



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



ESCUELA TÉCNICA  
SUPERIOR INGENIEROS  
INDUSTRIALES VALENCIA

**TRABAJO FIN DE GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES**

# **ANÁLISIS DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVO CON UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN INNOVADOR MEDIANTE MODELADO 1D**

AUTOR: JOSÉ ANTÓN RUIZ

TUTOR: JAIME GIMENO GARCÍA

COTUTOR: FRANCISCO JOSÉ ARNAU MARTÍNEZ

**Curso Académico: 2013-14**



# Índice de contenidos

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Renovación de la carga .....	1
1.2 Modelado de motores.....	2
2 SITUACIÓN INICIAL.....	3
2.1 Punto de partida. Idea inicial. ....	3
2.2 Descripción de las herramientas para el estudio. Programa OpenWAM.....	6
2.3 Objetivos .....	11
3 DESARROLLO DEL TRABAJO .....	12
3.1 Modelado de la configuración inicial .....	12
3.1.1 Implementación del motor en OpenWAM .....	13
3.1.2 Cálculos y resultados del sistema inicial .....	13
3.2 Modelado del sistema alternativo con elementos ideales .....	15
3.2.1 Implementación en OpenWAM. Configuración de elementos .....	15
3.2.2 Cálculos y resultados obtenidos .....	18
3.2.3 Estudio de la influencia de los componentes en el funcionamiento .....	21
3.3 Modelado del sistema con elementos reales .....	29
3.3.1 Implementación y configuración en OpenWAM .....	29
3.3.2 Resultados obtenidos .....	36
3.3.3 Otras configuraciones con elementos reales. Sistema de láminas.....	38
4 CONCLUSIONES Y COMPARATIVA DE SISTEMAS.....	41
4.1 Conclusiones y análisis de los resultados .....	41
4.1.1 Análisis de los resultados obtenidos en potencia efectiva y par efectivo.....	41
4.1.2 Análisis de los resultados obtenidos en la fracción de gases quemados .....	48
4.2 Conclusiones .....	50
4.2.1 Funcionamiento del sistema. Ventajas frente al sistema convencional.....	50
4.2.2 Posibles aplicaciones del sistema .....	52
5 ANÁLISIS ECONÓMICO.....	54
5.1 Determinación y cuantificación de las tareas realizadas.....	54
5.2 Elaboración del presupuesto .....	55
6 BIBLIOGRAFÍA .....	57



# 1 INTRODUCCIÓN

Antes de comenzar con la exposición del contenido del presente trabajo, es conveniente realizar una pequeña introducción de conceptos relacionados con el mismo y necesarios para su correcta comprensión. Se trata de fundamentalmente de dos ideas, ambas relacionadas con los motores de combustión interna alternativos (en adelante MCIA), que son el objeto de estudio del trabajo.

## 1.1 Renovación de la carga

La primera de ellas es, el llamado proceso de renovación de la carga, mediante el cual el motor evacua los gases del ciclo anterior y los reemplaza por mezcla fresca para el ciclo siguiente. Dicho proceso tiene una gran influencia sobre las prestaciones que pueda desarrollar un MCIA, ya que la potencia máxima a la que puede llegar tiene su límite en la cantidad de aire que pueda llegar a entrar en sus cilindros.

Dada la naturaleza de la idea que se pretende analizar en el trabajo, en esta introducción se prestará atención al proceso de renovación de la carga en motores de cuatro tiempos.

En este tipo de motores el proceso se lleva a cabo en una de las dos vueltas que hacen falta para realizar el ciclo. La evacuación se realiza en la carrera de escape y el llenado de mezcla fresca, en la de admisión. Para un correcto control de las dos fases de las que consta el proceso, se utilizan los llamados sistemas de distribución, que actúan sobre las válvulas de admisión y de escape, coordinando su apertura y cierre para así poder optimizar el llenado y la evacuación de gases. Esta última idea es especialmente importante, ya que el objetivo concreto del trabajo es evaluar el impacto que puede tener un determinado sistema de distribución en las prestaciones de un motor.

En el diseño de estos sistemas se debe prestar atención a los fenómenos físicos que tienen una relevancia considerable en el proceso de renovación de la carga, como son los rozamientos, la compresibilidad del fluido de trabajo, el efecto de las inercias del flujo, la transmisión de calor y los efectos de las ondas. La importancia que adquiera cada uno dependerá de las condiciones en las que opere el motor y del diseño de sus componentes. Estos fenómenos provocarán en muchos casos una serie de pérdidas, que se acabarán traduciendo en una menor eficiencia del motor, por lo que será conveniente tratar de minimizarlas, en muchos casos con un correcto diseño, y en otros con una apropiada adaptación a las condiciones de funcionamiento.

## 1.2 Modelado de motores

Explicar en qué consiste el modelado de motores adquiere una importancia vital, ya que se trata del procedimiento que se ha empleado en el trabajo para realizar el análisis.

Se trata de una herramienta que ha adquirido una gran importancia en el diseño de los MCIA en los últimos tiempos, ya que si el modelo es fiel a la realidad permite ahorrar grandes costes con respecto al método de diseño basado en la experimentación, mucho más caro y lento. Estas son algunas de las razones por las cuales la mayoría de fabricantes de MCIA hayan incorporado el modelado a su proceso de diseño, combinándolo normalmente con la experimentación.

Los modelos de motores utilizan modelos matemáticos, que sirven de solución a modelos físicos que tratan de reproducir los fenómenos que ocurren en las diferentes partes del motor, para poder calcular los diferentes sistemas del motor. En estos modelos, la precisión con respecto a la realidad viene determinada por que hayan adoptado los modelos físicos y matemáticos que lo componen, según hayan empleado un mayor o menor número de hipótesis simplificadoras.

Una ventaja adicional del modelado de motores es que permite un mejor análisis de los fenómenos físicos, pudiendo identificar con facilidad las variables de entrada y salida de cada proceso, así como evaluar tendencias y sensibilidad de las primeras al variar las segundas. Eso es lo que se conoce como estudio paramétrico, que también será empleado en el trabajo.

Existen diferentes tipos de modelos de motores, que se suelen clasificar según diversos criterios, que están relacionados con el objetivo del modelo, las variables que emplea en entrada y salida y las hipótesis y ecuaciones que adopta y emplea.

El modelo utilizado en el trabajo es el OpenWAM, desarrollado por la UPV y de código libre, un modelo de flujo de gases en conductos que se basa en una hipótesis de flujo unidimensional (Existe una resolución espacial en una de las variables espaciales), algo que se sostiene considerablemente bien en el caso de los conductos del interior de un MCIA, al no existir grandes variaciones de sección y curvatura. Este modelo tiene en cuenta los efectos de inercia y transmisión de ondas, de ahí que pertenezca al tipo de modelos más utilizados para diseñar los sistemas que intervienen en el proceso de renovación de la carga de los motores.

Queda claro pues, que el programa de modelado que se utiliza para el trabajo posee una gran potencia y los resultados que se obtienen bien pueden tomarse en serio, ya que el modelo utilizado constituye una representación bastante fidedigna de lo que en realidad ocurre en el interior del motor, por lo que las posibilidades que ofrece tanto para diseño como para diagnóstico de motores son bastante extensas.

## 2 SITUACIÓN INICIAL

### 2.1 Punto de partida. Idea inicial.

En los MCIA de cuatro tiempos, el proceso de renovación de la carga se lleva a cabo mediante válvulas, que coordinadas mediante el sistema de distribución se abren y cierran, para así poder vaciar y llenar el cilindro eficazmente. Es por esto que en los MCIA convencionales existen dos tipos de válvulas, las de admisión y las de escape, variables en tamaño y número. Actualmente se opta en la mayoría de los motores por cuatro válvulas por cilindro (dos de admisión y dos de escape), existiendo también otras configuraciones (una para admisión y una para escape, tres de admisión y dos de escape...). Es importante mencionar que las válvulas de admisión suelen tener mayor sección que las de escape, debido a que la fase de llenado es más crítica que la de la evacuación de gases.

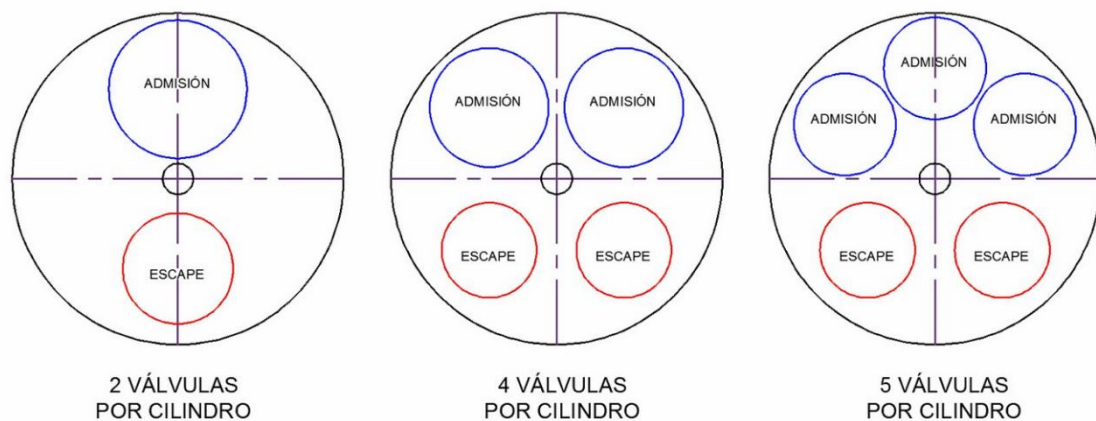


Figura 2.1 Diferentes configuraciones de válvulas.

Pues bien, de esa idea de mejorar el llenado es de donde nace el sistema de distribución que se va a analizar en el trabajo, cuyo propósito principal es aprovechar todas las válvulas del cilindro tanto para realizar la admisión como el escape, consiguiendo así un gran aumento de la sección efectiva para cada propósito. Una ventaja que tiene es que se trata de una modificación relativamente sencilla, no de un sistema complejo que requiera un cambio radical en el proceso de fabricación de los sistemas de distribución. Es más, seguramente podría incorporarse a motores que ya estén funcionando, si es que resulta ser realmente beneficioso.

Ahora que la idea ya está expresada, se va a proceder a explicar cómo se lleva a cabo. Para lograr que admisión y escape sean comunes para todas válvulas, lo que se hace es conectar el colector de admisión y el de escape a un pequeño depósito común, y este a las pipas que confluyen en las válvulas. Además, para evitar la circulación del flujo de gases en direcciones no deseadas, (En los colectores de admisión y escape el flujo es en una única dirección mientras que en los conductos que van desde las válvulas al depósito circula en dos direcciones) se coloca entre la entrada al depósito y los colectores de admisión y escape un elemento regulador, que consiga orientar el flujo en la dirección deseada. En la figura 2.2 puede apreciarse con mayor claridad todo lo expuesto anteriormente.

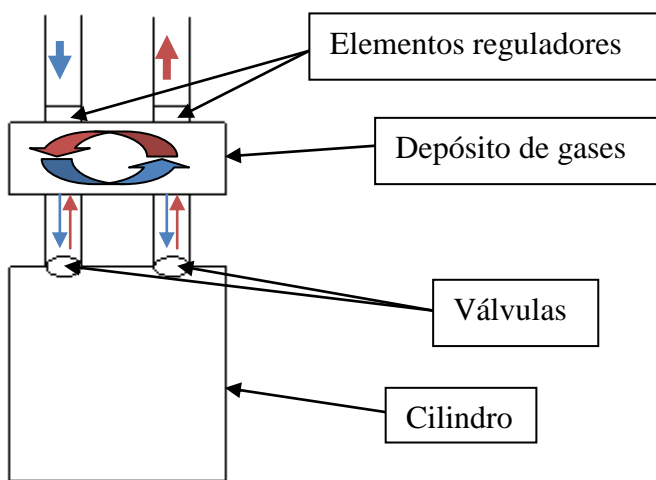


Figura 2.2 Esquema del sistema de distribución alternativo.

Otra modificación importante que también deberá realizarse será la del llamado diagrama de levantamiento de la válvula, que es la representación del levantamiento de la válvula frente al ángulo del cigüeñal.

En los MCIA con un sistema de distribución convencional, las válvulas de admisión y las de escape tienen diagramas distintos, puesto que se abren en momentos del ciclo diferentes. En el caso del sistema alternativo que se va a analizar, al no hacerse distinción entre un tipo u otro de válvulas, todas ellas deberán presentar el mismo diagrama de levantamiento que, a su vez deberá ser equivalente al de admisión y escape juntos, reproduciendo también los instantes en los que ambas válvulas están abiertas simultáneamente (cruce de válvulas).

En la figura 2.3 se puede apreciar el pequeño período de cruce que existe en el sistema original, mientras que en el sistema modificado se ha diseñado el diagrama de tal forma que no cierre completamente en ese instante y simule el cruce.



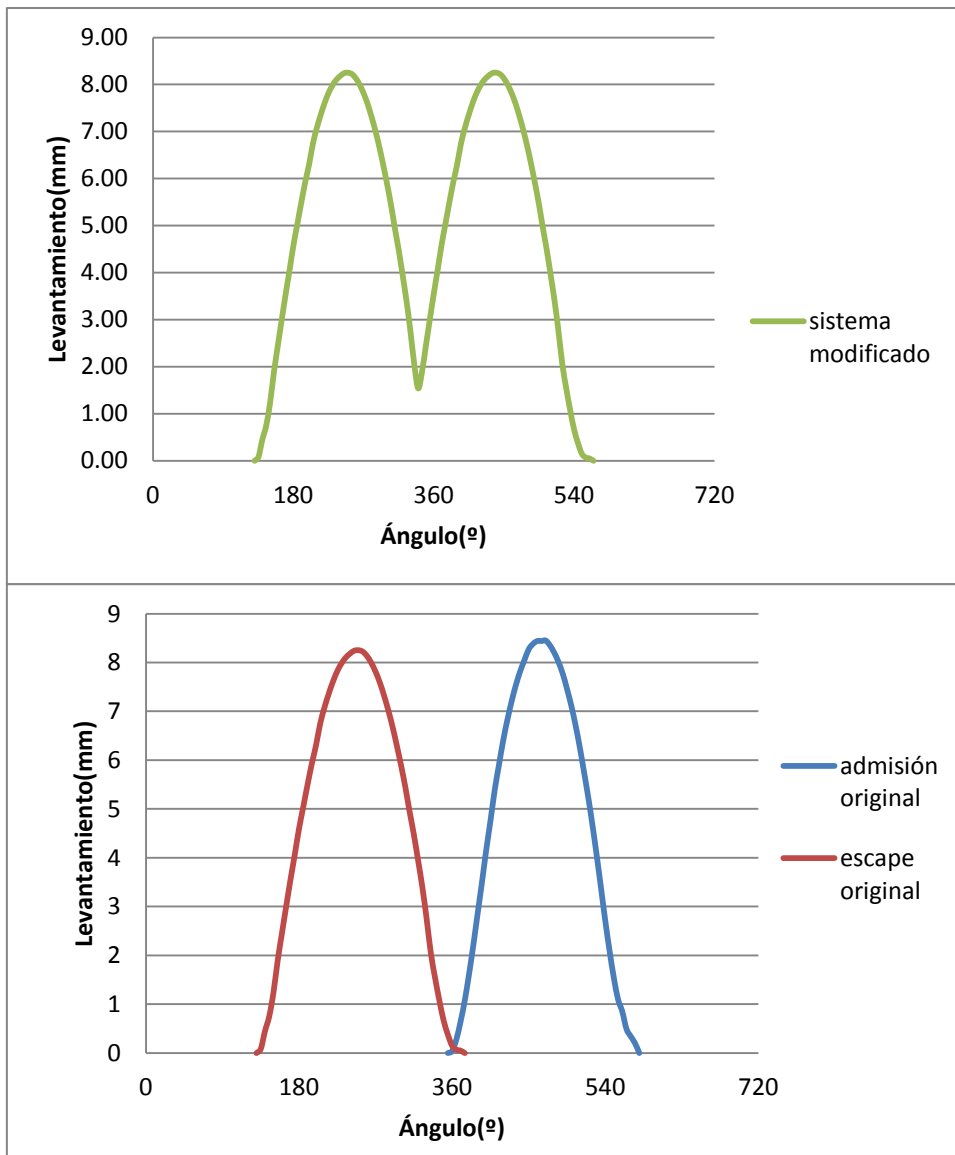


Figura 2.3 Representación gráfica de los diagramas de levantamiento de válvula.

Se profundizará más adelante en este tema cuando se explique con detalle el caso concreto de la modificación de un motor en el programa informático y su posterior estudio.

## 2.2 Descripción de las herramientas para el estudio. Programa OpenWAM.

Una vez expuesta y explicada la idea, se procede a la descripción de la herramienta que se ha utilizado para implementarla y evaluar sus características y posibles ventajas con respecto a las soluciones ya existentes. En este caso se ha optado por emplear un programa informático de modelado de motores, mucho más adecuado para las características de la idea que la otra opción posible, la vía experimental, que además supondría un coste económico y de horas de trabajo elevado que haría imposible el desarrollo de este estudio. Se trata de OpenWAM que, como se ha dicho anteriormente en la introducción, es un programa informático de modelado unidimensional de flujo de gases en motores, desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia y de código libre. Explicar el funcionamiento práctico del programa, su interfaz y los diferentes tipos de archivos que utiliza es más adecuado para el seguimiento y comprensión de las tareas que se han realizado en el trabajo, que explicar los modelos físicos y matemáticos que utiliza el programa y describir sus ecuaciones, por lo que en este apartado se enfocará desde una perspectiva pragmática.

El programa tiene una interfaz gráfica llamada WAMer, que permite la creación de distintos modelos de motores a partir de elementos predefinidos, como por ejemplo depósitos, cilindros, válvulas, turbocompresores o turbinas. En la figura 2.4 tenemos una captura de pantalla de la interfaz de WAMer, en la que se pueden apreciar diferentes elementos predefinidos que el programa tiene a disposición del usuario.

También dispone de un archivo ejecutable, que es el encargado de realizar los cálculos de la simulación llevada a cabo en el modelo.

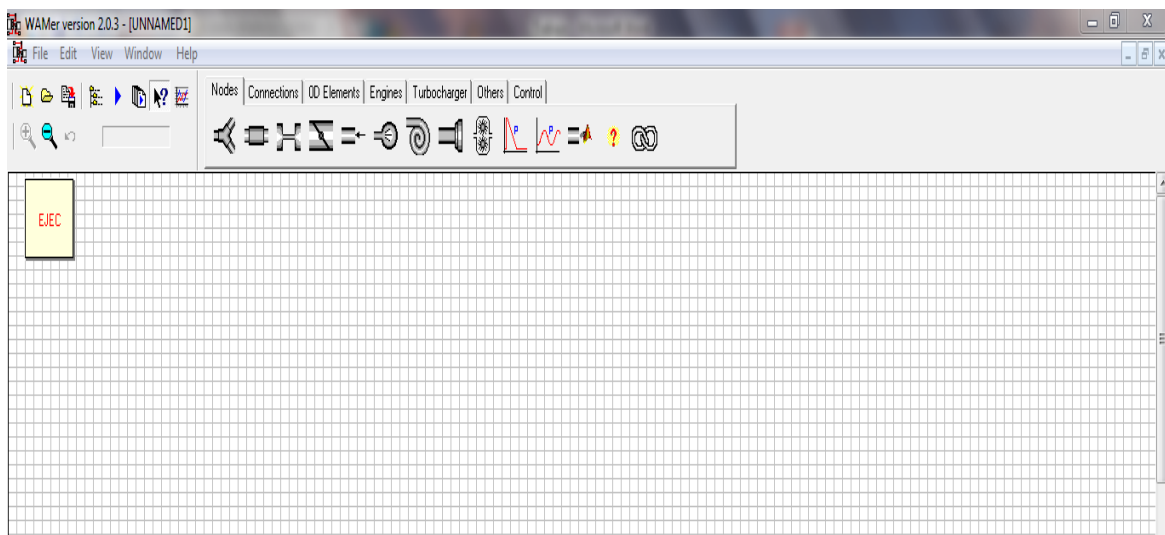


Figura 2.4 Interfaz de WAMer.

A partir de esos elementos, que se introducen en el modelo pinchando sobre ellos y arrastrándolos a la cuadrícula, y configurando cada uno de ellos con las características, condiciones de contorno deseadas y resultados que se quiere ver después en el archivo de salida, se crea el modelo del motor que se quiere estudiar. Si el modelo presenta varios elementos con las mismas características, no es necesario configurar cada uno de ellos manualmente, sino que el programa permite hacer copias de ellos, además de existir en ciertos elementos la opción de asociarlos a un tipo ya existente. Esto se hace pinchando con el botón derecho en el elemento, seleccionando la opción Associate to... y seleccionando el tipo de elemento cuyas características se desea que adopte.

Sólo podrá asociarse un elemento a otro del mismo tipo, por lo que, por ejemplo, no será posible hacer que un compresor adquiera las propiedades de una caja de láminas mediante esta opción. También las características de la simulación deberán ser configuradas (tipo de simulación, número de ciclos...). Esto se hace arrastrando el elemento “EJEC” a la cuadrícula (aunque cuando se abre WAMer este elemento ya está en el fichero que se abre automáticamente), y pinchando sobre él con el botón derecho del ratón, y pinchando en la opción “data...”, o bien haciendo doble click sobre él.

Este procedimiento de configuración de elementos es algo que en el trabajo no se ha hecho completamente, pues se ha partido de un motor ya implementado en WAMer al que se le han hecho modificaciones. Los nuevos elementos que se le han introducido al motor sí han tenido que ser configurados.

Una vez realizado el modelo, éste puede ser guardado como un archivo de preproceso (formato .PCS), o un archivo de datos (formato .WAM). Esto se hace pulsando en File->Save Project as... y se selecciona el tipo de archivo.

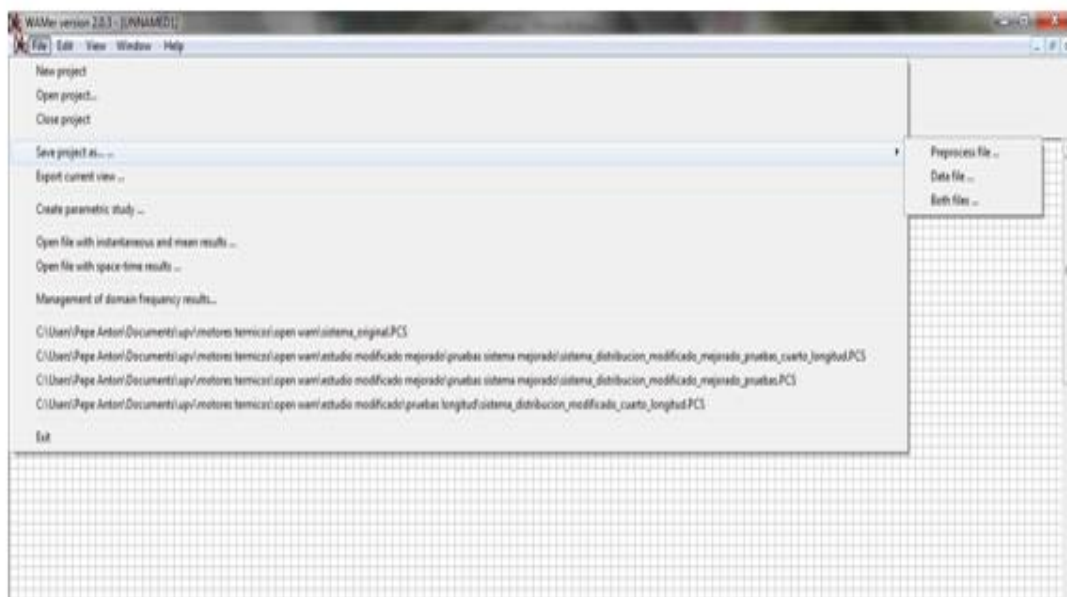


Figura 2.5 Guardado de un archivo en WAMer.

En el caso de que el modelo configurado se haya guardado directamente como .WAM, será posible ejecutarlo. Esto se hace pulsando en View->Executions control, y aparecerá una ventana como la de la figura 2.6. Para lanzar una ejecución, se pincha sobre el signo +, y se abrirá una nueva ventana, que pedirá tres ubicaciones: la del archivo ejecutable que lanza los cálculos, la del archivo de datos (el modelo que se ha creado) y la de los archivos de salida, entre los que hay que destacar los de resultados medios (.AVG), que muestran los valores medios de los parámetros que se ha pedido al programa que muestre a lo largo de los diferentes ciclos que dura la simulación, y los de resultados instantáneos (.INS), que muestran los valores instantáneos de los parámetros seguidos a lo largo de un ciclo., que puede entenderse como tiempo o como ángulo descrito por el cigüeñal del motor. Una vez se selecciona todo, se pulsa el botón “OK” y entonces aparecerá el nombre que se le haya asignado y la ubicación de cada uno de los tres archivos pedidos por el programa, así como un pequeño icono de un documento al inicio de todo el texto. Si se pulsa sobre él con el botón derecho y se selecciona la opción “Start calculation”, la simulación comenzará.

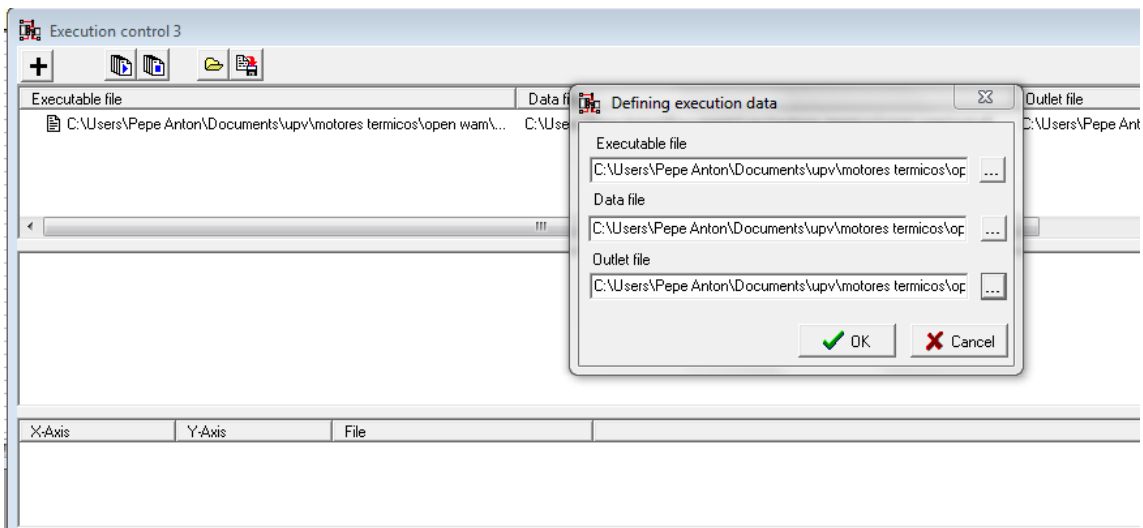


Figura 2.6 Procedimiento de lanzado de una ejecución de un archivo de datos.

En el caso de que el archivo haya sido guardado en formato .PCS, las opciones se amplían, pudiendo crear a partir de ese archivo varios para poder realizar con facilidad lo que se conoce como estudios paramétricos en los cuales, variando el valor de las variables de entrada se analizan los efectos de dichas variaciones en las variables de salida, pudiendo apreciar tendencias y sensibilidades.

Para crear un estudio paramétrico, se pincha en “File”->”Create parametric study”, y se abrirá una ventana donde podrán crearse diferentes casos, mediante los desplegables visibles en la figura 2.7. Con “Number of cases” se selecciona el número de casos que se desee para el estudio, con “Element” el elemento que se desea monitorizar, con “Property” la variable que va a variar el valor en el estudio, y con “Value”, el valor que va a tomar. Teniendo el desplegable “Case number” en el caso que se desea editar, se seleccionan elemento, variable y valor y se pulsa el botón “Apply”. Así ese caso quedará configurado.

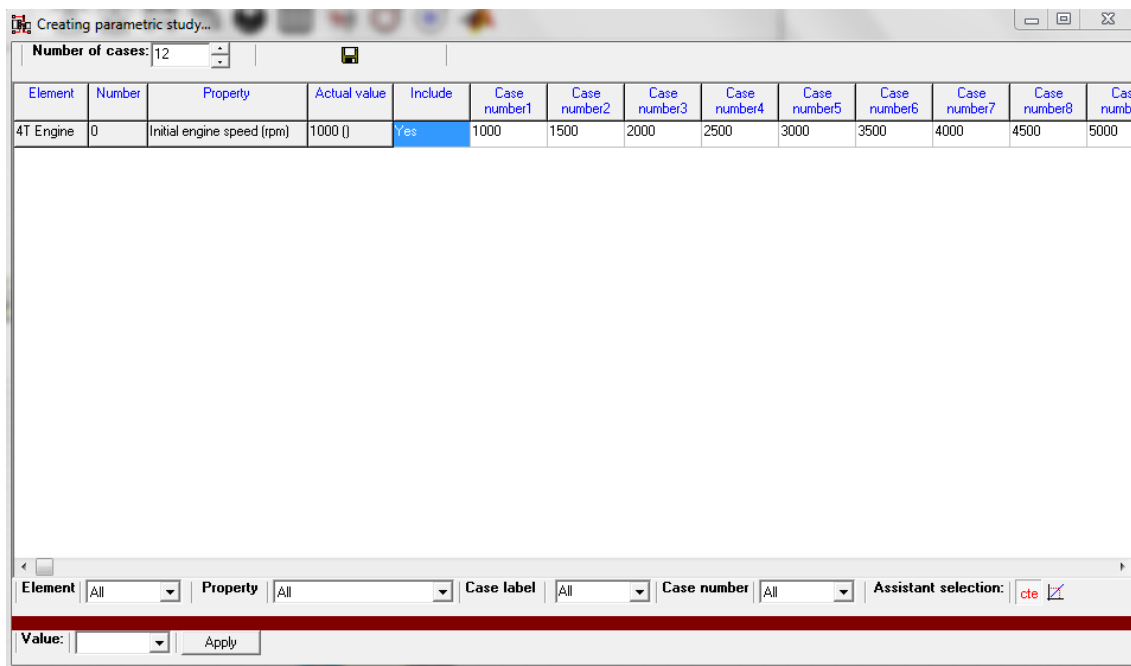


Figura 2.7 Creación de un estudio paramétrico.

Es importante mencionar que las variables de entrada que aparecerán en la pestaña “Property” como seleccionables deberán ser previamente seleccionadas en el archivo .PCS. Para ello se debe pinchar con el botón derecho en el elemento de tipo de motor (Figura 2.8) y seleccionar la opción “Parametric study variables...”, donde se podrán seleccionar las que se deseen poniéndolas en “Yes”.

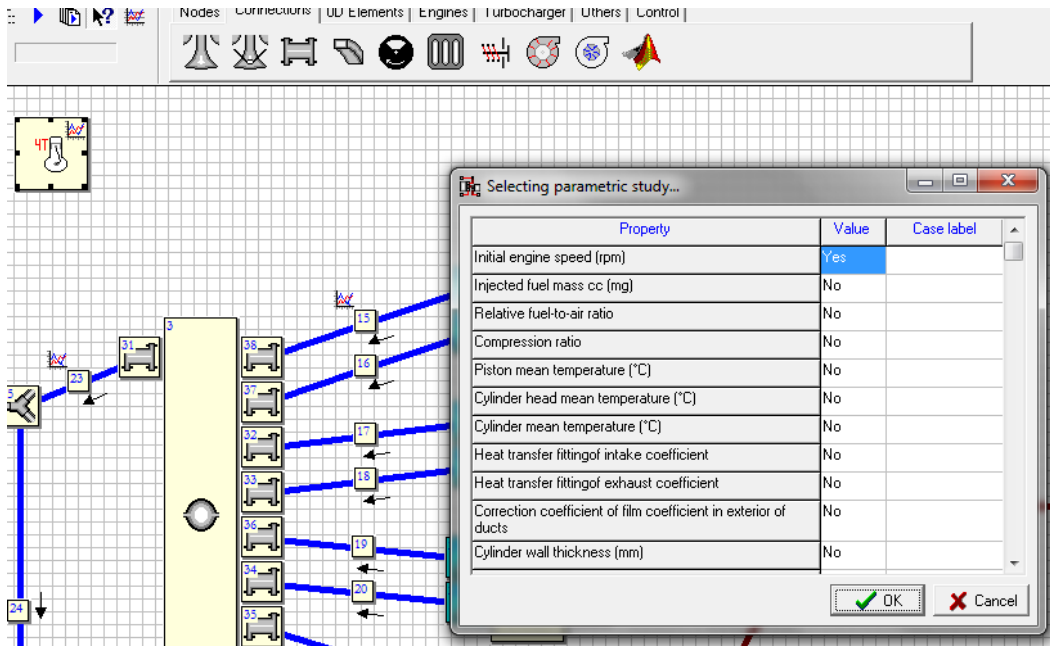


Figura 2.8 Selección de variables para estudio paramétrico.

Una vez configurados los casos, se pulsa el botón del diskette para guardarlos, y el programa preguntará si se quiere crear un archivo que englobe a todos los casos (formato .GRO). Estos archivos resultan cómodos para ejecuciones múltiples, ya que aparecen todos en la ventana “Executions control” cuando se cargan. Para cargar un archivo .GRO, desde la ventana de la figura 2.6 se pincha en la figura de la carpeta y se selecciona el archivo. De este modo aparecerán todos los casos.

Este procedimiento no es necesario cuando se crea el estudio por primera vez, ya que todas las ventanas aparecen automáticamente cuando se siguen los pasos de creación, pero resulta interesante si se va a abrir un estudio ya creado.

Una vez cargado todo, se puede proceder a la ejecución de manera individual como se ha explicado anteriormente, o de manera secuencial, pulsando en el botón de los documentos con el símbolo de “play”. Si se procede de este modo, el primer caso se ejecutará y los demás pasarán a la llamada cola de cálculo, de manera que comenzarán a calcularse cuando el anterior se haya calculado completamente.

## 2.3 Objetivos

El propósito principal del trabajo es analizar el impacto que tiene la implementación de un sistema de distribución alternativo en las prestaciones de un MCIA. Todo ello por medio de la herramienta informática OpenWAM, de la que se adquirirán también conocimientos sobre su uso y las posibilidades de cálculo que ofrece. Para llevar a cabo este objetivo se partirá inicialmente de un motor ya existente, implementado en el programa, y se irán haciendo modificaciones en él para lograr primero un modelo simplificado del sistema, que permitirá tener una idea de la influencia que tendrá el sistema sobre el motor, y después un modelo que emplee elementos reales para adoptar las soluciones necesarias a los problemas que plantea la implementación del sistema. Estos tres modelos serán calculados y comparados entre sí en relación a diferentes parámetros, como por ejemplo potencia y par efectivos. Tras esta comparativa se sacarán conclusiones, basadas siempre en los resultados, sobre si sería beneficioso o no la utilización de este sistema de distribución.

Este estudio se ubica dentro del campo de los motores térmicos, en particular de los de combustión interna alternativos, que se aplican en campos como la generación de electricidad como la automoción. Por las características que presenta el sistema sobre el papel, puede ser interesante su aplicación a este último campo, ya que parece que una de sus grandes ventajas podría ser una mejora del llenado a altas revoluciones, cosa que en generación de electricidad no suele ocurrir (suele trabajarse a regímenes constantes y no demasiado elevados, debido en parte al gran tamaño de la mayoría de motores utilizados en este campo), pero sí ocurre en los motores de automoción, especialmente en los MCIA de encendido provocado (MEP), que presentan grandes variaciones de régimen y a altas revoluciones tienen problemas de renovación de la carga, especialmente para la fase de admisión, donde se llena el cilindro con mezcla fresca.

### 3 DESARROLLO DEL TRABAJO

En este apartado se va a proceder a describir todo el proceso de realización del trabajo en cuestión, desde la implementación en el programa informático de las diferentes configuraciones de motor como de la obtención de resultados. La parte de análisis y extracción de conclusiones se verá posteriormente. La estructura de este apartado seguirá el siguiente orden: Primero se expondrá el caso del motor inicial sin modificaciones, después el del mismo motor con el sistema modificado pero con elementos ideales, y por último diferentes configuraciones realizadas con elementos reales. Todos ellos con una parte de implementación y configuración de elementos y otra de resultados obtenidos.

#### 3.1 Modelado de la configuración inicial

Antes de comenzar con el análisis del sistema alternativo, primero es conveniente evaluar el sistema convencional, para obtener resultados que después puedan compararse con los del sistema modificado. Dado que la implementación en OpenWAM de todos los elementos que forman el motor es bastante costosa, se decide partir de un motor ya implementado en el programa, lo que ahorra una cantidad considerable de tiempo y tampoco interfiere con el propósito del trabajo, ya que se trata de evaluar el impacto del cambio de sistema de distribución sobre el motor, no de la influencia que puedan tener los demás componentes sobre éste.

Se decide también elegir de entre los motores posibles un MCIA de encendido provocado (MEP) de cuatro tiempos, debido a que en este tipo de motores el llenado y vaciado del cilindro (proceso que en principio el sistema alternativo es capaz de mejorar) es una tarea crítica a altas revoluciones, cosa que en el otro tipo de motores a los que podría aplicárseles este sistema, los MCIA de encendido por compresión (MEC), no ocurre, al no alcanzar éstos velocidades de giro tan elevadas.

El motor seleccionado finalmente es un MEP, que presenta las siguientes características de diseño:

- Número de cilindros: 4
- Diámetro del pistón: 81 mm
- Carrera: 95,5 mm
- Relación de compresión: 16
- Número de válvulas por cilindro: 4
- Aspiración: natural ( motor atmosférico)



### 3.1.1 Implementación del motor en OpenWAM

Este apartado en el caso del motor inicial resulta bastante sencillo, pues como se ha comentado anteriormente, se ha tomado un motor ya implementado en el programa informático. Sólo un par de cambios en el diámetro de parte de los conductos del sistema de escape son necesarios para dejar el modelo listo para ser calculado por el programa.

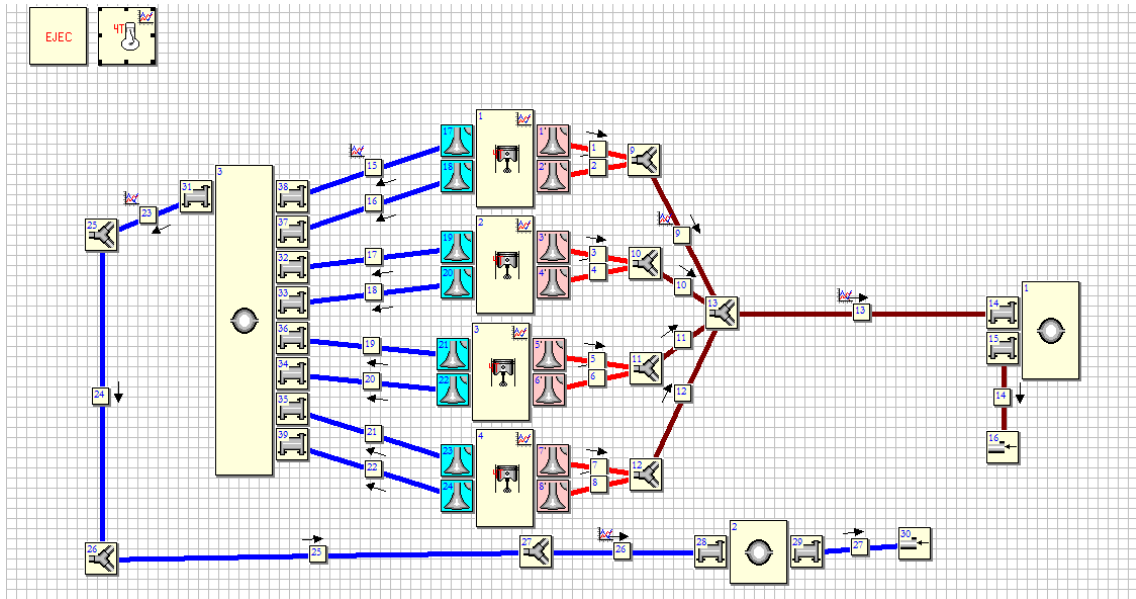


Figura 3.1 Modelo del motor inicial implementado en OpenWAM.

### 3.1.2 Cálculos y resultados del sistema inicial

Una vez modelado, se procede a realizar el proceso de cálculo y obtención de resultados. Lo que se va a hacer en este caso, y en los otros modelos también, es lo que se llama un estudio paramétrico, que consiste en variar alguna variable de entrada para observar los efectos en las variables de salida. Se variará la velocidad de giro del motor, desde 1000 revoluciones por minuto (rpm) hasta las 6500, con incrementos de 500 rpm. Cada uno de los casos de estudio generará dos ficheros de salida, el de resultados medios y el de resultados instantáneos, como se comentó anteriormente. De los primeros se pueden obtener algunas de las curvas características del motor, como por ejemplo la curva de potencia efectiva y la de par efectivo, que en la figura 3.2 pueden observarse. De los ficheros instantáneos puede obtenerse información acerca de diferentes parámetros que varían a lo largo del ciclo, como por ejemplo el gasto másico en las válvulas o las fracciones de las diferentes especies que se encuentran en el cilindro (gases quemados, combustible, aire fresco...).

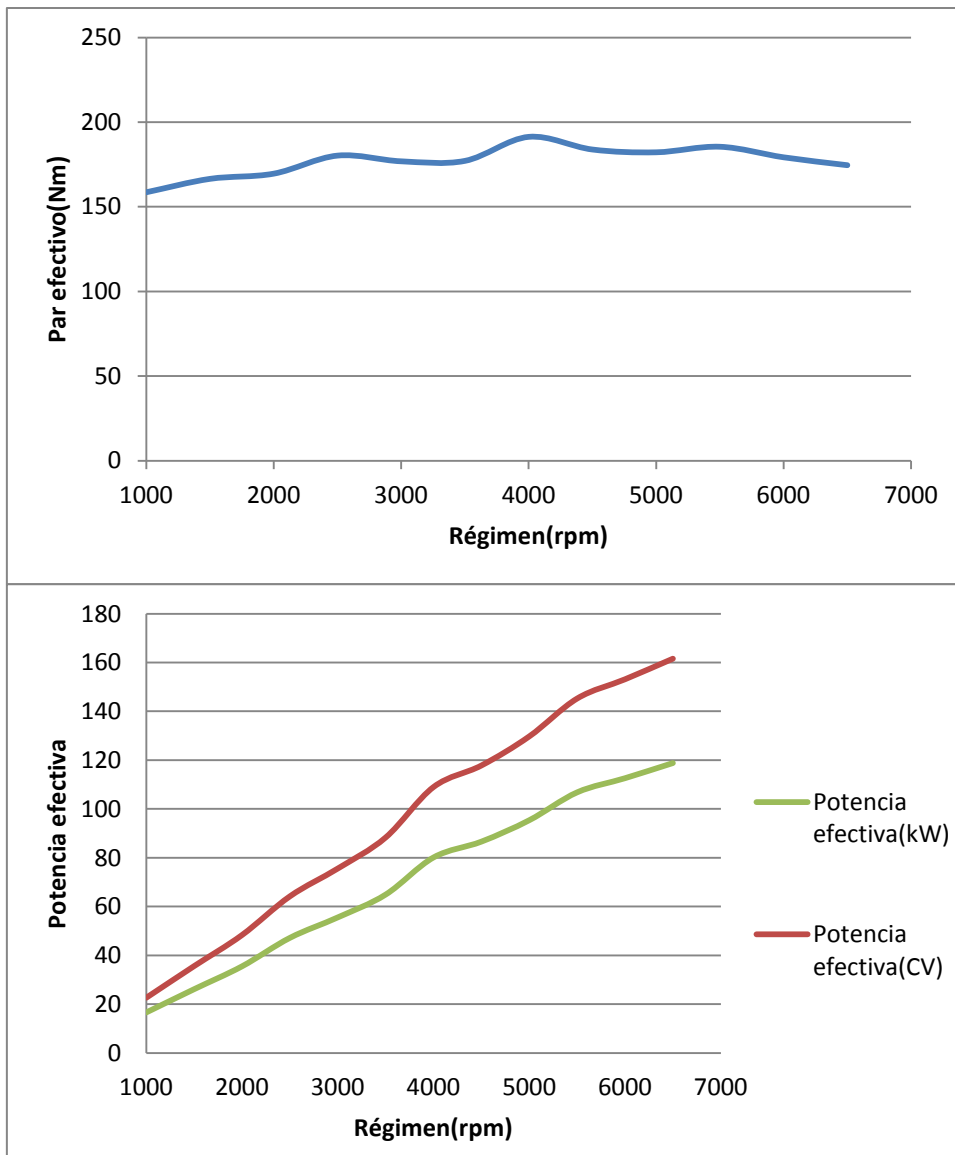


Figura 3.2 Curvas de potencia efectiva y par efectivo del motor original.

Con el sistema convencional el motor obtiene una potencia máxima de 161,612 CV (118,785 kW) @ 6500 rpm y un par máximo de 191,249 Nm @ 4000 rpm. En apartados posteriores estos parámetros y algunos más serán analizados y comparados con los obtenidos en las otras configuraciones.

### 3.2 Modelado del sistema alternativo con elementos ideales

Para realizar una primera aproximación al sistema alternativo, se le realizan al motor original una serie de modificaciones en el sistema de distribución, añadiéndole algunos elementos y cambiando ciertos parámetros de otros. Así se consigue un comportamiento muy acorde al que presentaría el sistema realmente, pero con una menor complejidad, debido a que en este caso se utilizan elementos que en la realidad no existen, debido a sus propiedades ideales.

#### 3.2.1 Implementación en OpenWAM. Configuración de elementos

Para el caso de los elementos que orientan el flujo en la dirección deseada se emplean unos conductos ideales, a los que se les impone la condición de tener un coeficiente de descarga de valor la unidad en el sentido en el que el flujo debe circular, y nulo en el contrario. Esto equivale a decir que la sección de paso de estos conductos es máxima (la que posea geoméricamente el conducto) en el sentido correcto, y nula en el sentido opuesto. Lo que se hace es simular un cierre y apertura ideal de un sistema de paso.

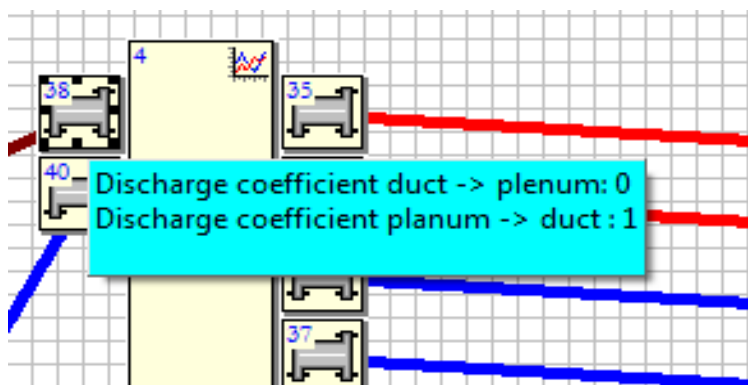


Figura 3.3 Conductos ideales para la orientación del flujo.

Otro elemento del motor original que debe modificarse es el diagrama de levantamiento de las cuatro válvulas de cada cilindro, ya que todas van a ser aprovechadas para realizar tanto la admisión de aire fresco como la evacuación de los gases quemados. Para ello debe reproducirse el diagrama original pero con una sola línea, reproduciendo también el instante en el que las válvulas de admisión y escape se encuentran abiertas simultáneamente (cruce de válvulas). De este modo, todas las válvulas presentarán el mismo comportamiento: abrirán al comienzo del escape, simularán el cruce de válvulas no cerrándose completamente y tras la finalización del proceso de admisión sí que lo harán.

Para la implementación en el programa del diagrama de levantamiento, lo que se hace en primer lugar es introducir una curva con la forma del diagrama y los valores que debe tomar el levantamiento de válvula, tal como se puede apreciar en la figura 3.4, para posteriormente seleccionar la división del eje de coordenadas horizontales, que en este caso se corresponde con el ángulo relativo que describe el mecanismo de cada cilindro, ya que no todos giran simultáneamente. En este caso, los cilindros se accionan en orden 1-3-4-2 (orden de encendido), existiendo un desfase de 180° entre uno y su consecutivo.

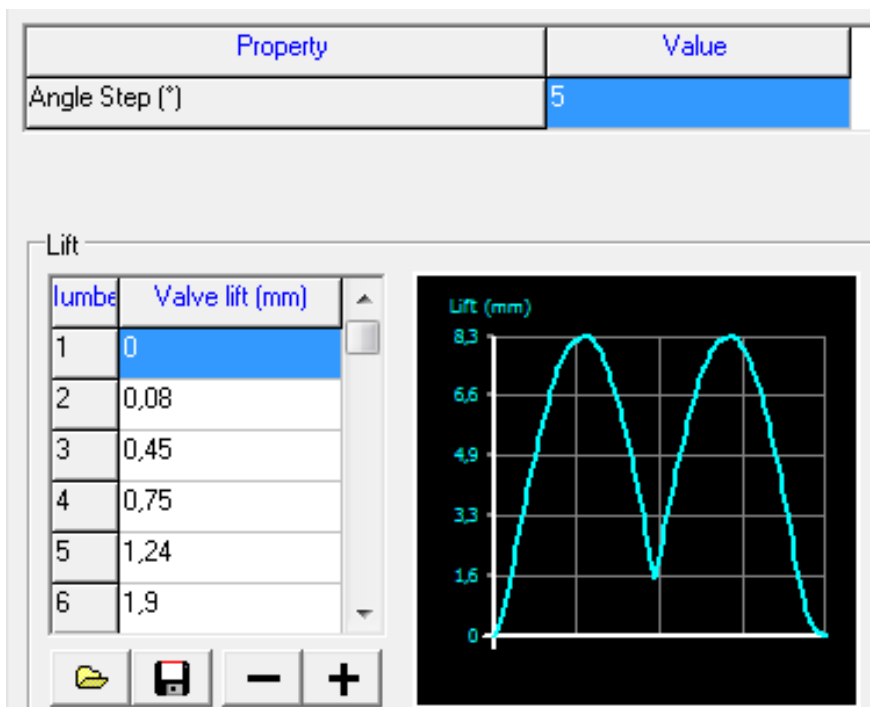


Figura 3.4 Introducción de la curva y selección de división del eje horizontal.

Por último, en cada válvula debe seleccionarse el valor del ángulo en el que la válvula comienza a describir el levantamiento establecido por la curva. Puesto que simula tanto admisión como escape, se debe introducir un valor que sincronice la curva con este último, al ocurrir en valores de ángulo de cigüeñal menores (180°-360°). En este caso, lo que se ha hecho es tomar el valor que tenía establecido el motor original para la apertura de las válvulas de escape, 130 grados. La curva resultante de introducir estos parámetros puede observarse en la figura 3.5, donde se aprecia la apertura del escape, la de la admisión y la simulación del cruce de válvulas.

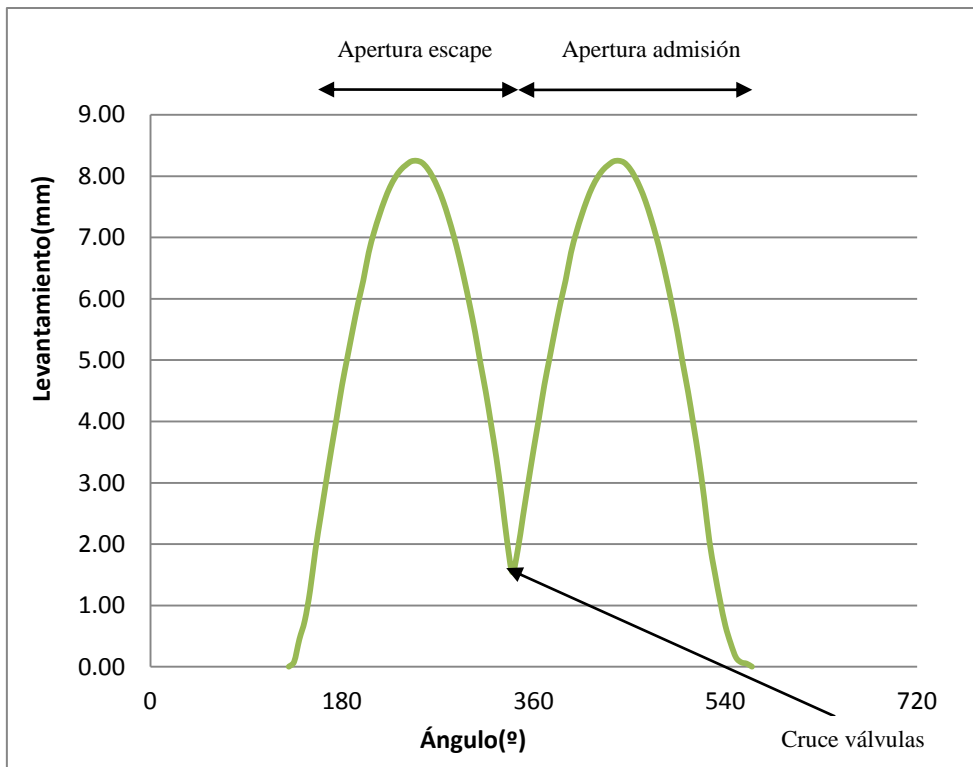


Figura 3.5 Diagrama de levantamiento del sistema modificado.

Otro elemento que debe ser añadido al motor original es el depósito de gases, que comunica las válvulas tanto con admisión como con escape. Se crean cuatro de estos componentes, uno por cada cilindro, y su volumen se estima con diferentes pruebas, intentando lograr un compromiso entre el volumen que aporta y las pérdidas que provoca en el sistema. Más adelante se hará un análisis sobre la influencia del volumen de estos depósitos sobre las prestaciones del sistema, pero en este apartado los resultados corresponden al volumen inicialmente estimado, que es de 11 cm<sup>3</sup> para cada depósito.

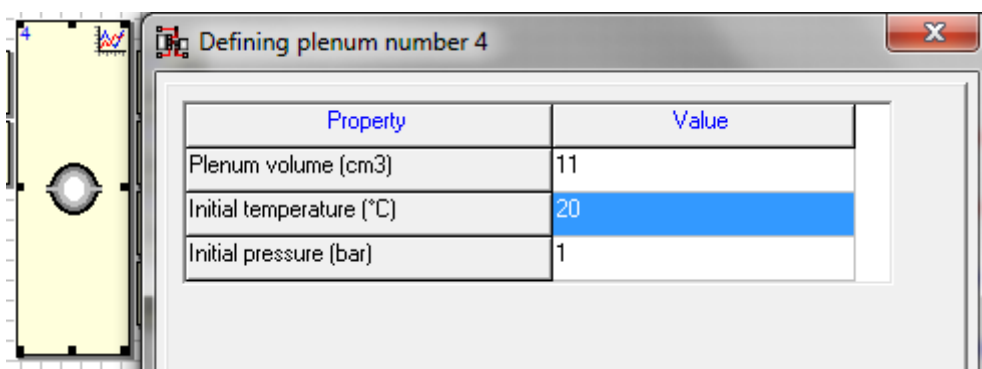


Figura 3.6 Depósito de gases modelado en OpenWAM.

Con la adición y configuración de estos elementos se obtiene el modelo simplificado del sistema, que puede observarse en la figura 3.7. También ha sido necesaria la adición de algunos conductos extra, tanto para la admisión como para el escape. En estos elementos el compromiso entre longitud y diámetro es muy importante, ya que factores como las pérdidas de carga y las condiciones sónicas dependen en gran medida de estos parámetros. Para demostrar esta influencia, en apartados posteriores se llevará a cabo un análisis de la relación entre la longitud de estos conductos y las prestaciones del sistema.

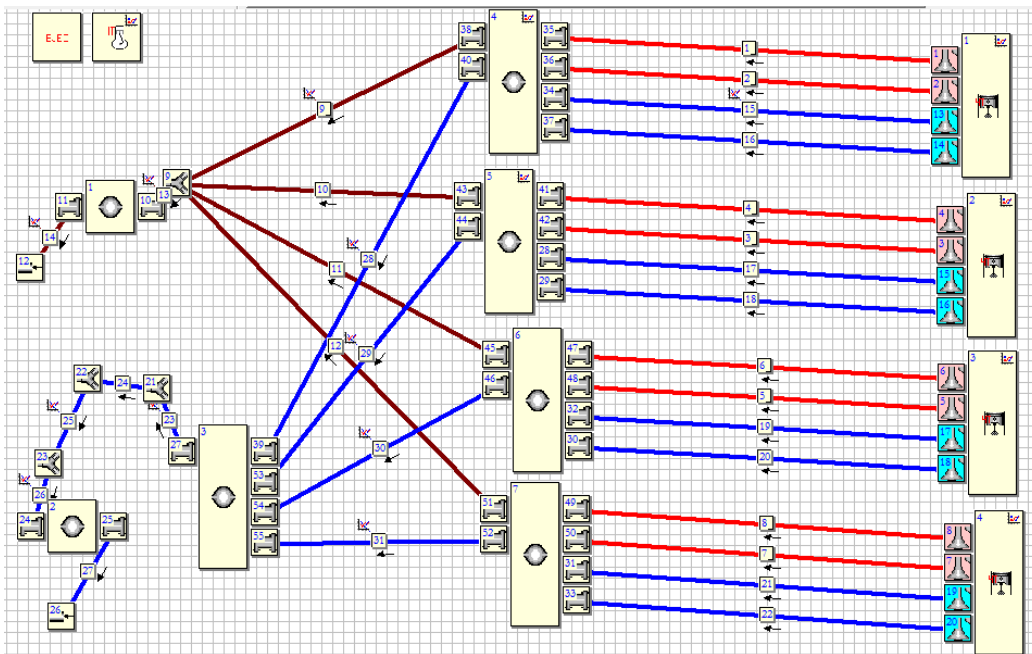


Figura 3.7 Modelado del sistema en OpenWAM.

### 3.2.2 Cálculos y resultados obtenidos

En este caso se procede de igual modo que en el anterior: se realiza una variación del régimen de giro del motor desde 1000 hasta 6500 rpm, con incrementos de 500 rpm, para observar los efectos producidos en las variables de salida, que hasta ahora eran fundamentalmente el par efectivo y la potencia efectiva.

Pero esta configuración, por su naturaleza requiere que se le preste atención a un nuevo parámetro: la fracción de gases quemados que queda atrapada al finalizar el ciclo, ya que supone un buen indicador de la efectividad del sistema en cuanto a la evacuación de gases. Si fuera muy alta significaría que el sistema no consigue renovar correctamente la carga y que el ciclo siguiente se realiza con una importante cantidad de gases procedentes de la combustión, con las repercusiones negativas que dicho fenómeno tiene sobre el rendimiento del motor.

Este parámetro se obtiene del fichero de resultados instantáneos, pero sólo se toma el valor final a cada uno de los regímenes correspondientes para así crear la curva. También es cierto que los valores que pueda tomar este parámetro no tienen mucho sentido si no se comparan con la configuración de motor inicial, por lo que, aunque dicha comparación se trate en apartados posteriores, se incluirán en el presente apartado comparaciones para comenzar a tener una idea de las posibles ventajas o problemas que este sistema pueda plantear.

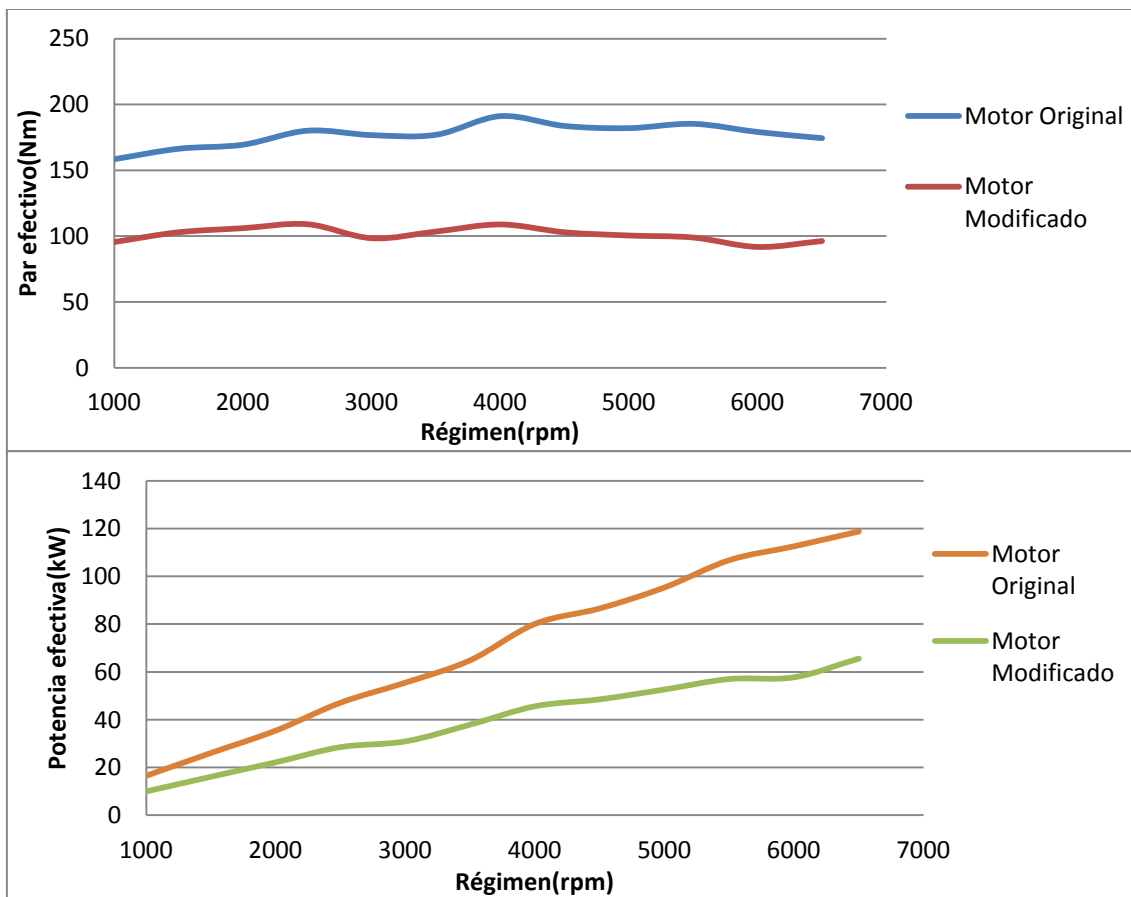


Figura 3.8 Curvas de par efectivo y potencia efectiva del motor original y del modelo del sistema alternativo.

En la figura 3.8 se observan las curvas de par efectivo y potencia efectiva de la configuración inicial y del modelo del sistema superpuestas. De la simple visualización de dichas curvas puede apreciarse que, según lo que este modelo pronostica, las prestaciones de un motor con este sistema de distribución alternativo serán inferiores a las del mismo motor equipado con un sistema convencional.

Si se expresa la ganancia como:

$$G(\%) = \frac{(V_f - V_i) * 100}{V_i} \quad (1)$$

Donde  $V_i$  y  $V_f$  son los valores inicial y final de la magnitud a analizar y, en el caso de que  $G$  sea negativa, ésta pasa a expresar el concepto de pérdida.

Si se aplica (1) a las curvas de par de ambos sistemas se obtienen pérdidas que van desde un 37,5% (a 2000 rpm) hasta un máximo de 48,76% (a 6000 rpm), por lo que no son para nada despreciables.

Queda claro pues, que equipando este sistema el motor pierde prestaciones. Será necesario analizar más parámetros para poder tener una idea aproximada de las razones por las que esto ocurre.

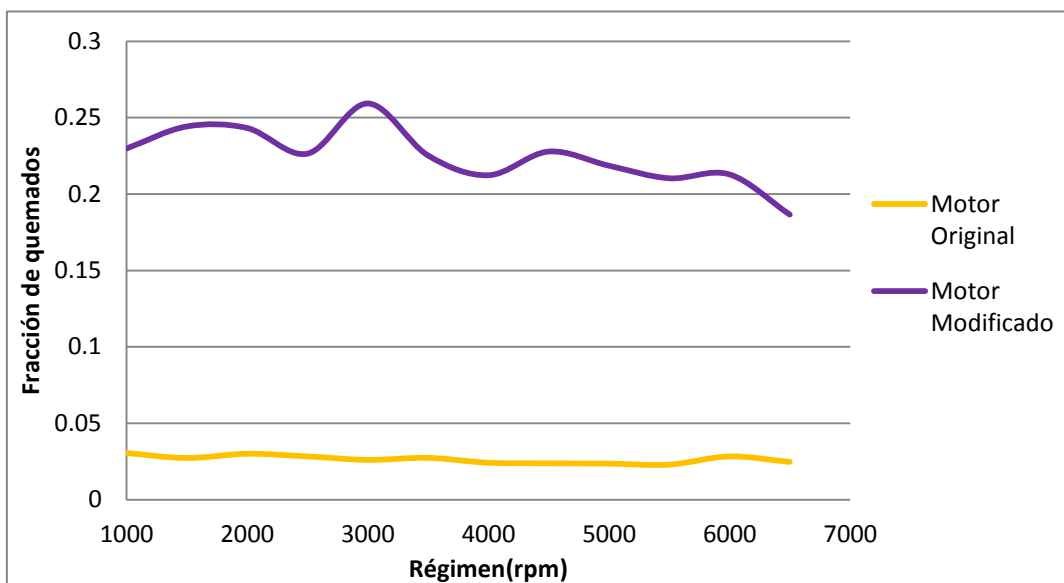


Figura 3.9 Representación gráfica de la fracción de quemados al final de ciclo.

En el caso de la fracción de gases quemados al final del ciclo, los resultados tampoco son demasiado positivos, ya que si se observan las curvas de la figura 3.9 se observa un gran incremento de la fracción másica de estos gases en todo el espectro de revoluciones. Aplicando la fórmula (1) de la ganancia, este incremento tiene un máximo del 896,93% a 3000 rpm y un mínimo del 651,77% a 6000 rpm.



Esto significa que en este sistema quedan al final de cada ciclo más de 6 veces la fracción de gases quemados del sistema original. La masa de este tipo de gases dependerá de la cantidad de mezcla que entre en los cilindros, pero este parámetro ya asegura que el combinado de gases será de peor calidad en el sistema alternativo que en el convencional.

Esta pérdida de calidad de la mezcla que se va a quemar es probablemente una de las causas de que el motor pierda prestaciones, pero seguro que no es la única. En apartados posteriores se analizarán y compararán los diferentes sistemas, analizando todos los parámetros posibles para extraer conclusiones adecuadas. Este apartado es algo más descriptivo e introductorio, para que se pueda extraer una idea aproximada del funcionamiento del sistema.

### **3.2.3 Estudio de la influencia de los componentes en el funcionamiento**

En este apartado se va a analizar cómo repercute en las prestaciones del sistema alternativo la modificación de las dimensiones de algunos de sus componentes. En concreto se va a variar, de forma independiente, la longitud de los conductos del sistema y el volumen de los depósitos de gases. Los parámetros que se analizarán serán la potencia efectiva y la fracción de gases quemados.

#### **3.2.3.1 Estudio de la influencia del volumen del depósito de gases**

En este análisis se pretende evaluar el impacto que tiene el volumen de los depósitos de gases sobre el funcionamiento del sistema. Para ello se crearán dos casos a partir del modelo del sistema alternativo: uno en el que se duplicará el volumen de los depósitos de gases y otro en el que dicha magnitud será reducida a la mitad. A partir de cada uno se creará un estudio paramétrico en el que, como se ha procedido hasta ahora, se variará el régimen de giro del motor. Después se compararan parámetros con el modelo inicial para sacar conclusiones.

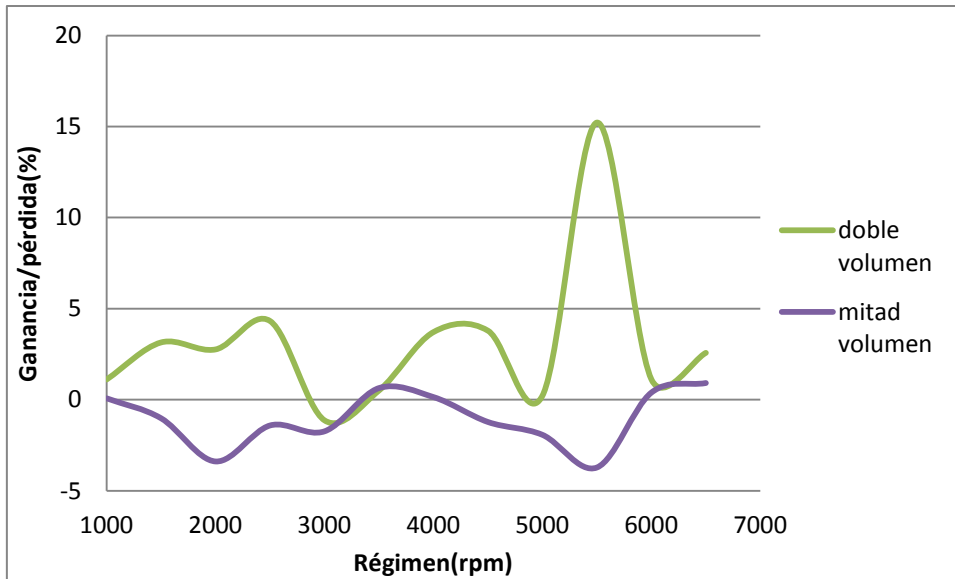


Figura 3.10 Representación gráfica de la ganancia o pérdida sobre la fracción de quemados.

En la figura 3.10 se observa la representación gráfica de la ganancia o pérdida en par efectivo y potencia efectiva con respecto al volumen inicial, que era de 11cm<sup>3</sup>. Se observa que reducir el volumen es beneficioso para este parámetro a ciertos regímenes, pues la ganancia es negativa y en este caso lo que interesa es reducir este parámetro al mínimo posible, pero si se presta atención a los valores que alcanza la reducción de este parámetro (no llegan al 5%), rápidamente puede concluirse que modificar el volumen no supone una gran ventaja e incluso, podría suponer un inconveniente puesto que no reduce la fracción de quemados en todo el rango de velocidades de giro del motor (en algunos puntos la aumenta).

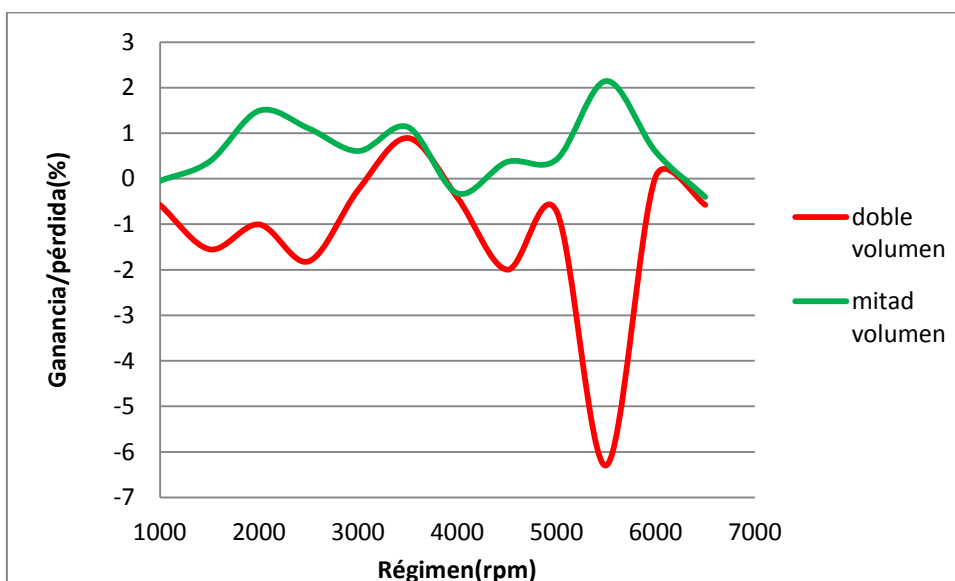


Figura 3.11 Representación gráfica de la ganancia o pérdida sobre el par y la potencia.

En el caso de la potencia y el par, como se observa en la figura 3.11 los valores de la ganancia que se obtienen son prácticamente los mismos, lo que significa que el volumen del depósito afecta de igual modo a ambos parámetros. Esto tiene sentido, pues la potencia efectiva depende del par efectivo. Se observa que en algunos regímenes hay un ligero aumento del par y, por tanto, de la potencia, tanto si se duplica el volumen como si se reduce a la mitad con respecto al original, pero queda bastante claro que no se obtiene ninguna mejora significativa y se pueden obtener en algunas velocidades de giro reducciones mayores que cualquiera de las ganancias, en especial en el caso en el que se duplica el volumen, donde se llega a perder más de un 6% de potencia cuando como máximo aumento no se consigue ni un 1%.

Puede concluirse pues, que el análisis de la modificación de ese parámetro ha servido para corroborar que el valor del volumen del depósito de gases que se había estimado mediante pruebas es adecuado y próximo al óptimo, pues al aumentarlo no se llegan a obtener beneficios significativos en ninguno de los parámetros y al reducirlo sí que se observan pérdidas mayores que cualquiera de los beneficios obtenidos.

### 3.2.3.2 Estudio de la influencia de la longitud de las pipas

En este apartado el parámetro que se va a modificar es la longitud de los conductos que componen el sistema, para, al igual que en apartado anterior, evaluar el impacto tiene este parámetro sobre las condiciones de funcionamiento del sistema de distribución.

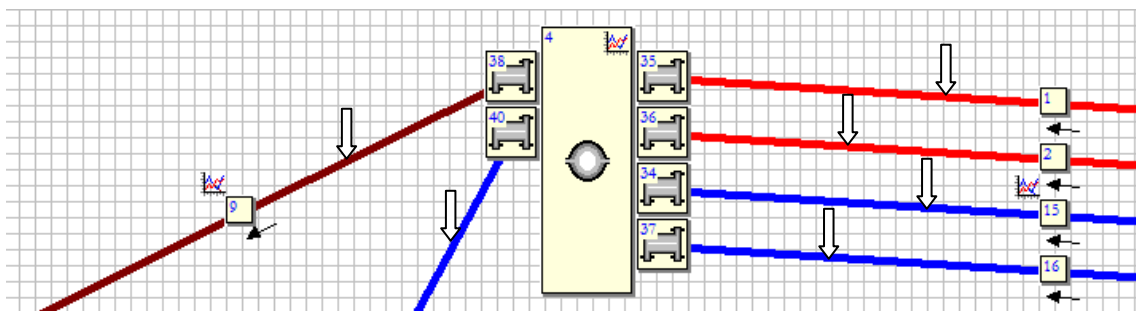


Figura 3.12 Conductos a modificar en el análisis.

Inicialmente se crean dos casos, uno al que se le ha doblado la longitud de los conductos con respecto al original y otro con la mitad de longitud. De los dos se hace el ya mencionado anteriormente estudio paramétrico variando el régimen de giro.

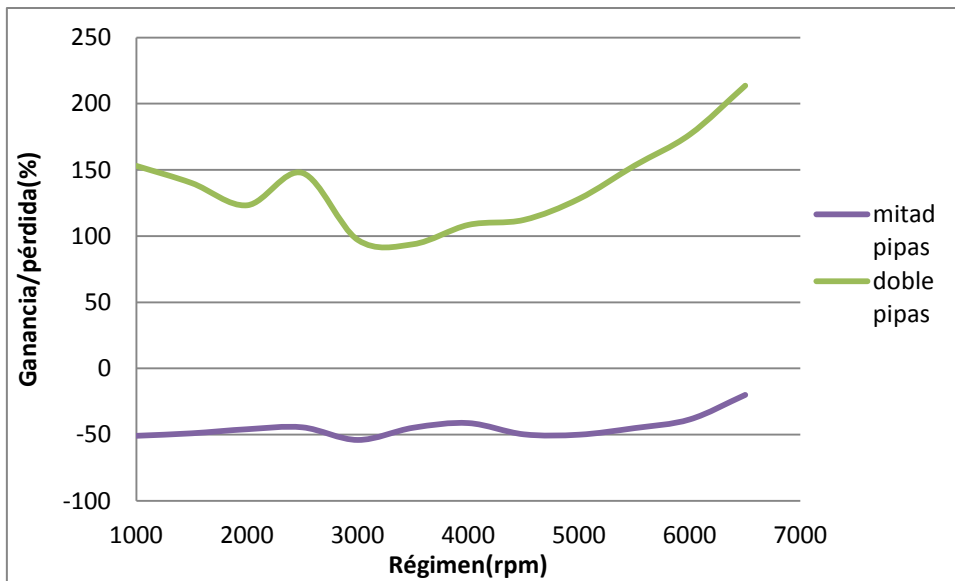


Figura 3.13 Representación gráfica de la ganancia o pérdida en fracción de quemados.

Los resultados obtenidos pueden observarse en las figuras 3.13 y 3.14, donde han sido representados en formato de ganancia/pérdida para así poder observar más fácilmente el impacto sobre las prestaciones. En el caso de la fracción de quemados (Figura 3.13) se aprecia un aumento importante de este parámetro si se aumenta la longitud de los conductos, lo que resulta perjudicial para el buen funcionamiento del sistema de distribución y del motor en general. Con unos incrementos tan altos (superiores al 200% en algunos regímenes) puede afirmarse que aumentar la longitud de los conductos que componen el sistema no resulta beneficioso para el funcionamiento del sistema.

Al contrario ocurre con el caso en el que se reduce a la mitad la longitud de los conductos, donde la fracción de gases quemados baja considerablemente con respecto al sistema de longitud inicial (reducción superior al 50% en algunos regímenes) en todo el rango de velocidades, por lo que reducir la longitud de conductos a la mitad parece ser positivo para el funcionamiento del sistema.

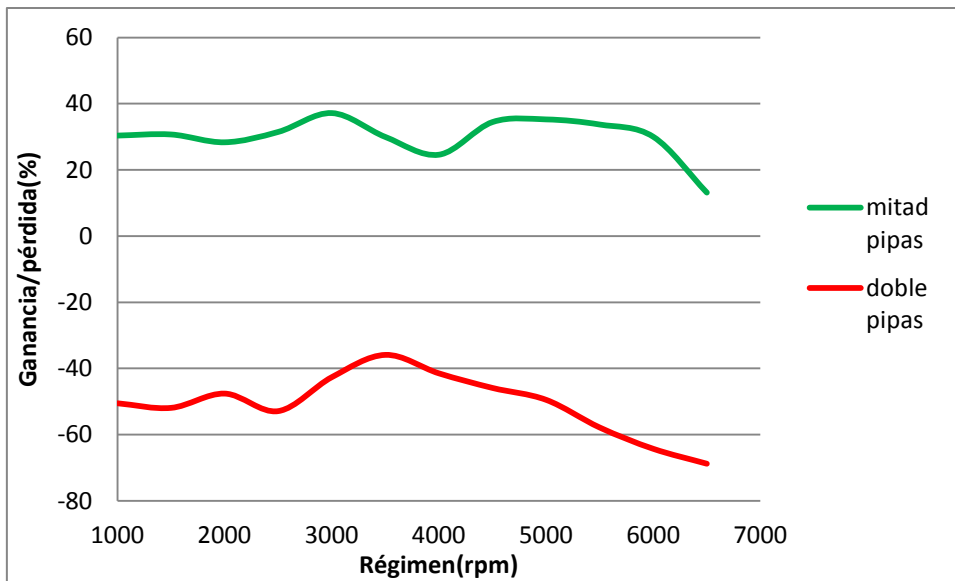


Figura 3.14 Representación gráfica de la ganancia o pérdida en potencia y par.

En el caso de la potencia y par efectivos, en la figura 3.14 pueden apreciarse resultados igualmente positivos en el caso de la longitud reducida a la mitad, y negativos en el caso de la doble longitud. En el caso de estos parámetros, que de alguna manera representan las prestaciones que el motor posee, una ganancia del orden de magnitud que ofrece el caso de la reducción de longitudes (de un 37,14% en su máximo) resulta todavía más significativa que en el caso de la fracción de gases quemados.

Puesto que se observa una mejora considerable en par y potencia y fracción de gases quemados, se decide realizar un análisis de un caso más en el que se reduce todavía más la longitud, esta vez hasta una cuarta parte de su valor original. Como se aprecia en las figuras 3.15 y 3.16 se siguen obteniendo resultados positivos en ambos parámetros, reduciendo más de un 70% la fracción de gases quemados a ciertas velocidades y obteniendo cerca de un 60% (58,7%) más de potencia y par.

Queda claro entonces que reducir la longitud de los conductos es beneficioso para el funcionamiento del sistema en todos los aspectos, lo que puede deberse a que reduciendo la longitud de los conductos se reducen las pérdidas de carga que éstos introducen. El único aspecto negativo es que la longitud de conductos que queda en el último caso es tan pequeña en algunos casos (17,5 mm como valor más bajo) que haría verdaderamente complicada su integración en el sistema, puesto que en algunos casos, como por ejemplo el del conducto que une la válvula con el depósito de gases, probablemente deba existir una distancia de separación de elementos mayor que la longitud del elemento de unión.

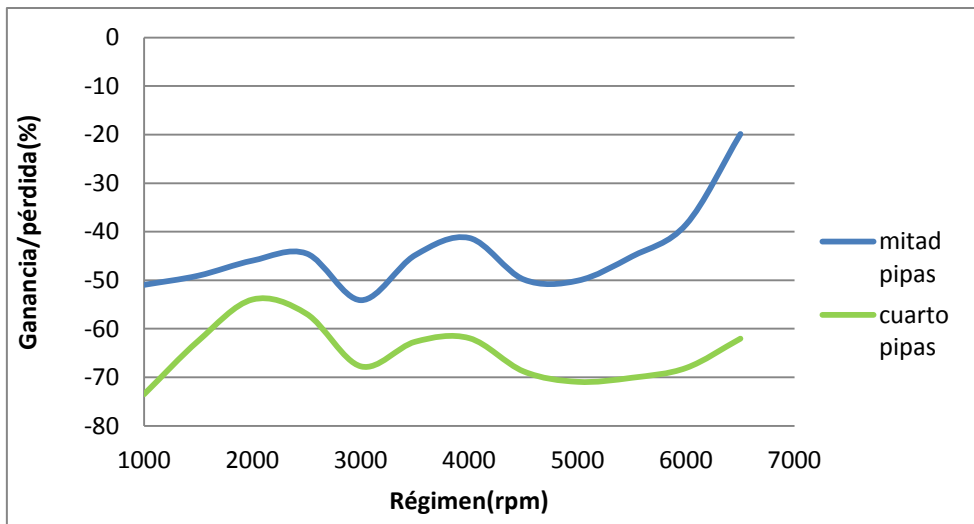


Figura 3.15 Representación gráfica de la ganancia en fracción de quemados con la longitud.

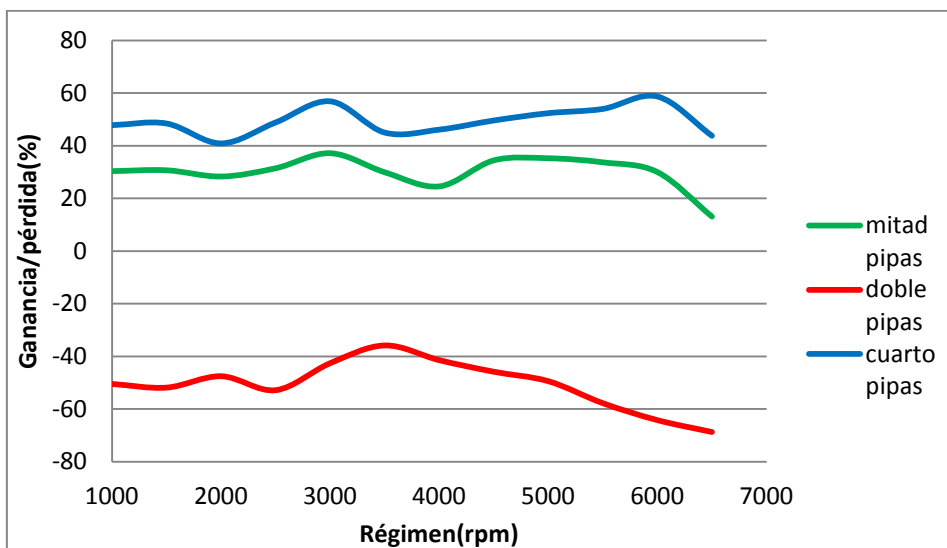


Figura 3.16 Representación gráfica de la ganancia de potencia y par de los casos de longitud.

### 3.2.3.3 Conclusiones del estudio

Después del análisis de los diferentes casos, como conclusión final puede decirse que de entre los dos componentes que se había decidido cambiar, es la longitud de conductos la que en mayor medida afecta a las prestaciones y funcionamiento del sistema. Así, el sistema será sensible a una variación de la longitud de los conductos, pero no a un cambio en el volumen del depósito de gases. Las tendencias observadas en los resultados indican que el volumen del depósito puede tener un valor óptimo comprendido entre 22 cm<sup>3</sup> (doble volumen) y 5,5 cm<sup>3</sup> (mitad volumen), y próximo al valor inicial, que era de 11 cm<sup>3</sup>. Como se comentó anteriormente, esto era un indicador de que la estimación de dicho volumen mediante pruebas se había realizado correctamente. En el caso de la longitud de conductos, se aprecia que cuanto menor longitud posean, mejor será el funcionamiento del sistema, conclusión lógica, pues las pérdidas de carga de los conductos son calculadas en este modelo mediante la ecuación de Darcy–Weisbach, cuya expresión general para tuberías cilíndricas es:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (2)$$

Atendiendo a la expresión se aprecia que las pérdidas son proporcionales a la longitud del conducto, por lo que reducirla reduce las pérdidas y por tanto mejora el funcionamiento. El valor ideal de la longitud sería nulo, pues así las pérdidas no existirían y se aprovecharía toda la energía.

Otro aspecto interesante a comentar es que, si se observan las curvas de par efectivo, potencia efectiva y fracción de gases quemados de los distintos casos de estudio (Figura 3.17, se aprecia que la forma de las curvas cambia al cambiar la longitud de conductos o el volumen del depósito de gases. Como ejemplo concreto puede tomarse la curva de par del caso en el que se duplica la longitud, que presenta una caída a partir de las 4000 rpm mucho más pronunciada que la de la configuración original.

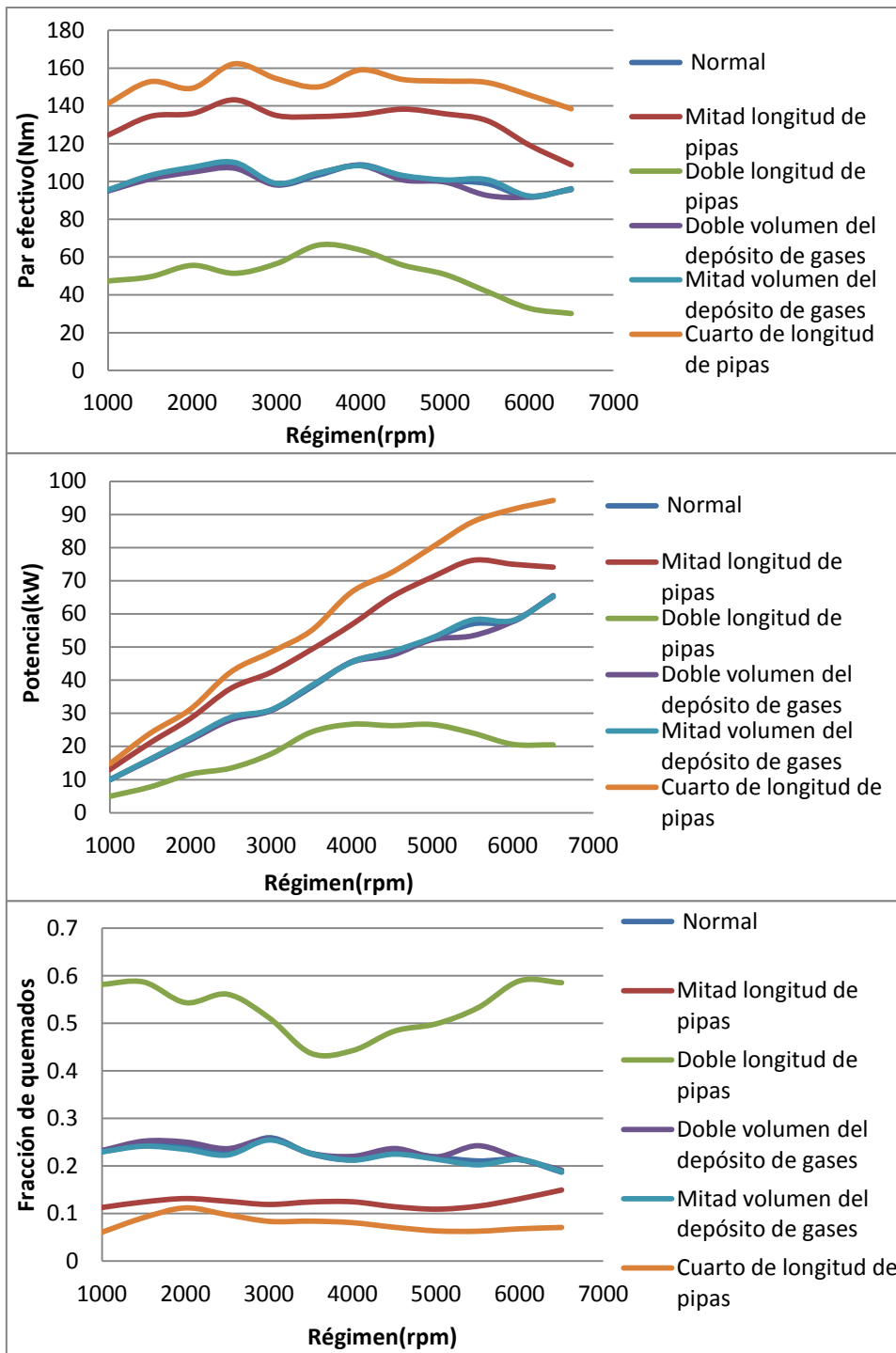


Figura 3.17 Curvas de par, potencia y fracción de quemados de los casos.

Esto significa que, además de intervenir en las prestaciones del motor, cambiando las dimensiones de estos componentes se está interviniendo también en su comportamiento, algo que debe tenerse muy en cuenta en ciertos campos, como la automoción, donde el motor no se diseña para funcionar en un único punto, sino en múltiples y por ello es crucial el comportamiento dinámico en el paso de uno a otro.



### **3.3 Modelado del sistema con elementos reales**

El siguiente paso a seguir tras el obtener el modelo ideal del sistema es tratar de adoptar soluciones en ciertos elementos que aproximen el modelo, dentro del contexto en el que todo son simulaciones y aproximaciones, un poco más a la realidad. Para ello deben sustituirse ciertos elementos que en la realidad no tienen cabida, como son los conductos que orientan el flujo en la dirección apropiada. Estos elementos, tal y como están implementados en el modelo, realizan su función de una manera más eficaz que cualquier elemento existente en el mundo real. Es por esto que serán sustituidos por dos tipos de elementos, de los que se hablará en el próximo apartado.

El procedimiento a seguir será el mismo que el de los casos anteriores. En primer lugar se configurará el modelo, en segundo se realizará el estudio paramétrico de variación de régimen y en tercer lugar se analizarán los parámetros.

#### **3.3.1 Implementación y configuración en OpenWAM**

Se parte del modelo ideal, al que se le van a cambiar los conductos de orientación del flujo por dos tipos de elementos que normalmente se usan en motores de dos tiempos, pero que por sus características pueden ser una solución interesante para los problemas de orientación del flujo y de retorno de la mezcla que este sistema presenta. Dichos elementos son:

- **Caja de láminas:** La caja de láminas funciona como una simple válvula de control y evita el retroceso de la mezcla. Suele emplearse para realizar la admisión en motores de dos tiempos. La utilización de este elemento para realizar la admisión no está enteramente libre de problemas. Aún muy recientemente, la rigidez de los pétalos de las láminas estaba severamente comprometida. Para asegurar un buen llenado a bajas revoluciones, las láminas deben de ser delgadas y flexibles, para que abran fácilmente y no restrinjan excesivamente el flujo de aire.

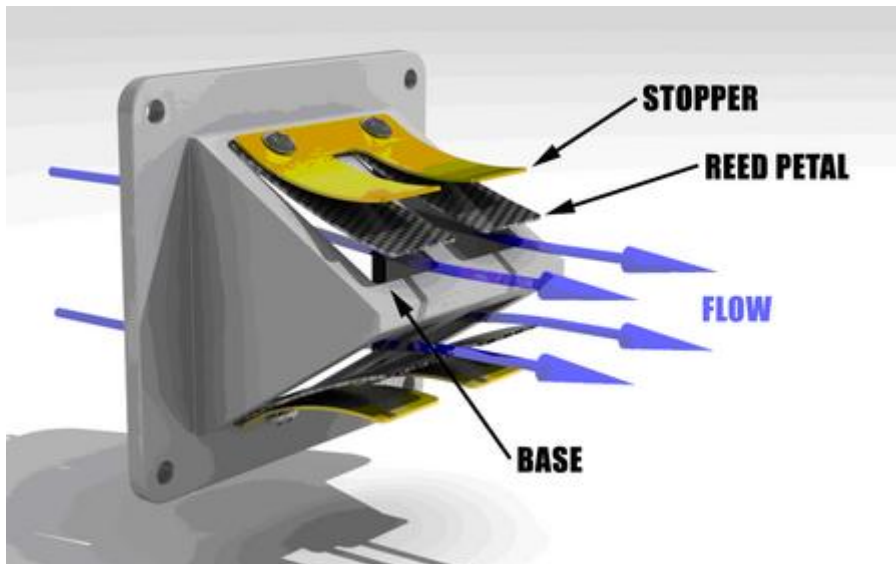


Figura 3.18 Esquema de una caja de láminas.

A altas revoluciones, si las láminas son demasiado delgadas y flexibles, tienden a agitarse y vibrar, permitiendo el retroceso del flujo. En el momento de cerrar tienden a rebotar contra sus asientos debido a la inercia y/o resonancia en el conducto de admisión. Es por esto que debe buscarse un compromiso entre rigidez y grosor.

- Válvula de disco rotativo: También empleado para controlar el proceso de admisión en los motores de dos tiempos, este elemento consiste en un disco que abre y cierra el conducto que esté regulando según los orificios que se le hayan practicado, mientras va girando.

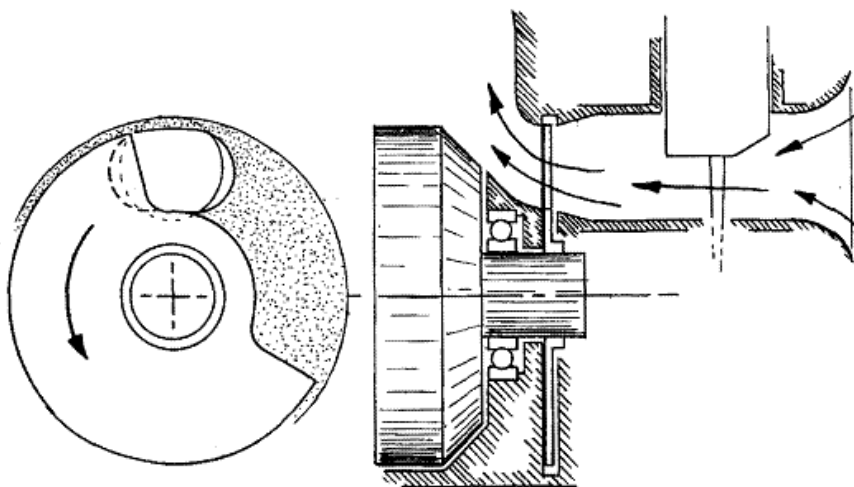


Figura 3.19 Representación esquemática de una válvula de disco rotativo.

La problemática de este sistema está en el hecho de conseguir centrar la apertura en el momento en el que el flujo debe pasar a través de la válvula, así como cerrar en el momento adecuado para evitar reflujos. Si se resuelven bien estas posibles complicaciones, este sistema consigue ser la mejor solución conocida al problema de admisión en motores de dos tiempos, consiguiendo las máximas prestaciones y un correcto funcionamiento. Otro inconveniente de este sistema es su elevado coste con respecto a otros sistemas, debido a su mayor complejidad.

Una vez descritos los elementos que se van a utilizar, se procede a describir la configuración que inicialmente se ha adoptado para modelar el sistema. Se opta por una configuración de láminas para regular el conducto de entrada de la admisión al depósito de gases y válvulas de disco rotativo para el conducto que comunica el escape con el depósito de gases.

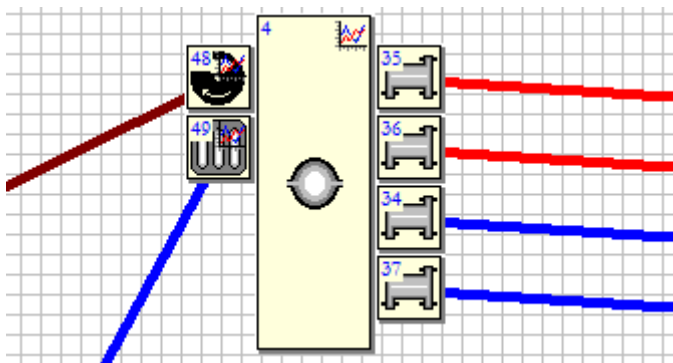


Figura 3.20 Solución empleada implementada en OpenWAM.

La implementación de la solución en el programa informático puede observarse en la figura 3.20, donde la válvula rotativa es el elemento superior a la izquierda del depósito de gases y la caja de láminas el que está justo debajo. Esta configuración es la misma en los cuatro depósitos de gases, correspondientes a los cuatro cilindros que posee el motor.

### 3.3.1.1 Configuración del sistema de admisión por láminas

Una vez introducidos los elementos en OpenWAM, se procede a configurarlos para que simulen correctamente el comportamiento real. Se comienza con la configuración del sistema de láminas, que resulta en general más sencilla debido a que todas las cajas de láminas se configuran del mismo modo y no hace falta tener en cuenta a qué cilindro pertenece cada una ni el orden de encendido de los cilindros.

Para configurar las cajas de láminas en OpenWAM debe pasarse por dos ventanas, algo que puede observarse en la figura 3.21.

En la primera se seleccionan el tipo de modelo del elemento, el diámetro de referencia, que debe ser el de la conexión que comunica el depósito de gases con la admisión, y la dirección de apertura, que en este caso es desde el conducto hacia el depósito.

En la segunda ventana se configura la apertura del elemento, que en este programa se simula mediante una curva de coeficiente de descarga, que es la relación entre la sección de paso existente y la geométrica, y cuyo valor máximo es la unidad. Este parámetro toma diferentes valores según el incremento de presión al que esté sometido el elemento. Se puede configurar una respuesta distinta en un sentido o en otro introduciendo diferentes curvas en “Inlet Cd” y “Outlet Cd”, pero en este caso se introduce la misma para los dos. Mediante la modificación del valor de “Increase in X axis” se cambia la división del eje horizontal, pudiendo así obtener rápidamente diferentes respuestas de las láminas sin necesidad de cambiar la curva, simulando de este modo cambios en el grosor y en la rigidez de los pétalos.

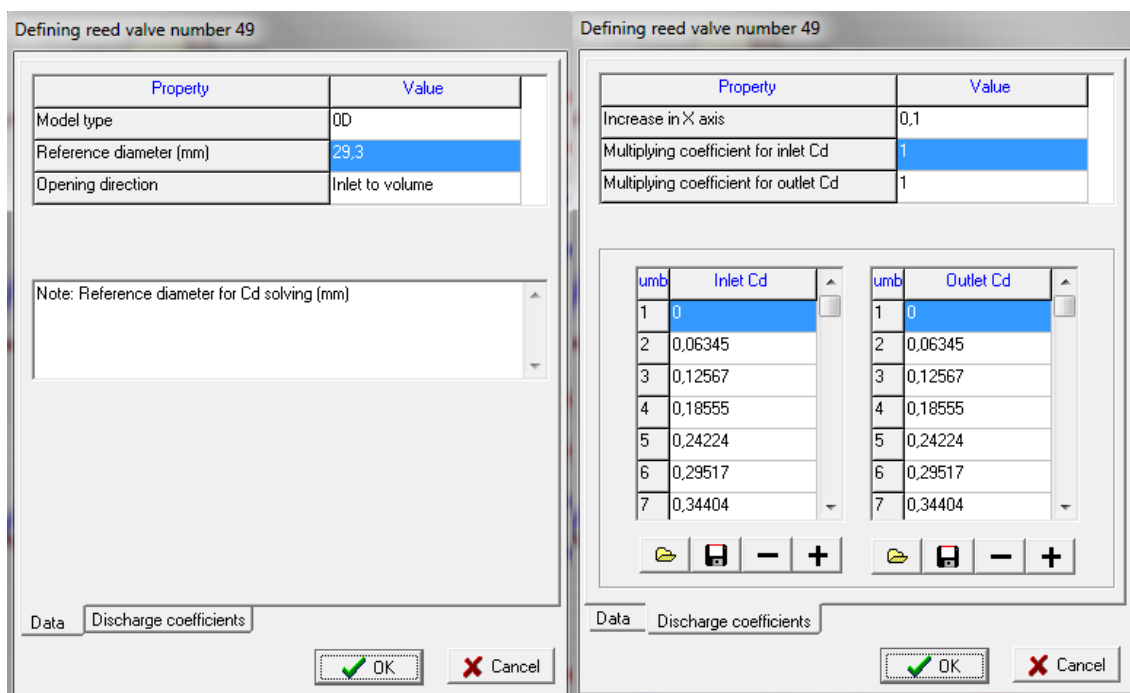


Figura 3.21 Ventanas de configuración de la caja de láminas.

La configuración adoptada para el elemento es la que se presenta en la figura 3.21, y la representación gráfica de la curva del coeficiente de descarga utilizada queda visible en la figura 3.22, donde también se ha representado junto a ella otra curva en la que se ha elegido una división del eje horizontal de 0,05, lo que hace el elemento más sensible a los incrementos de presión, que se traducen en una caja de láminas más “blanda”.

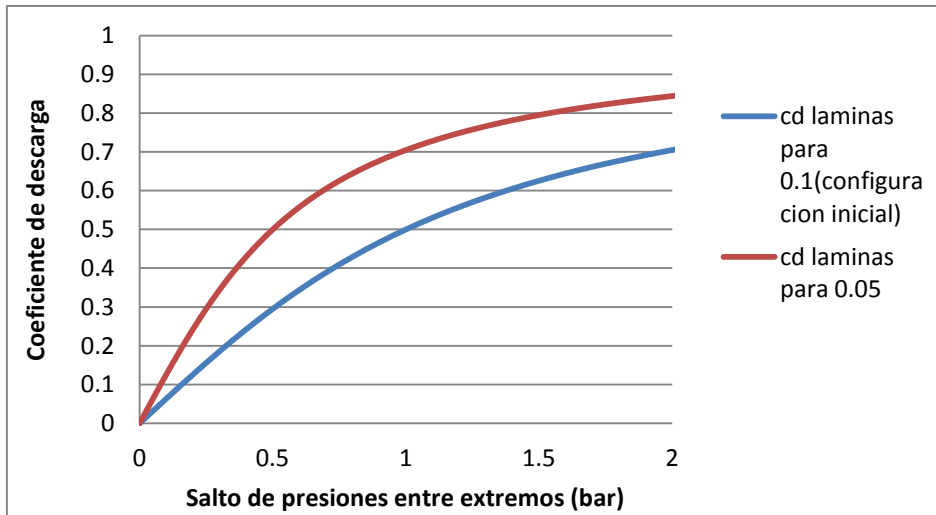


Figura 3.22 Representación gráfica de las curvas de coeficiente de descarga de la caja de láminas.

### 3.3.1.2 Configuración del sistema de válvula de disco rotativo

Finalmente este sistema se ha escogido para ser el encargado de controlar el escape de gases del depósito hacia el colector. Al contrario que en el caso de las láminas, cada elemento debe configurarse con respecto al cilindro al que pertenece el depósito de gases en el que se ubica, debido a que los cilindros no realizan las fases del ciclo a la vez, sino que tienen un orden de encendido y un desfase entre ellos, el llamado ángulo de encendido, que para motores de cuatro tiempos puede calcularse como:

$$\text{ángulo de encendido} = \frac{720^\circ}{\text{número de cilindros (N)}} \quad (3)$$

Para el caso del motor empleado en el trabajo, según la expresión (3), el ángulo de encendido es de  $180^\circ$ , y el orden de encendido establecido es 1-3-4-2.

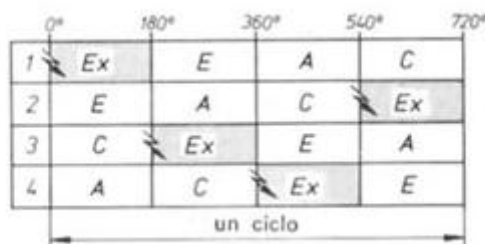


Figura 3.23 Ciclo de un motor de cuatro cilindros con orden de encendido 1-3-4-2.

La aclaración de estos conceptos es importante debido a que guardan una estrecha relación con la configuración de las válvulas de disco rotativo. Esto se debe a que el objetivo que se persigue es centrar la apertura de la válvula en el período de tiempo en el que los gases de escape deben ser evacuados. En el programa se hace mediante una curva de coeficientes de descarga, en la que esta vez el eje horizontal es el ángulo que describe el cigüeñal. Puesto que se pretende que la válvula se encuentre abierta durante la evacuación de gases, y cerrada el resto del tiempo, la manera de simular esto será centrar las curvas de coeficiente de descarga en el período de escape de cada cilindro. Así, según la figura 3.23, la curva del cilindro 1 deberá estar entre  $180^\circ$  y  $360^\circ$ , la del 2 entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ , la del 3 entre  $360^\circ$  y  $540^\circ$  y la del 4 entre  $540^\circ$  y  $720^\circ$ .

La forma de las curvas es similar a la del levantamiento de válvula, como puede observarse en la figura 3.24, que muestra la configuración con la que mejores resultados se han obtenido. A la hora de introducirlas en el programa deben tenerse varias cosas en cuenta: la primera de ellas es que para el programa el ángulo 0 del cigüeñal y el de la válvula no coinciden, sino que el instante inicial a partir del cual empieza a contarse el ángulo del disco rotativo es el instante en el que se cierra la válvula de admisión, que en este motor es de  $566^\circ$ . Por lo tanto, habrá un desfase entre motor y disco que deberá tenerse en cuenta a la hora de introducir las curvas. El segundo es que las curvas deben introducirse en orden temporal, es decir, que los valores del ángulo deben estar ordenados de menor a mayor. Un último dato a tener en cuenta es que el valor del coeficiente de descarga no puede llegar a la unidad ni superarla. Si se introduce una curva así, la simulación dará error.

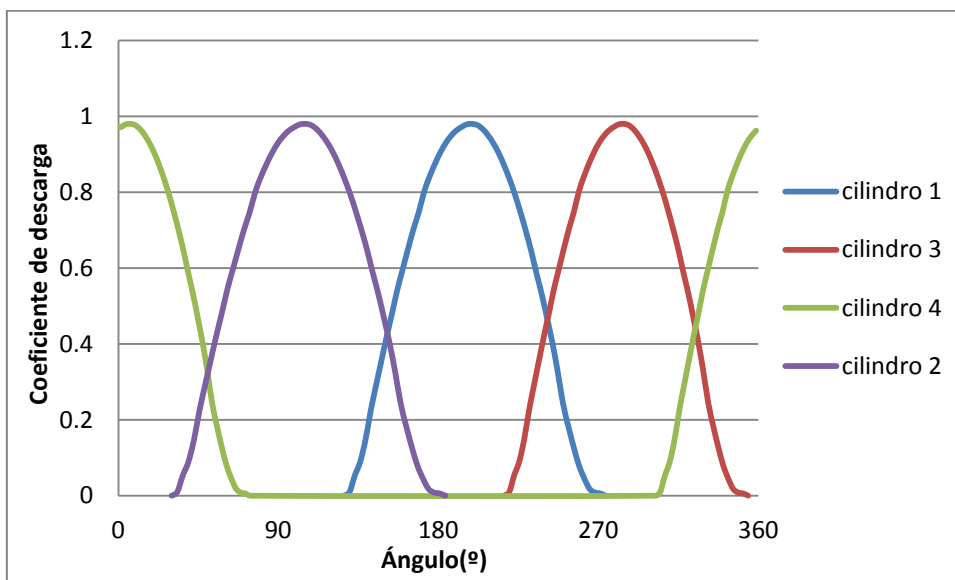


Figura 3.24 Representación gráfica de las curvas de coeficientes de descarga.

Otro aspecto de gran importancia es la velocidad de giro de los discos rotativos, que no puede ser la misma que la del motor, ya que si fuera así no se conseguiría que la válvula abriera una sola vez, sino que lo haría por partida doble, al describir el cigüeñal dos vueltas completas por ciclo. Afortunadamente, esto en el programa es fácil de implementar, ya que basta con seleccionar en la ventana de la figura 3.25 la opción “Engine” en el campo “Speed control” y en el de “Speed relation” el valor 0,5.

Para la introducción de las curvas también tiene que tenerse en cuenta la diferencia de velocidades, pues esto provoca que el ángulo descrito por el disco vaya desde 0° hasta 360°, justo la mitad del que describe el cigüeñal, que va desde 0° hasta 720°. También deberá sumarse el desfase mencionado anteriormente a las curvas, que será de 77° (Es el resultado de restarle al ángulo máximo de cigüeñal el del instante en el que cierra la admisión y multiplicarlo por la relación de velocidades  $[720-566]*0,5$ ).

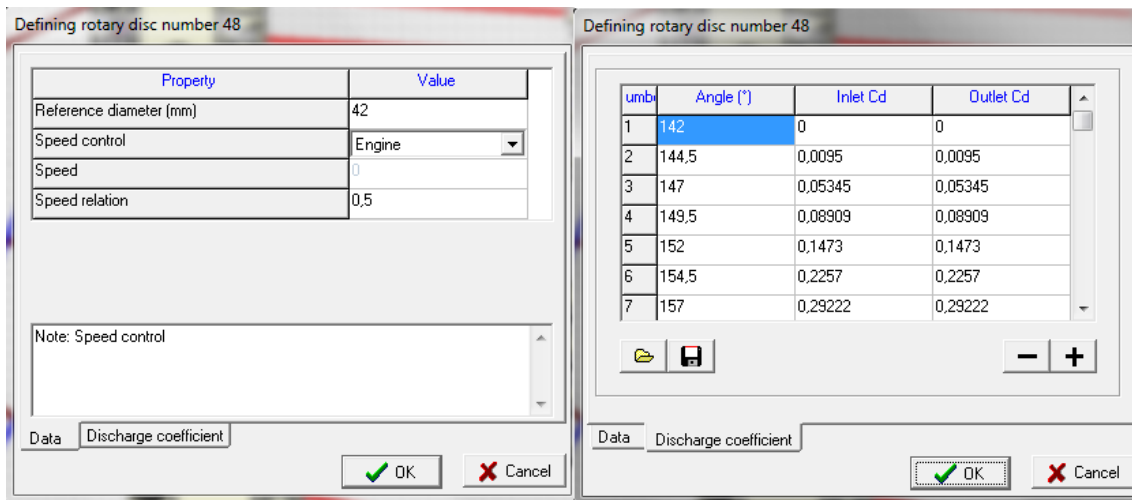


Figura 3.25 Ventanas de configuración del disco rotativo del cilindro 1.

Una vez conocido el procedimiento de configuración de los discos rotativos, se prueban diferentes configuraciones, y se observa que las configuraciones que mejores resultados obtienen son aquellas en las que los discos abren algo antes de que se produzca el escape y cierran algo después. La configuración de las curvas utilizada en el estudio es la mostrada en la figura 3.24, y la de las láminas la que tiene una división del eje horizontal de 0,1.

### 3.3.2 Resultados obtenidos

Una vez configurados los elementos, se realiza el ya conocido estudio paramétrico variando la velocidad de giro del motor. Los parámetros a analizar inicialmente son los ya mencionados en otros apartados (potencia, par y fracción de quemados).

En la figura 3.26 pueden verse las curvas de par efectivo y potencia efectiva del sistema, representadas junto con el motor original. Se aprecia una considerable reducción de ambos parámetros, en concreto si se aplica la fórmula de la ganancia (1), se pierde como mínimo un 45,57% (a 1000 rpm) de par y potencia, siendo la máxima pérdida del 57,09% (a 6000 rpm). Unos resultados nada favorables para la implementación del sistema que, atendiendo a estos parámetros, parece no presentar ventaja alguna.

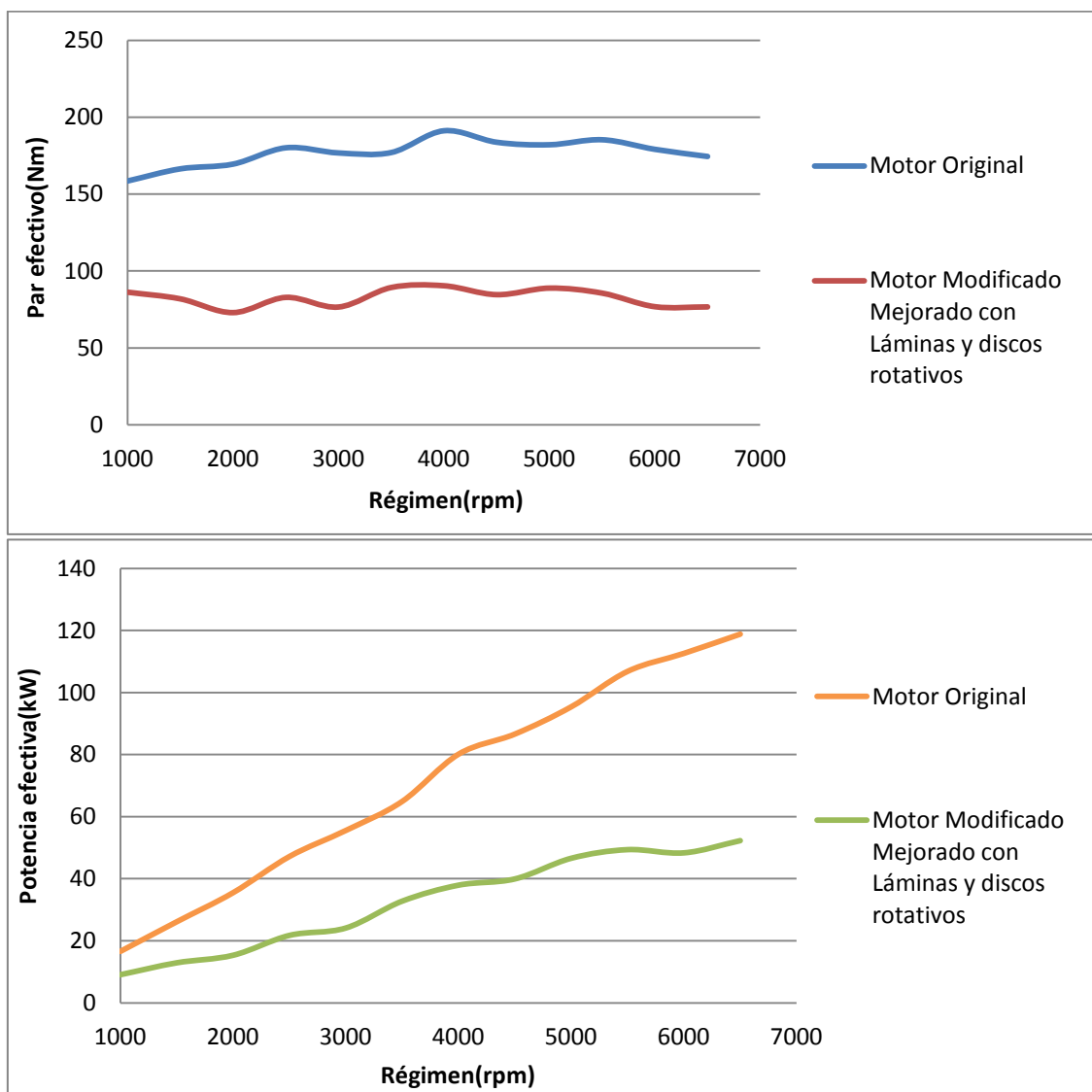


Figura 3.26 Curvas de par efectivo y potencia efectiva del sistema original y del sistema modificado.



En el caso de la fracción de gases quemados a final de ciclo, los resultados tampoco son positivos, puesto que tanto si se observa la figura 3.27 como si se calcula la ganancia, se ve que este parámetro se dispara, más aun incluso que en el modelo de elementos ideales (un 1095,688% de aumento máximo que se produce a 3000 rpm frente al 896,93% del sistema de elementos ideales a 3000 rpm). Atendiendo a los valores de la fracción, se aprecia que en ciertos regímenes la fracción pasa de 0,3, lo que significa que hay ciertos momentos en los que el ciclo se empieza con más de un 30% de gases quemados, un valor que para nada es despreciable.

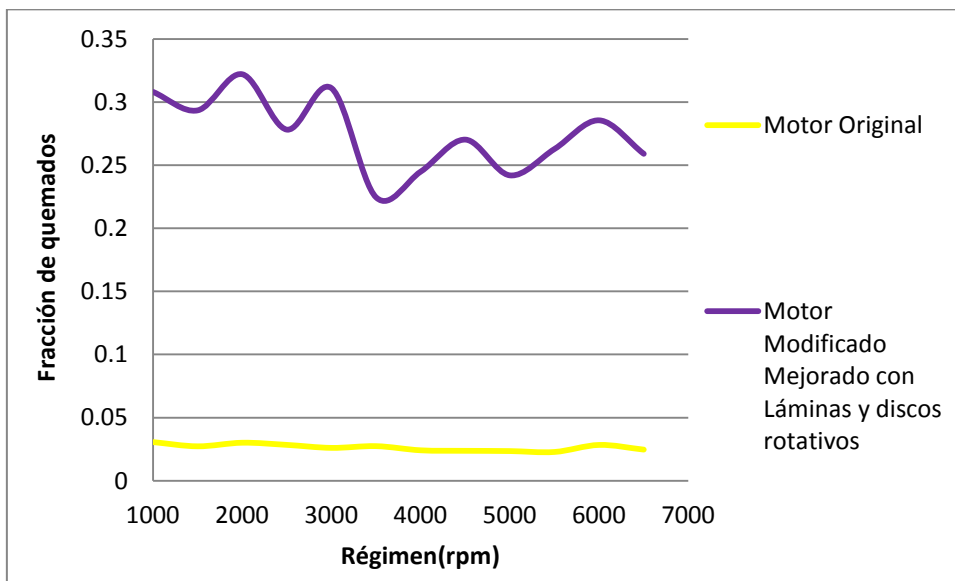


Figura 3.27 Representación de la fracción de quemados del sistema original y del mejorado.

La conclusión que puede sacarse del análisis de estos parámetros es que en ninguno de ellos el sistema consigue superar al motor original, y en todos ellos obtiene unos valores demasiado desfavorables que harían prácticamente imposible poner a ambos motores a la misma altura mediante una configuración óptima de los elementos o la introducción de alguno más. En resumen, que tal y como apuntaba el modelo parece ser que este sistema no aporta nada positivo al funcionamiento del motor. En apartados posteriores se analizarán y compararán más parámetros para ver si realmente es así.

### 3.3.3 Otras configuraciones con elementos reales. Sistema de láminas

Como punto final al modelado del sistema con elementos reales, se muestra una configuración alternativa al sistema que emplea láminas y válvulas de disco rotativo. Dicha configuración emplea únicamente láminas, tanto para la admisión como para la evacuación de gases en el depósito. La principal ventaja de emplear este sistema es que, como se ha visto anteriormente, la configuración es mucho más sencilla. También se ven reducidas la complejidad mecánica del sistema y el coste de éste, si se implementara en la realidad.

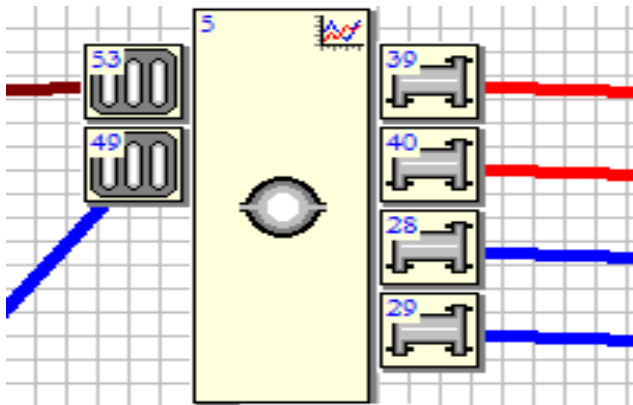


Figura 3.28 Implementación de la configuración en OpenWAM en uno de los depósitos.

Para configurar las láminas se insertan las mismas curvas del apartado anterior, pero aumentando la división del eje horizontal (de 0,1 a 0,3), lo que hace a las láminas más “duras”, es decir, menos sensibles a las variaciones de presión. Las encargadas de realizar la admisión se configuran de igual modo que las del modelo anterior en cuanto a dirección de apertura, mientras que las de escape se configuran en dirección opuesta, de tal manera que se abran cuando el flujo circula del depósito hacia el colector de escape.

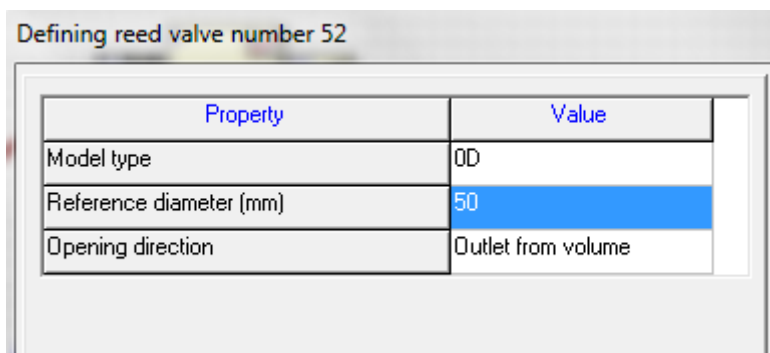


Figura 3.29 Configuración de láminas de escape del sistema.

Una modificación adicional que se ha hecho ha este sistema ha sido el aumento del diámetro de los conductos de escape que van desde el colector principal hasta el depósito de gases, debido a que en los casos anteriores con el diámetro original se alcanzaban condiciones sónicas y supersónicas en esos conductos.

Hechas todas estas modificaciones, se lanza el estudio paramétrico de variación de régimen de giro. Los resultados obtenidos se pueden observar en la figura 3.30, representados junto al sistema original y el de láminas y válvulas rotativas.

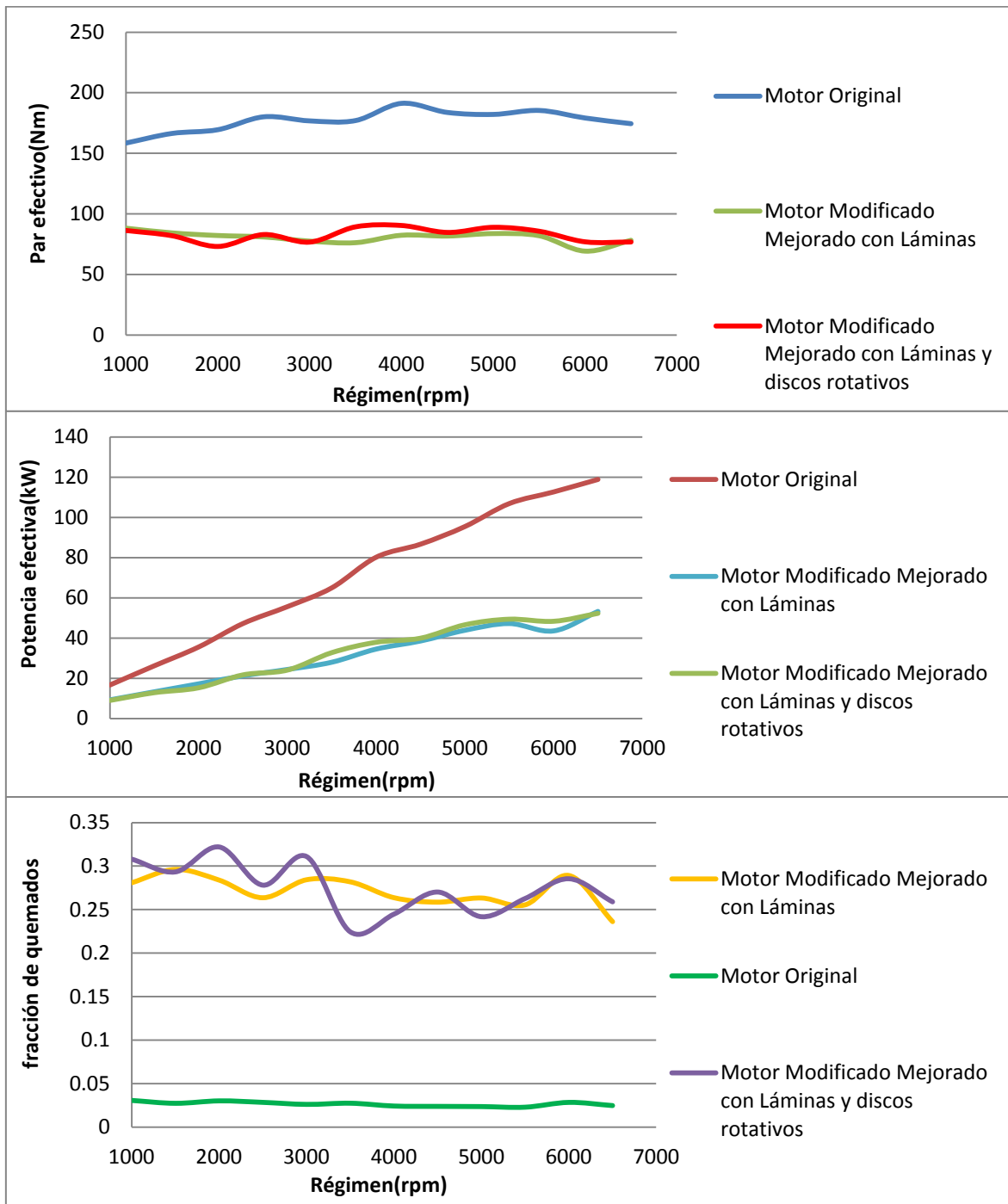


Figura 3.30 Representación de parámetros de los diversos sistemas.

Los resultados obtenidos se asemejan a los del sistema que emplea láminas y discos conjuntamente, si bien en potencia y par este último consigue estar por encima en mayor un mayor rango de velocidades, aunque la diferencia no es demasiado significativa. El comportamiento en fracción de quemados parece ser algo más estable que el modelo de lámina y disco, pero aun así tampoco consigue bajar este parámetro demasiado, llegando a aumentar a ciertas velocidades. Lo que sí es evidente es que ambas soluciones se encuentran lejos del sistema original en cuanto a prestaciones. Aun así, en el apartado siguiente se analizarán más parámetros.

## 4 CONCLUSIONES Y COMPARATIVA DE SISTEMAS

Con este apartado concluye el análisis del sistema de distribución. En él, tal como se ha mencionado en apartados anteriores, se va a proceder al análisis y comparación de diferentes parámetros adicionales a los ya vistos en los apartados de resultados para, de alguna manera, contrastar las conclusiones que se han sacado en los apartados anteriores mediante el análisis de los parámetros iniciales, así como identificar las causas a los posibles problemas que el sistema plantea.

### 4.1 Conclusiones y análisis de los resultados

#### 4.1.1 Análisis de los resultados obtenidos en potencia efectiva y par efectivo

Se parte de los resultados obtenidos por cada sistema para cada uno de los parámetros iniciales (potencia, par y gases quemados), aunque en el caso del par efectivo y la potencia efectiva basta con estudiar uno de ellos, debido a que uno depende de otro, como puede observarse en la expresión (4).

$$N_e = M_e \omega \quad \text{siendo} \quad \omega = 2\pi n \quad (4)$$

Aunque en (4) se observe que la potencia efectiva dependa del par efectivo, resulta más interesante analizar la primera, pues es un indicador directo de las prestaciones del motor y uno de los parámetros en los que más se fijan tanto fabricantes como consumidores.

Se parte pues, de las curvas y datos obtenidos en cada uno de los estudios paramétricos realizados para cada sistema. La figura 4.1 muestra las curvas de potencia efectiva obtenidos en cada uno de los sistemas.

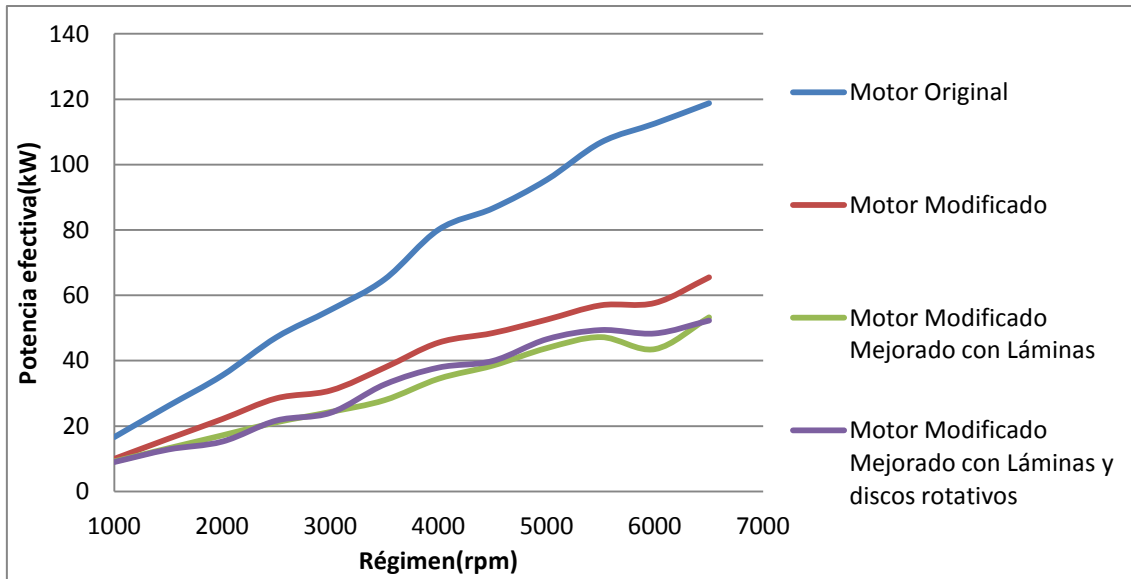


Figura 4.1 Curvas de potencia efectiva de los diversos sistemas analizados.

En potencia máxima, los resultados exactos son:

- Motor original: 161,612 CV (118,785 kW) @ 6500 rpm
- Motor modificado: 89,13 CV (65,5103 kW) @ 6500 rpm
- Motor con láminas y válvula rotativa: 71,086 CV (52,2483 kW) @ 6500 rpm
- Motor con láminas en admisión y escape: 72,437 CV (53,241 kW) @ 6500 rpm

Como ya se ha comentado anteriormente, el motor con la configuración original es el que consigue mejores resultados, estando su curva de potencia en todo momento por encima de la de cualquiera de las configuraciones del sistema de distribución alternativo, incluida la del modelo ideal. Este hecho dice muy poco a favor del sistema alternativo, ya que si el modelo obtiene unos resultados tan bajos y distantes del sistema original significa que puede que en alguno de los aspectos en los que se pensaba que este sistema iba a mejorar al original no se consiga mejora alguna, llegando incluso a poder empeorar la situación inicial.

Esto son meras suposiciones, así que para ver lo que realmente está pasando en relación a la potencia efectiva, es mejor analizar qué está ocurriendo con las variables de las que depende. Para ello se partirá de la siguiente expresión de este parámetro:

$$N_e = i n \eta_e F_r F_e \eta_v \rho_{ref} V_T PCI \quad (5)$$

En el caso concreto de este motor hay ciertos parámetros que permanecen fijados y por tanto no van a intervenir en la variación de la potencia efectiva. Es el caso de la cilindrada ( $V_T$ ), el poder calorífico del combustible (PCI) y su dosado estequiométrico ( $F_e$ ), al seguir utilizándose el mismo combustible (gasolina) y comburente (aire), la densidad de referencia ( $\rho_{ref}$ ), al no haberse sobrealimentado el motor y seguir siendo de aspiración natural y el número de ciclos por vuelta (i), al seguir siendo el motor de cuatro tiempos.

Si se agrupan los términos que no varían en una única constante C, la expresión de la potencia efectiva queda reducida a:

$$N_e = Cn\eta_e\eta_vF_r \quad (6)$$

De este modo, si se observa la expresión (6) se deduce que la potencia que desarrolle el motor dependerá del rendimiento efectivo, el rendimiento volumétrico, el dosado relativo y el régimen de giro. Puesto que esta última variable se ha tomado como la variable a modificar intencionadamente en los estudios paramétricos, queda claro que para sacar conclusiones de los resultados obtenidos en potencia y par efectivos se debe analizar el comportamiento de las tres variables restantes de la expresión (6). Para ello se comparará el comportamiento que presenta cada variable en cada uno de los sistemas de distribución empleados (original, modelo ideal, láminas y discos y láminas) a lo largo del rango de velocidades de giro del motor (1000-6500 rpm).

#### 4.1.1.1 Estudio del rendimiento efectivo

El rendimiento efectivo es un parámetro adimensional que expresa la relación entre la potencia efectiva desarrollada y la potencia térmica consumida por el motor. De este modo, una de las formas de expresarlo es:

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f PCI} \quad (7)$$

Este parámetro mide la capacidad del motor de aprovechar el combustible y convertirlo en energía útil, que en este caso se entrega de potencia en el eje.

Lo que se va a hacer con esta variable es representarla gráficamente en función del régimen para cada sistema, para así obtener las llamadas curvas de rendimiento efectivo, para poder analizar así las diferencias y similitudes existentes entre cada una de las configuraciones del sistema de distribución del motor.

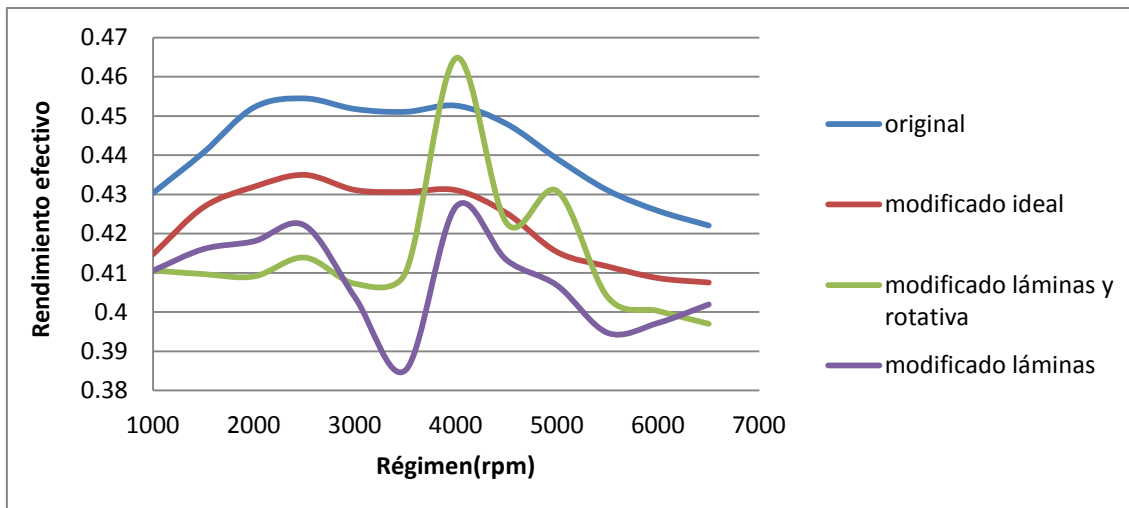


Figura 4.2 Representación gráfica del rendimiento efectivo de los sistemas.

Observando las gráficas de la figura 4.2 se puede apreciar que la curva que consigue un mayor rendimiento en la mayoría del rango de velocidades de giro es la del motor original, si bien hay un pequeño intervalo de regímenes en el que se ve superada por la del sistema que emplea láminas y discos rotativos. Este dato constituye la primera nota positiva para el sistema alternativo, ya que significaría que el motor con esa configuración es más eficiente a ese régimen que el original, aunque también podría ser un dato anómalo, aunque viendo la forma de las curvas de los sistemas que emplean elementos reales puede no ser así.

Atendiendo a la forma de las curvas, se aprecia una semejanza en la forma de las curvas del sistema original y del modelo ideal del sistema, aunque ésta siempre se encuentra por debajo de la original. Otra conclusión que puede sacarse es que el sistema alternativo tiene problemas para hacer funcionar eficientemente el motor a bajas revoluciones, especialmente en el caso de la configuración con láminas y válvula rotativa.

Por último, cabe destacar que los valores que el programa da del rendimiento efectivo son muy altos, tal vez demasiado, pues en el caso de un MCI de encendido provocado como el del caso de estudio el rendimiento efectivo máximo que puede llegar a obtenerse es de 0,35 aproximadamente. Esto puede significar que en el modelo se han idealizado ciertos parámetros o comportamientos, como por ejemplo la relación de compresión, que adquiere un valor de 16, algo que está bastante por encima del límite que la autodetonación de la mezcla en los MEP establece, que suele ser de 11. También podría deberse a que el programa no calcula bien el rendimiento.



#### 4.1.1.2 Estudio de la evolución del dosado relativo

Para analizar el impacto de este parámetro sobre la potencia se representará gráficamente el dosado a los diferentes regímenes de las diferentes configuraciones del motor. El fichero de salida del programa proporciona el dosado absoluto, que es el producto del dosado relativo y el dosado estequiométrico, pero la información que proporciona es la misma pues como se ha explicado antes el dosado estequiométrico no varía, por lo que una modificación del dosado absoluto se deberá exclusivamente a una modificación del dosado relativo. De todos modos se representará el dosado relativo, ya que para obtenerlo simplemente hay que dividir por el dosado estequiométrico del combustible utilizado, que en este caso es gasolina y su valor es de 1/14,6.

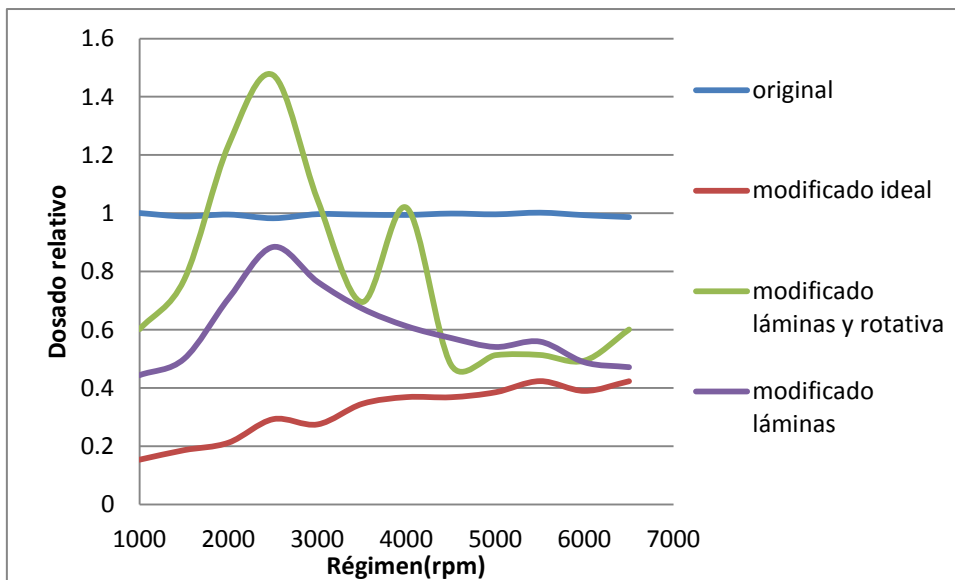


Figura 4.3 Gráficas del dosado relativo de las diferentes configuraciones.

Como puede verse en la figura 4.3, la curva de dosado relativo de la configuración de motor original se mantiene estable en torno a la unidad, algo que no es casualidad ya que el dosado de máximo rendimiento se encuentra en torno a este valor, algo que puede verse en la figura 4.4. Además, si el motor implementado en el modelo deriva de uno real que ha sido introducido en el mercado, éste será forzado a trabajar en estas condiciones de dosado fundamentalmente por la compatibilidad de algunos sistemas de post-tratamiento (catalizador 3 vías...), por lo que ya se diseña acorde con ese requisito.

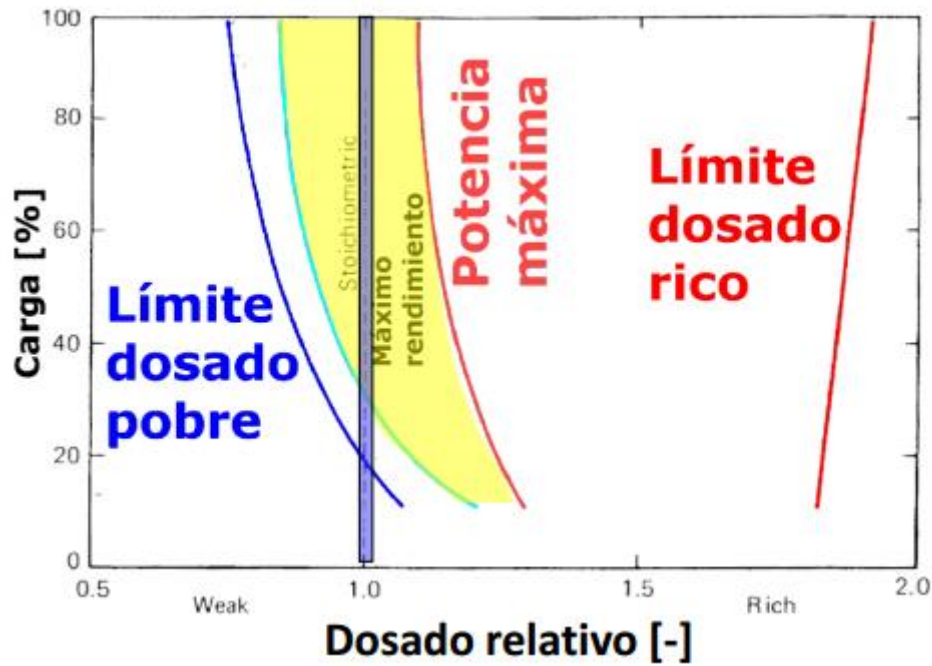


Figura 4.4 Curvas de dosado relativo y grado de carga.

En el caso de las otras configuraciones, la que obtiene unos resultados menos positivos es la del modelo ideal, ya que en ciertos regímenes opera en condiciones muy por debajo del límite de dosado pobre indicado por la figura 4.4, lo que puede significar que las pérdidas de potencia que tiene este sistema alternativo con respecto al original puedan deberse a los bajos valores de este parámetro.

Destacable es el caso del sistema de válvulas rotativas y láminas, ya que presenta una curva oscilante, que en algunos momentos alcanza valores superiores al dosado de máxima potencia, aunque en muchos otros puntos opera en dosado muy pobre. También el dosado consigue aproximarse a la unidad a un cierto régimen de giro, 4000 rpm, que curiosamente coincide con el de máximo rendimiento, tal y como se ha visto anteriormente y como la curva de la figura 4.4 confirma.

En el caso del sistema de láminas, la curva oscila menos pero los resultados indican el empleo generalizado de un dosado pobre.

Del análisis del dosado relativo se puede afirmar que este parámetro sí es una de las causas de pérdida de potencia de las configuraciones alternativas, al no mantenerse en los valores requeridos en la mayoría de regímenes.

### 4.1.1.3 Estudio de la evolución del rendimiento volumétrico

El rendimiento volumétrico es el parámetro que actúa como indicador del llenado del cilindro. Puede calcularse de acuerdo con la expresión:

$$\eta_V = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{ref}} = \frac{\dot{m}_a}{\rho_{ref} V_T n i} \quad (8)$$

Como se ha visto antes, el rendimiento volumétrico es uno de los parámetros que afecta directamente a la potencia, y el que, en teoría, el sistema de distribución alternativo debía mejorar a altas revoluciones, consiguiendo así un mejor llenado del cilindro y potenciando así al motor original.

Pues bien, si se calcula el rendimiento volumétrico de las diferentes configuraciones y se representa en función del régimen de giro (figura 4.5), se aprecia que esta premisa no es cierta, pues la curva de la configuración original se mantiene en todo el espectro de velocidades de giro por encima de las de los otros sistemas.

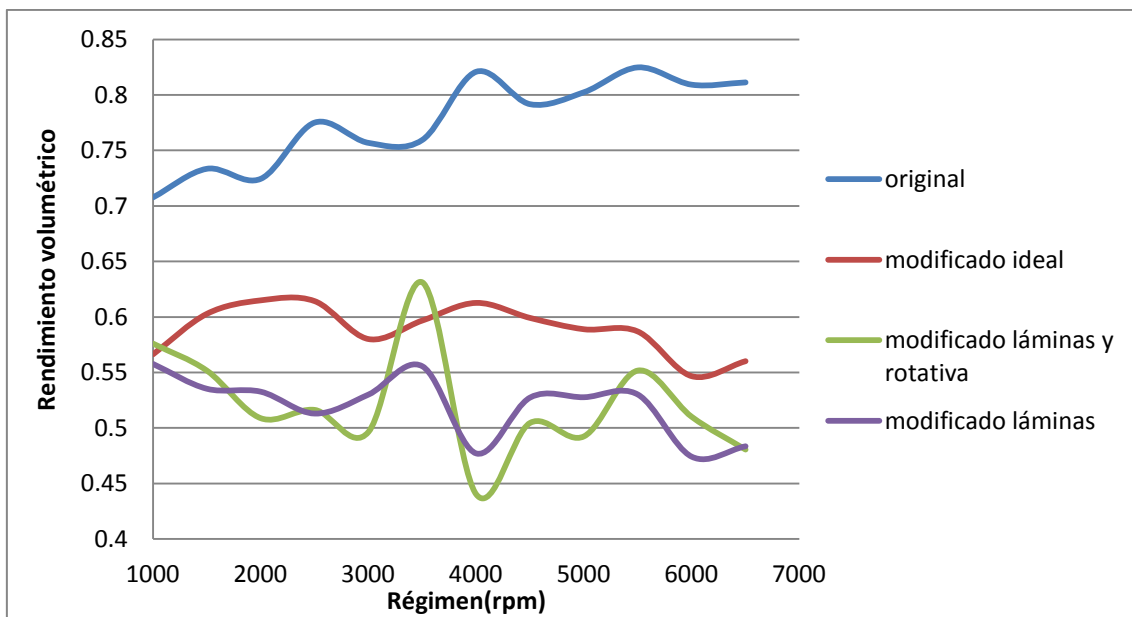


Figura 4.5 Representación gráfica del rendimiento volumétrico de los distintos sistemas.

Queda claro pues, que otra de las causas por las que el motor equipado con el sistema de distribución alternativo en cualquiera de sus configuraciones pierde potencia con respecto al original debido a que no es tan eficaz llenando el cilindro, entre otras cosas.

El dato más interesante y puede que esperanzador para este sistema es que en la oscilante curva de rendimiento volumétrico que presenta la configuración que emplea láminas y válvulas rotativas existe un pico que alcanza un valor más o menos razonable (0,63 aproximadamente) a 3500 rpm, que podría hacer pensar que se han sintonizado los colectores de admisión el motor para esta velocidad de giro. Pues bien, si se consiguiera sintonizar para 4000 rpm obteniendo un valor algo más alto del rendimiento volumétrico puede ser que se obtuviera un punto de funcionamiento en el que las prestaciones no fueran tan dispares con respecto al motor que monta el sistema de distribución original, al ser el rendimiento efectivo a ese régimen superior en el motor con el sistema alternativo de válvula rotativa y láminas.

#### 4.1.2 Análisis de los resultados obtenidos en la fracción de gases quemados

Los resultados obtenidos en este parámetro sirven como indicador de cómo está realizando el motor el proceso de renovación de la carga, ya que se trata de la proporción del gasto másico del cilindro correspondiente a los gases resultantes de la combustión que queda en el cilindro tras la realización del ciclo, y que por tanto formará parte de los gases del ciclo siguiente, con las consecuencias que esto pueda tener. En el caso de que el valor de este parámetro sea elevado, se podrá afirmar que el motor no está renovando bien la carga, con las pérdidas de rendimiento y prestaciones que eso provoca.

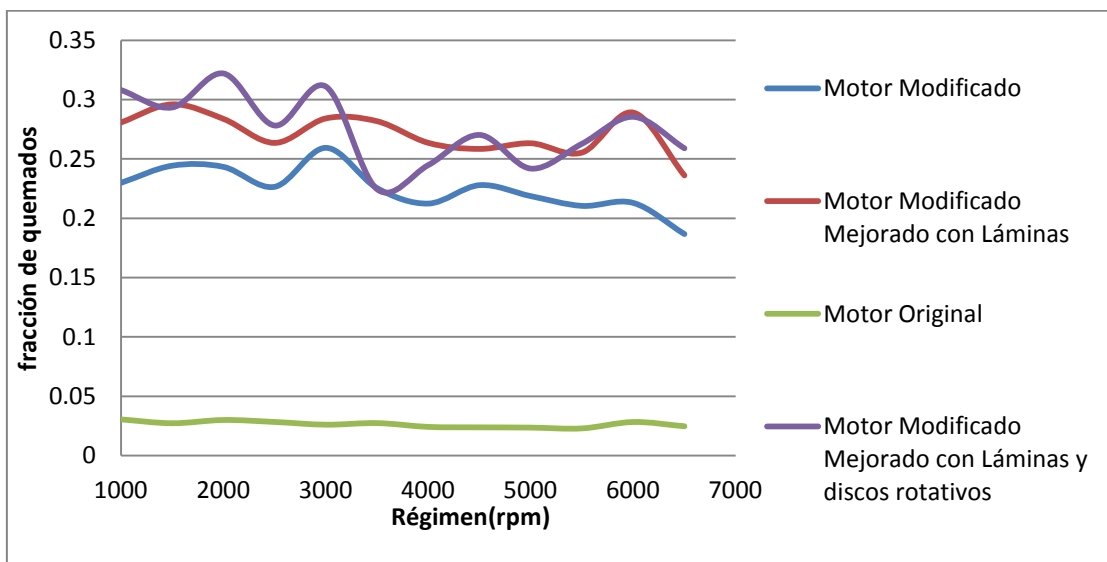


Figura 4.6 Representación de la fracción de quemados a final de ciclo de los sistemas.

En la figura 4.6 se han representado los valores de la fracción de estos gases al final del ciclo referidas al cilindro 1, a las diferentes velocidades de giro, de las diferentes configuraciones. Tal y como se ha comentado en apartados posteriores, se observa un aumento considerable de este parámetro, desde valores poco significativos en los que se sitúa la curva del motor original (los gases quemados remanentes no llegan ni al 5%) a valores que no deben ser despreciados y que seguramente influyan en las prestaciones y rendimiento del motor, como en el caso del sistema de válvulas rotativas y láminas, que llega a sobrepasar el 30%.

A la vista de estos resultados, puede afirmarse que el sistema de distribución alternativo, en todas sus configuraciones, tiene problemas para evacuar este tipo de gases, por lo que la supuesta ventaja que parecía suponer utilizar todas las válvulas para evacuar gases y para llenar el cilindro está resultando ser inexistente, según está indicando este parámetro y otros, como el rendimiento volumétrico.

Para comprobar si esta afirmación es cierta, se escoge un régimen y se representa la cantidad masa de uno de los cilindros de cada configuración a lo largo del ciclo. En la figura 4.7 pueden observarse los resultados del cilindro 1 a 4000 rpm. El dato interesante que aporta esta representación gráfica son los valores de masa al final del ciclo, cuando se acaba el proceso de admisión y el cilindro se encuentra lleno. En las diferentes configuraciones del sistema de distribución alternativo se observa que este valor baja con respecto al sistema convencional, lo que respalda la idea de que no se consigue llenar mejor el cilindro mediante el empleo de este sistema.

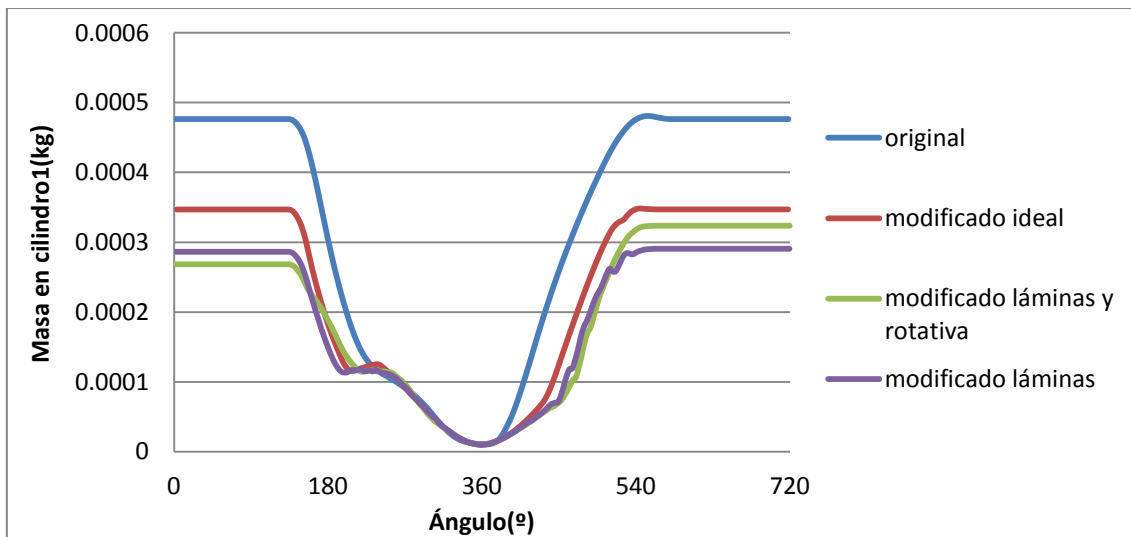


Figura 4.7 Masa en el cilindro 1 a 4000 rpm a lo largo del ciclo de los diferentes sistemas.

Si además se tiene en cuenta lo aportado por el parámetro de la fracción de gases quemados, se detecta que el problema es doble, ya que no sólo no se está consiguiendo llenar el cilindro mejor, sino que además la mezcla de gases que se introduce es de peor calidad. Lo que puede estar ocurriendo es que la renovación de los gases en el depósito no se esté realizando correctamente.

Por tanto, la conclusión que puede sacarse de este análisis es que el sistema de distribución alternativo no soluciona el problema de llenado y vaciado del cilindro que plantea el uso de sistemas convencionales, sino que lo traslada a otro elemento, el depósito de gases, y a los elementos que se haya escogido para orientar el flujo (láminas, válvulas rotativas...). Al igual que ocurre con las válvulas y el cilindro, de cómo se diseñen estos elementos dependerá la eficiencia del sistema para renovar la carga, pero por los resultados obtenidos, especialmente los del modelo con elementos ideales, que en teoría tiene unos orientadores de flujo perfectos, no parece que vaya a ser muy superior a la de un sistema convencional.

## **4.2 Conclusiones**

Puesto que ya se ha realizado un análisis en profundidad de los resultados obtenidos, es el momento de finalizar el estudio de este sistema de distribución mediante la extracción de las conclusiones oportunas, que en este caso se centrarán fundamentalmente en torno a dos aspectos: el funcionamiento del sistema, sus prestaciones y posibles ventajas frente al sistema convencional, y las posibles aplicaciones prácticas que el sistema podría tener en la realidad.

### **4.2.1 Funcionamiento del sistema. Ventajas frente al sistema convencional**

Como ya se ha podido apreciar en los resultados obtenidos y en el análisis de éstos, el sistema convencional obtiene valores más favorables de los parámetros en un mayor rango de velocidades de giro del motor. No obstante, en el análisis posterior se ha podido observar que la configuración del sistema alternativo que emplea válvulas rotativas y láminas tiene puntos de funcionamiento en los que obtiene valores favorables de algunos parámetros, como por ejemplo de rendimiento efectivo, siendo además en ese punto los valores de otros parámetros no demasiado negativos, por lo que si se llegara a optimizar el funcionamiento del motor en ese punto puede que sí que fuera capaz de mejorar al motor original en él.

Por tanto, parece ser que lo que los resultados apunten a que un motor equipado con este tipo de sistema de distribución, en cualquiera de sus configuraciones con elementos reales, no funciona bien en un amplio espectro de régimen de giro, sino que tiene un punto de funcionamiento en el que los parámetros, todos o alguno de ellos, alcanzan sus valores más altos consiguiendo unas buenas condiciones de operación del motor, que se traducen en unas buenas prestaciones o eficiencia.

Existe otra ventaja sobre el sistema convencional, orientada al aspecto del control de emisiones contaminantes, algo de gran relevancia si el sistema llegara a implementarse a un motor real que quiere ser introducido en el mercado. Se trata de que el motor equipado con este sistema alternativo consigue de manera natural el efecto producido por el llamado sistema de EGR (figura 4.8), un mecanismo que recircula parte de los gases del escape hacia el cilindro de nuevo, consiguiendo así grandes reducciones en las emisiones de los óxidos de nitrógeno (NOx). Los altos valores de la fracción de gases quemados así lo demuestran, alcanzando valores a ciertos regímenes muy parejos a los típicos en un sistema de EGR, que suele ser de un 20% de recirculación.

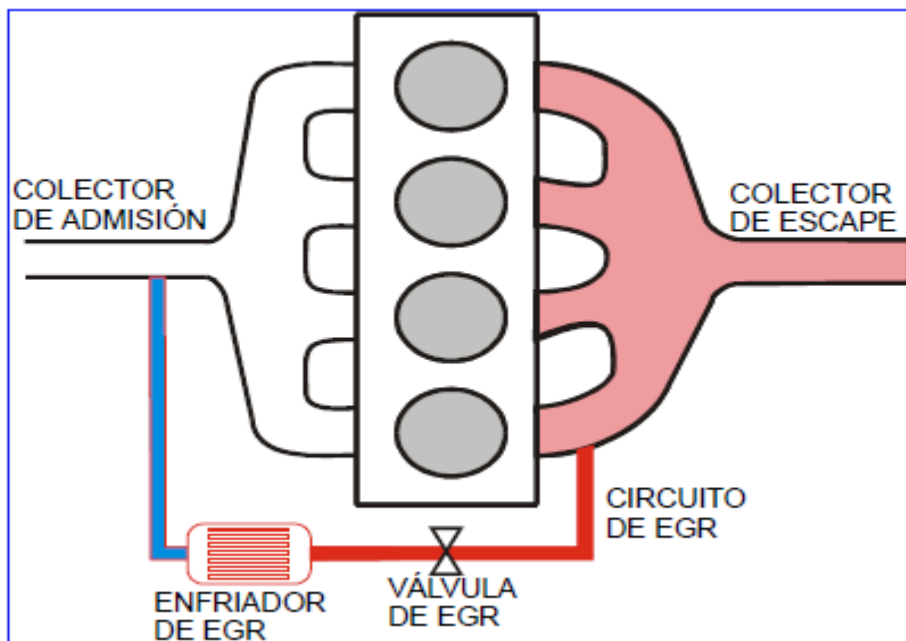


Figura 4.8 Esquema de un sistema de EGR de un motor convencional.

Este sistema es perjudicial para las prestaciones (potencia, par), así que en este aspecto el motor original ha jugado con ventaja en la simulación, puesto que no lo equipaba, pero en la realidad seguramente tendría que montar uno de ellos para pasar la normativa de emisiones, con las correspondientes repercusiones que esto tendría en sus prestaciones. En cambio, el sistema alternativo seguramente no requeriría del empleo de este sistema.

## 4.2.2 Posibles aplicaciones del sistema

Tras la identificación de los posibles puntos positivos del sistema, el siguiente paso a dar es buscar en qué aplicación práctica de la vida real su utilización puede suponer una ventaja o un avance tecnológico. Cabe destacar que las aplicaciones que se sugieren en este apartado se basan en los resultados obtenidos del modelo en OpenWAM de un motor que empleaba un sistema de distribución convencional y que ha sido modificado para equipar el alternativo, y que por tanto no estaba diseñado para tal propósito, por lo que puede que un motor diseñado para utilizar esta configuración obtuviera resultados diferentes que le permitieran servir para más propósitos.

Debido a que las curvas de par efectivo y potencia efectiva no aseguran unas prestaciones demasiado brillantes en la mayoría del rango de velocidades de giro se descarta su uso para aplicaciones en las que el régimen de giro varíe ampliamente, como por ejemplo en la mayoría de vehículos. En este campo sólo tendría alguna posibilidad con los que emplearan transmisiones automáticas tipo variador, donde el régimen varía bastante menos que en una transmisión manual y podría adaptarse el funcionamiento a la pequeña región en la que el motor con este sistema consigue buenos valores de los parámetros, donde probablemente conseguiría ser un motor eficiente con buenos consumos y con la anteriormente mencionada ventaja de la recirculación natural de los gases de escape que realiza el sistema sin emplear el EGR, por lo que probablemente sería bastante sencillo adaptarlo a las normativas de emisiones.

Como motor de apoyo en vehículos híbridos también podría tener cabida, siempre que se consiguiera que trabajara al régimen en el que se consigue una buena eficiencia, algo que mediante la combinación con los motores eléctricos debería poder conseguirse.

Aun así, esta aplicación no es la más recomendable para este sistema, puesto que según la información aportada por los resultados del estudio sólo consigue resultados positivos, sobretodo de rendimiento efectivo a un determinado régimen, 4000 rpm, por lo que las aplicaciones en las que se trabaja a velocidad constante parecen ser la mejor de las opciones posibles. Así, la generación de energía eléctrica o la cogeneración podría ser un buen campo de aplicación de este sistema de distribución, que sería incapaz de desbancar por eficiencia a los enormes grupos diesel de generación de electricidad en plantas pero sí que podría sustituir a los grupos electrógenos de tamaño pequeño, que muchas veces emplean motores de gasolina con sistemas de distribución convencionales, con los que sí que podría competir.



Estos son los posibles campos de aplicación que se le han encontrado este innovador sistema de distribución. Resulta curioso que finalmente se haya asociado este sistema a usos en los que el régimen no varía o lo hace muy poco, y además no se trabaje en la zona alta del espectro de velocidades de giro, precisamente donde inicialmente se pensaba que un motor equipado con esta configuración iba a obtener mejores resultados, puesto que lo que se suponía que iba a mejorar era el llenado del cilindro a altas vueltas, una de las tareas que resulta ser más crítica en los sistemas de distribución convencionales.

La causa de que se hayan obtenido estos resultados reside en que mediante el empleo de este sistema de distribución lo que se hace realmente no es solucionar los problemas de renovación de la carga en el cilindro, sino trasladarlos a otros elementos, el depósito de gases y los elementos de orientación del flujo (láminas, válvulas rotativas...), que presentan problemas de diseño y funcionamiento muy similares a los que puedan presentar los elementos del sistema convencional (válvulas, colectores...). Además este sistema emplea más elementos que el convencional, de hecho aprovecha parte de los elementos originales, introduciendo más pérdidas y, por tanto, repercutiendo negativamente en las prestaciones y en el funcionamiento del motor.

En definitiva, se trata de un sistema que puede que si se diseña correctamente teniendo en cuenta la aplicación y las condiciones de funcionamiento puede que obtenga unos resultados algo mejores que un motor con sistema convencional, pero difícilmente lo suficientemente superiores como para que consiguiera reemplazarlo o siquiera llegar a entrar en el mercado, debido al elevado coste que supondría el cambio de criterios de diseño que debería asumirse para hacer de esta idea una realidad.

## 5 ANÁLISIS ECONÓMICO

Antes de comenzar, es conveniente mencionar que el análisis económico y el cálculo del presupuesto que se va a realizar en este apartado corresponden a la realización del análisis del sistema de distribución mediante el programa informático, y no a su implementación en la realidad, ya que no es el objetivo de este trabajo de fin de grado. Este hecho, por otra parte, simplifica bastante la elaboración del presupuesto, que únicamente tendrá costes de horas de trabajo y no materiales, al realizarse con un programa informático que además, es gratuito.

### 5.1 Determinación y cuantificación de las tareas realizadas

En este apartado se va a recopilar y a agrupar cada una de las tareas realizadas para la elaboración del trabajo, asociándole a cada una de ellas las horas correspondientes para su finalización, repartiendo así las horas asignadas a la duración de este proyecto que en este caso son 300 horas.

Lo más sencillo en este caso para dividir el proyecto en fases o unidades de obra es seguir un orden cronológico, ya que en este caso las tareas se han realizado secuencialmente con una relación entre ellas de inicio de una con la finalización de la inmediatamente anterior.

Siguiendo este criterio, las tareas y la duración de las mismas es la siguiente:

1. Caso de partida. Configuración inicial
  - 1.1 Implementación del modelo inicial en el programa: 5 horas
  - 1.2 Realización del estudio paramétrico y obtención de resultados: 10 horas
  - 1.3 Organización de los ficheros de salida y análisis de parámetros: 10 horas

TOTAL HORAS FASE 1: 25

2. Modelado del sistema con elementos ideales
  - 2.1 Implementación del modelo del sistema en el programa: 20 horas
  - 2.2 Realización del estudio paramétrico y obtención de resultados: 20 horas
  - 2.3 Organización de ficheros de salida y análisis de parámetros: 20 horas

TOTAL HORAS FASE 2: 60

3. Modelado del sistema con elementos reales
  - 3.1 Implementación de la configuración con láminas y válvula rotativa: 35 horas
  - 3.2 Realización del estudio paramétrico y obtención de resultados: 20 horas
  - 3.3 Búsqueda de configuraciones alternativas: 10 horas
  - 3.4 Implementación de la configuración del sistema de láminas: 20 horas
  - 3.5 Organización de ficheros de salida y análisis de parámetros: 20 horas
  - 3.6 Realización del estudio paramétrico y obtención de resultados: 20 horas

TOTAL HORAS FASE 3: 125

4. Comparativa de sistemas
  - 4.1 Selección de parámetros a comparar: 5 horas
  - 4.2 Elaboración de la comparativa: 15 horas
  - 4.3 Análisis de resultados y extracción de conclusiones: 20 horas

TOTAL HORAS FASE 4: 40

5. Elaboración del documento de memoria del proyecto
  - 5.1 Designación de la estructura y los apartados del documento: 5 horas
  - 5.2 Elaboración del primer borrador del documento: 35 horas
  - 5.3 Corrección de errores y elaboración del documento definitivo: 10 horas

TOTAL HORAS FASE 5: 50

TOTAL HORAS DEL PROYECTO: 300

## **5.2 Elaboración del presupuesto**

Una vez clara la estructuración de las fases del proyecto y su duración, se procede a calcular el presupuesto. Dada la sencillez del cálculo se ha prescindido del uso de programas informáticos para su elaboración, ya que se trata de un trabajo que puede ser realizado por unas pocas personas en un despacho y no de un proyecto de construcción por ejemplo, en el que multitud de recursos humanos y materiales.

Se elige como remuneración una cifra coherente con lo que cobraría una ingeniería al realizar este trabajo, que es de 40 €/hora. De este modo, por fases y en total el coste del proyecto es:

- Fase 1: 1000 €.
- Fase 2: 2400 €.
- Fase 3: 5000 €.
- Fase 4: 1600 €.
- Fase 5: 2000 €.

COSTE TOTAL DE LAS HORAS DE TRABAJO DEL PROYECTO: 12000 €.

COSTES INDIRECTOS (30% DEL COSTE DE LAS HORAS): 3600 €.

COSTE TOTAL DEL PROYECTO: 15600 €.

El coste del proyecto puede parecer elevado, pero si se tiene en cuenta que si se hubiese optado por realizarlo mediante ensayos experimentales, el coste económico de esta operación se habría disparado, debido a que para realizar este tipo de ensayos hace falta emplear una gran cantidad de recursos (materiales, de personal...) y normalmente se tarda más tiempo en realizarlos que si se opta por el uso de modelos. No es de extrañar entonces que muchas de las empresas del mundo del motor utilicen modelos al menos en parte del proceso de desarrollo de sus productos, visto el ahorro en esfuerzos económicos, materiales, de personal y de horas de trabajo que se consigue utilizando esta estrategia.

Volviendo al caso concreto del presupuesto de este proyecto, sería recomendable para ahorrar un poco más en costes poder contratar en primer lugar las dos primeras fases del proyecto pudiendo decidir después si se continúa o no con el estudio en función de los resultados obtenidos, pues en esta parte es donde se ve si la ventaja competitiva que puede extraerse de la idea existe realmente o no.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- PAYRI, F. et al. *Motores de combustión interna alternativos*. Gandía (Valencia): Reverté, UPV, 2011.