



# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO MODELADO DEL SISTEMA DE SOPLO DE ACEITE EN UN MCIA

Autor: Ignacio Lazaro Abrisqueta

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

Modelado del sistema de sople de aceite en un MCIA

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Ignacio Lazaro

Fecha: 10 / 07 / 2023

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Juan Norverto Moriñigo

Fecha: 13 / 07 / 2023

DE NORVERTO Firmado digitalmente  
MORIÑIGO por DE NORVERTO  
JUAN - MORIÑIGO JUAN -  
09746499L 09746499L  
Fecha: 2023.07.13  
18:47:54 +02'00'





# GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

## TRABAJO FIN DE GRADO MODELADO DEL SISTEMA DE SOPLO DE ACEITE EN UN MCIA

Autor: Ignacio Lazaro Abrisqueta

Director: Juan Norverto Moriñigo

Madrid



# Agradecimientos

Sería una larga lista de nombres si enumerase a todos aquellos a los que querría agradecer su ayuda en la elaboración de este trabajo, pero en lugar de hacerlo, simplemente comentaré que me gustaría agradecer a todos aquellos que han estado involucrados de forma más o menos activa en facilitarme el que entregue este proyecto terminado. Todos aquellos con los que he vivido, compartido días de estudio, e incluso con los que he compartido días de trabajo.



# **MODELADO DEL SISTEMA DE SOPLO DE ACEITE EN UN MCIA**

**Autor: Lazaro Abrisqueta, Ignacio**

Director: Norverto Moriñigo, Juan

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Este proyecto ha tenido como objetivo en análisis y modelado del funcionamiento de los sistemas de ventilación de vapores del cárter, en el cual se ha estudiado el comportamiento de las variables de comportamiento claves del sistema bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

**Palabras clave:** Cárter, Blow-by, Recirculación

### **1. Introducción**

El presente proyecto ha tenido como objeto de estudio los sistemas de ventilación de vapores del cárter, los cuales son un sistema integrado en los motores de combustión interna que se encargan de recircular los vapores, que se filtran de la combustión que ocurre en el interior de los cilindros al interior del bloque motor, nuevamente de vuelta al sistema de admisión del motor.

Estos sistemas asumen un papel fundamental en el funcionamiento de los motores de combustión, ya que por un lado regulan el que la presión en el cárter no alcance valores que pongan en peligro a los demás componentes del motor, así como aseguran el que gases de alto potencial contaminante no se expulsen a la atmósfera, sino que se devuelvan al ciclo de combustión.

### **2. Definición del proyecto**

Este proyecto está focalizado en modelar y simular el comportamiento de los sistemas de ventilación del cárter. Previamente al desarrollo y realización de dicho modelo resulta necesario entender el funcionamiento de estos sistemas, así como las diferentes tipologías de sistemas, ya que luego más adelante se seleccionará un tipo de sistema concreto dimensionado para un motor de combustión tipo, ya no resulta posible hacer un modelo genérico para todos los tipos de sistemas.

Estos sistemas de ventilación de vapores del cárter forman parte del sistema de lubricación de los motores de combustión interna, los cuales se encargan de mantener todos los componentes móviles del motor debidamente lubricado de aceite para disminuir los desgastes y fricciones. En particular la función de los sistemas de ventilación de vapores del cárter dentro de este sistema es la de mantener controlada la presión en el cárter, parte imprescindible del sistema. Además de esto, también se encargan de que los gases encerrados en la cavidad compuesta por el cárter y la tapa de balancines se renueven asegurándose que estos estén lo más libres de residuos posibles, directamente reduciendo la suciedad del lubricante y aumentando así por consiguiente su vida útil.

### 3. Descripción del modelo

Como se ha comentado previamente, a la hora de desarrollar el modelo y las simulaciones de estos sistemas, resulta necesario tomar un tipo de sistema como referencia. En el caso del presente trabajo, se ha elegido como modelo, un sistema de ventilación de vapores del cárter para un motor diesel, con turbocompresor, con doble recirculación de vapores, tanto a la entrada del turbocompresor como al colector de admisión, además de un respirador que permite la entrada de aire del ambiente para renovar estos vapores. Así mismo, estos vapores previamente a ser recirculados atravesarán un decantador que filtre las partículas de lubricante de mayor tamaño.

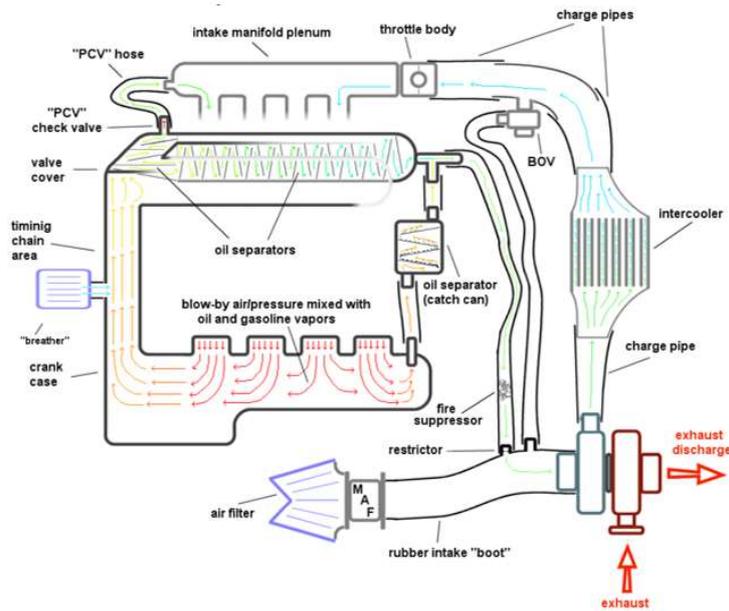


Ilustración 1 - Esquema del sistema de recirculación de vapores modelado [3]

Una vez seleccionado el tipo de sistema como objeto de la realización del modelo, a continuación, resulta necesario a partir de una serie de ecuación traducirlo a un modelo numérico que se pueda simular.

La ecuación principal que se ha empleado es la que establece el equilibrio de masas en el sistema.

$$Q_{int} + Q_{turb} + \frac{\Delta m_{carter}}{\rho} = Q_{amb} + Q_{blow}$$

Dónde  $Q_{int} \equiv$  Caudal recirculado al colector de admisión desde el sistema;  $Q_{turb} \equiv$  Caudal recirculado a la entrada del turbocompresor desde el sistema;  $\Delta m_{carter} \equiv$  Variación de masa encerrada en el sistema;  $Q_{amb} \equiv$  Caudal de entrada al sistema a través del respirador;  $Q_{blow} \equiv$  Caudal de blow-by proveniente de la combustión que entra en el sistema filtrándose a través de los anillos de los pistones.

Adicionalmente, con el objetivo de despejar dicha ecuación en función de los parámetros del sistema y de la presión en el cárter, resulta imprescindible aplicar la ecuación de Bernoulli.

## Ecuación de Bernoulli

$$\frac{1}{2} * p * v_1^2 + p * g * h_1 + P_1 = \frac{1}{2} * p * v_2^2 + p * g * h_2 + P_2$$

$p =$  Densidad del liquido

$v =$  Velocidad del líquido

$g =$  Aceleración de la gravedad

$P =$  Presión

## 4. Resultados

Una vez desarrollado el modelo con el que poder simular el comportamiento de las principales variables a estudiar en el sistema de ventilación de vapores del cárter, se analizarán varios casos para comparar el comportamiento de estos sistemas a través de la representación de dichas variables bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Por un lado, se han analizado una serie de casos de funcionamiento común o habitual, para entender como se comportan estos sistemas bajo situaciones de correcto funcionamiento.

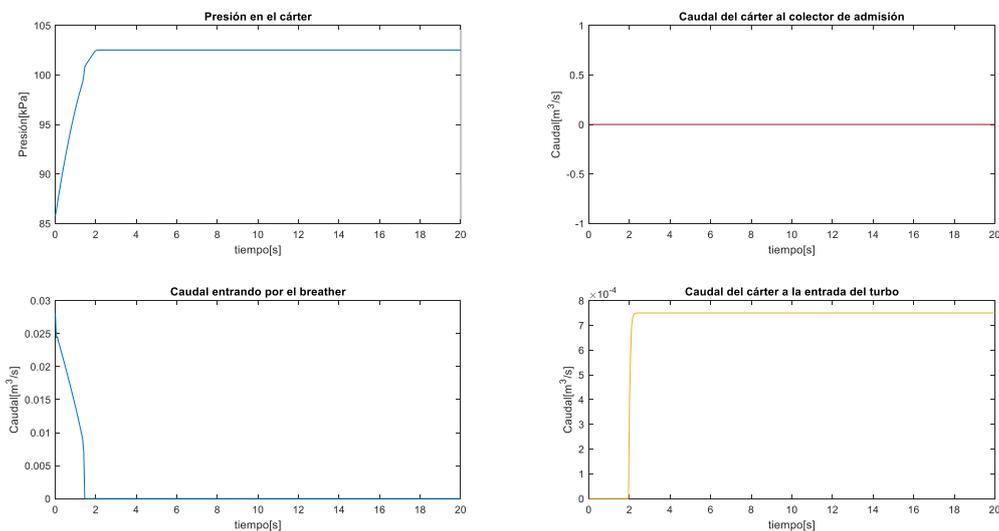
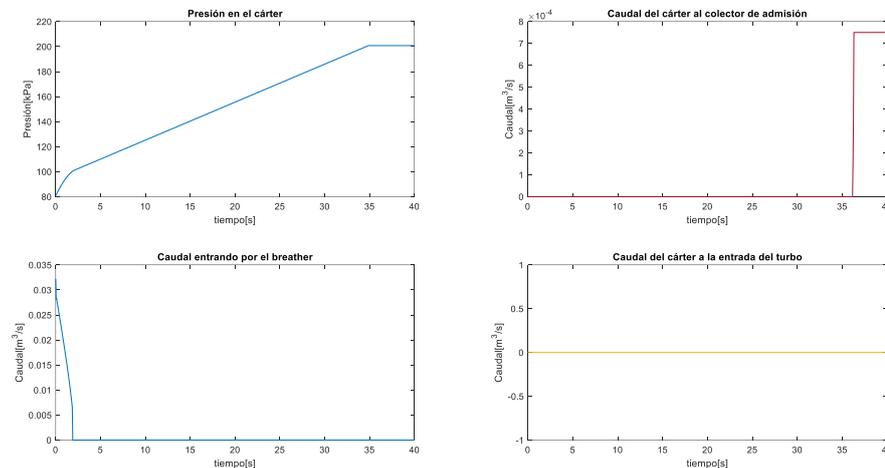


Ilustración 2 – Resultados de simulación para condiciones normales de funcionamiento

En el caso mostrado en Ilustración 2, se observa el comportamiento del sistema en una situación en la que pasa de una situación de baja carga, en la que la presión en el cárter es inferior a la del ambiente por la influencia de la baja presión en el colector de admisión, a una situación de alta carga en la cual se recirculan los vapores del blow-by a la entrada del turbocompresor ya que es la salida del sistema que presenta

una presión más baja, debido a que el efecto del turbocompresor aumenta la presión en el colector de admisión.

A continuación, y a diferencia del caso anterior, se muestra un caso en el que se da un fallo en el sistema, que directamente afecta el funcionamiento de éste, como se puede observar.



*Ilustración 3 – Resultado de simulación de error de válvulas en el sistema*

En la Ilustración 3, se observan los resultados de simular el fallo de la válvula que regula la recirculación de vapores a la entrada del turbocompresor, lo cual tiene un impacto altamente negativo debido a que aumenta la presión en el cárter considerablemente, ya que los gases del blow-by tienen que ser recirculados al colector de admisión por defecto, suponiendo un riesgo a largo plazo para numerosos componentes del motor, y no siendo este sistema capaz de realizar la labor para la que ha sido diseñado.

En estas simulaciones se representan principalmente los transitorios entre situaciones estables, es decir que se representa como pasa de la condición estática de baja carga, a la situación estática de alta carga.

## 5. Conclusiones

Por un lado, el análisis del funcionamiento de estos sistemas, así como los fenómenos que ocurren en los motores de combustión y por los cuales se ven afectados, además de las diferentes tipologías de sistemas, permite entender cuáles son las variables más críticas en el comportamiento de estos sistemas. Por otro lado, permite también entender cuáles son las condiciones de funcionamiento básicas y así como las más críticas, que será interesante simular una vez desarrollado el modelo.

El modelado y la simulación de las diferentes condiciones de funcionamiento de estos sistemas, adicionalmente, permiten observar las variaciones de comportamiento de estos sistemas, así como su sensibilidad a diferentes circunstancias. En este proyecto se ha tratado de simular uno de los sistemas de ventilación de vapores del cárter más complejos, de forma que sea más sencillo hacerse una idea de como podrían funcionar otro tipo de sistemas más simples.

## 6. Referencias

- [1] Markel, A. "PCV VALVE FACTS". Underhood Service. February, 2016.  
<https://www.underhoodservice.com/pcv-valve-facts/>
- [2] Westerman, B. "CJ3A Crankcase Ventilation". February, 2020  
<https://cj3a.info/tech/pcv.html>
- [3] Corkett, K. "How to keep a crankcase breathing". International Online. May, 2011.  
<https://www.iol.co.za/motoring/how-to-keep-a-crankcase-breathing-1075902>
- [4] Cox, J. "Managing Engine Blow-by with Crankcase Ventilation Systems" Solberg Filtration, June 2023. <https://www.solbergmfg.com/es/resources/blog/crankcase-ventilation-system-for-engine-in-the-pow>

# **MODELING OF A CRANKCASE VENTILATION SYSTEM IN AN ICE**

**Author: Lazaro Abrisqueta, Ignacio**

Supervisor: Norverto Morínigo, Juan

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

The objective of this project has been to analyze and model the operation of the crankcase vapor ventilation systems, in which the behavior of the key system performance variables under different operating conditions has been studied.

**Keywords:** Crankcase, blow-by, recirculation

### **1. Introduction**

The object of this project is to study the crankcase vapor ventilation systems, which are an integrated system in internal combustion engines that are responsible for recirculating the vapors that are filtered from the combustion that occurs inside the cylinders to the interior of the engine block, back to the engine's intake system.

These systems play a fundamental role in the operation of combustion engines, since on the one hand they ensure that the pressure in the crankcase does not reach values that endanger the other engine components, and on the other hand they ensure that gases with high polluting potential are not expelled into the atmosphere but are returned to the combustion cycle.

### **2. Definition of the project**

This project is focused on modeling and simulating the behavior of crankcase ventilation systems. Prior to the development and realization of such a model, it is necessary to understand the operation of these systems, as well as the different types of systems, since later on a specific type of system will be selected and sized for a combustion engine type, since it is not possible to make a generic model for all types of systems.

These crankcase vapor ventilation systems are part of the lubrication system of internal combustion engines, which are responsible for keeping all the moving components of the engine properly lubricated with oil to reduce wear and friction. In particular, the function of the crankcase vapour ventilation systems within this system is to keep the pressure in the crankcase under control, which is an essential part of the system. In addition to this, they also ensure that the gases enclosed in the cavity made up of the crankcase and rocker cover are renewed, ensuring that they are as free of residues as possible, directly reducing the fouling of the lubricant and thus increasing its service life

### **3. Description of the model**

As previously mentioned, when developing the model and simulations of these systems, it is necessary to take a type of system as a reference. In the case of the present work, a crankcase vapor ventilation system for a diesel engine with turbocharger has been chosen as a model, with double vapor recirculation, both at the turbocharger inlet and at the

intake manifold, in addition to a breather that allows the entry of ambient air to renew these vapors. Likewise, before being recirculated, these vapors will pass through a decanter that filters the larger lubricant particles.

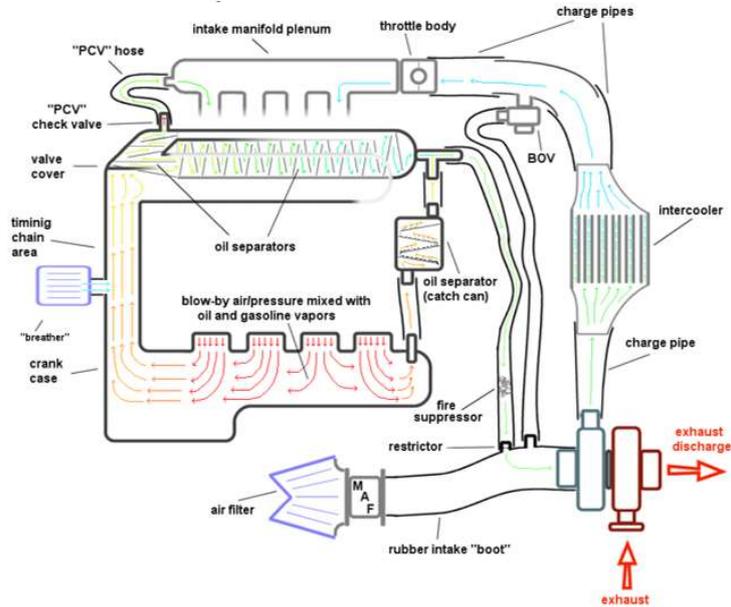


Illustration 1- Schematic of modeled vapor recirculation system [3]

Once the type of system has been selected as the object of the model, it is then necessary to translate it from a series of equations into a numerical model that can be simulated.

The main equation used is the one that establishes the mass balance in the system.

$$Q_{int} + Q_{turb} + \frac{\Delta m_{carter}}{\rho} = Q_{amb} + Q_{blow}$$

Where  $Q_{int} \equiv$  Flow recirculated to the intake manifold from the system;  $Q_{turb} \equiv$  Flow recirculated to the turbocharger inlet from the system;  $\Delta m_{carter} \equiv$  Variation of mass enclosed in the system;  $Q_{amb} \equiv$  Inlet flow rate to the system through the breather;  $Q_{blow} \equiv$  Blow-by flow rate coming from the combustion entering the system filtering through the piston rings.

Additionally, in order to clear this equation as a function of system parameters and crankcase pressure, it is essential to apply Bernoulli's equation.

### Bernoulli's equation

$$\frac{1}{2} * \rho * v_1^2 + \rho * g * h_1 + P_1 = \frac{1}{2} * \rho * v_2^2 + \rho * g * h_2 + P_2$$

$\rho =$  Density of the fluid

$v =$  Velocity of the fluid

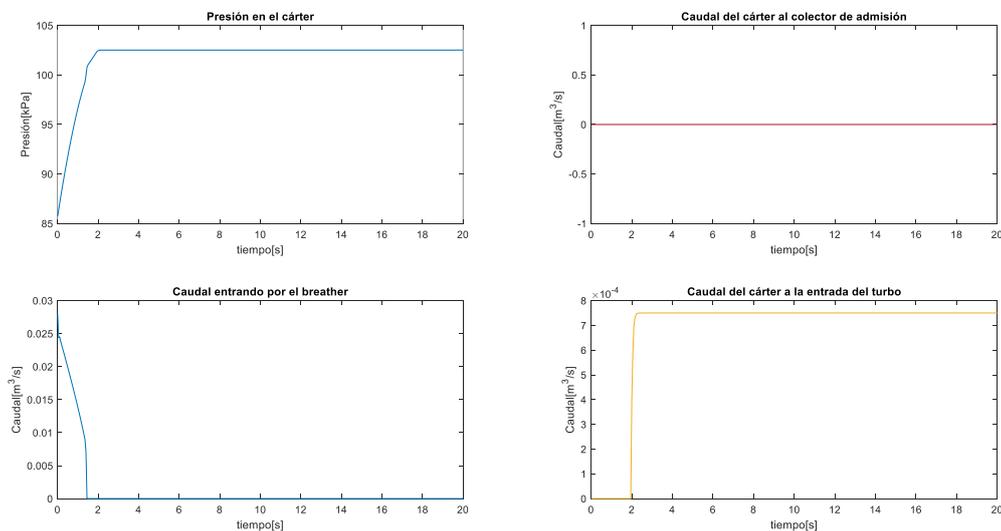
$g = \text{Acceleration of gravity}$

$P = \text{Pressure}$

#### 4. Results

Once the model has been developed to simulate the behavior of the main variables to be studied in the crankcase vapor ventilation system, several cases will be analyzed to compare the behavior of these systems through the representation of these variables under different operating conditions.

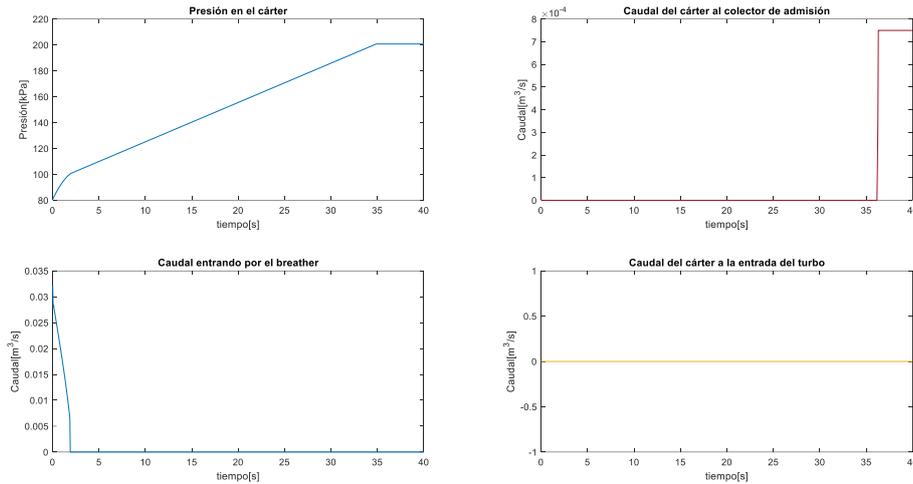
On the one hand, a series of common or usual operating cases have been analyzed in order to understand how these systems behave under correct operating situations.



*Illustration 2 - Simulation results for normal operating conditions*

In the case shown in Illustration 2, the behavior of the system is observed in a situation in which it goes from a low load situation, in which the pressure in the crankcase is lower than the ambient pressure due to the influence of the low pressure in the intake manifold, to a high load situation in which the blow-by vapors are recirculated to the turbocharger inlet since it is the outlet of the system that presents a lower pressure, due to the effect of the turbocharger increasing the pressure in the intake manifold.

Next, and unlike the previous case, a case is shown in which there is a failure in the system, which directly affects the operation of the system, as can be seen.



*Illustration 3 - Simulation result of valve error simulation in the system*

Illustration 3 shows the results of simulating the failure of the valve that regulates the recirculation of vapors at the turbocharger inlet, which has a highly negative impact because it increases the pressure in the crankcase considerably, since the blow-by gases have to be recirculated to the intake manifold by default, posing a long-term risk to numerous engine components, and this system not being able to perform the work for which it was designed.

In these simulations, the transients between stable situations are mainly represented, i.e. how it passes from the low load static condition to the high load static situation.

## 5. Conclusions

On the one hand, the analysis of the operation of these systems, as well as the phenomena that occur in combustion engines and by which they are affected, in addition to the different typologies of systems, allows to understand which are the most critical variables in the behavior of these systems. On the other hand, it also allows to understand which are the basic operating conditions and the most critical ones, which will be interesting to simulate once the model has been developed.

The modeling and simulation of the different operating conditions of these systems, additionally, allow observing the variations in the behavior of these systems, as well as their sensitivity to different circumstances. In this project we have tried to simulate one of the more complex crankcase vapor ventilation systems, so that it is easier to get an idea of how other simpler systems might operate.

## 6. References

- [1] Markel, A. "PCV VALVE FACTS". Underhood Service. February, 2016.  
<https://www.underhoodservice.com/pcv-valve-facts/>
- [2] Westerman, B. "CJ3A Crankcase Ventilation". February, 2020  
<https://cj3a.info/tech/pcv.html>
- [3] Corkett, K. "How to keep a crankcase breathing". International Online. May, 2011.  
<https://www.iol.co.za/motoring/how-to-keep-a-crankcase-breathing-1075902>
- [4] Cox, J. "Managing Engine Blow-by with Crankcase Ventilation Systems" Solberg Filtration, June 2023. <https://www.solbergmfg.com/es/resources/blog/crankcase-ventilation-system-for-engine-in-the-pow>

## *Índice de la memoria*

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>6</b>
1.1 Motivación .....	7
1.2 Objetivos del proyecto.....	8
1.3 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	9
1.4 Metodología del trabajo.....	9
1.5 Recursos a emplear.....	10
<b>Capítulo 2. Estado de la Cuestión .....</b>	<b>11</b>
2.1 Historia de los sistemas de ventilación de vapores del cárter.....	11
<b>Capítulo 3. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>18</b>
3.1 Motores de combustión interna .....	18
3.2 Sistema de lubricación.....	23
3.3 Blow-by .....	25
3.4 Sistema de ventilación de vapores del cárter.....	28
3.5 Rangos de presiones en el cárter recomendadas.....	32
3.6 Tipos de sistemas.....	33
3.6.1 Sistemas de ventilación de vapores del cárter abiertos.....	34
3.6.2 Sistemas de ventilación de vapores del cárter cerrado .....	35
<b>Capítulo 4. Modelo Desarrollado .....</b>	<b>41</b>
4.1 Definición del modelo real del sistema de ventilación de vapores del cárter.....	41
4.2 Modelo físico.....	44
4.3 Aproximación de constantes y otras asunciones .....	48
4.4 Desarrollo del modelo numérico .....	51
4.5 Modelo desarrollado para las simulaciones.....	53
<b>Capítulo 5. Análisis de Resultados.....</b>	<b>58</b>
5.1 Funcionamiento correcto del sistema en condiciones normales.....	58
5.1.1 Paso de reposo a condición de baja carga.....	59
5.1.2 Paso de reposo a carga alta.....	60
5.1.3 Paso de baja carga a carga alta .....	61
5.1.4 Paso de carga alta a baja carga .....	63

5.2	Funcionamiento incorrecto debido a fallos en el sistema.....	64
5.2.1	<i>Acumulación de residuos o suciedad en los conductos o en las válvulas .....</i>	<i>64</i>
5.2.2	<i>Fugas en el sistema por perforaciones en los manguitos.....</i>	<i>68</i>
5.2.3	<i>Obstrucción total de válvulas implicando la imposibilidad de que fluya algún caudal por esos conductos .....</i>	<i>70</i>
5.3	Resumen y posibles soluciones .....	74
<b>Capítulo 6. Conclusiones.....</b>		<b>76</b>
<b>Capítulo 7. Trabajos Futuros.....</b>		<b>78</b>
<b>Capítulo 8. Bibliografía.....</b>		<b>79</b>
<b>ANEXO I – Código de Matlab .....</b>		<b>81</b>

## Índice de figuras

°Figura 1 - Sistemas de ventilación de vapores del cárter abierto [5].....	13
Figura 2 - Patente de uno de los primeros sistemas de ventilación de vapores del cárter [2] .....	14
Figura 3 - Ilustración de la diferencia entre la inyección indirecta (izquierda) .....	16
Figura 4 – Indicación de principales componentes de un motor de combustión interna [17] .....	19
Figura 5 – Sistema de admisión de un motor [18].....	20
Figura 6 – Bloque motor [19].....	21
Figura 7 – Principales partes de un turbocompresor [8].....	23
Figura 8 – Sistema de lubricación [20].....	25
Figura 9 – Proceso de filtración de blow-by [21].....	27
Figura 10 – Geometría y funcionamiento de válvulas [13].....	31
Figura 11 – Clasificación de los sistemas de ventilación de vapores del cárter .....	33
Figura 12 – Funcionamiento de un ventilación de vapores del cárter abierto [22] .....	34
Figura 13 – Esquema del modelo físico empleado para el modelo [4] .....	43
Figura 14 – Esquema del modelo físico simplificado empleado.....	45
Figura 15 – Código referente a la programación de la geometría de las válvulas.....	55
Figura 16 – Código de programación de funcionamiento de válvulas .....	56
Figura 17 – Simulación de caso en condiciones normales de paso de reposo a baja carga	59
Figura 18 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de reposo a alta carga ..	61
Figura 19 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de baja a alta carga .....	62
Figura 20 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de alta a baja carga .....	63
Figura 21 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el conducto encargado de recircular gases al colector de admisión .....	65
Figura 22 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el conducto encargado de recircular gases a la entrada del turbo .....	66

Figura 23 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el breather.....	67
Figura 24 - Simulación de caso de perforación del conducto encargado de recircular vapores al colector de admisión .....	68
Figura 25 - Simulación de caso de perforación del conducto encargado de recircular vapores a la entrada del turbocompresor.....	69
Figura 26 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula reguladora de la recirculación al colector de admisión .....	70
Figura 27 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula reguladora de la recirculación a la entrada del turbocompresor.....	72
Figura 28 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula del breather .....	73

## *Índice de tablas*

Tabla 1 – Principales valores de constantes de pérdidas secundarias en tuberías[15] ..... 51

## **Capítulo 1. INTRODUCCIÓN**

Desde el desarrollo y construcción de los primeros motores de combustión interna se han suscitado numerosos retos que han ido permitiendo a su vez a estos mismos evolucionar y perfeccionarse. De esta misma manera, los problemas a los que se enfrentan los motores de combustión interna en estos últimos años son distintos a aquellos a los que se enfrentaron entonces.

Ahora los principales retos a los que los motores de combustión interna se enfrentan son la contaminación de los mismos, así como su eficiencia y su durabilidad, estrechamente ligados todos ellos al cambio climático. Para afrontar esta problemática, en las últimas décadas se han ido realizando numerosos avances desarrollando los motores de combustión interna hacia un futuro más sostenible y acorde también con el desarrollo de la normativa que regula el nivel de contaminación de los vehículos, la cual se ha ido volviendo más restrictiva. Por esto mismo el desarrollo de los motores de combustión interna ha sido constante y ha implicado un desarrollo íntegro de todos los componentes de este en una misma dirección.

Entre algunos de los avances más significativos se encuentran por ejemplo el desarrollo de los catalizadores, que han tenido un papel fundamental en la reducción de emisiones del sistema de escape, siendo capaces de filtrar y retener hasta un 80 por ciento de las emisiones contaminantes provenientes del motor. Otro área en el que se ha avanzado mucho es en el propio proceso de la combustión, es decir que, gracias a numerosas innovaciones como los sistemas de inyección directa o los turbocompresores, se ha logrado que el motor de combustión interna sea más eficiente y duradero.

Relacionado tanto con el problema de la contaminación, como con el de la durabilidad y la eficiencia, el sistema de lubricación juega un papel muy importante. Este es el encargado por un lado de disminuir la fricción entre componentes, lo cual aumenta la durabilidad de

muchos componentes y mejora la eficiencia, y por otro lado, una función menos conocida del sistema de lubricación, y la cual es el objetivo de estudio de este documento, es la de recircular los gases de la combustión que en ocasiones se escapan de los cilindros al cárter. Estos vapores son particularmente problemáticos ya que producen un aumento de presiones en el cárter y en la tapa de balancines, además de ser potencialmente altamente contaminantes.

El sistema encargado de ello es el sistema de ventilación de vapores del cárter, el cual tiene un papel importante en recircular esos vapores potencialmente contaminantes de forma que no se liberen a la atmósfera y además permite regular la presión del motor evitando graves daños en numerosos componentes. El papel de este sistema es tan importante debido a que los gases que recircula son potencialmente extremadamente contaminantes ya que provienen directamente de la combustión ocasionada en el cilindro, los cuales de ser expulsados a la atmósfera tendrían un impacto nocivo.

Además de todo esto, los sistemas de ventilación de vapores del cárter y su rendimiento tienen un impacto indirecto en numerosos componentes y procesos de los motores de combustión interna. Algún ejemplo de esto podría ser el hecho de que estos sistemas permiten reducir el consumo de aceite del motor, fundamental para alargar la vida útil del mismo, o también el papel que poseen estos sistemas en mantener la admisión del motor libre de aceites, de manera que la combustión pueda realizarse de forma más controlada y permita a los sistemas de filtrado de los gases de escape realizar su labor adecuadamente.

## ***1.1 MOTIVACIÓN***

Este trabajo de investigación tiene como centro de su estudio uno de los principales sistemas encargados del control de contaminantes en los motores de combustión interna. La problemática de la contaminación se trata de un tema que cobra cada vez más importancia en la sociedad, y en torno al cual los motores de combustión interna modernos se han ido

desarrollando, de ahí también la importancia que han ido adquiriendo los sistemas encargados de cumplir esta función y reducir este impacto.

Además, el avance y aumento de la complejidad de los motores ha tenido como consecuencia la necesidad del desarrollo de los sistemas de ventilación del cárter para poder seguir cumpliendo su función, convirtiéndolos en sistemas complejos integrados por numerosos componentes. El correcto funcionamiento de estos sistemas, como ya se ha mencionado anteriormente, resulta crucial para el buen funcionamiento del motor en su conjunto, y la correcta compresión y diseño de estos sistemas resulta fundamental.

Por lo tanto, este trabajo pretende profundizar en el conocimiento de estos sistemas, sus condiciones de funcionamiento y en los principales retos a los que se enfrentan tanto en la actualidad como en un posible futuro con la intención de poder dar soluciones a los mismos o de avanzar en la búsqueda de maneras de continuar desarrollando estos sistemas.

## ***1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO***

- Descripción del funcionamiento del sistema y de sus componentes
- Modelado de un sistema de ventilación de vapores del cárter regido por presiones
- Simulación de las consecuencias del mal funcionamiento de determinados componentes del sistema de ventilación de vapores del cárter
- Reconocimiento de principales fallos en el sistema y sus consecuencias en el funcionamiento de todo el motor
- Posibles formas de prevenir dichos fallos

### ***1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)***

El presente trabajo comparte un propósito similar a varios de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Estos sistemas cumplen la función de disminuir y minimizar las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna, cuya polución tiene un impacto notable en el medioambiente, así como también alargar la vida de los mismos con la consecuencia de reducir la producción de componentes.

Estos efectos trascienden más allá del ahorro económico de los particulares, o de la reducción en la contaminación del aire de determinadas ciudades, sino que contribuye al avance en dar solución a algunos de los principales problemas relacionados con la sostenibilidad.

Por lo tanto, este trabajo busca a través del estudio de los sistemas de ventilación de vapores del cárter el seguir avanzando en la mitigación de estos contaminantes. Ya que algunos de los contaminantes que se reducen presentan un riesgo para el aire y la respiración de la población en un gran número de ciudades, el desarrollo de estos sistemas tiene la intención de mejorar la salud y el bienestar de la población (tercero de la lista de los ODS). Teniendo en cuenta que el objetivo del motor de combustión interna es transformar energía, este sistema contribuye a una producción de energía menos contaminante (séptimo de los ODS), y a una movilidad cada vez más sostenible para el medioambiente (ODS número trece).

### ***1.4 METODOLOGÍA DEL TRABAJO***

Con el objetivo de llevar a cabo este proyecto, se diferencian unas etapas distinguidas entre sí necesarias para la consecución del mismo. Por un lado, será fundamental una familiarización y conocimiento del tema profundos de cara a poder abordar dicho trabajo, así como elaborar una correcta descripción de los principales procesos y componentes del sistema, lo cual se encontrará incluido tanto en el estado de la cuestión o estado del arte, como en la descripción de las tecnologías.

Por otro lado, y a continuación de lo previamente mencionado, el objetivo es llegar a desarrollar un modelo que pueda predecir presiones y caudales del sistema para poder simular los posibles fallos del sistema y sus consecuencias. Una vez esto se haya logrado, la fase restante consistirá en analizar, interpretar y redactar las conclusiones obtenidas de dichos resultados.

## ***1.5 RECURSOS A EMPLEAR***

Las herramientas necesarias para la consecución de dicho trabajo serán, por un lado toda aquella bibliografía que se pueda encontrar relacionada con estos sistemas, así como otros documentos que detallen el funcionamiento de estos sistemas y componentes que se empleen en la fabricación de los mismos. De cara al modelado y simulación del sistema se emplearán aquellos conocimientos y recursos relacionados con la dinámica de gases y el funcionamiento de sistemas cerrados de fluidos.

## **Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

El desarrollo de los sistemas de ventilación de vapores del cárter ha acompañado al de los motores de combustión interna de forma general, es decir, que su desarrollo se ha dado al tratar de cubrir, primero con la invención de este sistema, y más tarde con sus avances, una funcionalidad básica necesaria de los motores. Más tarde también ha tenido la necesidad de desarrollarse con el objetivo de poder cumplir esta función bajo una estricta normativa de emisiones y adaptándose a los diferentes motores que se han ido creando a lo largo de los años. Con el paso del tiempo los motores de combustión interna se han ido volviendo cada vez más complejos, y esto ha ido dificultando su labor al sistema de ventilación de vapores del cárter, convirtiendo también a estos a su vez en sistemas más complejos.

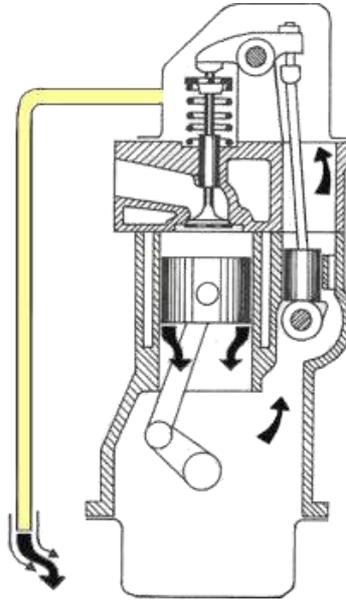
### ***2.1 HISTORIA DE LOS SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE VAPORES DEL CÁRTER***

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter no se inventaron hasta alrededor de treinta años después de la producción de los primeros automóviles, es decir que, si los primeros coches surgieron a finales de la década de 1880, no fue hasta los años veinte cuando surgieron los primeros sistemas de ventilación de vapores del cárter. Esto se debe a la naturaleza inicial de estos motores primitivos, es decir, que sus componentes no estaban sellados completamente y se producían fugas de aceite, lo cual permitía expulsar los residuos que se filtraban de los pistones, diluidos en el aceite y liberar de esta forma la presión del motor de combustión interna.

El primer sistema de ventilación de vapores del cárter consistía en un tubo que salía o bien del cárter o bien de la tapa de balancines, y que tenía el otro extremo abierto al ambiente y localizado en la parte posterior del vehículo. Este sistema permitía expulsar los gases que se

escapaban del cilindro directamente al ambiente y así prevenir el incremento excesivo de presiones dentro del cárter. Este sistema surgió de la necesidad de aumentar la vida de los motores que estaban experimentando problemas, ya que, para evitar el vertido de aceite al ambiente, se fueron produciendo motores más eficazmente sellados. Esto convertía el incremento de presión en el cárter, el cual era debido a la fuga de gases de la combustión, en un problema ya que la presión dentro del cárter no tenía forma de liberarse y terminaba por producir grietas en juntas u otros componentes del motor. Esto es lo que se conoce como sistema de ventilación de vapores del cárter abierto y permite al coche en movimiento expulsar esos gases que se encuentran en el cárter al ambiente. La salida al exterior de estos sistemas se produce en la parte posterior del vehículo con el objetivo de emplear la succión generada por el movimiento del vehículo para desalojar los gases que se encuentran en el cárter y poder de esta manera tener una menor presión en el cárter.

El principal problema de estos sistemas es que liberan gases provenientes del pistón que en ocasiones no han sido combustionados, lo cual implica unos contenidos elevados en hidrocarburos además de otras sustancias, cuyo efecto nocivo en el medioambiente se descubriría más tarde. Además de esto, al liberar estos gases mezclados con los vapores de aceite que también se encuentran en el cárter, se iba perdiendo aceite de forma gradual, lo cual obligaba a añadir rutinariamente aceite al sistema de lubricación para que siempre hubiese líquido de lubricación en el sistema.

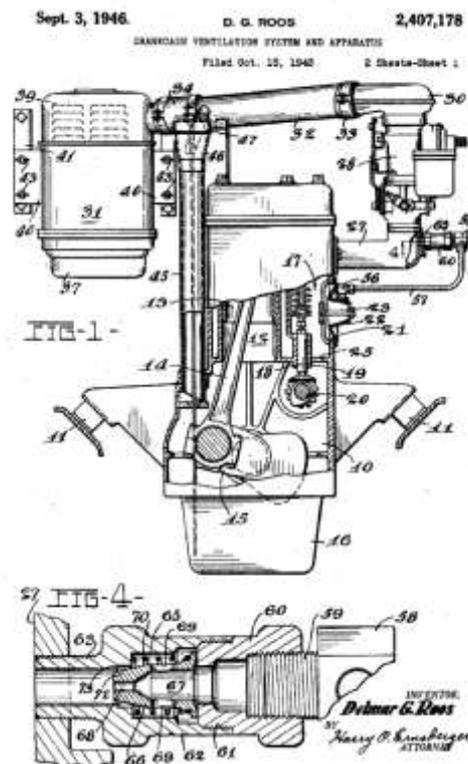


*Figura 1 - Sistemas de ventilación de vapores del cárter abierto [5]*

El primer sistema de ventilación de vapores del cárter cerrado fue ideado durante la segunda guerra mundial, y curiosamente fue con un objetivo totalmente diferente al que hoy mayoritariamente desempeña. Este sistema fue incorporado en el tanque M5 Stuart fabricado por Cadillac, el cual fue ideado con la idea de poder fabricar motores preparados para poder funcionar debajo del agua. En este caso no era viable un sistema de ventilación de vapores del cárter abierto ya que este no podría evitar que se filtrase agua dentro del motor, lo cual inutilizaría el motor en caso de que dichos vehículos tuviesen que atravesar una zona relativamente profunda de agua. Por ello se inventó un sistema de ventilación de vapores del cárter cerrado que no permitiese el filtrado del agua, y de esta manera sellase el sistema. El funcionamiento de estos sistemas de ventilación de vapores del cárter consistía en recircular estos gases que se acumulaban en el cárter al propio motor de manera que volviesen al pistón para así volver al ciclo de la combustión y terminar siendo expulsados por el sistema de escape.

A raíz de la invención de estos sistemas, se fueron integrando estos, y sustituyendo los sistemas abiertos en algunos nuevos modelos, pero no representaba una parte importante de

los vehículos en circulación, ya que en ese momento los sistemas cerrados implicaban una pérdida ligera de prestaciones, y las ventajas respecto a los sistemas abiertos aún no eran conocidos.



*Figura 2 - Patente de uno de los primeros sistemas de ventilación de vapores del cárter [2]*

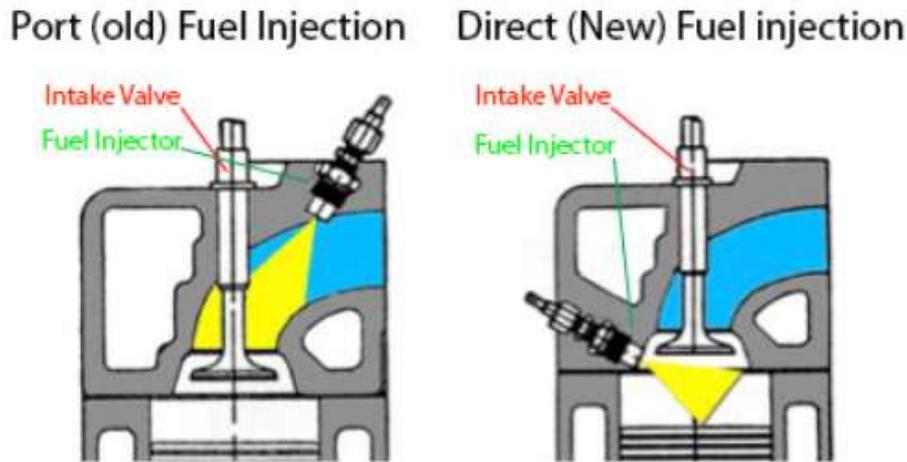
Unos años más tarde, a lo largo de los años cincuenta, se empezaron a publicar estudios, liderados por uno realizado por el profesor de California Institute of California Arie Jan Haagen-Smit, que indicaban que los automóviles eran una de las causas de la contaminación por su emisión de hidrocarburos no combustionados.

A finales de esta misma década, se descubrió que los sistemas de ventilación de vapores del cárter abiertos constituían en torno a la mitad de las emisiones de esos hidrocarburos. Estos

descubrimientos dieron a los sistemas de ventilación de vapores del cárter cerrados una gran importancia y los convirtieron en los primeros sistemas de control de emisiones. Como consecuencia de ello, General Motors propietario de la patente cedió los derechos de la misma al resto de fabricantes. Ya en el año 1961 se obligó en el estado de California a que todos los vehículos nuevos tuviesen que llevar uno de estos sistemas, el primer marco regulatorio que los exigía.

Más tarde, en torno a 1970, el propio Gobierno Federal de los Estados Unidos legislaría sobre estos sistemas y los impondría a todos los vehículos. Además, se aprobaría una ley en el congreso de los Estados Unidos conocida como ley de aire limpio que permitiría a la también formada en ese año Agencia de Protección Medioambiental (EPA) a establecer unos estándares de emisiones.

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter fueron desarrollándose a la par que los demás componentes del motor para poder seguir desempeñando su función bajo las exigencias y necesidades requeridas. De esta forma la siguiente gran evolución vino en la década de 1990 vino con la fabricación de los primeros sistemas de inyección directa y con el crecimiento en el desarrollo de motores diesel. Estos sistemas suscitaban una problemática, y era que como el combustible se liberaba dentro del pistón, residuos de aceite que se encontraban en los vapores recirculados del cárter podían adherirse a las válvulas y obstruirlas parcialmente. Esto no era un problema hasta ese momento ya que la mezcla de aire y gasolina era capaz de limpiar las válvulas con su paso.



*Figura 3 - Ilustración de la diferencia entre la inyección indirecta (izquierda) y la directa (derecha) [16]*

Por este motivo surgió la necesidad de realizar un filtrado de los vapores provenientes del cárter para reducir al máximo las partículas de aceite contenidas en el flujo de aire que se recirculaba. La introducción de un decantador de aceite, nombre del componente capaz de separar las partículas de aceite, supuso también un avance de estos sistemas más allá de lo que implicaba su función principal, puesto que permitía también reducir el consumo de aceite puesto que el aceite filtrado es devuelto al cárter para que pueda ser nuevamente utilizado por el sistema de lubricación.

Ya entrados en los años 2000, se empezaron a comercializar un número cada vez mayor de motores que empleaban turbocompresores. Esto se debe por un lado a que los motores diesel fueron siendo cada vez más populares sobre todo en Europa, y teniendo en cuenta que los motores de combustión interna diesel es más común que usen turbocompresores que los motores de combustión interna gasolina, hizo que la producción de motores con turbos aumentase. Por otro lado, las propias ventajas de los turbos fueron cada vez más conocidas, ya que permitían fabricar motores de la misma potencia más pequeños. Esto supuso nuevamente un reto para los sistemas de ventilación de vapores del cárter ya que, debido a las características de los turbocompresores, la presión en el colector de admisión podía llegar

a valores más elevados y esto podía eliminar la succión y que los gases no fuesen recirculados. Por ello, se desarrollaron nuevos sistemas de ventilación de vapores del cárter que tenían dos conductos para recircular los gases, uno que desembocaban en la entrada al turbocompresor, y otro que llegaba directamente al colector de admisión.

A la par de esto, en algunos países en los que las temperaturas alcanzan valores extremadamente bajos, se descubrió que se daban algunos problemas con los sistemas de ventilación de vapores del cárter bajo este tipo de temperaturas. A muy bajas temperaturas al juntarse los gases provenientes del cárter con el aire proveniente de la toma de aire, el agua contenida en los vapores del cárter se podía llegar a congelar y a obstruir la válvula que regula el paso de los mismos, lo cual supondría un problema grave para el funcionamiento del sistema. Para dar solución a esto, se idearon para ese tipo de situaciones calentadores del sistema de ventilación de vapores del cárter para evitar esto problemas.

Además de estos avances y evoluciones, a medida que ha ido avanzando la tecnología se han ido añadiendo sensores a este sistema que permiten entre otras cosas medir flujos de gases, advertir de la necesidad de mantenimiento o medir temperaturas y presiones. Esto ha permitido incluso el desarrollo de algunos sistemas de ventilación de vapores del cárter controlados electrónicamente, de manera que en función de la información recabada por todos los sensores se pudiesen controlar las diferentes válvulas del sistema para lograr un rendimiento del sistema más eficiente.

Uno de los avances en este ámbito fue la implementación de sensores capaces de medir el efecto de vacío generado por la succión de los pistones, con la intención de ser capaces de calibrar de una manera más precisa el caudal, así como el momento en el que recircular estos gases a la entrada de aire al motor.

## **Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS**

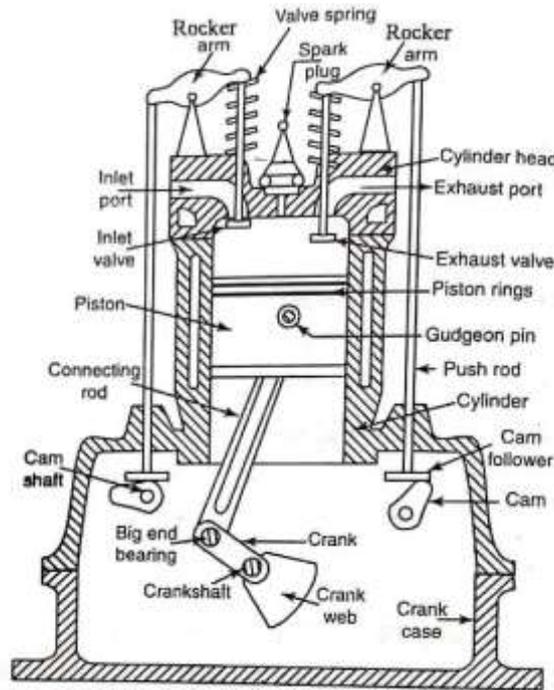
El presente trabajo, como ya se ha comentado al comienzo del mismo, busca analizar el funcionamiento de los sistemas de ventilación de vapores del cárter, sistemas complejos encargados de recircular los gases alojados en el cárter, de manera que se pueda controlar la presión dentro del propio cárter. Para lograr comprenderlo, será fundamental comprender tanto los fenómenos que rigen su funcionamiento como el comportamiento de todo el sistema en el que trabaja, es decir, el motor de combustión interna y sus diferentes subsistemas.

Además de todo esto, se describirán los fenómenos de funcionamiento que dan sentido a este sistema y que le harán trabajar de una manera o de otra. De hecho, una gran parte de los componentes de los motores de combustión interna tendrá un efecto directo o en su defecto indirecto en el funcionamiento de los sistemas de ventilación de vapores del cárter, por lo que tener una noción de todo ello permitirá comprender de una manera más profunda el desarrollo y forma de trabajo de estos sistemas.

### ***3.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA***

Con el objetivo de entender más en profundidad el funcionamiento de los sistemas de ventilación de vapores del cárter es necesario tener unas nociones generales del funcionamiento, los componentes y los procesos que ocurren en los motores de combustión interna.

Un motor de combustión interna es un tipo de motor, el cual es de los tipos de motores el más común, que transforma la energía química contenida en el combustible en energía mecánica a través de la combustión o explosión del combustible. Estos motores están compuestos por diferentes sistemas y componentes que se encargan del correcto funcionamiento del mismo. Estos motores se instalan en una amplia variedad de vehículos, desde coches o motocicletas, hasta barcos o incluso aeronaves, a pesar de que en estas últimas se ha ido reduciendo radicalmente su uso.



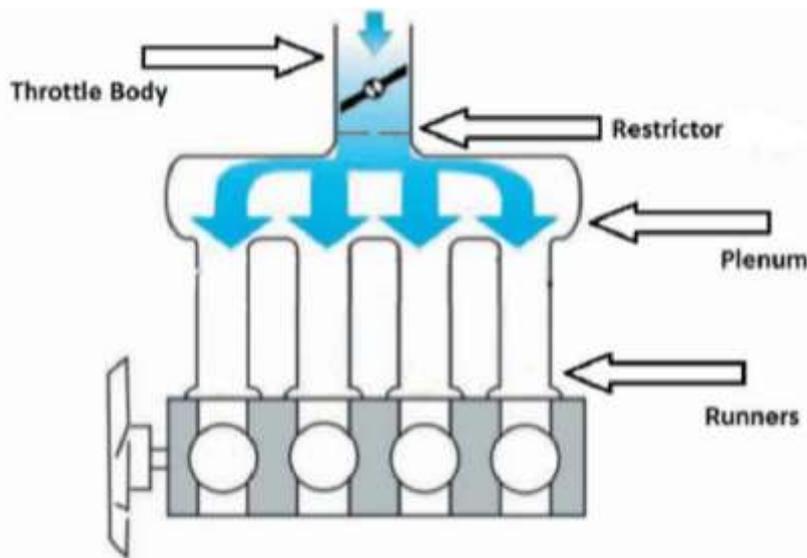
*Figura 4 – Indicación de principales componentes de un motor de combustión interna [17]*

El funcionamiento de la mayoría de los motores de combustión interna es similar, a pesar de que haya ligeras variaciones en función del tipo de combustible, los diferentes sistemas de inyección, etc.

Los motores de combustión interna en los que se emplean sistemas de ventilación de vapores del cárter son motores de cuatro tiempos en los que la combustión se produce en cuatro fases. La admisión, por un lado, en la que entra el aire, o la mezcla de aire y combustible en el cilindro. La compresión, a continuación de la admisión, en la que se comprime la mezcla, a la que sigue la expansión, fase en la que se produce la mayor parte de la combustión, y por último la fase de escape, última fase en la que se expulsan los gases que han resultado de la combustión. Estas cuatro fases componen un ciclo que se repite continuamente una vez tras otra.

La combustión como se ha mencionado será consecuencia de la explosión de la mezcla de aire y combustible dentro del cilindro. Esta mezcla no siempre tendrá la misma densidad, y en los motores diesel además podrá tener diferente relación entre la cantidad de aire y la de

combustible. Para regular la cantidad de aire y combustible que entran al cilindro se encuentran diferentes sistemas que participan de ello. Por un lado, en el caso de la regulación de entrada de aire para la mezcla, en la admisión se encuentra una válvula conocida como válvula de mariposa que restringe la cantidad de aire en función de su ángulo de apertura. Por otro lado, el sistema de inyección es el encargado de la regulación de combustible que entra al cilindro. Existen diferentes tipos de sistemas de inyección de combustible para los motores de combustión interna, principalmente en función de en que momento se inyecta el combustible y también de la forma que se hace.



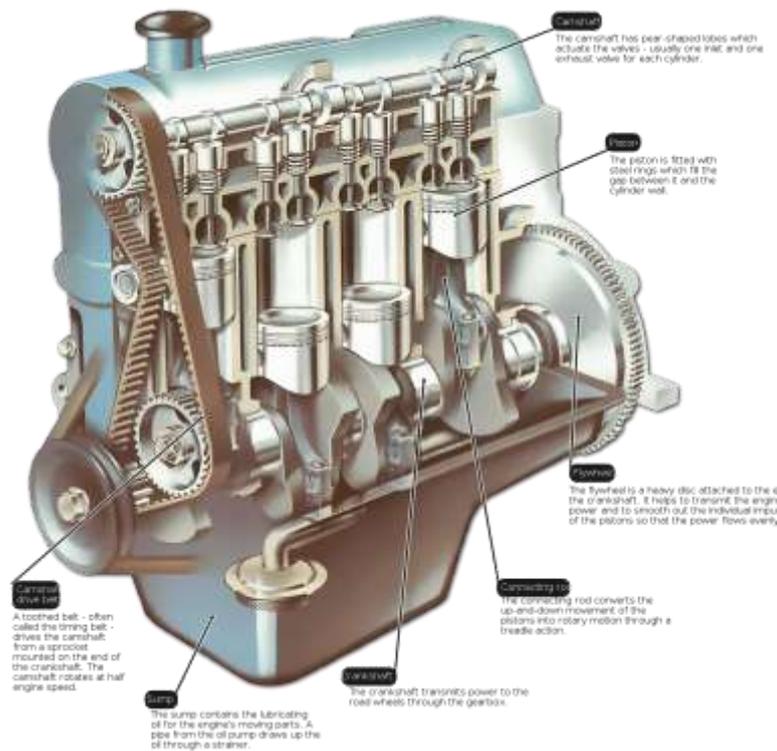
*Figura 5 – Sistema de admisión de un motor [18]*

La energía generada por la combustión es transmitida del pistón al cigüeñal el cual transmite el movimiento al resto de partes del vehículo, entre ellos por ejemplo al árbol de levas, el cual controla la apertura de las válvulas tanto de admisión como de escape para regular el paso de aire de los colectores de admisión y escape.

Las principales diferencias entre los motores diesel y los de gasolina radican en particularidades del ciclo de combustión. Por un lado, en los motores de gasolina el combustible y el aire se mezcla previo a la combustión, y se requiere de una bujía que origine

una chispa para dar comienzo a la combustión. En cambio, en el caso de los motores diesel, el combustible se inyecta durante la combustión y este se mezcla instantáneamente con el aire dando lugar a la combustión. Estos últimos motores no requieren de ninguna chispa ya que combustión por las altas temperaturas y presiones a las que se llega en el cilindro.

Todos estos componentes que están involucrados en la combustión se encuentran alojados en el bloque motor, el cual es la estructura principal del motor. Esta es la que soporta al resto de componentes.



*Figura 6 – Bloque motor [19]*

Como se puede observar en la figura superior, todos los componentes del motor se encuentran encerrados dentro del bloque motor. Este a su vez presenta, además de su parte central, un espacio inferior conocido como cárter en el que se deposita el lubricante, así como otro espacio superior conocido como tapa de balancines, los cuales están conectados por el

espacio que hay en la parte izquierda donde se encuentran las correas que transmiten la rotación del cigüeñal al árbol de levas. Esta cavidad entendida como el conjunto de estos espacios será el volumen en el que se encontrarán los gases objeto del estudio de este trabajo.

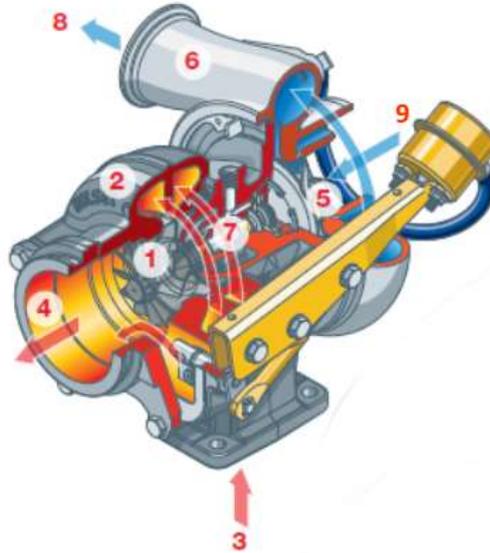
Estos gases que se encuentran encerrados dentro del cárter ofrecen una resistencia al movimiento del pistón a lo largo del proceso de la combustión, y por esto mismo, cuanto mayor sea la presión de estos gases, además de poder dañar algunos componentes, también aumentará la resistencia al movimiento de los pistones.

Por otro lado, respecto al desarrollo de los sistemas de admisión en los motores de combustión interna, se empezaron a emplear sistemas que pudiesen aumentar la presión del aire de entrada para poder aumentar la cantidad de mezcla que entra al cilindro. Estos sistemas se encargan de comprimir el aire que entra en el sistema de admisión, de manera que la presión aumente y se consiga por lo tanto introducir un mayor flujo de aire.

Dentro de estos sistemas encargados de aumentar la presión de la admisión se diferencia dos variantes, por un lado, los conocidos como turbocompresores, y por el otro, los sistemas que se conocen como sobrealimentadores (turbocharger y supercharger en inglés). Los primeros sistemas que se desarrollaron fueron los sobrealimentadores, los cuales emplean la energía generada por el motor y transmitida por el cigüeñal, para hacer rotar un compresor.

Más tarde se desarrollaron los sistemas conocidos como turbocompresores. Estos se diferencian principalmente de los sobrealimentadores en la fuente de energía que emplean para hacer rotar el compresor. En el caso de los sobrealimentadores se emplea la rotación del cigüeñal, y en este caso, en el de los turbocompresores, se emplea la energía de los gases de escape que salen del cilindro para, a través de hacerlos atravesar una turbina son capaces de hacer rotar el compresor, ya que tanto el compresor como la turbina están unidos por un eje común. Este tipo de sistema es el más común dentro de los motores de combustión empleados para coches comerciales, ya que resultan muy eficientes al emplear energía de los gases de escape que si no se perdería.

- 1- Hélice de la turbina
- 2- Carcasa de la turbina
- 3- Entrada de los gases de escape
- 4- Salida de los gases de escape
- 5- Hélice del compresor
- 6- Carcasa del compresor
- 7- Eje conector
- 8- Salida del aire de la admisión
- 9- Entrada del aire de la admisión



*Figura 7 – Principales partes de un turbocompresor [8]*

### **3.2 SISTEMA DE LUBRICACIÓN**

Los sistemas de lubricación, como ya se ha mencionado en múltiples ocasiones con anterioridad, son una parte fundamental de los motores de combustión interna, cuyo papel es imprescindible para el correcto funcionamiento del mismo. Estos sistemas tienen un impacto muy significativo en algunas funciones de los motores de combustión interna que se mencionarán más adelante.

En primer lugar, el sistema de lubricación de un motor de combustión interna es el encargado de tanto transportar como distribuir el aceite de lubricación por toda aquella parte que tenga algún movimiento dentro del motor, ya que estas son las partes susceptibles tener fricción y rozamiento con otros componentes del motor. De esta manera, lo que se busca no es solo reducir la fricción de estos componentes lubricados, sino también reducir su temperatura, así como evitar que suciedad o impurezas se depositen en componentes del motor.

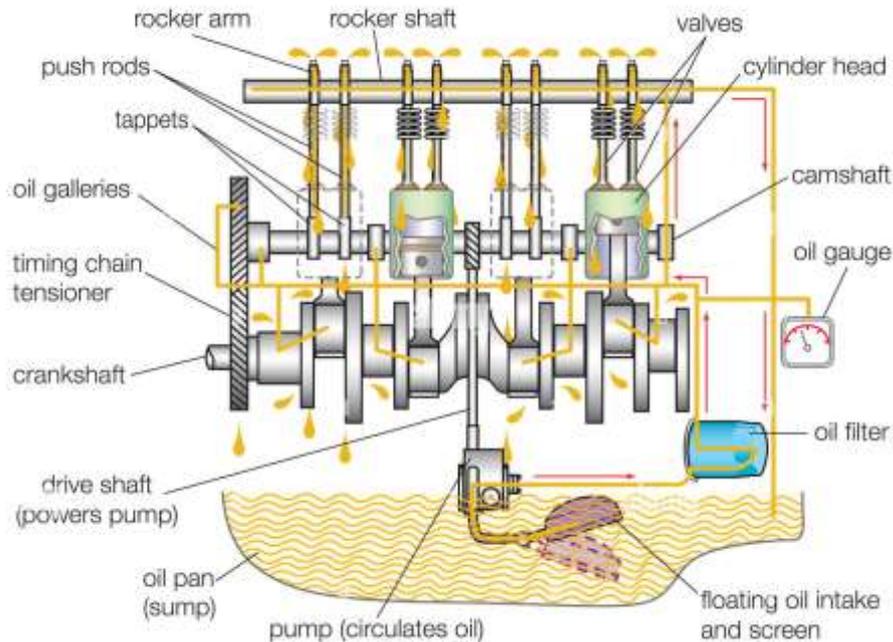
Dentro de los sistemas de lubricación hay numerosas variantes, lo cual significa que hay una cantidad considerable de diferentes tipos de sistemas de lubricación. Estos se pueden diferenciar unos de otros en función del tipo de lubricante que empleen, la forma en la que se distribuye o se impregna a los componentes que requieren lubricación, así como de la disposición de líneas de transporte, válvulas y otros componentes.

En la mayoría de los motores, especialmente el tipo de motores que presentan los sistemas de ventilación de vapores del cárter que se van a analizar, el lubricante es un aceite, el cual a su vez puede ser de numerosos tipos en función de su viscosidad o su origen, entre otras cosas.

Los componentes principales y comunes a los sistemas de lubricación son los siguientes:

- **Bandeja de aceite o cárter:** Se trata del recipiente en el que se almacena el aceite y al que vuelve el mismo una vez haya realizado todo su ciclo. Esta a su vez también es la parte inferior del bloque motor.
- **Bomba de aceite:** Componente que se encarga de suministrar la presión necesaria al sistema para poder transportar el lubricante a todas las partes del motor. La bomba está normalmente impulsada por la correa de distribución, el cigüeñal o alguno de los otros componentes rotativos del motor.
- **Filtro de aceite:** El filtro de aceite es el encargado de limpiar aquellos depósitos, partículas u otro tipo de suciedad que se pueda encontrar en el lubricante, con el objetivo de prevenir que estas puedan llegar a los componentes del motor.
- **Tubo de recogida:** Se trata del conducto que recoge el lubricante de la bandeja de aceite dando comienzo al ciclo de este.
- **Enfriador de aceite:** Componente encargado de disipar el calor del lubricante que ha acumulado durante el proceso de lubricación de los componentes móviles del motor. Estos sistemas generalmente están compuestos principalmente por un radiador que funciona como intercambiador de calor.
- **Sistemas de control de la presión del cárter:** También conocidos como sistemas de ventilación de vapores del cárter, son los sistemas objeto de este trabajo, y los

encargados de regular que la presión del cárter no se incremente, con el objetivo de proteger todos los componentes del motor.



*Figura 8 – Sistema de lubricación [20]*

Como se puede observar en la figura anterior, el lubricante dentro del sistema sigue un ciclo circular. En primer lugar, la bomba de aceite succiona el aceite del cárter y lo dirige, pasando primero por el filtro de aceite, a todos los componentes del motor que requieren de lubricación. El lubricante una vez impregna a los componentes del motor, va cayendo por el efecto de la gravedad, poco a poco hacia abajo hasta terminar llegando nuevamente al cárter.

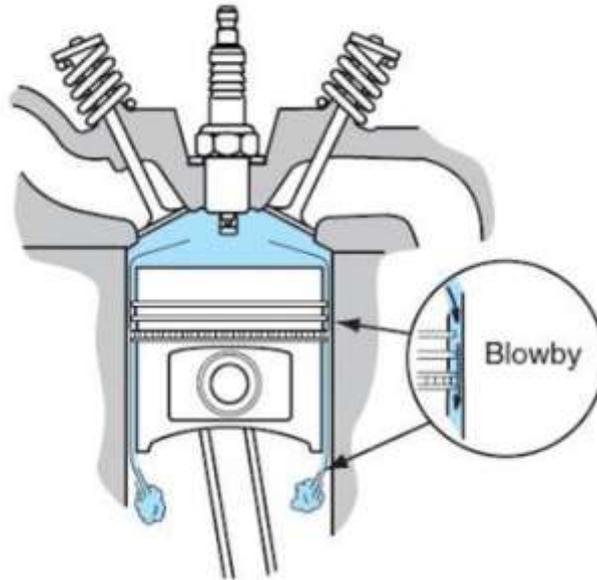
### **3.3 BLOW-BY**

El fenómeno conocido como blow-by es el principal motivo por el que se desarrollaron los sistemas de ventilación de vapores del cárter y resulta necesario entender cómo y porque se

origina, así como qué consecuencias tiene, para poder analizar los sistemas de ventilación de vapores del cárter en más profundidad.

El blow-by es como se conoce el fenómeno en el que la mezcla de aire y combustible se filtra entre el pistón y el cilindro al cárter, a través de los anillos que sellan el pistón. El blow-by ocurre tanto en motores diesel como en motores de gasolina, lo cual evidencia que puede ocurrir por numerosas razones, y en una medida reducida es algo inevitable. Uno de los motivos fundamentales por lo que ocurre esto, es por las altas presiones que se experimentan en el cilindro a lo largo de la combustión. Estos picos de presiones propician el que en diferentes circunstancias la mezcla de combustible y aire pueda escapar del cilindro y entrar en la cavidad del cárter y la tapa de balancines. Por esto mismo, dentro del ciclo de la combustión que se mencionaba con anterioridad, este fenómeno conocido como blow-by se produce principalmente en la fase de expansión, ya que es en la cual se produce la mayor parte de la combustión, siendo así mismo posible que también se produzca en la fase de la compresión. Se mencionaba previamente que el blow-by en una medida reducida es inevitable, lo cual se debe a numerosos factores, entre ellos los más importantes son, por un lado, el hecho de que los anillos del pistón no son perfectos, además de que en caso de que lo fuesen seguirían necesitando algo de holgura, y por ello son incapaces de sellar perfectamente el cilindro del resto del motor.

Por otro lado, estos anillos con el tiempo y el kilometraje del propio motor se van desgastando, lo cual facilita el que les sea más sencillo escapar a estos gases. Este es uno de los motivos también por el que la lubricación resulta tan fundamental, para reducir los efectos del desgaste al mínimo y alargar la vida de los componentes. Además de todo esto, los motores no funcionan siempre bajo las mismas condiciones, por ello, variaciones en parámetros como la temperatura, pueden generar dilataciones o contracciones que faciliten una vez más el favorecimiento de este fenómeno. Por esto mismo, en el momento de arranque del motor, en ocasiones resulta el momento más crítico en cuanto al flujo de blow-by, ya que los componentes del motor están más fríos y contraídos, lo cual facilita el que dichos gases del cilindro puedan escaparse al cárter y a la tapa de balancines.



*Figura 9 – Proceso de filtración de blow-by [21]*

En la figura superior se puede observar como el cilindro está en uno de sus puntos de mayor presión, y a su vez como parte de la mezcla se filtra a través de los anillos del pistón hacia el cárter.

Debido a la naturaleza del motivo por el que se origina este fenómeno, la cantidad de gases de la combustión que se filtran a la cavidad compuesta por el cárter y la tapa de balancines, varía dependiendo de las condiciones de funcionamiento del motor. Esto es, por un lado, en función del nivel de carga del motor este flujo será mayor o menor, es decir, que cuanto más se el exija al motor, y mayor se la cantidad de mezcla que entra al mismo, mayor será la cantidad de estos gases que se filtran, debido principalmente a que el pico de presiones es mayor.

Además de estos también afectarán otras variables como, principalmente el rodaje o kilometraje del motor y de los anillos del pistón, así como la temperatura o presión del entorno entre otras.

### **3.4 SISTEMA DE VENTILACIÓN DE VAPORES DEL CÁRTER**

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter con el paso del tiempo se han ido volviendo más complejos, además de haberse desarrollado también sistemas específicos para cada tipo de motor y condiciones de funcionamiento. Por esto mismo, en el presente trabajo se explicarán cada uno de los diferentes tipos de sistemas y la aplicación de cada uno de estos.

A pesar de ello, hay características generales para todos estos sistemas. Por un lado, y como resulta lógico, su finalidad fundamental es común, todos los tipos de sistemas de ventilación de vapores del cárter se encargan de redirigir los gases blow-by que se filtran a través de la junta entre pistón y cilindro a la cavidad del cárter, de manera que, como ya se ha mencionado, se pueda controlar la presión dentro de la cavidad del cárter y la tapa de balancines. Por otro lado, la estructura subyacente de estos sistemas está principalmente compuesta por conductos por los que se circulan estos gases, así como por válvulas que regulan el paso de estos gases. Como se mencionará cuando se entre en más detalle de cada tipo de sistema, lo que variarán serán los distintos componentes adicionales de algunos sistemas, así como la geometría del sistema y las salidas a las que se redirijan estos gases.

Como salidas de estos gases que se encuentran en la cavidad compuesta por el cárter y la tapa de balancines podemos diferenciar tres grandes grupos. Por un lado, estará el ambiente o la atmósfera como salida, lo cual como se explicó con anterioridad en la gran mayoría de los casos ya no está permitido. Por otro lado, la más común de las salidas se trata del sistema de admisión del motor, de manera que estos gases que han escapado del cilindro durante la combustión son recirculados nuevamente de forma que puedan realizar el ciclo completo. Por último, se encuentra el sistema de escape que en ocasiones muy particulares también se puede emplear como salida para los gases del cárter, lo cual ocurre principalmente en aplicaciones de vehículos de competición.

Las válvulas que se emplean en estos sistemas se encargan, por un lado, de regular el flujo de gases del sistema, así como la de impedir que puedan circular en sentido inverso estos

gases, de manera que solo permitan que salgan flujos de gases del cárter, para evitar que gases provenientes de la admisión puedan entrar al cárter e incrementar la presión. De hecho, esta funcionalidad de las válvulas está principalmente ideada para los casos en los que ocurre el fenómeno conocido como petardeo, lo cual consiste en un mal proceso de combustión en el que ésta no se produce únicamente en el cilindro, sino que parte de ella escapa o bien al escape o a la admisión. En este caso la situación que concierne es en la que la combustión escapa a la admisión, ya que esto aumenta drásticamente la presión en la admisión, lo cual en caso de no emplearse este tipo de válvulas llevaría a un aumento de presión en el cárter no deseable.

Estas válvulas son diseñadas, de manera que se pueda regular la cantidad de gas que circula a través de los conductos del sistema. Más adelante se comentarán con más detalle las distintas condiciones de funcionamiento del sistema y como afectan a este, pero con el objetivo de comprender el funcionamiento de estas válvulas es necesario tener una noción básica de ello.

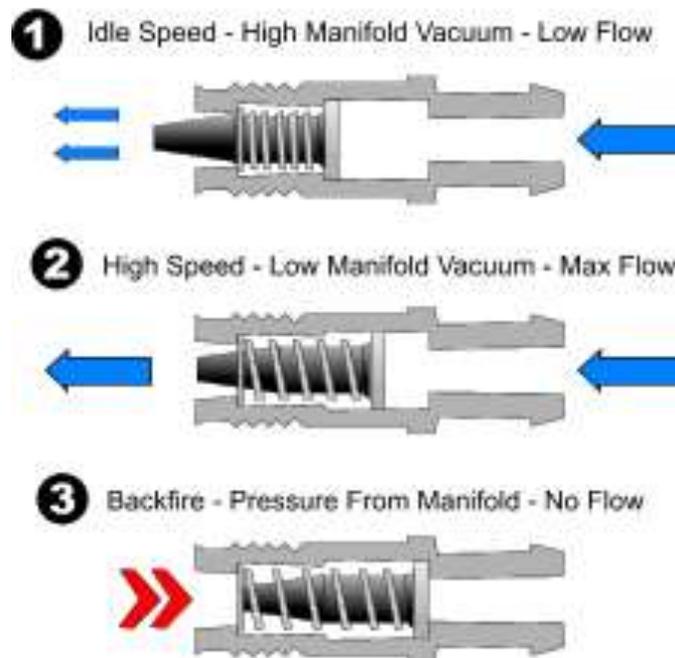
Para el análisis del funcionamiento de estas válvulas distinguiremos cuatro condiciones de funcionamiento:

- **Apagado:** Se trata de la condición de funcionamiento en la que el motor está apagado y el motor no se encuentra funcionando. En este caso las válvulas se encontrarán cerradas con el fin de evitar que puedan entrar en el sistema gases provenientes del sistema de admisión o para evitar que ningún gas contaminante que se encuentre en el sistema pueda emitirse al exterior a través del sistema de admisión.
- **Baja carga:** En este caso el motor no requerirá de mucha mezcla de aire y combustible ya que no tiene que producir apenas potencia, por lo que la válvula de mariposa, que controla la cantidad de aire que entra al colector de admisión y a los cilindros, se encontrará en una posición bastante cerrada, lo cual significará que la presión dentro del colector de admisión será baja. Esto favorecerá el flujo de gases del cárter ya que la diferencia de presiones entre el cárter y la admisión será alta. Además de esto, al estar trabajando a baja carga y bajas revoluciones, el flujo de gases blow-by

provenientes del cilindro durante la combustión será reducido. Esto significará que el motor no requerirá de una alta recirculación de gases. Debido a estas dos circunstancias, estas válvulas están diseñadas para que cuando la válvula esté sometida a un alto diferencial de presiones la válvula restrinja el flujo.

- **Media carga:** Para el caso de media carga, el motor estará trabajando en unas condiciones en las que la válvula que regula el paso de aire al colector de admisión estará en una posición intermedia, en la que la presión en el colector de admisión será superior a la presión en el caso de baja carga. Por otro lado, el flujo de blow-by será superior, por lo que en este caso la válvula del sistema de ventilación de vapores del cárter no tendrá que restringir tanto el paso de gases.
- **Máxima carga:** En este último caso, la situación es la opuesta al caso de baja carga. Al estar el motor demandando la máxima cantidad de aire, la presión en el colector de admisión será la máxima de todo su rango de funcionamiento. Además, el flujo de gases de la combustión que se filtran al cárter también será máximo, por lo que en este caso la válvula tendrá que estar en la posición en la que más favorezca el flujo de estos gases.

Debido a estas diferentes condiciones de funcionamiento y requisitos de estas válvulas, su geometría deberá estar diseñada para poder restringir el flujo de gases cuanto mayor sea el diferencial de presiones, así como cerrarse en caso de que el diferencial de presiones sea negativo, es decir, que la presión de la salida sea mayor que la del sistema. Esto último, como se ha mencionado con anterioridad ocurrirá tanto en casos en los que se dé el petardeo y la presión se incremente en el sistema de admisión, así como también situaciones en las que haya una recirculación al colector de admisión en un motor con turbocompresor, en el que la presión dentro del colector de admisión pueda ser considerablemente superior a la presión atmosférica.



*Figura 10 – Geometría y funcionamiento de válvulas [13]*

En la Figura 10 – Geometría y funcionamiento de válvulas, mostrada en la parte superior se observa un ejemplo de cómo podría ser la geometría de una de las válvulas empleadas en los sistemas de ventilación de vapores del cárter. Como se puede apreciar el muelle está unido a un tapón, el cual está diseñado para controlar el flujo que atraviesa la válvula en función de lo comprimido que se encuentre el muelle en cada punto de funcionamiento. De esta forma, cuando el muelle se encuentre completamente elongado, la válvula obstruirá totalmente el flujo y no permitirá el paso de gases. A medida que el muelle se vaya comprimiendo por el aumento del diferencial de presiones la válvula se irá abriendo y desplazando el tapón hacia la izquierda en el caso de la figura mostrada. Por la geometría de este tapón, cuanto más se acerque a la zona izquierda, ya que su sección en la zona de la salida irá aumentando, limitará más el paso de los gases cuyo flujo controla este sistema. Esta geometría tan particular, lo que busca es, de una forma mecánica, regular el flujo en función de las condiciones del motor. Esto a su vez permite que se puedan diseñar diferentes geometrías en función de cada motor en particular, ya que cada uno tendrá unas características muy diferentes.

El diseño de esta geometría de las válvulas podrá depender del tamaño de los conductos del sistema, de hacia dónde se estén recirculando los gases, de los rangos de presiones y caudal de blow-by del sistema, así como de otros posibles parámetros.

Por último, se observa en la Figura 10 – Geometría y funcionamiento de válvulas otro caso llamado backfire. Esto hace referencia a situaciones en las que por un fallo en la combustión del motor, la combustión comienza o continúa en el momento en el que la válvula que regula la entrada de aire en el cilindro desde el colector de admisión está abierta, lo cual dispara las presiones dentro del sistema de admisión y resulta muy peligroso para el sistema de ventilación de vapores del cárter, por lo que estas válvulas están diseñadas para que en ese momento se cierren instantáneamente y no permite el paso de dichos gases al cárter disparando la presión también en este.

### **3.5 RANGOS DE PRESIONES EN EL CÁRTER RECOMENDADAS**

Resulta importante dedicar una breve sección a aclarar aquellos valores de presión en el cárter considerados como óptimos. Esto permitirá a lo largo de todo el trabajo, y sobre todo en la parte de las simulaciones y análisis de resultados, comprender de una manera más rápida aquellos datos que se estén observando.

En primer lugar, la presión óptima dentro del cárter es una presión inferior a la presión atmosférica, debido a que de esta forma se favorece por un lado la labor de los anillos del cilindro para que lo sellen de forma más efectiva, y por otro lado se reduce el esfuerzo realizado por los pistones en movimiento para desplazar los gases encerrados en el cárter ya que la presión es más baja. Este rango óptimo dependerá de cada uno de los motores, así como de muchas otras variables, pero estará en torno un 80%-90% de la presión atmosférica.

Una vez mencionado esto, resulta complicado lograr mantener estos valores de presión en el cárter de manera continuada en todas las condiciones de funcionamiento del motor, por lo que valores razonables de presión dentro del cárter también serían todos aquellos que no superen excesivamente la presión atmosférica. Se entiendo por superar excesivamente la

presión atmosférica, exceder dicho valor en más de un 10%-15%, de manera que valores superiores ya podrían tener en el largo plazo impactos negativos en el funcionamiento del sistema.

### 3.6 TIPOS DE SISTEMAS

Durante el desarrollo de los motores de combustión interna y de los sistemas de ventilación de vapores del cárter se han ido generando diversas necesidades particulares dependiendo de la aplicación deseada de cada uno. Por ello, diferencias en la utilidad, el tipo de combustible o de método de carburación, tiene como consecuencia que exista un amplio número de diferentes tipos de sistemas de ventilación de vapores del cárter.

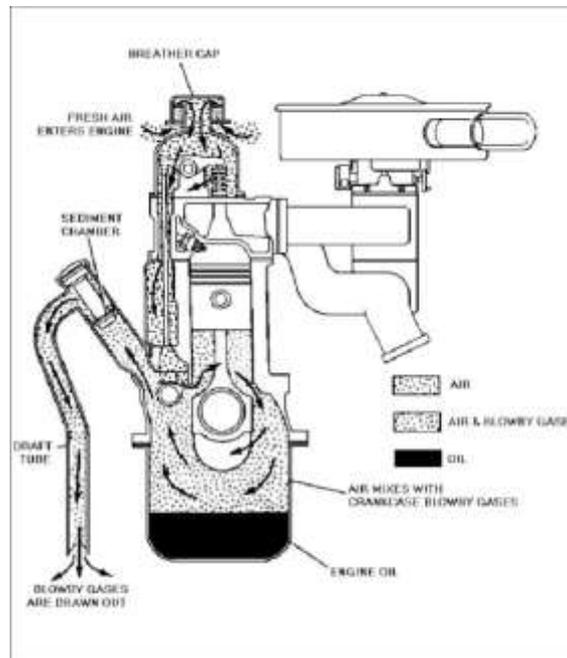
A continuación, se realizarán varias clasificaciones diferentes relativas a diversas partes y funcionalidades de estos sistemas, las cuales algunas estarán relacionadas entre sí y otras no lo estarán.



Figura 11 – Clasificación de los sistemas de ventilación de vapores del cárter

### 3.6.1 SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE VAPORES DEL CÁRTER ABIERTOS

La primera gran clasificación depende de a dónde sean vertidos los vapores provenientes de la combustión que se liberan al cárter. Los primeros en desarrollarse fueron los sistemas que expulsaban estos vapores al ambiente, los cuales también fueron prohibidos por razones medioambientales. Estos sistemas son además los más sencillos ya que simplemente consisten en un tubo cuya entrada sea el cárter o la tapa de balancines, y cuya salida sea el entorno. Estos sistemas aún son utilizados en algunos vehículos de circuito o en países en los que las normativas medioambientales no están avanzadas al menos en esa área. Algunos sistemas más modernos de este tipo también incorporan algún filtro a la salida de los gases que permite reducir el consumo de aceite y la emisión de algunos gases potencialmente contaminantes.



*Figura 12 – Funcionamiento de un ventilación de vapores del cárter abierto [22]*

### **3.6.2 SISTEMAS DE VENTILACIÓN DE VAPORES DEL CÁRTER CERRADO**

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter cerrados son los empleados principalmente en los coches actuales. Con la implantación de normativas medioambientales que limitan las emisiones producidas por cualquier vehículo, los sistemas de ventilación de vapores del cárter se convierten en una parte indispensable de los motores de combustión interna. A diferencia de los sistemas abiertos, los sistemas cerrados se caracterizan, como su propio nombre indica, por recircular o redirigir los vapores acumulados en el cárter nuevamente al motor. La localización del motor exacta a donde se recirculen estos gases puede variar, pero en la mayoría de los casos es al colector de admisión. En los casos en los que se emplean turbocompresores esto podría cambiar, y por otro lado en casos excepcionales, sobre todo en vehículos de competición, se pueden recircular estos gases al sistema de escape, pero además de no cumplir con las normativas de emisiones actuales es algo que resulta especialmente exigente para el motor.

#### **3.6.2.1 Sistemas de ventilación de vapores del cárter para motores sin turbocompresor**

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter ideados para motores que no emplean un turbocompresor son más sencillos. Estos a su vez pueden presentar diferentes variaciones, pero aquello característico que los diferencia de los sistemas de ventilación de vapores del cárter empleados en motores con turbocompresor, es que su recirculación se realiza al colector de admisión. Esto se debe a que es el punto de la admisión en el que la presión es lo más baja posible es este, además de que también la succión generada por el pistón durante la combustión también favorece la recirculación de los gases del sistema.

##### **3.6.2.1.1 Sistemas con decantador**

El empleo de decantadores o sistemas de filtrado de los vapores provenientes del cárter tiene varias funciones, el de evitar que se recirculen con los gases liberados de la combustión vapores de aceite, por un lado, y por otro lado, el de reducir el consumo de aceite redirigiendo

ese aceite de nuevo al cárter. La reducción de partículas de aceite recirculadas al sistema de admisión con los gases alojados en el cárter es fundamental en algunos casos por varios motivos.

Por un lado, en casos en los que el motor emplea un sistema de inyección directa, se evita que dichas partículas de aceite se puedan adherir a las válvulas provocando una obstrucción parcial de las mismas. En motores con sistemas de carburación o de inyección indirecta estos depósitos de aceite son arrastrados por la mezcla al cilindro y esto no supone un problema en el funcionamiento de este.

Por otro lado, la presencia de aceite en la mezcla puede llegar a provocar lo que se conoce como detonaciones en el motor, lo cual significa que se producen detonaciones repentinas e independientes a la detonación principal controlada producida en la combustión. Esto se puede deber a que, con la presencia de aceite en la mezcla y su consecuente combustión, se pueden llegar a formar depósitos de aceite e hidrocarburos que dificulten la combustión.

Este componente suele estar situado antes de la válvula que regula el paso de los gases al colector de admisión, de manera que las partículas de aceite no lleguen a la válvula y se evite así posibles obstrucciones de la misma por la acumulación de aceite. Los distintos decantadores se clasifican en función de la capacidad de filtrado de los mismos, y normalmente esto se determina por el tamaño mínimo de las partículas que son capaces de filtrar, siendo una capacidad de filtrado más alta la del sistema que sea capaz de filtrar partículas más pequeñas.

#### **3.6.2.1.2 Sistemas sin decantador**

Los sistemas de ventilación de vapores del cárter que no cuentan con un decantador son sistemas más sencillos. Este tipo de sistemas son cada vez menos comunes, ya que, con la creciente complejidad de los motores de combustión interna, cada vez se encuentran más componentes sensibles al deterioro o el malfuncionamiento por presencia de residuos de aceite en los mismos. Estos sistemas a su vez requieren de un mantenimiento menor, además de que se evita el riesgo de que el sistema se pueda obstruir por acumulación de suciedad en el propio decantador.

### **3.6.2.2 Sistemas de ventilación de vapores del cárter para motores con turbocompresor**

Los motores de combustión interna que emplean turbocompresores son cada vez más numerosos por sus múltiples ventajas, especialmente en motores diesel, pero esto los hace también sistemas más complejos, lo cual supone un reto para los sistemas de ventilación de vapores del cárter.

La principal diferencia entre los sistemas de ventilación de vapores del cárter diseñados para motores que emplean un turbocompresor, y aquellos que no lo hacen, es el punto al que se recirculan estos gases.

El empleo de un turbocompresor altera principalmente las condiciones de trabajo de todo el sistema de admisión, lo cual afecta directamente al funcionamiento del sistemas de ventilación de vapores del cárter, lo cual da lugar a que se presenten diferentes alternativas para optimizar el funcionamiento del sistema.

#### **3.6.2.2.1 Con recirculación al colector de admisión**

Los sistemas que funcionan en motores con turbocompresor, cuya recirculación se realiza al colector de admisión es muy similar a los sistemas de ventilación de vapores del cárter empleados en los motores sin turbocompresor, pero su funcionamiento es algo diferente. En este caso la presión dentro del colector de admisión, en determinados puntos de funcionamiento en los que la carga es media o alta, la presión del colector de admisión es superior a la atmosférica. Esto implica que en esas condiciones la presión dentro del cárter también será superior a la atmosférica, lo cual a largo plazo puede ser problemático para la durabilidad de algunos componentes del motor. Además de esto, resulta negativo tener presiones más altas dentro del cárter ya que la resistencia que estos gases ofrecen a los pistones cuando están en movimiento crece.

Estos sistemas son los que se emplearon con los primeros motores en los que se incorporaban turbocompresores. Este tipo de sistemas en motores con turbocompresores se han ido reduciendo, dando paso a sistemas más complejos que se mencionarán a continuación.

### **3.6.2.2.2 Con recirculación a la entrada del turbocompresor**

Una alternativa de sistemas de ventilación de vapores del cárter que se emplean en motores con turbocompresor, son aquellos que recirculan los vapores del cárter a la entrada del turbocompresor. La presión a la entrada del turbocompresor se comporta de manera diferente a la presión en el colector de admisión. Esta presión a la entrada del turbocompresor a su vez tampoco presenta el mismo comportamiento en los motores en los que la válvula de admisión está antes del turbocompresor que en aquellos en los que la válvula está después.

Por un lado, en aquellos motores cuya válvula del sistema de admisión está entre la salida del turbocompresor y el colector de admisión, la presión en la entrada del turbocompresor se mantiene relativamente estable con un valor cercano a la presión atmosférica. En este caso, la presión dentro del cárter se mantendrá en todo momento en valores en torno al valor de la presión atmosférica. Esto supone una ventaja respecto a los sistemas en los que se recirculan los vapores al colector de admisión, ya que la presión dentro del cárter permanece estable en valores cercanos a la presión atmosférica, pero en ningún momento se obtiene una presión en el cárter inferior a la del ambiente.

En este tipo de casos, la válvula que regula el paso de los vapores que se recirculan, puede ser de una geometría más sencilla, o más bien, la válvula no tendrá un rango tan amplio de regulación de la sección de paso, ya que la presión en la entrada del turbocompresor no variará mucho y mayoritariamente tendrá esta recirculación un papel activo en situaciones de alta carga en la que tendrá que estar permitiendo el paso del máximo caudal posible.

Por otro lado, en los motores en los cuales la válvula del sistema de admisión se encuentra antes de la entrada del turbocompresor, la presión en la entrada del turbocompresor varía por debajo de la presión atmosférica, es decir que a medida que se va abriendo la válvula más se acerca la presión en la entrada del turbocompresor a la presión atmosférica. En este caso, al oscilar la presión en la salida del sistema por debajo del valor de la presión atmosférica la presión dentro del cárter también variará en menor medida por valores inferiores, lo cual resultará beneficioso para el comportamiento del motor.

### **3.6.2.2.3 Con doble recirculación**

Esta última alternativa relativa a la forma de recircular los vapores del cárter combina ambas alternativas mencionadas anteriormente. En este caso se filtran los vapores que se almacenan en el cárter a través de dos conductos. Uno de ellos tiene como salida el colector de admisión, y el otro en cambio los recircula a la salida del turbocompresor. Esta alternativa permite que los gases se recirculen por uno u otro conducto en función de las condiciones en las que esté trabajando, incluso pudiendo circular por ambos en un mismo momento.

De esta manera, en situaciones en las que el motor se encuentre trabajando a baja carga la mayoría de los gases recirculados al sistema de admisión se realizará a través del colector de admisión. Por otro lado, en situaciones de media y alta carga en las que la presión del colector de admisión supere la presión atmosférica, los gases se recircularán a la entrada del turbocompresor.

Esta alternativa presenta varias ventajas respecto a los anteriores diseños, por un lado, que la presión dentro del cárter no supere significativamente la presión ambiente, y, por otro lado, que la presión del cárter pueda bajar a valores inferiores a la presión atmosférica. Además, en caso de algún malfuncionamiento de alguna de los conductos se tiene otro adicional que puede realizar parte de las labores del sistema.

A pesar de estos beneficios se ha de tener en cuenta que es siempre preferible utilizar el sistema más sencillo posible, y este sistema como resulta claro es más complejo que las otras alternativas. A parte de esto, este sistema ocupará más espacio, lo cual en algunas circunstancias puede llegar a ser problemático.

### **3.6.2.3 Sistemas con respirador o breather**

Independientemente de si el motor emplea un turbocompresor o no, en algunas circunstancias se emplean unas entradas de aire al sistema, las cuales se encargan de filtrar aire limpio del ambiente al sistema. Esto, se realiza por numerosos motivos y puede resultar muy positivo para el funcionamiento general del sistema.

Cabe mencionar en primer lugar, que estos sistemas se comenzaron a usar con el objetivo contrario, el de expulsar vapores al ambiente, sobre todo en aplicaciones de competiciones en las que la normativa de contaminación convencional para los vehículos comerciales no se aplica. Pero la aplicación que interesa en este presente trabajo, y la cual se emplea en numerosos vehículos comerciales, es la de permitir el paso de aire en determinadas circunstancias, con el objetivo de renovar los gases que se encuentran en la cavidad compuesta por el cárter y la tapa de balancines. Esta aplicación tiene como finalidad el que no se ensucie en exceso, o reducirlo en la medida de lo posible, tanto el lubricante, como el resto de los componentes que se encuentran en dicha cavidad.

Además de esto, estos respiradores permiten que en situaciones de baja carga en las que la recirculación al colector de admisión pueda disminuir a presiones excesivamente bajas no se exija a la geometría de la válvula regularlo, sino que este respirador al provenir del ambiente a presión atmosférica equilibra la presión en el cárter y permite que se mantenga la presión en valores moderados, asegurando unas condiciones óptimas en el cárter en situaciones normales de funcionamiento.

## **Capítulo 4. MODELO DESARROLLADO**

El principal objetivo del desarrollo del modelo que se describirá a continuación es el de estimar y simular cómo se comporta la presión dentro del cárter bajo diferentes condiciones de trabajo. Para ello, ya que se trata de un modelo complejo, se tomarán algunas asunciones para poder diseñar un modelo numérico que lo represente. Además de esto, se emplearán ecuaciones de la dinámica de fluidos, así como las leyes básicas de comportamiento de gases, para poder cuantificar el sistema real y plasmarlo en un modelo numérico.

### ***4.1 DEFINICIÓN DEL MODELO REAL DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN DE VAPORES DEL CÁRTER***

Como se ha mencionado con anterioridad, debido al desarrollo y la complejidad tanto de los motores de combustión interna en general, como de los sistemas de ventilación de vapores del cárter, hay una cantidad muy amplia de diferentes sistemas de ventilación de vapores del cárter, como también se ha explicado previamente. Por todo esto, resulta necesario restringir las características del sistema para poder seleccionar un tipo o modelo concreto de sistema de ventilación de vapores del cárter para que luego se pueda simular su funcionamiento para diferentes casos.

Para este estudio, el sistema de ventilación de vapores del cárter que se estudiará corresponde a un motor diesel equipado con un turbocompresor. Para ser más específicos, ya que por particularizaciones de la geometría del motor y del sistema de ventilación de vapores del cárter es necesario, emplearemos un como referencia un motor diesel de en torno a 180 caballos de potencia de unas dimensiones de 685 mm x 610 mm x 615 mm. Esto se debe a que los motores diesel son ligeramente más exigentes para estos sistemas que los de gasolina, ya que se alcanzan presiones más elevadas dentro del cilindro, y por ello se propicia más el efecto del blow-by. Además, para este tipo de motores de combustión, es muy común el que

empleen turbocompresores para hacer más eficiente el motor, lo cual a su vez requiere de sistemas de ventilación de vapores del cárter algo más complejos.

Haciendo referencia a la clasificación y tipología de sistemas de ventilación de vapores del cárter desarrollada previamente, el modelo que se empleará para el presente estudio será un sistema de ventilación de vapores del cárter cerrado en primer lugar, ya que todos los motores actuales están obligados a que no se recirculen estos gases al ambiente.

Además, presentará doble recirculación, tanto al colector de admisión como a la entrada del turbocompresor. Ambos conductos, tanto el que recirculará los gases al colector de admisión, como el que lo hará a la entrada del turbocompresor, presentarán válvulas que regulen el paso de estos gases. Así mismo, estos dos conductos estarán conectados al sistema compuesto por el cárter y la tapa de balancines donde se almacenarán los gases del sistema, por medio de un decantador que filtrará las partículas de mayor tamaño para evitar o mitigar obstrucciones y deterioros de componentes del motor.

Se incluirá también en el modelo un respirador que permita al sistema tomar aire del ambiente para que se pueda renovar los gases que se encuentran dentro del sistema, así como para que la presión dentro del sistema no se reduzca demasiado en casos de muy baja carga, y por consiguiente de muy baja presión en el colector de admisión. Respecto a algunas características del propio motor resulta importante apuntar que la válvula de mariposa del sistema de admisión se encontrará entre el turbocompresor y el colector de admisión, de manera que la presión en la entrada del turbocompresor no variará significativamente.

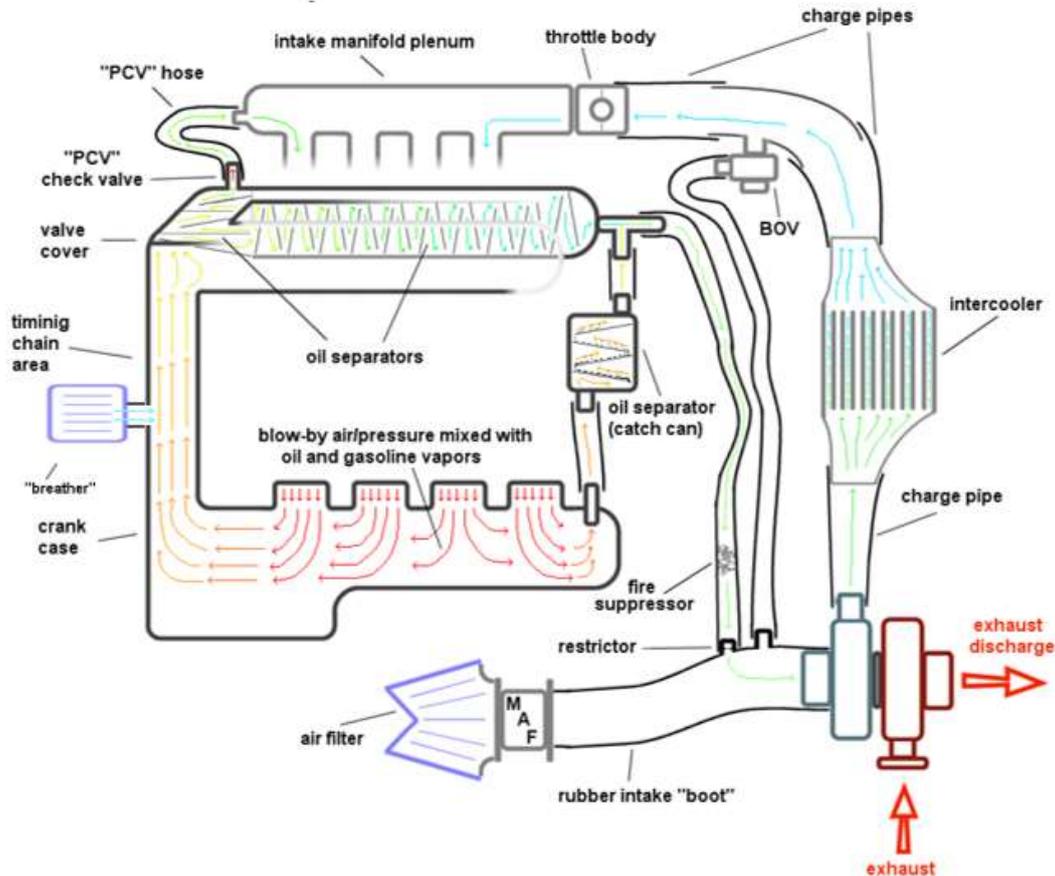


Figura 13 – Esquema del modelo físico empleado para el modelo [4]

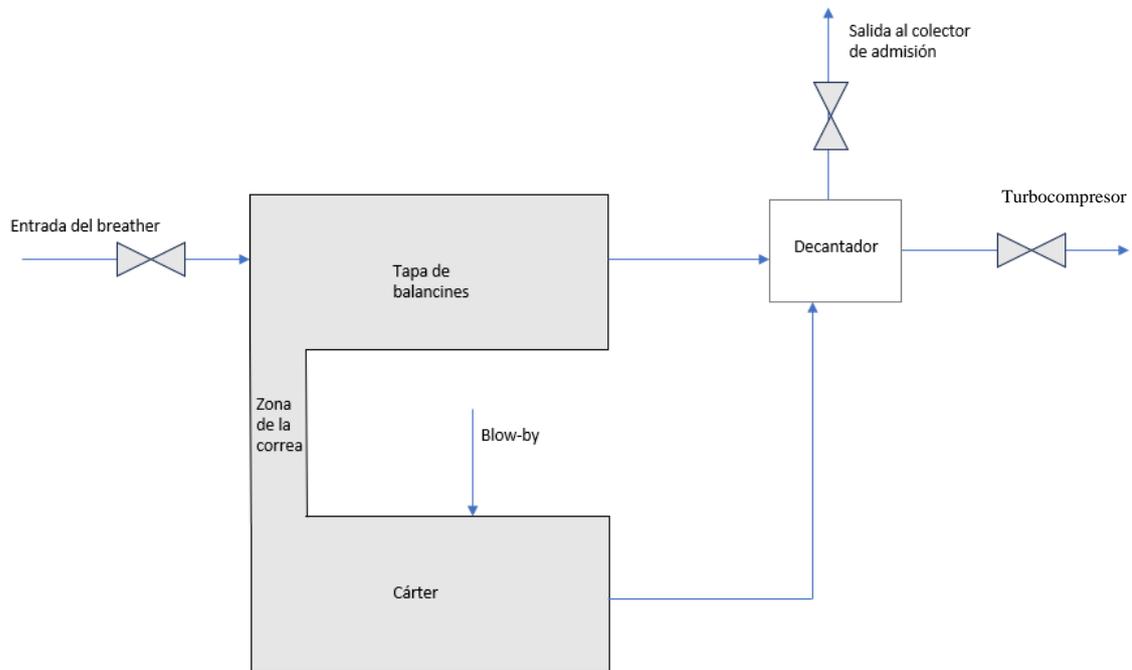
Como se puede observar en el esquema presentado en la Figura 13, el sistema estará compuesto por dos salidas, una al colector de admisión, y la segunda a la entrada del turbocompresor. Ambas salidas, como también se puede observar en la representación gráfica del modelo, estarán controladas por una válvula cada una de ellas que será la encargada de regular el flujo de los gases que sean redirigidos al sistema de admisión. Estas dos salidas provendrán de un decantador común que devolverá las partículas que sea capaz de filtrar nuevamente al cárter a través de un conducto regulado por una válvula que solo permita que estos restos de aceite puedan volver al cárter y no al revés, y el cual tomará gases tanto de la parte superior del sistema, la tapa de balancines, como de la parte inferior, el cárter, a pesar de que ambas estén conectadas entre sí, con el objetivo de que los gases en el sistema estén lo más uniformemente mezclados posible.

El sistema a su vez tendrá también dos entradas, como se puede observar. Por un lado, estará la entrada de los gases provenientes de la combustión que se filtrarán a través de los anillos del pistón, es decir lo que se conoce como blow-by, y, por otro lado, recibirá aire fresco del ambiente a través de lo que se conoce como respirador.

Tanto los flujos de entrada como de salida estarán en cada momento condicionados y determinados por los parámetros de funcionamiento. Por un lado, tanto las salidas como la entrada del ambiente dependerán de las presiones de los diferentes puntos del sistema. Por otro lado, la entrada proveniente de los gases blow-by estará condicionada por la carga y la velocidad a la que se encuentre trabajando el motor en cada momento.

## **4.2 *MODELO FÍSICO***

Por modelo físico se entiende aquel modelo que permitirá representar las condiciones de trabajo del sistema y los fenómenos que estén ocurriendo de forma matemática, empleando ecuaciones de dinámica de fluidos y de gases. Este modelo será una versión simplificada del modelo real descrito previamente, ya que determinados componentes no requerirán de una representación explícita, sino que simplemente se representará su influencia en las condiciones de contorno.



*Figura 14 – Esquema del modelo físico simplificado empleado*

Como se puede observar en la Figura 14, en este caso ya no se encuentra ninguna representación del sistema de admisión. Esto se debe a que este sistema simplemente se representará a través de las presiones de salida, tanto a la entrada del turbocompresor, como al colector de admisión. Por otro lado, también se aprecia que el conducto encargado de redirigir el lubricante filtrado por el decantador tampoco se encuentra representado, ya que este no tiene ninguna influencia en el comportamiento de los flujos ni del volumen de control que se busca estudiar con el modelo.

Este modelo físico, lo que en última instancia permite es resumir el comportamiento del sistema en una serie de valores de caudales y presiones, lo cual es lo que se buscaba en un primer momento.

De esta manera se tendrán por un lado las presiones del sistema, las cuales serán cuatro:

- Presión ambiente: Esta dependerá únicamente de la localización en la que se encuentre nuestro sistema, es decir que, dependiendo de variables como altitud o temperatura, esta presión ambiente podrá cambiar ligeramente. Dicho esto, para el presente trabajo se empleará un único valor para esta presión.
- Presión del colector de admisión: Esta presión variará considerablemente, y en condiciones normales de trabajo, de todas las presiones que se estudiarán, será la que tome valores más extremos. Esta presión estará sometida a la influencia tanto de la válvula de mariposa del sistema de admisión como a la del turbocompresor, por lo que podrá tomar tanto valores inferiores a la presión ambiente, en aquellos casos en los que la válvula no esté completamente abierta, como valores superiores a estas presiones en aquellos casos en los que el turbocompresor este comprimiendo el aire de entrada y aumentando su presión.
- Presión en la entrada del turbocompresor: Como se ha comentado ya con anterioridad en este trabajo, en el modelo que se ha tomado para realizar el estudio, la válvula de mariposa del sistema de admisión se encuentra entre el colector de admisión y la salida del turbocompresor. Por esto mismo, la presión a la entrada del turbocompresor oscilará en todo momento en torno a la presión ambiente.
- Presión del cárter: Se denominará presión del cárter a la presión de los gases alojados dentro del volumen de control, el cual será el volumen encerrado dentro de la cavidad compuesta por el cárter y la tapa de balancines. Esta presión será una de las variables a estudiar en este trabajo, la cual tendrá una gran importancia en las conclusiones y soluciones que se vayan obteniendo. Idealmente esta presión se encontrará próxima a la presión ambiente con el objetivo de que ningún componente del motor se pueda dañar por exceso de presión en el sistema, siendo incluso más beneficioso si esta presión es ligeramente inferior a la de ambiente de forma que la resistencia de estos gases ejercida sobre el movimiento de los pistones sea menor.

De la misma forma también se trabajará con cuatro caudales diferentes, cuyo comportamiento se observará con detalle:

- Caudal de entrada del ambiente ( $Q_{amb}$ ): Este caudal representa el flujo de aire que entra a través del respirador del ambiente, y el cual estará determinado por la geometría del sistema y por las características del aire, así como por las presiones tanto de ambiente, la cual como se ha mencionado antes se tratará como constante, como por, sobre todo, la presión del cárter. Esta última será la que determine la cantidad de flujo a través de la válvula que lo controla, así como la cantidad de aire que atravesará dicho conducto, ya que será la única condición que se estudie como variable y no como constante.
- Caudal de entrada de blow-by ( $Q_{blow}$ ): Este es el parámetro cuyo comportamiento y sobre todo impacto se trata en el presente trabajo, el cual como ya se ha mencionado con anterioridad es un caudal de entrada a nuestro sistema proveniente de los cilindros que dependerá de las condiciones de trabajo a las que se encuentre sometido el motor.
- Caudal de salida a la entrada del turbocompresor ( $Q_{turb}$ ): Este primer caudal de salida será aquel que indique el flujo de vapores del cárter que sean redirigidos a la entrada del turbocompresor. Este caudal estará condicionado por las condiciones de presión tanto en el cárter como en el sistema de admisión, así como por la geometría del sistema y de la válvula que regule y en algunos casos también restrinja este caudal.
- Caudal de salida al colector de admisión ( $Q_{int}$ ): Por último, este último caudal será el que represente el flujo de gases provenientes del cárter que se recirculen al colector de admisión, y será el principal agente que permita reducir en determinadas circunstancias la presión dentro del cárter a valores inferiores a la presión de ambiente para poder aumentar la eficiencia del motor.

### **Leyes generales y asunciones básicas**

La primera ecuación que se emplea en el modelado del sistema es la ecuación de la conservación de la masa, es decir, aquella ecuación que establece que el sumatorio de la masa que entra en el sistema, más la que se acumula y menos la que sale de nuestro sistema tiene que ser necesariamente cero, ya que la masa no puede ni generarse ni destruirse.

$$\Delta m_{Total} = 0$$

Por otro lado, se empleará también la ecuación de Bernoulli para calcular el comportamiento del fluido que analizaremos dentro de nuestro sistema.

### **Ecuación de Bernoulli**

$$\frac{1}{2} * \rho * v_1^2 + \rho * g * h_1 + P_1 = \frac{1}{2} * \rho * v_2^2 + \rho * g * h_2 + P_2$$

$\rho$  = Densidad del líquido

$v$  = Velocidad del líquido

$g$  = Aceleración de la gravedad

$P$  = Presión

## **4.3 APROXIMACIÓN DE CONSTANTES Y OTRAS ASUNCIONES**

El desarrollo de modelos numéricos para la representación de modelos físicos tan complejos con semejante número de variables y parámetros requiere de la realización de numerosas asunciones y aproximaciones. En el caso de las aplicadas para la elaboración del presente modelo, se enunciarán a continuación.

Por un lado, y la primera asunción realizada, es la de asumir el volumen de control como un gas incompresible, es decir, que la densidad del fluido en todo el sistema se tomará como una constante. Dicha densidad, de hecho, se calculará partiendo de la hipótesis de que el gas encerrado en el volumen de control a estudiar se trata de una mezcla homogénea de aire con un 1% de vapores de aceite de lubricación.

Empleado como densidad del aceite la densidad de un lubricante multigrado 10W40

$$d_{aire} = 1.29 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 0^\circ; \text{ a } 60^\circ 1.06$$

$$d_{aceite} = 858 \text{ kg/m}^3 \text{ a } 15^\circ, \text{ a } 60^\circ 843$$

$$d_{mezcla} = d_{aire} * 0.99 + d_{aceite} * 0.01 = 1.06 * 0.99 + 843 * 0.01 = 9.63 \text{ kg/m}^3$$

Por otro lado, otra de las asunciones que se emplearán en la consecución del modelo será la de tratar al gas encerrado en dicho volumen de control como un gas ideal, es decir que se aplicará la siguiente ecuación:

$$PV = nRT$$

En este caso el volumen será el volumen total del sistema compuesto por la cavidad del cárter y la tapa de balancines, el cual se estimará a partir del volumen total del motor, asumiendo que aproximadamente ocupará un 10% de este volumen total. Por otro lado, la constante de los gases R, se calculará de forma que permita despejar la masa, tal y como se verá más adelante, y por último la temperatura se asumirá constante y con un valor de 60°C.

$$V_{total} = 0.685 * 0.610 * 0.615 * 10\% = 0.0257 \text{ m}^3$$

Cálculo de R:

$$R = \frac{P}{dens * T} = \frac{101250 \text{ Pa}}{9.86 * 333} = 30.83$$

$$R = 30.83 * \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K} * \text{kg}} = 30.83 \frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{K} * \text{kg}} * \frac{9.86 \text{ kg}}{\text{m}^3} = 304 * \frac{\text{Pa}}{\text{K}}$$

En lo referente a las presiones y condiciones en las salidas del sistema, es decir en el colector de admisión y en la entrada del turbocompresor, se aproximarán a condiciones de recipientes estancos en los que no hay velocidad de salida.

En lo que respecta a los valores de blow-by empleados, se ha realizado una aproximación a partir de la información recabada en varios estudios, y se han distinguido dos casos, uno para alta carga y otro para baja, para un motor de las características mencionadas previamente, los cuales son:

- Baja carga: para aquellos casos en los que el motor se encuentre poco exigido y con presiones en el colector de admisión inferiores a la presión ambiente, el valor de caudal de blow-by que se filtra a través de los anillos de los pistones es de  $0.0004\text{m}^3/\text{s}$
- Alta carga: para aquellos casos en los que el motor se encuentre altamente exigido, requiriéndose de él altas prestaciones y con presiones en el colector de admisión superiores a la presión ambiente debido al efecto del turbocompresor, el valor de caudal de blow-by que se filtra a través de los anillos de los pistones es de  $0.00075\text{m}^3/\text{s}$

Respecto a la geometría de los conductos del sistema, los valores típicos para el área de los conductos se calculan a partir de los valores aproximados de diámetros, los cuales varían entre 2 y 3 cm, lo cual da un rango de áreas de entre  $3.14\text{cm}^2$  y  $7\text{cm}^2$ . En el caso del valor empleado para este modelo, se usará un valor medio entre estos el cual será  $5\text{cm}^2$ . Además de esto, en lo que respecta a la geometría, se aproximará la longitud total de tanto el conducto que recircula los vapores al colector de admisión, como el que los recircula a la entrada del turbocompresor, a 1 metro.

Por otro lado, en lo que respecta a las ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en el sistema, se requerirá de una serie de constantes y parámetros cuyos valores se enunciarán en la presente sección.

Se asumirá en todo momento el comportamiento del fluido en régimen laminar, ya que los valores del número de Reynolds en las simulaciones en todo momento han estado en valores muy inferiores a aquellos asociados al régimen turbulento. Para el cálculo de las pérdidas primarias, también será necesaria la constante de viscosidad, la cual para estas simulaciones se aproximará a la viscosidad del aire.

$$\mu = 0.0466N * s/m^2$$

En lo que respecta a las pérdidas secundarias, será necesaria la constante K para cada uno de los conductos. Para calcular dicha constante para cada uno de ellos se han aproximado a partir de constantes de otro tipo de válvulas, codos y otras formas típicas de conductos.

Accidente	K	L/D
Válvula esférica (totalmente abierta)	10	350
Válvula en ángulo recto (totalmente abierta)	5	175
Válvula de seguridad (totalmente abierta)	2,5	-
Válvula de retención (totalmente abierta)	2	135
Válvula de compuerta (totalmente abierta)	0,2	13
Válvula de compuerta (abierta 3/4)	1,15	35
Válvula de compuerta (abierta 1/2)	5,6	160
Válvula de compuerta (abierta 1/4)	24	900
Válvula de mariposa (totalmente abierta)	-	40
T por salida lateral	1,80	67
Codo a 90° de radio corto (con bridas)	0,90	32
Codo a 90° de radio normal (con bridas)	0,75	27
Codo a 90° de radio grande (con bridas)	0,60	20
Codo a 45° de radio corto (con bridas)	0,45	-
Codo a 45° de radio normal (con bridas)	0,40	-
Codo a 45° de radio grande (con bridas)	0,35	-

*Tabla 1 – Principales valores de constantes de pérdidas secundarias en tuberías [15]*

#### **4.4 DESARROLLO DEL MODELO NUMÉRICO**

Con el objetivo de más adelante poder introducir el modelo desarrollado en un sistema computacional que permita realizar los cálculos y simulaciones necesarias, será indispensable hallar una serie de ecuaciones que lo planteen.

De cara a llegar a esas ecuaciones finales, se partirá en primer lugar de la ecuación de conservación de la masa.

$$\Delta m_{Total} = 0$$

La cual particularizada para el sistema que se está estudiando quedaría de la siguiente manera:

$$\Delta m_{sistema} + \Delta m_{salida} - \Delta m_{entrada} = 0$$

Así mismo, y ya que el objetivo es poder trabajar con caudales en lugar de masas, se empleará la definición de la densidad para sustituir dichos flujos de masa por caudales.

$$\rho = \frac{m}{V}; V = \frac{m}{\rho}; \Delta V = Q = \frac{\Delta m}{\rho}$$

$$Q_{int} + Q_{turb} + \frac{\Delta m_{carter}}{\rho} = Q_{amb} + Q_{blow}$$

Una vez despejada dicha ecuación, la cual se empleará como la ecuación base sobre la que se realizarán la mayoría de los cálculos, se buscará desarrollar un número de ecuaciones que permitan enunciar cada una de las variables de dicha ecuación en función de la presión en el cárter, la cual será la variable fundamental sobre la que se calculen todas las demás, así como de parámetros conocidos que ya se hayan calculado o aproximado.

Por un lado, para despejar el término que hace referencia al incremento de masa acumulada en el volumen de control, se empleará la ecuación de gases ideales, la cual despejada quedará de la siguiente manera:

$$\frac{\Delta m_{carter}}{\rho} = \frac{dP}{dt} * \frac{V_{total}}{R * T}$$

Por otro lado, en lo que respecta a los caudales tanto de entrada como de salida, se empleará la definición de caudal en primer lugar, y la ecuación de Bernoulli a continuación para poder despejarlo en función de la presión del cárter.

$$Q = vel * A_{conducto}$$

$$vel = \sqrt{2 * \frac{p_2 - p_1}{\rho} - perdidas} \text{ (siendo } p_2 \text{ la presión de salida y } p_1 \text{ la de entrada)}$$

Para el cálculo de las pérdidas, éstas se dividirán en primarias y secundarias, las cuales se calcularán de forma independiente.

$$perdidas = perdidas\ primarias + perdidas\ secundarias$$

$$hf(primarias) = \frac{f * L * vel^2}{2 * \rho * g}$$

$$hs(secundarias) = \frac{K * vel^2}{2 * g}$$

$$f = \frac{64}{\rho * vel * d} * \mu$$

#### **4.5 *MODELO DESARROLLADO PARA LAS SIMULACIONES***

A la hora de diseñar el modelo computacional que fuese capaz de realizar todos los cálculos y simulaciones necesarias, se decidió emplear la herramienta MATLAB por numerosos motivos, entre ellos la utilización de este software a lo largo de los cuatro años de carrera, así como la capacidad de este programa para realizar cálculos complejos en procesos iterativos, así como la flexibilidad a la hora de programar y de poder representar gráficamente los resultados.

Dicho esto, necesariamente se han de realizar una serie de ajustes y modificaciones al modelo físico a la hora de simular su comportamiento en una herramienta como MATLAB, los cuales se explicarán a lo largo de este apartado.

El más relevante de estos ajustes es el haber tenido que modelarlo como un modelo iterativo, ya que no era posible extraer una función continua que se pudiese representar. Esto se debe a que la mayoría de los términos presentes en la ecuación fundamental no tomaban valores continuos, sino que en condiciones particulares no se incluían en la ecuación. Como ejemplo de esto, el caudal de los vapores recirculados al colector de admisión en los casos en los que la presión del cárter es inferior a la presión en el colector de admisión ha de eliminarse de la ecuación, ya que la válvula impide que haya flujo en el sentido contrario.

De esta manera se ha diseñado un bucle iterativo en el que en cada ciclo se han calculado todas las variables y parámetros del sistema. Lo más significativo por lo tanto de esta modificación es la expresión de la ecuación base, la cual ya no se verá expresada de forma diferencial, así como el comportamiento de las válvulas lo cual hasta el momento aún no se ha mencionado con detalle.

$$\frac{\Delta m_{carter}}{\rho} = \frac{\Delta P}{\Delta t} * \frac{V_{total}}{R * T}$$

De esta forma por lo tanto quedaría la componente relativa al incremento de masa en el interior del volumen de control de forma incremental para poder incluirlo en el bucle.

Por el otro lado, una de las partes más fundamentales de todo el sistema son las válvulas que regulan el paso de los vapores tanto en las salidas como en la entrada al sistema. Además de ser una parte clave del sistema, también es una de los componentes más complejos y determinantes del modelo realizado en MATLAB. Esto se debe a que la apertura de las válvulas condicionaba de manera directa a los agentes de la ecuación base.

Para explicar esto, se mostrarán porciones del código para profundizar en el comportamiento y modelado de las válvulas,

```

if(Pcart1>Pturb && Pcart1<(Pturb+K2))
    at =(Pcart1-Pturb)/K2;
    if(at>1)
        at=1;
    end
if(Pcart1>Pturb+K3)
    at = 2-(Pcart1-Pint)/K3
    if(at<0.1)
        at=0.1;
    end
end
end
end

```

*Figura 15 – Código referente a la programación de la geometría de las válvulas*

En el código mostrado en la Figura 15, se observa la forma en la que se ha tratado de replicar el efecto de la geometría particular de las válvulas empleadas en estos sistemas que se mencionó en capítulos anteriores. La variable definida como “at” hace referencia al nivel de apertura en este caso de la válvula que regula los gases recirculados a la entrada del turbocompresor, es decir, que 0 sería que está completamente cerrada, y uno que está totalmente abierta maximizando el área de paso de flujo por la válvula. De esta forma se ha calculado un diferencial de presiones necesario para comenzar a abrir la válvula, es decir, una transición en la que la válvula pasa de estar completamente cerrada, a estar en la posición en la que permite que un mayor flujo. Esto se ha aproximado a partir del cálculo de la fuerza necesaria para comprimir el muelle de la válvula 5mm.

$$P_{equivalente} = \frac{K * \Delta x}{A} = \frac{1200 * 0.5 * 10^{-2}}{5 * 10^{-4}} = 1200Pa = 1.2kPa$$

De esta manera una vez se ha abierto completamente la válvula, si este diferencial de presiones sigue aumentando, la válvula comienza a cerrarse hasta llegar a estar cerrada como máximo un 90%, lo cual influye en que se aumente la sección de paso en los casos en los que el motor trabaja a máxima carga y el caudal de blow-by es mayor, y se disminuya esta área cuando el diferencial de presiones es mayor al trabajar a menor carga y el caudal de blow-by además sea menor.

```

if(Pcart1<Pturb) %simulación efecto de la válvula
    Qturb = 0;
    Re_at = 0;
    f_at = 0;
    hf_at = 0;
    hs_at = 0;
else Re_at = d*Vel_at*di/mu; %numero de reynolds cart-turbo
    f_at = 64/(d*Vel_at*di/mu);
    hs_at = Ks*(Vel_at)^2/(2*g);
    if(Re_at==0) f_at=0;
end
hf_at= f_at*L_at*Vel_at^2/d/2/g;
Qturb = sqrt(2*(Pcart-Pturb-(hf_at+hs_at)*d)/d)*A*at;

```

Figura 16 – Código de programación de funcionamiento de válvulas

En esta siguiente Figura 16, aquello que se trate de mostrar es, cómo afecta el nivel de apertura de la válvula descrito previamente en el desarrollo del modelo. Como se puede observar en primer lugar, las primeras líneas de código discriminan en función de si la presión en el cárter es inferior a la presión en el turbocompresor, ya que en ese caso para evitar que se puedan filtrar gases hacia el cárter e incluso darse casos de backfire la válvula se ha de cerrar, lo cual supone que tanto el caudal que va hacia el turbocompresor como todas las variables relacionadas tengan que ser cero. En la segunda parte en la que la válvula sí que está abierta, se realizan los cálculos de todos los parámetros que por último son introducidos en la ecuación del caudal recirculado a la entrada del turbocompresor, la cual tiene como variable la presión en el cárter, y se observa también como multiplicando al área total del conducto se introduce la variable relacionada con el grado de apertura de la válvula del sistema, influyendo directamente en el caudal total.

Resulta importante mencionar adicionalmente que, por simplificar el modelo y no realizar varios diseños diferentes de válvulas, se ha asumido que las tres válvulas son idénticas. De todas formas, en caso de haber sido diseñadas de forma diferente tampoco tendría una gran influencia ya que de haberse modificado, la diferencia sería que tanto la válvula del respirador como la del turbo sería ligeramente más sencillas, y las variaciones serían en los resultados serían poco perceptibles.

Por último, otro de los ajustes necesarios para poder desarrollar el modelo es la adición de una variable auxiliar que guarde el valor de la presión en el cárter en la iteración anterior, es decir que al ser necesario realizar el modelo de forma incremental para calcular el  $\Delta P$  se requiere una variable que guarde el valor de la iteración anterior para calcular el valor siguiente para la presión del cárter

## **Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Una vez desarrollado el modelo, el objetivo con el mismo es simular diferentes condiciones de funcionamiento y cómo pueden afectar las diferentes situaciones en el comportamiento del sistema y de sus principales variables de funcionamiento. Dichas variables que se representarán a continuación para cada una de las simulaciones serán, en primer lugar, la presión en el cárter, además de los tres caudales fundamentales, excluyendo el de blow-by que será un parámetro de entrada y no una variable de salida como el resto.

En primer lugar, se presentarán los casos de funcionamiento en condiciones normales seguido de aquellos en los que se dé algún tipo de fallo, de forma que estos se puedan comparar con la finalidad de analizar aquellas situaciones de mayor riesgo para el sistema y sus potenciales consecuencias negativas.

### ***5.1 FUNCIONAMIENTO CORRECTO DEL SISTEMA EN CONDICIONES NORMALES***

Dentro de esta primera categoría de casos de funcionamiento habitual, se han diferenciado cuatro casos. Estos casos muestran el régimen dinámico o transitorio entre distintos puntos de funcionamiento en los que diferenciamos tres diferentes, el de reposo, es decir aquel en el que la presión en el cárter es aproximadamente similar a la presión atmosférica, el de baja carga, es decir aquella situación en la que la presión en el colector de admisión es baja y el caudal de blow-by también, y el caso de alta carga en el que la presión en el colector de admisión es superior a la presión atmosférica y el caudal de blow-by es máximo. Para las simulaciones se ha obviado el caso de carga media ya que de cara a analizar las situaciones más críticas para el motor y para el sistema no aporta información adicional relevante.

### 5.1.1 PASO DE REPOSO A CONDICIÓN DE BAJA CARGA

Condiciones de contorno:

- Presión inicial en el cárter = presión ambiente (101 kPa)
- Presión en la entrada del turbocompresor = ligeramente inferior a presión ambiente (98kPa)
- Presión en el colector de admisión = 60kPa
- Caudal de blow-by = 0.4l/s (0.0004 m<sup>3</sup>/s)

Resultado de la simulación:

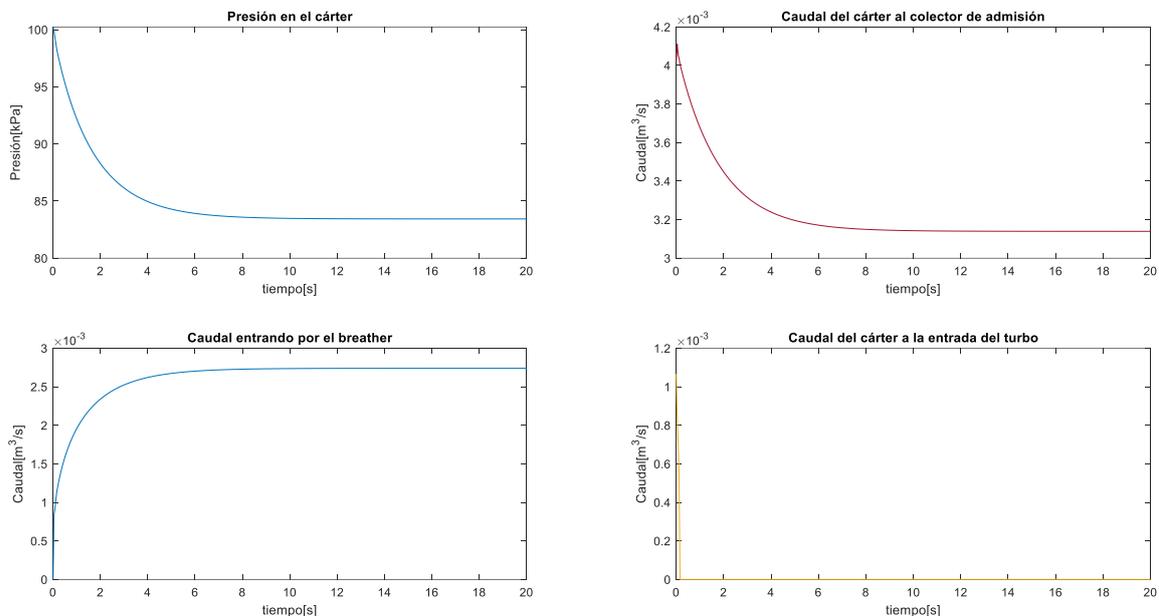


Figura 17 – Simulación de caso en condiciones normales de paso de reposo a baja carga

En este primer caso, al ser considerablemente inferior la presión en el colector de admisión a la presión en el cárter, provoca que el caudal entre estos sea elevado reduciendo la presión en el cárter considerablemente. Así mismo se observa también en los primeros instantes que también se origina un flujo de vapores hacia la entrada del turbocompresor, pero este tiene poca influencia ya que rápidamente la presión dentro del cárter desciende a valores inferiores a la presión del turbocompresor, y por lo tanto la válvula que regula el paso se cierra. Además de todo esto, la presión del cárter al tomar valores inferiores a la presión ambiente provoca

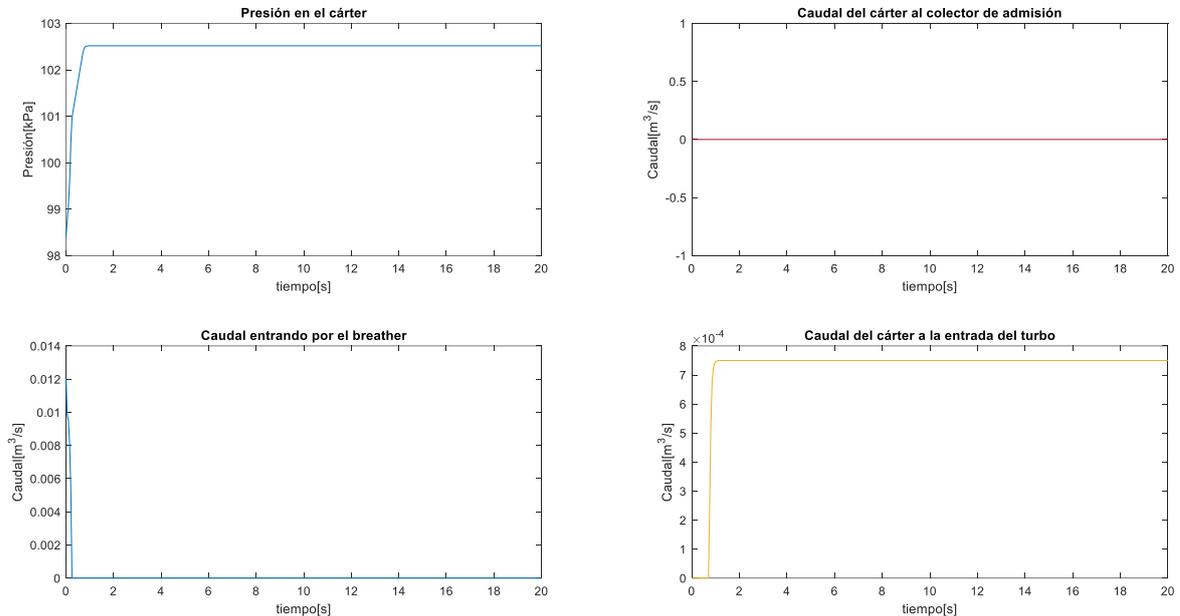
que también se de un flujo de entrada desde el respirador que introduce aire fresco dentro del cárter, aumentando este a medida que desciende la presión en el cárter, hasta que tanto la presión como los caudales se estabilizan en un punto en el que la presión en el cárter se encuentra en valores intermedios entre la presión atmosférica y la presión en el colector de admisión. Resulta complicado de apreciar, pero realmente cuando ya se ha dado el régimen permanente, la diferencia entre el caudal que es redirigido al colector de admisión y el que entra en el sistema a través del respirador, es exactamente el valor del caudal del blow-by como no podría ser de otra manera ya que en el cárter ya no se da ninguna variación de masa ni de concentración de vapores.

### **5.1.2 PASO DE REPOSO A CARGA ALTA**

Condiciones de contorno:

- Presión inicial en el cárter = ligeramente inferior a presión ambiente (99 kPa)
- Presión en la entrada del turbocompresor = presión ambiente (101kPa)
- Presión en el colector de admisión = 200kPa
- Caudal de blow-by = 0.75l/s (0.00075 m<sup>3</sup>/s)

Resultado de la simulación



*Figura 18 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de reposo a alta carga*

Se observa en los resultados de este caso en el que se pasa del reposo a una situación de alta carga cómo rápidamente la presión en el cárter aumenta, en primer lugar, por la contribución del flujo que entra del ambiente, pero sobre todo por el caudal de blow-by entrando en el volumen de control. Una vez esta presión supera la presión en la entrada del turbocompresor la válvula que permite el paso de vapores del cárter a la entrada del turbocompresor se abre, compensando el caudal proveniente de la combustión que se filtra a través de los anillos de los pistones. Esto se produce en un tiempo más reducido ya que el diferencial de presión entre la entrada del turbocompresor y el cárter necesaria para que la totalidad del flujo entrante del blow-by se recircule al turbocompresor es reducida, entre otras cosas favorecido por la geometría de la válvula que permite que la sección de paso sea mayor.

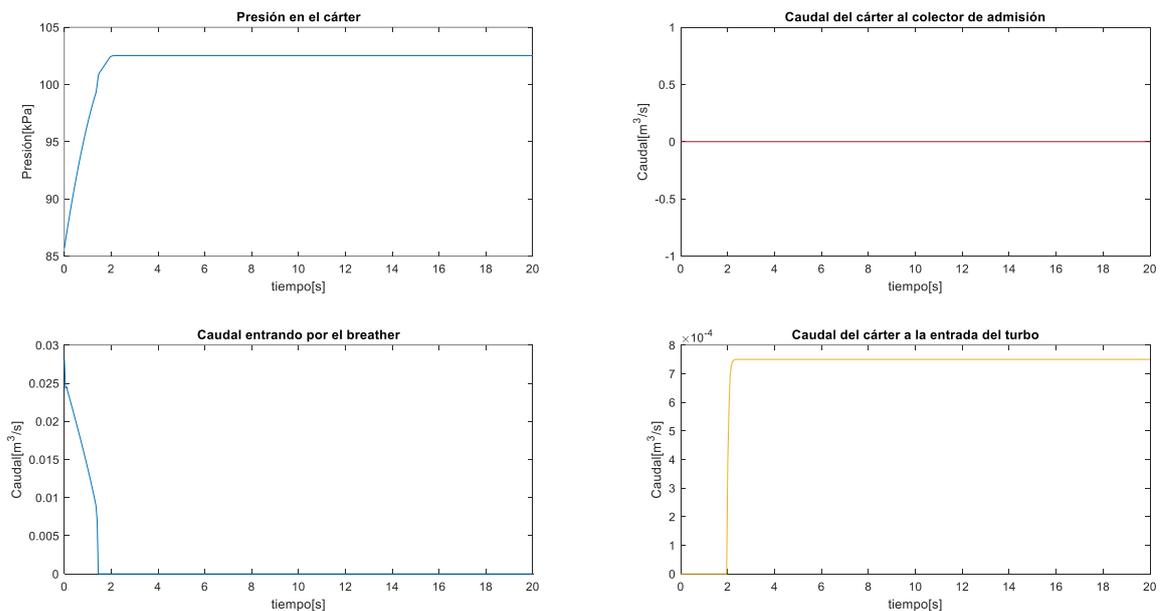
### 5.1.3 PASO DE BAJA CARGA A CARGA ALTA

Condiciones de contorno:

- Presión inicial en el cárter = presión ambiente (85 kPa)

- Presión en la entrada del turbocompresor = ligeramente inferior a presión ambiente (100kPa)
- Presión en el colector de admisión = 200kPa
- Caudal de blow-by = 0.75l/s (0.00075 m<sup>3</sup>/s)

### Resultado de la simulación



*Figura 19 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de baja a alta carga*

Este supuesto como se puede comprobar se asemeja mucho al anterior, la principal diferencia reside en que en este caso la presión inicial es considerablemente inferior a la presión ambiente debido a que se parte de la situación de baja carga en la que por la contribución de la baja presión en el colector de admisión hace descender la presión del cárter a esos valores considerablemente inferiores. Por lo tanto, comparado con el caso anterior se observa que la contribución en el aumento de la presión en el cárter de el caudal proveniente del ambiente es mayor ya que la diferencia entre la presión del cárter y la ambiental también lo es. Así mismo, al partir la presión del cárter de valores inferiores la contribución del caudal de vapores recirculados a la entrada del turbocompresor llega más retrasada, ya que la presión del cárter tiene que incrementar considerablemente más y ello le lleva más tiempo. De todas

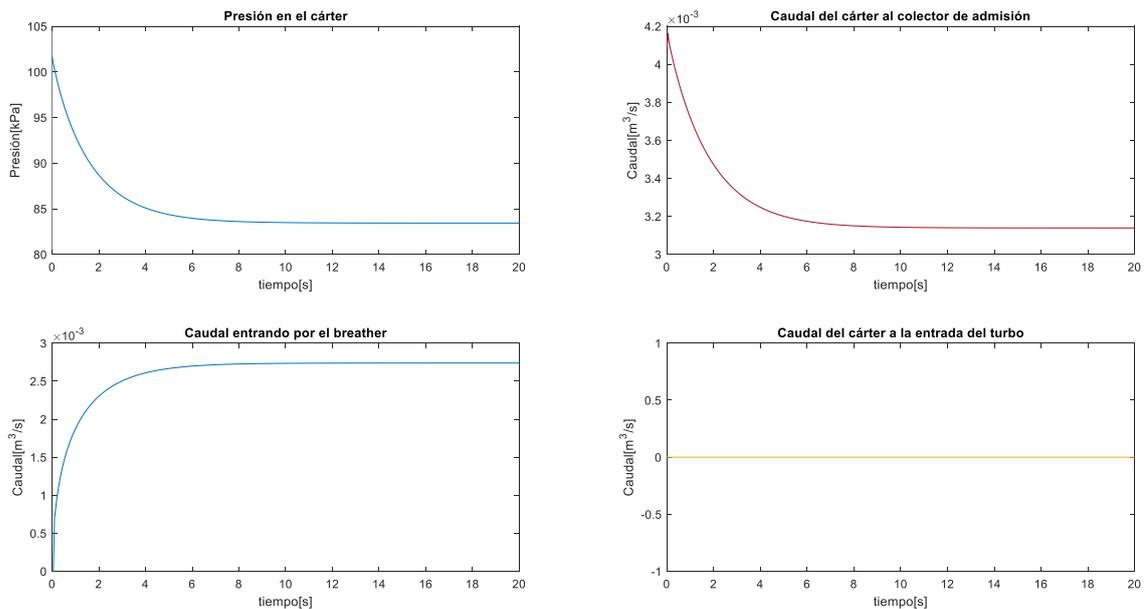
maneras, se puede observar claramente como el régimen permanente de ambos casos es completamente idéntico.

### 5.1.4 PASO DE CARGA ALTA A BAJA CARGA

Condiciones de contorno:

- Presión inicial en el cárter = ligeramente superior a presión ambiente (103 kPa)
- Presión en la entrada del turbocompresor = ligeramente inferior a presión ambiente (100kPa)
- Presión en el colector de admisión = 60kPa
- Caudal de blow-by = 0.4l/s (0.0004 m<sup>3</sup>/s)

Resultado de la simulación



*Figura 20 - Simulación de caso en condiciones normales de paso de alta a baja carga*

En esta última simulación del apartado de los casos de funcionamiento correcto o habitual, observamos un comportamiento muy similar al observado en el primer supuesto, con la única variación en que la presión inicial es ligeramente superior, ya que se trata de la presión en régimen permanente de los dos casos analizados previamente. Este hecho es lo único en lo

que afecta es en que se llegue ligeramente más tarde al régimen permanente y que las gráficas estén ligeramente desfasadas en comparación con ese primer caso.

## ***5.2 FUNCIONAMIENTO INCORRECTO DEBIDO A FALLOS EN EL SISTEMA***

A diferencia de los casos simulados anteriormente, en esta segunda serie de casos, se tratarán de simular aquellas situaciones de funcionamiento en las que algún hecho atípico afecte al sistema de manera negativa, con el objetivo de poder visualizar y analizar los riesgos en el funcionamiento de estos sistemas.

Para estos casos se simulará únicamente aquella situación de funcionamiento que se vea afectado por el fallo, es decir, que para un fallo en el subsistema encargado de recircular vapores al colector de admisión se simulará la situación de transición a baja carga únicamente, ya que en las demás el comportamiento del sistema será el mismo al comportamiento en situaciones normales de funcionamiento. De todas maneras, esto quedará mejor explicado para cada uno de los casos en el momento de entrar en detalle a analizar cada uno de ellos.

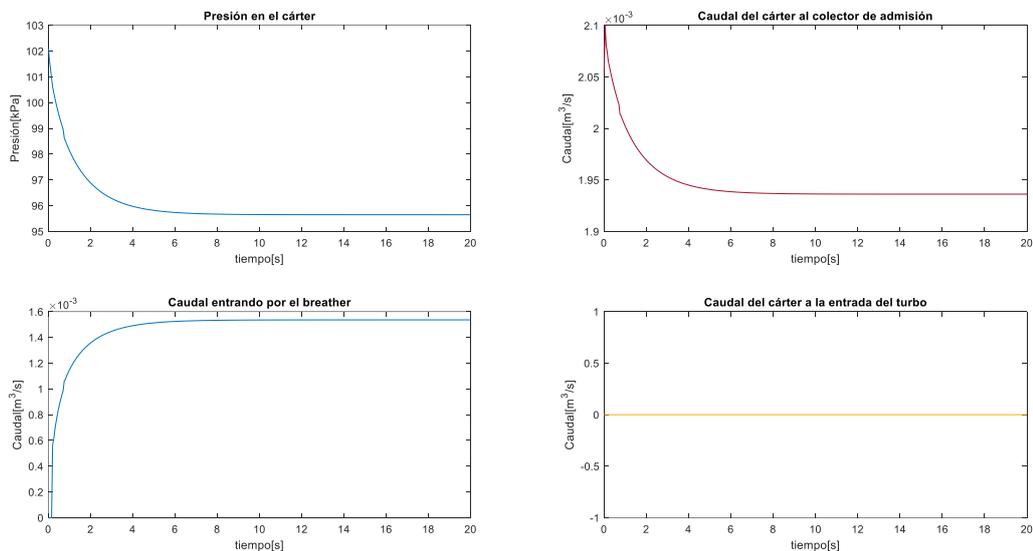
### **5.2.1 ACUMULACIÓN DE RESIDUOS O SUCIEDAD EN LOS CONDUCTOS O EN LAS VÁLVULAS**

En primer lugar, es necesario comentar que el efecto principal que esto produce es que se traduce en que se dé reducción de la sección del conducto y un aumento de las pérdidas secundarias en dicho conducto.

Para estos tres casos que se estudiarán a continuación, se asumirá que la obstrucción es equivalente a una reducción de área de flujo del conducto del 50%. Esta reducción podría ser de distinta magnitud, pero el objetivo de estas simulaciones es hacer una representación del impacto de estos fallos, no así tanto de analizar los números con especial detalle, así de esta manera se podría inferir aproximadamente el impacto de obstrucciones superiores o inferiores.

Estas obstrucciones se pueden dar por numerosos motivos, a pesar de que en principio no sea común ya que el propio decantador se encarga de filtrar gran parte de las partículas de mayor tamaño, pero se dan casos en los que las partículas más pequeñas también se acumulan, además de que en numerosas ocasiones el mantenimiento de estos sistemas no se realiza de la manera adecuada y muchos de sus componentes no terminan funcionando de la manera en la que fueron diseñados.

### ***5.2.1.1 Obstrucción parcial del conducto encargado de recircular los gases al colector de admisión***



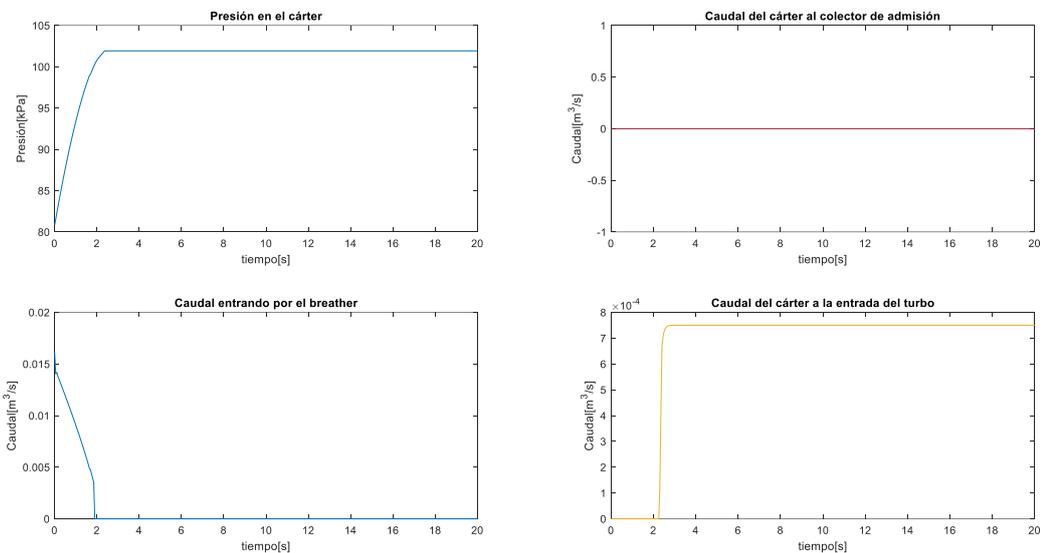
*Figura 21 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el conducto encargado de recircular gases al colector de admisión*

El caso a simular seleccionado ha sido el aquel que pasa de alta a baja carga debido a que es el caso en el que más interviene la recirculación de vapores del cárter al colector de admisión, siendo este último el afectado por la obstrucción simulada.

Como se puede observar, en comparación con el caso base de funcionamiento normal, el caudal que se redirige al colector de admisión es inferior, ya que esta reducción de la sección imposibilita el paso de todo el flujo que se redirigiría por este conducto en condiciones de buen funcionamiento. Esto comprensiblemente tiene una afectación directa a todo el sistema

y en particular a la presión de el volumen de control. Al no ser el subsistema encargado de redirigir los gases al colector de admisión de evacuar la totalidad de su potencial la contribución del flujo proveniente del ambiente es mayor. Es decir que, al tener una sección efectiva menor, para que el caudal evacuado al colector de admisión sea suficientemente alto, la presión en el cárter ha de ser superior a la del caso base para que el diferencial con la presión en el colector de admisión sea mayor y de esta manera se compense.

### ***5.2.1.2 Obstrucción parcial del manguito encargado de recircular los gases a la entrada del turbocompresor***



*Figura 22 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el conducto encargado de recircular gases a la entrada del turbo*

Para la simulación de este supuesto en el que la sección de flujo de la recirculación al turbocompresor se ve afectada, se selecciona la situación en la que se pasa de baja a alta carga debido a que es el caso en el que la recirculación a la entrada del turbocompresor es fundamental para el buen funcionamiento del sistema.

En este caso, se observa con mayor dificultad la diferencia entre estos resultados y los del caso base, debido a que como se comentaba antes, el incremento de presión necesario para recircular a la entrada del turbocompresor los gases del blow-by es baja y por ello variaciones

en esta diferencia de presiones son también menores. De todas formas y a pesar de este hecho, la presión final en el cárter es superior a la del caso base, ya que al verse reducida la sección de paso se compensa con un incremento en la presión final del cárter

### 5.2.1.3 Obstrucción parcial del breather que permite la entrada de aire del ambiente

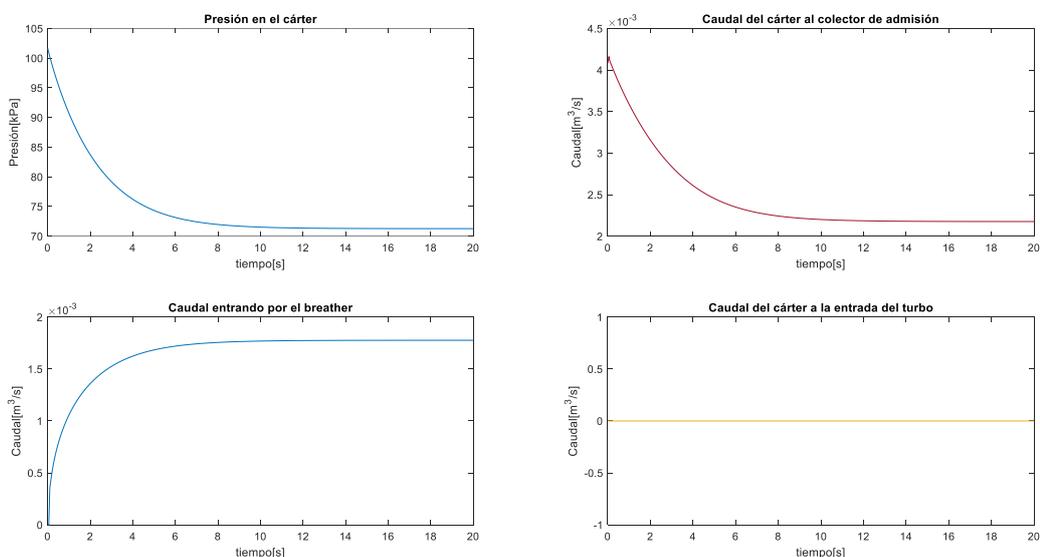


Figura 23 - Simulación de caso de acumulación de suciedad en el breather

Para el análisis del impacto de estas condiciones de funcionamiento adversas, se selecciona nuevamente aquel caso en el que se pasa de alta carga a baja, ya que el efecto del flujo proveniente del ambiente también se ve más claramente representado que en el resto de los casos.

En este supuesto, lo que se observa es que ocurre algo contrario a lo que ocurría en la obstrucción del conducto encargado de redirigir vapores al colector de admisión, es decir, que el caudal a través del breather se ve directamente reducido ya que la sección efectiva de paso se ve considerablemente afectada. Esto claramente afecta a la presión en el cárter ya que en este caso el flujo proveniente del ambiente requiere de mayor diferencial de presiones

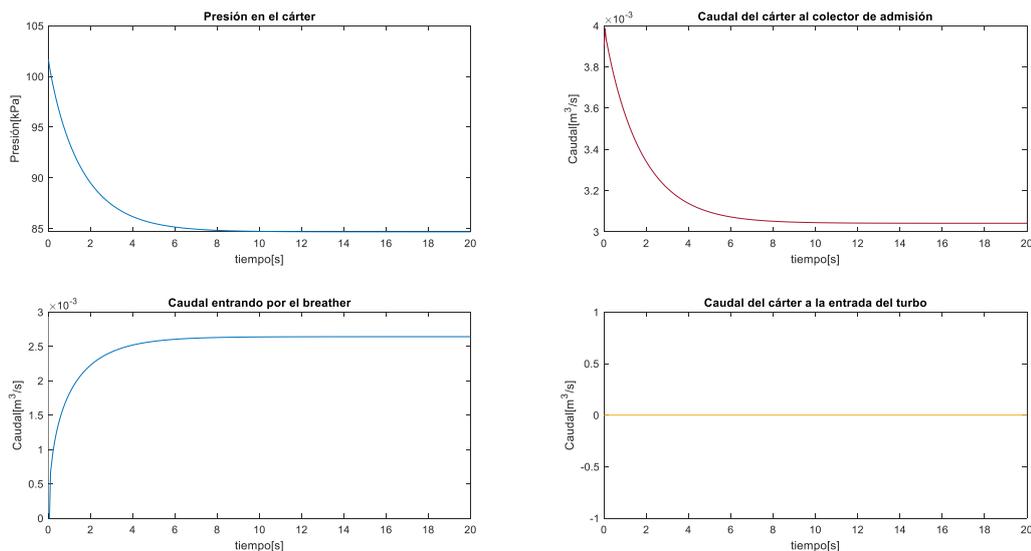
para llegar a niveles parecidos a los del caso base y por ello la presión en el volumen de control es notablemente inferior a la presión del cárter en el caso base.

## 5.2.2 FUGAS EN EL SISTEMA POR PERFORACIONES EN LOS MANGUITOS

Estos supuestos en los que se dé la situación en la que conductos se hayan perforado tendrá como consecuencia la reducción de la efectividad en la recirculación de vapores vertiendo una fracción al ambiente (En el caso de la entrada de aire ambiental al sistema, este no está compuesto por ningún manguito, por ello no habrá caso en el que se pueda hablar de perforación en algún conducto del mismo)

Estas situaciones se pueden dar en multitud de ocasiones y en muchos casos son complicadas de detectar. Pueden darse por motivos relacionados con temperatura, con desgaste, o incluso con un accidente o un despiste en algún periodo de mantenimiento o sustitución de algún otro componente del motor.

### 5.2.2.1 Perforación en el manguito que recircula los vapores al colector de admisión



*Figura 24 - Simulación de caso de perforación del conducto encargado de recircular vapores al colector de admisión*

En este caso, ocurre algo bastante similar al caso de la obstrucción en el manguito por el cual se recirculan los vapores al colector de admisión, la principal diferencia es, que en este caso el incremento de la presión del cárter respecto al caso base no es tan marcada. Además, el razonamiento subyacente es totalmente distinto, en este caso no es que se reduzca la sección de paso, sino que se reduce la eficiencia de paso debido a que este agujero permite el paso de aire del ambiente que dificulta el flujo correcto de los vapores del cárter. En este caso de hecho, no habrá flujo saliendo a través del orificio, sino al contrario ya que la presión atmosférica también será inferior a la presión en el colector de admisión, lo que contribuirá a la dificultad de paso de los vapores al colector de admisión.

### 5.2.2.2 Perforación en el manguito que recircula los vapores a la entrada del turbocompresor

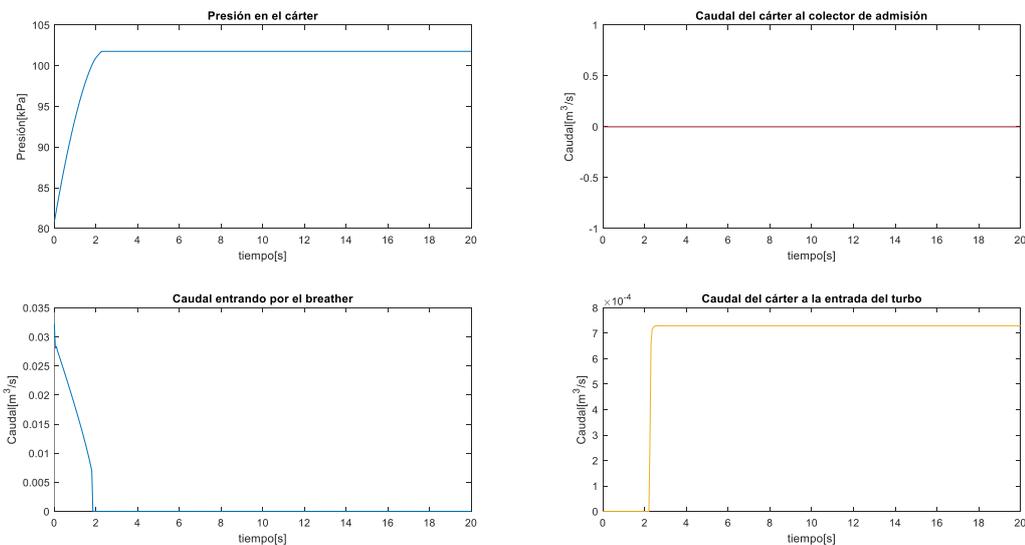


Figura 25 - Simulación de caso de perforación del conducto encargado de recircular vapores a la entrada del turbocompresor

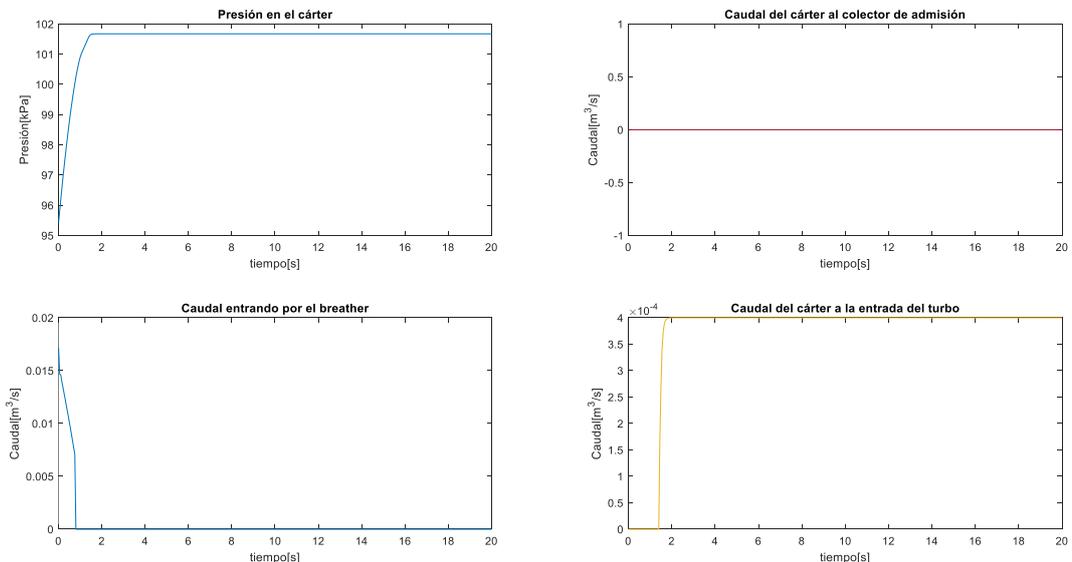
En este segundo caso, el efecto es poco apreciable en términos de presión final del cárter, ya que el sobrepaso respecto a la presión en la entrada del turbocompresor es pequeña, sin embargo lo que realmente está ocurriendo es que al ser la presión en el cárter superior a la presión atmosférica, en este caso sí que habrá una fracción reducida de vapores del cárter

que estén saliendo al exterior a través de este orificio, lo cual en cambio sí que se puede apreciar en el valor final del caudal recirculado del cárter a la entrada del turbocompresor, el cual es ligeramente inferior al caudal total de blow-by en el caso de alta carga, y precisamente esa diferencia es la que está escapándose a través del orificio.

### 5.2.3 OBSTRUCCIÓN TOTAL DE VÁLVULAS IMPLICANDO LA IMPOSIBILIDAD DE QUE FLUYA ALGÚN CAUDAL POR ESOS CONDUCTOS

En esta última serie de casos se simularán aquellas situaciones en las que por acumulación de residuos, por rotura de algún componente de las válvulas o por cualquier otro posible incidente alguna de las válvulas esté totalmente bloqueada y no permita en ningún caso el paso de caudal.

#### 5.2.3.1 Obstrucción de la válvula que regula el paso de vapores al colector de admisión



*Figura 26 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula reguladora de la recirculación al colector de admisión*

Para este caso se ha simulado un caso en el que se pase de una situación de reposo en la que se tenga una presión de partida en el cárter ligeramente inferior a la presión atmosférica, y se pase a un estado de baja carga en la que la presión en el colector de admisión sea considerablemente inferior a la presión ambiental.

En este caso lo que se observa es que ya no se obtiene una presión final del cárter inferior a la de ambiente ya que por la válvula que recircula los gases al colector de admisión ya no pasa flujo, y por lo tanto la presión se queda cercana a la presión de la entrada del turbocompresor, puesto que al no haber ninguna posible recirculación la presión sube hasta sobrepasar la presión en la entrada al turbocompresor y en ese caso ya sí que se da la recirculación. Esto resulta negativo ya que el poder tener presiones moderadamente inferiores a la presión ambiente en el cárter aumenta la eficiencia del motor. Siendo esto una consecuencia negativa, no se trata de algo que comprometa la integridad del sistema, ya que en ningún caso la presión en el cárter excederá considerablemente la presión atmosférica.

Este caso podría simular de una forma aproximada lo que sería el funcionamiento de un sistema de ventilación de vapores del cárter con simplemente una recirculación a la entrada del turbo, pero como ya se mencionó anteriormente, se suele realizar sobre todo en motores con la válvula de mariposa antes de la entrada del turbo, de forma que puede llegarse a presiones inferiores a la de ambiente.

Además, en este caso el respirador no intervendrá en ninguna ocasión, por lo que resultaría innecesario este componente en el sistema.

### 5.2.3.2 Obstrucción de la válvula responsable de permitir el paso de flujo a la entrada del turbocompresor

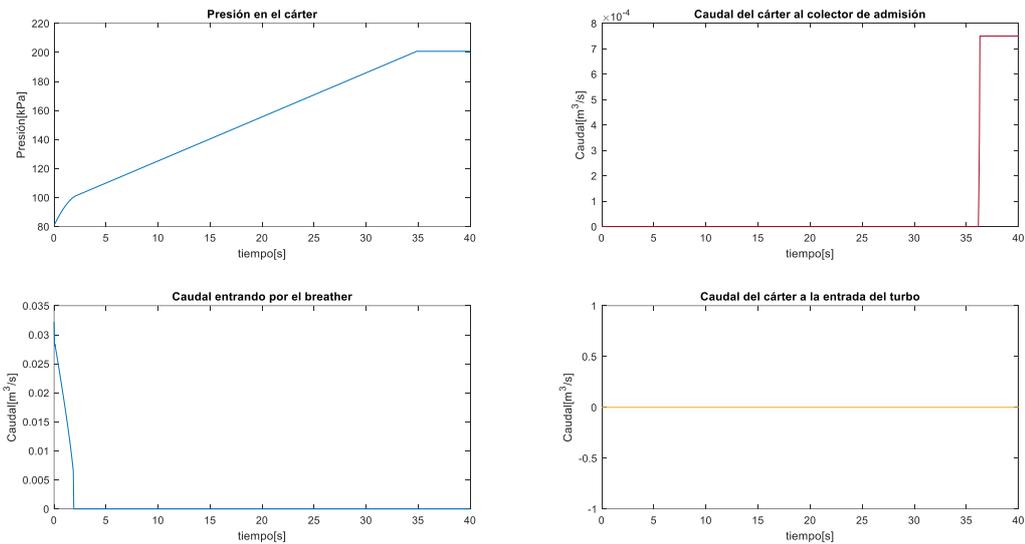


Figura 27 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula reguladora de la recirculación a la entrada del turbocompresor

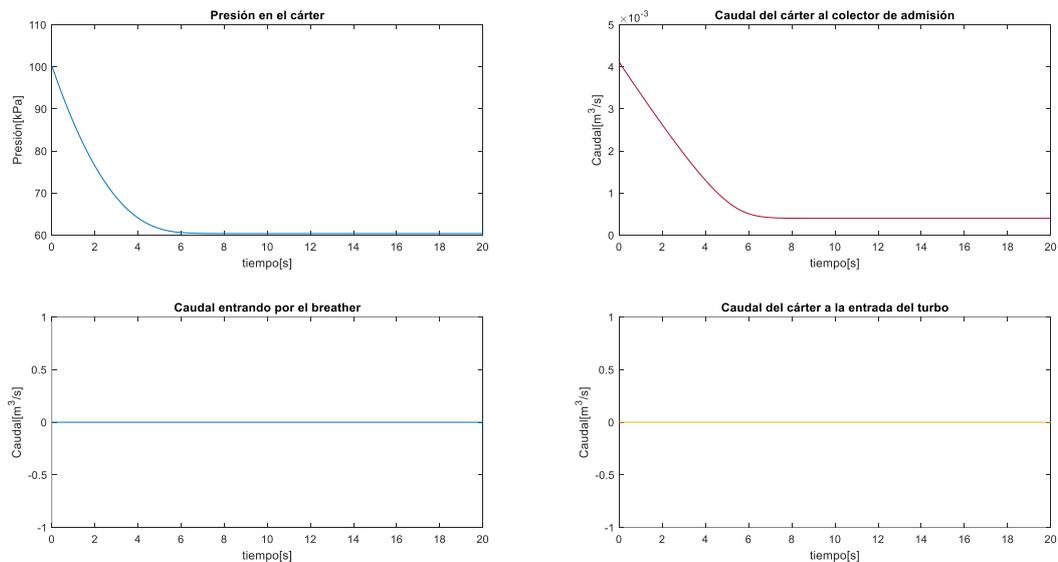
En este segundo caso el objetivo es simular la obstrucción de la válvula que permite la recirculación de vapores a la entrada del turbocompresor. Por ello se ha simulado el caso en el que se pasa de un estado de baja carga a un estado de alta carga en el que mejor se observa el impacto de este inconveniente.

Como se puede observar en primer lugar, la presión en el cárter se dispara y no para de aumentar hasta superar la presión en el colector de admisión. Esto se debe a que al no poder recircularse vapores que entran al sistema, estos se van acumulando y disparando la presión. Este aumento de presión no se detiene hasta que no supera, como se ha mencionado antes, la presión en el colector de admisión, momento en el que ya se pueden recircular dichos vapores a este. Se trata de un caso altamente problemático ya que se alcanzan presiones en el sistema peligrosas, y se podrían dar casos en los que la presión en el colector de admisión alcance valores aún más elevados, potencialmente dañando algún componente del motor. Se

trata de un caso grave sobre todo si se circula en este régimen de alta carga un tiempo prolongado.

Este caso, podría asemejarse al funcionamiento de un sistema con única recirculación al colector de admisión, pero como se menciono anteriormente son sistemas que se han dejado de emplear principalmente por el problema de sobrepresiones observado. Además este tipo de sistemas, se empleaban en el comienzo de los motores con turbocompresor, en los que las presiones en el colector de admisión no se elevaban a valores de esa magnitud, lo cual a pesar de empeorar la eficiencia de los motores no implicaba un riesgo tan elevado como lo que implica el presente fallo analizado.

### 5.2.3.3 Obstrucción del breather



*Figura 28 - Simulación de caso de obstrucción total de la válvula del breather*

En este último caso, la válvula que está inoperativa es la del respirador que permite la entrada de aire del ambiente. En este caso ocurre algo opuesto a lo que ocurría en el caso en el que la válvula de la recirculación al colector de admisión estaba obstruida. En este caso al solo tener el sistema que recircular los vapores procedentes del blow-by, y estar diseñada su geometría para trabajar en esta situación con un caudal procedente del ambiente, requiere de

un diferencial de presiones muy reducido para poder recircular los gases que entran al sistema, y por lo tanto la presión en el cárter se reduce hasta llegar a unos valores muy cercanos a la presión en el colector de admisión.

En esta última simulación, el comportamiento se podría asemejar al de un motor sin breather, pero la principal diferencia es que los sistemas sin este respirador están diseñados para dichas condiciones de funcionamiento de forma que las geometrías del sistema y de sus válvulas aseguran el mantenimiento de la presión del cárter en valores óptimos para el funcionamiento del motor de combustión.

### **5.3 RESUMEN Y POSIBLES SOLUCIONES**

Como a lo largo de este capítulo se ha podido observar, los diferentes imprevistos que pueden afectar al sistema tienen impactos considerablemente dispares. Por destacar los casos con mayor impacto negativo en el sistema, se comenzaría en primer lugar por la obstrucción total de la válvula que recircula los gases a la entrada del turbocompresor, ya que las sobrepresiones resultan tener el impacto más crítico en el funcionamiento del motor, y por otro lado las obstrucciones del breather, ya que al no estar diseñado el sistema para que este no funcione de manera correcta, se llega a presiones excesivamente bajas en el cárter. Por lo tanto, aquellos casos en los que se den valores de presiones que se alejen en exceso de la presión atmosférica, representarán un riesgo para el sistema, especialmente si son casos de sobrepresiones.

Una vez analizados todos estos casos, resulta aparente la importancia que tiene realizar un buen mantenimiento de este sistema, ya que la inversión económica y de tiempo es menor al riesgo que implica no hacerlo. Además de esto, se están desarrollando nuevas soluciones para seguir avanzando con el diseño de estos sistemas.

Algunas de las soluciones más interesantes al respecto son, por un lado, los sistemas con válvulas controladas de forma electrónica que se están desarrollando, ya que esto permite regulaciones más precisas de la apertura de las mismas sin tener que diseñar válvulas de

geometrías complejas, además de que estas geometrías también tienen sus limitaciones. Por otro lado, se están desarrollando de forma paralela, e incluso potencialmente complementaria, sistemas capaces de bajar la presión en el cárter de forma continuada que lo que hacen es crear succión adicional de estos vapores con distintos motores, bombas y mecanismos, cuya principal complicación es la recirculación de estos gases a la admisión de forma que no se liberen gases contaminantes adicionales al ambiente.

## **Capítulo 6. CONCLUSIONES**

En el presente proyecto, se ha procedido a realizar el análisis del funcionamiento de los sistemas de ventilación de vapores del cárter, en concreto modelando un sistema genérico de un motor de combustión interna diésel turbo, de en torno a 180 caballos de potencia, ya que representa uno de los tipos de motores más exigentes para estos sistemas. A través del modelado conceptual y numérico del comportamiento de estos sistemas bajo distintas condiciones de funcionamiento, se han logrado identificar las principales características que afectan al funcionamiento de los mismos, así como las recirculaciones más importantes y los casos de fallos en el funcionamiento del sistema más críticos para la totalidad del motor de combustión.

La primera parte está centrada en el estudio y análisis de los principales procesos que ocurren en los motores de combustión interna, cuáles son los procesos que motivan la necesidad de que se empleen sistemas de ventilación de vapores del cárter y cuáles son sus principales funciones. Esta sección resulta crítica para poder comprender y realizar un estudio más exhaustivo de las secciones que procederán a dicha primera parte. Además, en esta parte se describirán los principales tipos de sistemas de ventilación del cárter, lo cual participará en el desarrollo y elección de un tipo concreto para los posteriores modelados y simulaciones que se realizarán.

La segunda parte de este trabajo se ha centrado en el desarrollo del modelo que simulará el comportamiento de estos sistemas y sus principales variables. A la hora de explicar el desarrollo del modelo se ha tratado de ser lo más detallado posible ya que resulta fundamental de cara poder comprender los resultados y lo que estos implican, así como las características que mayor influencia tienen, en cuanto al diseño y la geometría, en el funcionamiento de estos sistemas. Además, se han especificado todas las ecuaciones, asunciones y aproximaciones que han sido necesarias para su desarrollo, así como todas las simplificaciones efectuadas para llegar desde el sistema real hasta el modelo numérico, o computacional para ser más exactos, empleado en las simulaciones.

A continuación, en la tercera parte y una vez desarrollado el modelo, el cual serviría para numerosos tipos de motores, se han empleado las características particulares de un motor de combustión diesel con turbo de en torno a 180 caballos para el que se han particularizado los parámetros de manera que se pudiesen simular las diferentes situaciones de funcionamiento a las que puede estar sometido un motor de combustión interna. Las simulaciones de mayor interés resultan aquellas en las que se trata de replicar una situación en la que por algún tipo de fallo en el sistema este se encuentra trabajando de forma incorrecta, con el objetivo de potencialmente descubrir qué consecuencias puede tener cada una de las situaciones.

Por último, cabe mencionar que de estas simulaciones de fallos en el sistema, se permite observar la sensibilidad de estos sistemas, su importancia en los motores de combustión interna, y cuáles son las situaciones más críticas a lo largo de su vida útil. Como se ha mencionado en numerosas ocasiones, estos sistemas son fundamentales en el control de emisiones de motores de combustión interna, y su correcto funcionamiento se hace vital para el buen funcionamiento del motor en términos de contaminación, pero también de prestaciones.

## **Capítulo 7. TRABAJOS FUTUROS**

El presente proyecto se ha enfocado en el estudio de los sistemas de ventilación de vapores del cárter de motores actuales, así como su comportamiento bajo diferentes condiciones de funcionamiento, tratando de analizar los principales puntos más críticos y sensibles de estos sistemas.

Como se ha podido concluir a lo largo de este estudio, las válvulas de estos sistemas, así como la geometría del sistema en su conjunto juegan un papel crucial en el comportamiento de estos, además de los riesgos que puede implicar la acumulación de depósitos en las diferentes partes del sistema.

Ampliaciones de este estudio podrían cubrir tanto el efecto de variaciones tanto en las válvulas como en la geometría del sistema, así como el análisis de sistemas más avanzadas en desarrollo como son los sistemas de control electrónico de válvulas o los sistemas de presión negativa del cárter. Por otro lado, y debido a la importancia que tienen los decantadores en asegurar que la totalidad del sistema esté lo más libre de suciedades posible, se podría realizar un estudio detallado del funcionamiento de estos componentes, las distintas tipologías y posibles desarrollos que se estén implementando en la actualidad.

## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Markel, A. “PCV VALVE FACTS“. Underhood Service. February, 2016.  
<https://www.underhoodservice.com/pcv-valve-facts/>
- [2] Westerman, B. “CJ3A Crankcase Ventilation“. February, 2020  
<https://cj3a.info/tech/pcv.html>
- [3] McNally, N.A. “What are PCV Oil Catch Cans and Why Do Direct Injection Engines Need One“, April 2017. [https://www.mcnallyelectronics.com/What-are-PCV-Oil-Catch-Cans-and-Why-Do-Direct-Injection-Engines-Need-One\\_b\\_7.html](https://www.mcnallyelectronics.com/What-are-PCV-Oil-Catch-Cans-and-Why-Do-Direct-Injection-Engines-Need-One_b_7.html)
- [4] Corkett, K. “How to keep a crankcase breathing“. International Online. May, 2011.  
<https://www.iol.co.za/motoring/how-to-keep-a-crankcase-breathing-1075902>
- [5] Jaaskeleinen, H. “Crankcase Ventilation“. DieselNet, June, 2021.  
[https://dieselnet.com/tech/engine\\_crank.php](https://dieselnet.com/tech/engine_crank.php)
- [6] Cox, J. “Managing Engine Blow-by with Crankcase Ventilation Systems” Solberg Filtration, June 2023. <https://www.solbergmfg.com/es/resources/blog/crankcase-ventilation-system-for-engine-in-the-pow>
- [7] Markus, F. “Turbocharger vs. Supercharger: What’s the Difference?” MotorTrend. 2020. <https://www.motortrend.com/how-to/turbocharger-vs-supercharger-whats-difference-types-explained/>
- [8] Cummins, N.A. “HOW A TURBOCHARGER WORKS”, Cummins,  
<https://www.cummins.com/components/turbochargers/how-a-turbocharger-works>
- [9] Grupo Herres, “Conoce qué es un sistema de lubricación y cuál es su función” Grupo Herres. June, 2021. <http://www.grupoherres.com.mx/sistema-de-lubricacion/#valvula-descarga>
- [10] Plaza, D. “ ¿Qué es el cárter? Funcionamiento y partes” April, 2020. <https://www.motor.es/que-es/carter>
- [11] Jones, K. “What Is Diesel Blow” MotorTrend, April 2020.  
<https://www.motortrend.com/how-to/what-is-blow-by/>
- [12] Mitchell, B. “Engine blow-by with oxygenated fuels: A comparative study into cold and hot start operation” Energiy, December 2017. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.115>

- [13] Ian, N.A. “Improved Engine Crankcase Breather System explained”. Flash customs, March 2012. <https://flashcustoms.wordpress.com/2012/03/21/improved-engine-crankcase-breather-system-explained/>
- [14] Ahmed, S. “Emission Control Technologies in Spark Ignition Engines”. November 2020. [https://www.researchgate.net/publication/345318341\\_Emission\\_Control\\_Technologies\\_in\\_Spark\\_Ignition\\_Engines](https://www.researchgate.net/publication/345318341_Emission_Control_Technologies_in_Spark_Ignition_Engines)
- [15] Fesmex. “Pérdidas por fricción en tuberías” January 2020. <https://www.fesmex.com.mx/article/perdidas-por-friccion-en-tuberias/>
- [16] Opoku, E “Having issues with Oil Dilution”. Citi newsroom, May 2020. <https://citinewsroom.com/2020/05/edward-opoku-writes-having-issues-with-oil-dilution/>
- [17] Raja, S “Internal Combustion Engines – IC Engines” The teche, February 2021. <https://theteche.com/internal-combustion-engines-ic-engines/>
- [18] Aydogan, H “Renewable Energy Sources Energy Policy and Energy Management Investigation of Intake Manifold Design and Its Effect on Engine Performance” Researchgate, September 2020. [https://www.researchgate.net/figure/Intake-manifold-section-view-7\\_fig2\\_348263871](https://www.researchgate.net/figure/Intake-manifold-section-view-7_fig2_348263871)
- [19] Fersainz, R “Mecánica básica: ¿cómo funciona un motor de coche?” Autobild, April 2018. <https://www.autobild.es/practicos/como-funciona-motor-coche-286423>
- [20] “Fundamentos básicos de los lubricantes: ¿Cómo funciona el aceite de motor?” Wolf, November 2021. <https://es.wolfubes.com/es-es/noticias/fundamentos-basicos-de-los-lubricantes-como-funciona-el-aceite-de-motor-5-9>
- [21] “How to Install an Oil Catch Can on a Toyota 2.2L 5SFE Engine” Axle addict, May 2022. <https://axleaddict.com/auto-repair/Engine-KnockOil-Burn-Install-an-Oil-Catch-Can-Toyota-22L-5SFE-Engine-With-Video>
- [22] Kraus, J “1968: U.S. Lawmakers Impose Limits On Automotive Emissions” Auto Universum, December 2017. <https://autouniversum.wordpress.com/2017/12/07/1968-u-s-lawmakers-impose-limits-on-automotive-emissions/>

## **ANEXO I – CÓDIGO DE MATLAB**

```
% Modelo de presiones y caudales sistema de ventilación de vapores del cárter
%% Definición de variables y parámetros
Pint = 180*10^3; %presión en el colector de admisión [Pa]
Pturb = 101.5*10^3; %presión en la entrada al turbo [Pa]
Pamb = 101.25*10^3; %presión ambiente [Pa]
g = 9.81; % valor de la gravedad [m/s^2]
d = 9.86; % densidad de la mezcla [kg/m^3]
R = 304; % constante R [m^3*Pa/K/kg]
T = 333; % temperatura de los gases [K]
V = 0.025; % volumen del carter [m^3]
A = 5*10^-4; % area de los conductos del sistema [m^2]
mu=0.0466; % coeficiente de viscosidad dinámica de la mezcla [N*s/m^2]
di=2.5*10^-2; % diametro de los conductos del sistema [m]
L_ac=0.1; % longitud conducto carter-turbo
L_at=1; % longitud conducto carter-turbo
L_ai=1; % longitud conducto intake-turbo
Qblow = 0.0075; % blow by flow [m^3/s]
K1=1.2*10^3; %Diferencial de presión necesario para abrir válvula debido al muelle
K2=1.2*10^3; %Diferencial de presión necesario para abrir válvula debido al muelle
K3=1.2*10^3; %Diferencial de presión necesario para abrir válvula debido al muelle
Ks=2; % coeficiente K en perdidas secundarias valvulas
syms Pcart %presión en el cárter [kPa]

%% Ecuación genérica de caudales
%Qint+Qturb+(Pcart-Pcart1)*V/(0.1*R*T)=Qamb+Qblow

%% Resolución de la ecuación
```

```

Qint = sqrt(2*(Pcart-Pint)/d)*A; %Ecuacion del caudal que va del cárter al intake
Qturb = sqrt(2*(Pcart-Pturb)/d)*A; %Ecuacion del caudal que va del cárter a la entrada del
turbo
Qamb = sqrt(2*(Pamb-Pcart)/d)*A; %Ecuacion del caudal que entra por el breather

%% Pérdidas
% Pérdidas primarias
%  $Re = d * Vel * \rho / \mu$ 
%  $f = 64 / Re$ 
%  $h_f = f * L * V^2 / (d * 2 * g)$ ;
% Pérdidas secundarias
%  $h_m = K * Vel^2 / (2 * g)$ 
%% Extracción de soluciones
i=1;
Pcart1 = 101.3*10^3;
Vel_ac = 0;
Vel_at = 0;
Vel_ai = sqrt(2*(Pcart1-Pint)/d);
ai=1;
at=1;
am=1;
for t=0:0.05:20
    if(Pcart1>Pturb && Pcart1<(Pturb+K2))
        at =(Pcart1-Pturb)/K2;
        if(at>1)
            at=1;
        end
    if(Pcart1>Pturb+K3)
        at = 2-(Pcart1-Pint)/K3
        if(at<0.1)

```

```
        at=0.1;
    end
end
end
if(Pcart1>Pint && Pcart1<(Pint+K3))
    ai =(Pcart1-Pint)/K3;
end
if(Pcart1>Pint+K3)
    ai = 2-(Pcart1-Pint)/K3;
    if(ai<0.1)
        ai=0.1;
    end
end
if(Pamb>Pcart1 && Pamb<(Pcart1+K1))
    am =(Pamb-Pcart1)/K1;
end
if(Pamb>Pcart1+K3)
    am = 2-(Pamb-Pcart1)/K3;
    if(am<0.1)
        am=0.1;
    end
end
if(Pcart1>Pamb) % simulación efecto de la válvula
    Qamb = 0;
    hs_ac = 0;
else
    hs_ac = Ks*(Vel_ac)^2/(2*g);
    Qamb = sqrt(2*(Pamb-Pcart-hs_ac*d)/d)*A*0.1;
    double(sqrt(2*(Pamb-Pcart1-hs_ac*d)/d)*A*am);
end
```

```

if(Pcart1<Pturb) % simulación efecto de la válvula
    Qturb = 0;
    Re_at =
    f_at = 0;
    hf_at = 0;
    hs_at = 0;
else Re_at = d*Vel_at*di/mu; % numero de reynolds cart-turbo
    f_at = 64/(d*Vel_at*di/mu);
    hs_at = Ks*(Vel_at)^2/(2*g);
    if(Re_at==0) f_at=0;
    end
    hf_at= f_at*L_at*Vel_at^2/d/2/g;
    Qturb = sqrt(2*(Pcart-Pturb-(hf_at+hs_at)*d)/d)*A*at;
end
if(Pcart1<Pint) % simulación efecto de la válvula
    Qint = 0;
    Re_ai = 0;
    f_ai = 0;
    hf_ai = 0;
    hs_ai = 0;
else Re_ai = d*Vel_ai*di/mu; % numero de reynolds en cart-intake
    f_ai = 64/Re_ai;
    hs_ai = Ks*(Vel_ai)^2/(2*g);
    if(Re_ai==0) f_ai=0;
    end
    hf_ai= f_ai*L_ai*Vel_ai^2/d/2/g;
    Qint = sqrt(2*(Pcart-Pint-(hf_ai+hs_ai)*d)/d)*A*ai;
end

Ans = solve((Qint+Qturb+(Pcart-Pcart1)*V/(0.05*R*T)-Qamb-Qblow==0),Pcart);

```

```

Pcart1=double(Ans);
P(i)= double(Ans)/1000; % Vector que guarda la presión del cárter en cada punto de
tiempo
    if(Pcart1+am*K1>Pamb)
        Qa(i)= 0; % Vector que guarda el caudal que entra por el breather
    else Qa(i)= sqrt(2*(Pamb-double(Ans)-hs_ac*d)/d)*A*ai;
        Vel_ac= sqrt(2*(Pamb-Pcart1-hs_ac*d)/d); % variable auxiliar que guarda velocidad
en breather
    end
    if(Pcart1<Pturb+at*K2)
        Qt(i)= 0; % Vector que guarda el caudal del carter a la entrada del turbo
    else Qt(i)= sqrt(2*(double(Ans)-Pturb-(hf_at+hs_at)*d)/d)*A*at;
        Vel_at= sqrt(2*(Pcart1-Pturb-(hf_at+hs_at)*d)/d); % variable auxiliar que guarda
velocidad en cond turbo
    end
    if(Pcart1<Pint*ai+K3)
        Qi(i)= 0; % Vector que guarda el caudal del carter al intake
    else Qi(i)= sqrt(2*(double(Ans)-Pint-(hs_ai+hf_ai)*d)/d)*A*ai;
        Vel_ai= sqrt(2*(Pcart1-Pint-(hf_ai+hs_ai)*d)/d); % variable auxiliar que guarda
velocidad en cond intake
    end
    i=i+1
end
%% Gráficas
figure; hold on
subplot(2,2,1)
plot(0:0.05:20,P)
title('Presión en el cárter')
xlabel('tiempo[s]')
ylabel('Presión[kPa]')

```

```
subplot(2,2,2)
plot(0:0.05:20,Qi,'Color','#A2142F')
title('Caudal del cárter al colector de admisión')
xlabel('tiempo[s]')
ylabel('Caudal[m^3/s]')
subplot(2,2,3)
plot(0:0.05:20,Qa,'Color','#0072BD')
title('Caudal entrando por el breather')
xlabel('tiempo[s]')
ylabel('Caudal[m^3/s]')
subplot(2,2,4)
plot(0:0.05:20,Qt,'Color','#EDB120')
title('Caudal del cárter a la entrada del turbo')
xlabel('tiempo[s]')
ylabel('Caudal[m^3/s]')
```