

Documento

Nº

1

MEMORIA

1.1. Memoria Descriptiva..... 7

1.1.1	<u>DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO Y OBJETIVOS.</u>	
	<u>POSIBLES VARIANTES</u>	7
1.1.2	<u>DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE ESQUEMA GENERAL DE</u>	
	<u>FUNCIONAMIENTO</u>	12
1.1.2.1	<u>Descripción de esquema general de funcionamiento</u>	12
1.1.2.1.1	<i><u>Motor neumático tipo I</u></i>	13
1.1.2.1.2	<i><u>Motor neumático tipo II</u></i>	17
1.1.2.1.3	<i><u>Motor neumático tipo III</u></i>	18
1.1.2.2	<u>Definición y requisitos de cada componente</u>	21
1.1.2.2.1	<i><u>Motor neumático tipo I</u></i>	22
1.1.2.2.2	<i><u>Motor neumático tipo II</u></i>	31
1.1.2.2.3	<i><u>Motor neumático tipo III</u></i>	31
1.1.2.3	<u>Descripción de las distintas opciones.Ventajas e inconvenientes</u>	37
1.1.2.3.1	<i><u>Opción I: Sistema sin posibilidad de recarga autónoma y sin recuperación de energía</u></i>	37
1.1.2.3.2	<i><u>Opción II: Sistema con posibilidad de recarga autónoma y recuperación de energía en las frenadas.</u></i>	38



1.1.2.3.3	<i>Opción III: Sistema con recuperación de energía en las frenadas</i>	42
1.1.2.4	<u>Primeros cálculos generales: dimensiones, potencia, par, ...</u>	44
1.1.3	<u>ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO</u>	51
1.1.3.1	<u>Análisis de los ciclos termodinámicos</u>	51
1.1.3.1.1	<i>Ciclos teóricos</i>	52
1.1.3.1.1.1	<i>Motor neumático tipo I</i>	53
1.1.3.1.1.2	<i>Motor neumático tipo II</i>	60
1.1.3.1.1.3	<i>Motor neumático tipo III</i>	70
1.1.3.1.2	<i>Ciclos reales</i>	76
1.1.3.1.3	<i>Ciclos prácticos</i>	77
1.1.3.2	<u>Autonomía</u>	78
1.1.3.2.1	<i>Energía de compresión</i>	80
1.1.3.2.2	<i>Balance energético</i>	81
1.1.3.2.3	<i>Autonomía teórica</i>	83
1.1.3.2.3.1	<i>Motor neumático tipo I</i>	84
1.1.3.2.3.2	<i>Motor neumático tipo II</i>	85
1.1.3.2.3.3	<i>Motor neumático tipo III</i>	87
1.1.3.3	<u>Elección final</u>	88
1.1.4	<u>AUTONOMÍA DEL SISTEMA SOBREALIMENTADO</u>	91
1.1.5	<u>EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DURANTE EL VACIADO DEL DEPÓSITO</u>	96
1.1.6	<u>COMENTARIO A LOS TRANSITORIOS DEL VEHÍCULO</u>	105
1.1.7	<u>DISEÑO DEL INYECTOR</u>	108



1.1.7.1	<u>Requisitos de los componentes principales</u>	109
1.1.7.2	<u>Cálculo de la fuerza magnética necesaria</u>	111
1.1.7.3	<u>Cálculo de la energía magnética necesaria</u>	112
1.1.7.4	<u>Resultados diseño</u>	116
1.1.8	<u>CORRECCIÓN DE TIEMPOS DE INYECCIÓN</u>	120
1.1.9	<u>SISTEMA DE CALENTAMIENTO</u>	125
1.1.9.1	<u>Comentario previo</u>	125
1.1.9.2	<u>Extensión al motor neumático</u>	127
1.1.9.2.1	<i>Medio “refrigerante”</i>	129
1.1.9.2.2	<i>Suposiciones realizadas</i>	129
1.1.9.2.3	<i>Cálculo aproximado de la temperatura de escape</i>	130
1.1.10	<u>CONCLUSIÓN FINAL</u>	134

1.2. Estudio económico.....136

1.2.1	<u>VIABILIDAD DE LA ADAPTACIÓN DEL VEHÍCULO</u>	136
1.2.1.1	<u>Descripción ciclos de conducción. Razonamiento del ciclo escogido</u> 136	
1.2.1.2	<u>Comparación motor neumático con motor de serie</u>	137
1.2.2	<u>RENTABILIDAD ECONÓMICA DE LA ADAPTACIÓN</u>	141
1.2.2.1	<u>Cálculos económicos</u>	141
1.2.2.2	<u>Conclusión</u>	145

1.3. Anexos.....148

1.3.1	<u>Notaciones</u>	148
-------	--------------------------------	-----



1.3.2. <u><i>Variables y unidades</i></u>	150
1.3.3. <u><i>Bibliografía</i></u>	155
1.3.4. <u><i>Tablas y resultados</i></u>	157



1.1.

Memoria Descriptiva



1.1. Memoria Descriptiva

1.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO Y OBJETIVOS.

POSIBLES VARIANTES

En este proyecto se aborda la adaptación de un motor de combustión interna alternativo de un vehículo del mercado para un posterior funcionamiento como motor neumático, esto es, propulsado vía aire comprimido.

El objetivo inicial del proyecto es conseguir que los usuarios de este modelo de vehículo puedan adaptar su utilitario de serie de acuerdo con las especificaciones que se fijen aquí y de forma que, con una inversión lo más económica posible, se obtenga un vehículo que no dependa ya del combustible diesel.

El vehículo elegido es un Smart Fortwo CDI equipado con un motor de encendido por compresión (MEC) de 30 kilovatios de potencia máxima y tres cilindros en serie que consiguen una cilindrada total de 799 cm³. Posteriormente se concretarán con más detalle las características principales de dicho motor.

El sistema “grosso modo” consistirá en transformar la energía almacenada en forma de aire a alta presión, en un depósito a instalar en el vehículo, en energía mecánica en el cigüeñal del motor, mediante la liberación del aire a presión a los cilindros.

A priori se plantean tres posibles variantes de motor neumático para la adaptación del vehículo de serie según el modo de funcionamiento escogido y que, más en concreto, tendrán que ver con el proceso de renovación de la carga que en éste se lleve a cabo y la manera en que la inyección del aire a presión sea realizada.



A continuación se detallan cuáles son dichas variantes, a las que se identificará en lo sucesivo como *motores neumáticos tipo*, hasta que, llegado el momento, se opte por una de ellas como sistema finalmente escogido para la adaptación del Smart de serie.

Los tres posibles sistemas de funcionamiento a estudiar son los que siguen:

- *Motor neumático tipo I*: Se trata del sistema planteado desde un principio para la realización del proyecto. Consiste en un motor que realiza la renovación de la carga de acuerdo a un ciclo de dos tiempos e inyectando el aire comprimido durante toda la carrera de trabajo del pistón.

- *Motor neumático tipo II*: Este modelo consiste en una modificación del sistema anterior donde, manteniendo el ciclo en dos tiempos, se inyecta el aire comprimido durante un cierto porcentaje de la carrera, pero a una presión mayor que la teórica y de forma que el trabajo obtenido en la expansión del aire se mantenga constante.

- *Motor neumático tipo III*: Esta última variante planteada presenta un ciclo de renovación de la carga en cuatro tiempos y una inyección del aire comprimido de forma muy similar a como se hace en el modelo serie.

Para cada una de las posibles variantes de funcionamiento anteriores se distinguirán tres opciones, en función de que estén dotadas o no de un sistema de recarga autónomo y de un sistema de recuperación de energía en las frenadas. Dichas opciones son las siguientes:

- *Opción I*: Sistema sin posibilidad de recarga autónoma ni recuperación de energía en las frenadas.

- *Opción II*: Sistema con posibilidad de recarga autónoma y recuperación de energía en las frenadas.

- *Opción III*: Sistema con recuperación de energía en las frenadas.



Las opciones anteriores son el resultado de integrar, o no, junto con el sistema un compresor y un motor eléctrico monofásico, así como un sistema de transmisión y embrague, que permitan al vehículo las acciones mencionadas previamente.

De acuerdo con lo anterior se nos plantea la matriz de posibles variantes siguiente:

Motor/Opción	Opción I	Opción II	Opción III
<i>Motor neumático tipo I</i>	#	#	#
<i>Motor neumático tipo II</i>	#	#	#
<i>Motor neumático tipo III</i>	#	#	X

Tabla a

Donde ya ha sido descartada una primera combinación. Se trata de la que constituirían el *motor neumático tipo III*, de cuatro tiempos, con la *opción III*. Esto es debido a que la presión de recuperación de aire sería imposible que alcanzase el valor suficiente como para poder volver a ser inyectada en el cilindro con una cierta rentabilidad. Más adelante se aclarará esta cuestión en 1.1.2.3.3.

La elección de la combinación más acertada para la adecuación del motor habrá de hacerse atendiendo a criterios de versatilidad en el uso posterior del vehículo, complejidad de la adaptación, coste, rentabilidad de la inversión, consumo (y, por tanto, autonomía disponible), espacio hábil para el depósito y peso máximo permitido al vehículo. Yendo estas dos últimas opciones íntimamente ligadas puesto que una mayor capacidad del depósito implicaría una menor presión de la masa de aire transportada (la cual, vendrá determinada por las exigencias permitidas por el peso máximo autorizado de vehículos de este tipo) y, por el contrario, una menor capacidad traería consigo una presión mayor de trabajo y, por tanto, unas exigencias más severas en las características del compresor a utilizar para la recarga (con las implicaciones económicas que esto suponga). Se habrá de estudiar el espacio



disponible en el vehículo (según la combinación finalmente escogida) y, de acuerdo con la masa de aire que pueda ser transportada por el vehículo, decidir la presión de trabajo del depósito a instalar. No obstante, esta presión tendrá que ser suficientemente elevada puesto que habrá un momento en el que, aun habiendo todavía aire a presión en el depósito, el motor no pueda seguir funcionando puesto que, bien la presión alcanzada en el interior de los cilindros, bien la sección de paso de los órganos estranguladores del flujo, se impida la inyección del aire a la presión demandada. Será éste el momento de indicar la necesidad de un repostaje inmediato (con algo de anterioridad como medida de seguridad).

En cuanto a los objetivos que se plantean para llevar a cabo la adaptación del motor serían los siguientes:

Primero, las curvas de potencia y par deberán ser idealmente idénticas, o lo más parecidas posible, a las del modelo serie de forma que el usuario no notara la diferencia en prestaciones y en conducibilidad.

Segundo, en la búsqueda de mantener lo anterior, los regímenes transitorios deberían estar regulados como en el modelo serie.

Tercero, en la búsqueda de la mayor rentabilidad posible se intentarán realizar los mínimos cambios posibles en el motor siempre con la idea de llevar a cabo la adaptación con el menor costo posible.

Cuarto, decidir si la instalación del sistema autónomo de alimentación de aire comprimido con suministro eléctrico junto con el de aprovechamiento de la energía degradada en el proceso de frenado es o no posible, o si, por el contrario, se debiera optar por el repostaje exterior del vehículo; con la



pérdida de versatilidad en el uso que esto implica en beneficio de la autonomía.



1.1.2 DISEÑO Y DESCRIPCIÓN DE ESQUEMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO

1.1.2.1 Descripción de esquema general de funcionamiento

El sistema consiste en un depósito de aire a alta presión (D_{ap}) que hace la función de almacén de energía. Dicho depósito va conectado con otro de presión variable (*depósito de regulación*, D_{reg}) a través de una válvula reguladora (V_{reg}) controlada electrónicamente. Esta válvula es la encargada de variar la presión de este último depósito, situado aguas abajo de la misma. A su vez, el depósito de regulación (D_{reg}) comunica directamente con los cilindros a través de las válvulas de admisión (V_{adm}); y, finalmente, el aire se desaloja al exterior a través de las válvulas y los conductos de escape (V_{esc} y Col_{esc}).

De acuerdo con lo anterior, el funcionamiento del motor se basa en la introducción de aire a alta presión en los cilindros, de forma que esta presión actúa sobre los pistones del sistema biela-manivela en la carrera de trabajo, moviendo el cigüeñal.

La regulación de la carga se realiza variando la presión del depósito de regulación (D_{reg}), ya que el par demandado por el motor y la presión realizada sobre la cara superior de los pistones se pueden considerar proporcionales. Para controlar esta presión la válvula reguladora (V_{reg}), antes mencionada, varía el caudal de aire que pasa del depósito de alta presión (D_{ap}) al depósito de regulación (D_{reg}).

Del depósito regulador de presión (D_{reg}) el aire se introduce directamente en los cilindros a la presión demandada (teniendo en cuenta las pérdidas de carga en las válvulas de admisión, V_{adm}) por lo que la válvula reguladora (V_{reg}) es de vital



importancia en todo el sistema y de su correcto funcionamiento dependerá que la adaptación del motor se realice con mayor o menor éxito.

Lo anterior representa un simple boceto de funcionamiento general. A continuación se exponen las distintas variantes del sistema que se han estudiado en el proyecto, previas a la elección de la que fuere la definitiva. A saber, mantener el funcionamiento del motor de serie en cuatro tiempos u optar por uno en dos tiempos. Lo comentado anteriormente se corresponde con el motor de dos tiempos puesto que fue éste el que constituía la idea inicial del proyecto. Por tanto, no se trata del funcionamiento general de todos los modelos. A continuación se presenta la explicación detallada del modo de operación de cada uno de ellos.

1.1.2.1.1 Motor neumático tipo I

El aire almacenado a alta presión es estrangulado por la válvula reguladora (V_{reg}) hasta la presión demandada y almacenado en el depósito de regulación (D_{reg}) ante su inminente salida hacia los cilindros. En el momento en el que las válvulas de admisión de los mismos se abren, el aire a presión empuja la cara superior de los pistones realizando mediante su expansión hasta la presión atmosférica una primera carrera de trabajo. Una vez el pistón en el punto muerto inferior, teóricamente, se realiza una segunda y última carrera de bombeo del aire en el cilindro hacia fuera. Después se llevaría a cabo una nueva apertura de la válvula de admisión volviendo a empezar el ciclo otra vez.

Tras lo anterior se especificará a continuación, de forma más concreta, cómo habrá de ser la respuesta del sistema a cada uno de los estados en los que se encontrará el motor durante la marcha normal del vehículo.



En cuanto al funcionamiento estacionario, se habrá de distinguir tres posibles situaciones del motor, correspondientes a los estados de carga, retención o ralenti del mismo.

La situación de motor en carga es más o menos el modo de funcionamiento básico comentado previamente. El vehículo demanda un par al motor, en función del régimen y del grado de carga que la posición del acelerador determine, y éste, obliga a la válvula reguladora (V_{reg}) a mantener en el depósito de regulación (D_{reg}) una presión concreta que es la que al actuar sobre los pistones mueve el cigüeñal para que el motor suministre el par demandado para continuar la marcha. Esta válvula deberá estar en todo momento en regulación para subsanar en lo posible las continuas fluctuaciones de presión que en el depósito de regulación (D_{reg}) producirán las sucesivas emboladas (tres por vuelta de motor) a los cilindros.

En cuanto al funcionamiento en retención (esto es, el proceso continuo de funcionamiento con motor arrastrado), al no demandarse par motor alguno, la válvula reguladora (V_{reg}) se cierra de forma que el depósito de regulación (D_{reg}) se vacía en unas décimas de segundo. Llegados a este punto se hace evidente la aparición de un nuevo elemento del sistema no mencionado hasta ahora. Se trata de la válvula antiretorno del depósito de regulación (V_{anti2}), que comunica éste con el exterior, de forma que no se produzcan presiones negativas en el depósito durante el funcionamiento en retención que provocarían la parada repentina del vehículo y una conducibilidad imposible del mismo. De esta forma los pistones continuarían su movimiento con la salvedad de que ahora sus dos carreras serían de bombeo lo cual produciría que, de acuerdo con la curva de motor arrastrado del motor, éste fuera reduciendo la velocidad del vehículo hasta detenerlo.



En cuanto al funcionamiento en ralentí, de vital importancia en el vehículo de serie, en nuestro caso se podría incluso prescindir del mismo. En el motor térmico, debido a su imposibilidad de arrancar por si solo, se mantiene el funcionamiento en ralentí puesto que, de no hacerlo así, la batería encargada de hacer funcionar el motor de arranque que lo ayuda en su puesta en marcha se acabaría descargando. A diferencia del de combustión, el motor neumático es perfectamente capaz de comenzar a funcionar por si sólo de ahí que se pueda suprimir en nuestro modelo tal estado de funcionamiento y sea innecesario también el motor de arranque. A pesar de lo anterior, se habrá de tener presente que el eliminar el funcionamiento en ralentí implicaría ciertas pérdidas de versatilidad en el uso del vehículo puesto que, al no existir tal estado, cada vez que detuviéramos el vehículo y, por tanto, el funcionamiento del motor, todos los dispositivos que se alimentan de la batería del coche seguirían funcionando sin producirse ahora la recarga continua de la misma, por lo que ésta terminaría descargándose. Debido a esto, sería prudente pensar en definir un estado de ralentí de forma que el motor se arrancara cuando el nivel de carga de la batería bajara de un determinado valor.

En lo que sigue, se comenta el funcionamiento transitorio del motor, esto es, lo que a los procesos de aceleración y deceleración del coche se refiere. El mantener al máximo la respuesta del motor en tales estados de funcionamiento con respecto a los del modelo serie constituye otro de los objetivos básicos del proyecto, puesto que no puede siquiera plantearse pérdida de conducibilidad alguna tras la adaptación tecnológica del vehículo.

El proceso de aceleración consiste en un aumento del par demandado al motor con respecto al estado inmediatamente anterior, lo cual se traduce en una mayor presión



necesaria en el depósito de regulación. El módulo de gestión electrónica del motor en función del régimen y del grado de carga (que, como ya se expuso antes, depende de la posición del acelerador y, además ahora, también de su derivada –con el fin de darle al motor información sobre la rapidez con que se demanda ese par-) calcula la necesidad de presión del depósito de regulación (D_{reg}) y, al mismo tiempo, el sensor de presión del mismo (S_{P2}) le indica la presión que se tiene en realidad en el depósito. Con ambos datos, el módulo controla la apertura de la válvula para conseguir la presión demandada y de esa forma se produce el aumento de par y por tanto, la aceleración del vehículo. Se hace notar que la celeridad en todo este proceso es de vital importancia para que el transitorio se produzca de forma normal por lo que se habrá de reducir las inercias de todas las partes implicadas en este proceso al máximo para conseguir que el objetivo de mantener los transitorios como en el modelo serie se cumpla en todo momento.

El proceso de deceleración se produce exactamente de igual forma que el de aceleración salvo que en este caso, se rige por una demanda menor de par que implica una menor presión en el depósito de regulación (D_{reg}) y, por tanto, una menor apertura de la válvula reguladora (V_{reg}) que habrá de cerrarse de acuerdo con lo anterior una determinada proporción. Habrá de tenerse presente, a la hora de controlar esta válvula, que la presión del depósito de regulación (D_{reg}) disminuye conforme va vaciándose éste.

Este sistema de funcionamiento en dos tiempos plantea a primera vista muchas ventajas con respecto al del de serie *-de ahí que fuera el primero en plantearse y estudiarse-*; se trata de un motor que requiere una presión media efectiva menor (la mitad), debido a que una de cada dos carreras de pistón es de trabajo, a diferencia del



ciclo de cuatro tiempos donde sólo se obtiene una carrera útil por cada dos vueltas de motor. Lo anterior supone una mayor suavidad de funcionamiento, menores vibraciones del vehículo y un menor desgaste mecánico, puesto que las presiones de trabajo son más constantes durante el ciclo. Pero aunque todo ello parezca a primera vista muy alentador, este sistema cuenta con un inconveniente fundamental para poder inclinarse por el mismo: *su baja eficiencia exergética* le convierte en un sistema inútil para el caso que se aborda ya que, dadas las escasas dimensiones de que se dispone, es necesario que la eficiencia del conjunto sea la máxima en aras de conseguir la mayor autonomía posible, uno de los ‘talones de Aquiles’ del proyecto.

Esta baja eficiencia del proceso tiene su origen en la excesiva pérdida de carga que la válvula reguladora (V_{reg}) introduce en el ciclo que el aire sufre a su paso por el motor, desde que es comprimido e introducido en el depósito de alta presión (D_{ap}), hasta que es devuelto a la atmósfera tras su expansión en el mismo.

Debido a este hecho inesperado, se estudiaron las siguientes alternativas. Una primera posibilidad para remediar lo anterior y aumentar la eficiencia del ciclo (grado de reversibilidad), manteniendo el funcionamiento del motor en dos tiempos, consiste en disminuir el estrangulamiento generado por la válvula de regulación (V_{reg}). De esta forma, se consigue aumentar el trabajo útil que puede extraerse del aire, al disminuir las irreversibilidades que la válvula reguladora (V_{reg}) introduce en todo el sistema.

1.1.2.1.2 Motor neumático tipo II

La única variación en el modo de funcionamiento anterior está en que, en lugar de introducirse aire a la presión media indicada demandada y durante toda la carrera del



pistón (idealmente, se entiende), se inyectará aire comprimido a mayor presión que la necesaria pero durante menos tiempo -un cierto porcentaje de la carrera desde el punto muerto superior- de forma que el trabajo obtenido se mantenga invariable.

El modo de funcionamiento del motor no se ve en ninguna forma afectado por la variación introducida con la salvedad de que habrá de tenerse presente que, al aumentar el rango de presiones con el que se trabaja en el depósito de regulación (D_{reg}), los esfuerzos a soportar por el mismo y el rango de lectura de los posibles aparatos de medición y control en su interior, caso del sensor de presión (S_{P2}), serán también mayores. De igual forma, al disminuir el estrangulamiento de la válvula reguladora (V_{reg}) el aire de escape alcanza la presión atmosférica a una menor temperatura por lo que los problemas que pudieran derivarse de ello, en caso de existir, se agudizan con respecto al modo de funcionamiento propuesto en un principio.

1.1.2.1.3 Motor neumático tipo III

Con el fin de obtener la mayor autonomía posible se estudió esta otra variante del sistema que pierde algunas de las ventajas del anterior pero gana otras muchas, como puede ser una mayor eficiencia exergética.

El sistema sigue constando del depósito de alta presión (D_{ap}), colocado de igual forma a como se expuso con anterioridad, pero carece del depósito de regulación (D_{reg}) y, por tanto, de la válvula reguladora (V_{reg}) puesto que el depósito de alta presión (D_{ap}) se comunica directamente con los cilindros. En su lugar, existirá una nueva válvula, distinta de las de admisión y escape, que comunicará dicho depósito con los cilindros y, cuyo tiempo de apertura, será lo que se habrá de controlar ahora



para introducir la cantidad de aire demandada en cada caso. El hecho de que el aire ya no sea introducido al cilindro a través de las válvulas de admisión del modelo serie constituye, junto con el nuevo ciclo de renovación de la carga en cuatro tiempos que se explica en lo que sigue, la principal diferencia con el sistema planteado en un principio en el proyecto. El nuevo ciclo de cuatro tiempos que rige el funcionamiento del motor varía la introducción del aire en el cilindro, puesto que ahora únicamente se produce una inyección por cada dos vueltas de motor.

En este caso, la presión media indicada a realizar por el aire en el pistón coincide en todo momento con la del modelo serie, cuyo funcionamiento, evidentemente, es también de cuatro tiempos.

El ciclo de funcionamiento del motor comienza con una primera carrera de admisión, en la que se llena el cilindro con aire exterior a presión atmosférica (*o a una presión algo mayor en caso de mantener el sistema de sobrealimentación*). A ésta, le sigue una segunda carrera de compresión del aire admitido, de acuerdo con la relación de compresión dada por el modelo serie. A continuación, se produce la inyección del aire comprimido, a la presión del depósito de alta (D_{ap}), durante un tiempo tal que permita la entrada de la masa de aire requerida para que se alcance en el cilindro la presión necesaria para obtener por ciclo el trabajo demandado, de acuerdo con el régimen y el grado de carga fijados por el usuario. Y por último, tras la carrera de expansión o trabajo que sigue a lo anterior, viene la carrera de bombeo del aire de escape volviendo a empezar el ciclo con una nueva admisión.

Llegados a este punto es preciso destacar que el concepto de presión media (no se distingue entre efectiva o indicada puesto que no se considerarán para los primeros cálculos iniciales pérdidas mecánicas) ya no es real, como ocurría en el modo de



funcionamiento en dos tiempos, donde se inyectaba a esa presión durante toda la carrera del pistón, sino que ahora este concepto es simplemente una invención matemática que representa la presión que, de forma constante, habría de hacerse sobre la cara superior del pistón durante la carrera de trabajo para obtener el par demandado. Ya que durante el ciclo en cuatro tiempos las presiones que se alcanzan en el cilindro varían.

Tras la mezcla del aire del depósito de alta (D_{ap}) con el aire admitido, y comprimido durante la carrera de compresión, se habrá de alcanzar en el cilindro una presión tal que su expansión produzca un trabajo idéntico al que se obtendría ejerciendo sobre la cara del pistón, y durante toda la carrera de trabajo, la presión media indicada demandada en cada caso.

Este modo de funcionamiento se asemeja bastante a un motor diesel con inyección mediante el sistema de conducto común (*common-rail*) puesto que el aire, de igual forma a como ocurre con el carburante, es mantenido a presión elevada en el depósito de alta (D_{ap}), un conducto o rail en el caso del motor térmico, e inyectado en el cilindro durante un cierto intervalo de la carrera del pistón (de forma instantánea en el ciclo teórico). Este intervalo habrá de ser el óptimo en cada uno de los puntos del mapa de motor de igual forma a como lo serán también los avances a las aperturas, y retrasos a los cierres, de la admisión, y del escape respectivamente.

En cuanto al funcionamiento estacionario del motor en carga, éste sería el siguiente. Se demanda un determinado par en el cigüeñal y por tanto, una presión media indicada en el cilindro que equivaldrá, realmente, a una presión de mezcla a conseguir en el mismo tras la inyección del aire. Para ello, la válvula, que se denominará “*inyector-válvula*” en lo que sigue, se abrirá durante un tiempo



determinado para permitir que entre en el cilindro la cantidad de aire suficiente para alcanzar la presión de mezcla antes mencionada. Durante el funcionamiento en retención, el *inyector-válvula* se cierra de forma que el único aire que se introduce en el pistón es el admitido en la carrera de admisión. El trabajo neto desarrollado ahora en el ciclo es negativo (puesto que la suma de los trabajos de admisión, compresión y escape es mayor que el trabajo que se obtiene de la expansión del aire del cilindro) y por tanto el motor va frenando al vehículo.

El funcionamiento en ralentí sí es, en este caso, necesario en el vehículo puesto que el motor neumático es incapaz ahora de arrancar por si solo. Por tanto, el motor de arranque es indispensable. Este estado de funcionamiento no difiere en nada del que existe en el vehículo de serie (pudiendo ser incluso el mismo) y será aquel régimen óptimo de funcionamiento en vacío del motor para el que éste tenga el mínimo consumo, realice el mínimo ruido y con las mínimas vibraciones.

En cuanto a los procesos de aceleración y deceleración del vehículo, estos se llevan a cabo de igual forma que en el sistema de dos tiempos. Es la unidad central del motor (*UCM*) la que, -en función del sensor de presión del depósito de alta (S_{PI}), el régimen del motor (n) y el grado de carga (α)-, controla el tiempo de apertura del *inyector-válvula* con el fin de incrementar o no la presión en el cilindro tras la carrera de compresión para así producir la aceleración o deceleración exigida en cada caso.

1.1.2.2 Definición y requisitos de cada componente



Se estudiará cada uno de los motores presentados haciendo una breve descripción de los elementos que conformarían el sistema, de su función dentro del mismo y de los requisitos que, a priori, tendrían que cumplir para un correcto funcionamiento.

1.1.2.2.1 Motor neumático tipo I

A continuación se presenta el esquema de todo el sistema, donde aparecen detalladas todas y cada una de las partes del mismo.

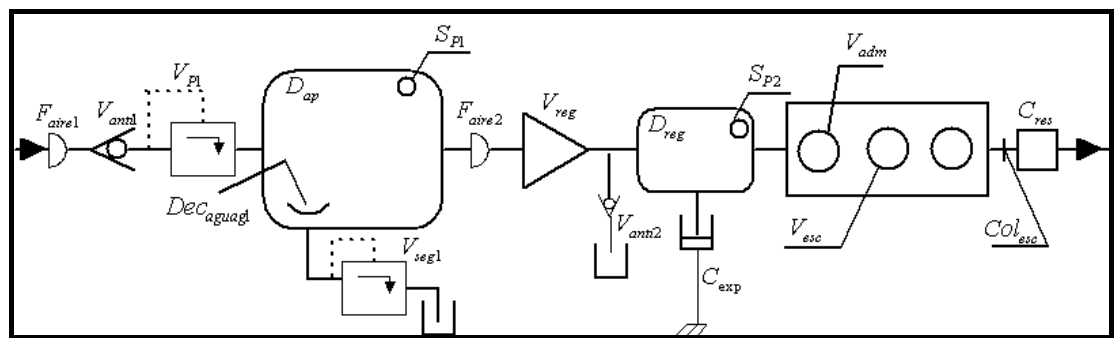


Fig. 1

Y se definen en las líneas que siguen dichas partes arriba mencionadas, mediante el símbolo que se usará para distinguirlas[†]:

- **D_{ap}** : Depósito de alta presión.
- **D_{reg}** : Depósito de regulación de presión.
- **S_{P1}** : Sensor de presión del depósito de alta presión (D_{ap}).
- **S_{P2}** : Sensor de presión del depósito de regulación (D_{reg}).
- **V_{anti1}** : Válvula antiretorno para la boca de llenado del depósito de alta (D_{ap}).
- **V_{P1}** : Válvula reguladora de presión (más concretamente, de presión máxima) para la boca de llenado del depósito de alta presión (D_{ap}).

[†] En lo que sigue se usará la nomenclatura descrita



- V_{seg1} : Válvula de descarga (seguridad) del depósito de alta presión (D_{ap}).
También se trata de una válvula de presión máxima.
- V_{reg} : Válvula reguladora de presión entre el depósito de alta presión y el de regulación.
- V_{adm} : Válvulas de admisión de los cilindros.
- V_{esc} : Válvulas de escape de los cilindros.
- V_{anti2} : Válvula antiretorno del depósito de regulación (D_{reg}).
- C_{exp} : Cámara de expansión amortiguada del depósito de regulación (D_{reg}).
- F_{aire1} : Filtro de aire junto a la boca de llenado del depósito de alta presión (D_{ap}).
- F_{aire2} : Filtro de aire entre el depósito de alta presión (D_{ap}) y el de regulación (D_{reg}). Su necesidad dependerá de si se instala el sistema autónomo de recarga en el vehículo o no.
- $Decaguag1$: Decantador de agua gravitacional del depósito de alta presión (D_{ap}).
- Col_{esc} : Colectores específicos de escape.
- C_{res} : Cámara de resonancia en el escape.

A continuación se presentan, más en detalle, cada uno de los dispositivos anteriores especificando su función y requerimientos de funcionamiento.

- Depósito de alta presión (D_{ap})

Función: Se trata del depósito de almacenamiento del aire comprimido en el coche y constituye la reserva energética del mismo. Ocupará la posición del depósito de



combustible del modelo serie, el maletero y la zona de detrás de los asientos (adicionalmente podrán buscarse otros espacios libres disponibles).

Requisitos: Habrá de ser de un tamaño suficiente como para dotar de una autonomía aceptable al vehículo sin necesidad de llevar el aire a una presión excesivamente elevada. Y esta presión máxima de carga será, por el contrario, la que, en función del tamaño del D_{ap} de que se consiga disponer en el vehículo, nos permita alcanzar una autonomía viable. Luego entre el tamaño y la presión máxima de carga habrá de conseguirse un equilibrio que la resistencia mecánica de los dispositivos empleados nos permita.

En cuanto a la presión mínima a alcanzar en este depósito, ésta habrá de ser la suficiente para que, en tales condiciones, V_{reg} pueda mantener en el D_{reg} la presión máxima que se pueda demandar (esto es, la del punto de máximo par). Esta presión mínima no debe alcanzarse en el depósito por lo que a una presión algo mayor habría de darse la señal a la *UCM* de que nos hemos quedado sin aire en el depósito y que, por tanto, es necesario un repostaje inmediato. Esta diferencia de presiones es la que en términos del motor térmico constituiría la reserva de combustible del mismo.

- Depósito de regulación de presión (D_{reg})

Función: Es el depósito, situado aguas abajo del anterior, donde se consigue y regula la presión necesaria a aplicar sobre los pistones para obtener el par demandado.

Requisitos: Habrá de ser de un tamaño suficiente para que las sucesivas emboladas que se producen en cada vuelta de motor (un total de tres), y que vacían progresivamente el mismo, no varíen en exceso su presión con el fin de que ésta pueda ser mantenida por el correspondiente sistema regulador en el valor que el par demandado fije al mismo (siendo éste último por tanto quien fijará las presiones



máxima y mínima que el depósito habrá de aguantar). Además de lo anterior, por otra parte el depósito habrá de ser lo suficientemente pequeño para que su descarga se realice en el menor tiempo posible de tal forma que se controlen los transitorios de deceleración del vehículo de forma adecuada y lo más parecida posible a la del modelo serie.

- Sensor de presión del depósito de alta presión (S_{P1})

Función: Su misión es informar a la unidad central del motor (UCM) del nivel de llenado del depósito de alta presión.

Requisitos: En principio no se necesitan características especiales en este dispositivo, puesto que su inercia no es importante en el funcionamiento del mismo, salvo que su rango de lectura nos permita trabajar con el orden de presiones que habrá en el D_{ap} .

- Sensor de presión del depósito de regulación de presión (S_{P2})

Función: Constituye una parte fundamental del sistema de regulación de presión del D_{reg} . Su misión es informar a la UCM de la presión que hay en el mismo, para que, en función de la presión demandada, controle la apertura o cierre de V_{reg} .

Requisitos: Es fundamental para el correcto funcionamiento del motor que este sensor tenga la mayor fiabilidad y la menor inercia posible para que la UCM tenga en todo momento una información rápida y precisa de forma que la conducibilidad del motor permanezca invariable. Puesto que una información con retraso implicaría un control tardío de la apertura (o cierre en función del caso) de la válvula reguladora y por tanto un retraso que se iría propagando por todo el sistema hasta llegar a notarse en la respuesta del vehículo. Esto no representa problema alguno durante el funcionamiento estacionario del sistema pero si en lo que a los transitorios se refiere y, por tanto, a los procesos de aceleración/deceleración del automóvil. Y es en estos



casos donde no se puede permitir una respuesta tardía del coche que hiciera la conducibilidad del mismo muy incómoda además de peligrosa. Además de esto, es evidente que su rango de lectura habrá de ser el adecuado en función de las presiones máxima y mínima que en este depósito vayamos a tener (la correspondiente al par máximo que de el motor y la atmosférica).

- Válvula antiretorno para la boca de llenado del D_{ap} (V_{anti1})

Función: Impide el vaciado del depósito de alta presión al permitir la circulación del flujo únicamente de fuera a dentro del sistema.

Requisitos: Son fundamentalmente mecánicos; esto es, será necesario que aguante altas presiones para no estropearse al conectar el sistema a una red de presión elevada para un supuesto repostaje exterior. Así mismo, habrá de tener una sección suficiente para permitir lo anterior en un tiempo razonablemente rápido.

- Válvula reguladora de presión para la boca de llenado del D_{ap} (V_{PI})

Función: Se trata de una válvula de presión máxima que obliga a que el aire que entre al depósito tenga una determinada presión mínima. De esta forma se consigue que el aire que va a acceder al depósito adquiera la presión necesaria (en caso de no hacerlo) para poder vencer la máxima que pueda encontrarse en el interior.

Requisitos: Su presión de tarado será la máxima presión de carga del depósito de alta (que, por otra parte, deberá ser suficiente para que en función del tamaño del depósito y su resistencia mecánica nos permita obtener una autonomía aceptable).

- Válvula de descarga (seguridad) del D_{ap} (V_{seg1})

Función: De nuevo se trata de una válvula de presión máxima que impide, en este caso, alcanzar una presión excesiva dentro del depósito que pueda no ser segura para el mismo puesto que la presión a la que V_{PI} va a permitir la entrada del aire en el



interior del D_{ap} va a ser siempre algo mayor de la teórica de tarado ya que ésta aumenta en función del caudal que pase por ella. Téngase en cuenta:

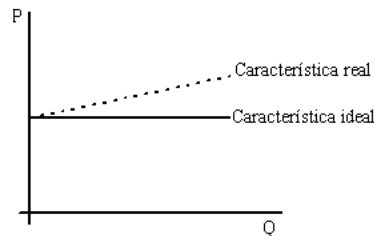


Fig. 2

Requisitos: La presión de tarado de esta válvula será la máxima que se quiera permitir llegar a obtener en el depósito como medida de seguridad. La importancia de este dispositivo y de su correcto funcionamiento es mucha en cuanto a que se trata de un elemento de seguridad. Y todo exceso es poco en este sentido.

- Válvula reguladora de presión entre el D_{ap} y el $D_{reg}(V_{reg})$

Función: Se trata del dispositivo más importante de todo el motor, puesto que esta válvula es la encargada de conseguir en cada momento la presión demandada en el D_{reg} .

Requisitos: Deberá aguantar mecánicamente la mayor diferencia de presiones que pueda darse entre los dos depósitos (depósito lleno y motor en retención). Además y fundamental, ha de tener las secciones necesarias para ser capaz de suministrar al D_{reg} el máximo caudal de aire demandado por el motor (esto es, en condiciones de máximo consumo) cuando el D_{ap} se encuentre en su mínima presión. Y, por último, es necesario que su respuesta ante el control electrónico de la UCM sea lo más rápida posible con el fin de que, como ya se explicó para S_{P2} , no se introduzcan retrasos en el sistema que impliquen una mala respuesta del motor ante el control de los transitorios del vehículo.



- Válvulas de admisión de los cilindros (V_{adm})

Función: su función es la misma que en el motor original. Regulan la admisión del aire en los cilindros salvo que, al no existir árbol de levas, su apertura y cierre se hace mediante las señales de la UCM.

Requisitos: Puesto que no se produce combustión alguna en los cilindros y como el control de su apertura y cierre se hará electrónicamente, podrán ser de un material polimérico de bajo peso que permita que tengan unos tiempos de accionamiento adecuados y suficientemente rápidos para el adecuado control de los transitorios. Su funcionamiento puede ser mediante solenoide.

- Válvulas de escape de los cilindros (V_{esc})

Función: Al igual que las de admisión, desempeñan la misma que en motor original.

Requisitos: Los mismos que las de admisión.

- Válvula antiretorno del D_{reg} (V_{anti2})

Función: Su misión es impedir que en el D_{reg} se alcance presión negativa en retención, esto es, que las sucesivas emboladas que se produzcan tras cerrarse la válvula V_{reg} y que vaciarán el D_{reg} en unas décimas de segundo continúen tomando aire del exterior a presión atmosférica para salvar al motor de la brusquedad de la parada que se produciría al tener presión negativa en el D_{reg} y que sería muy peligrosa para el correcto funcionamiento del automóvil.

Requisitos: Son fundamentalmente mecánicos, en lo que se refiere a que aguante la mayor presión que podamos tener en el depósito regulador (la correspondiente al par máximo que de el motor), así como de sección, esto es, que ésta sea la suficiente para que por la válvula entre el caudal necesario para impedir quedarnos sin aire en el D_{reg} y que de nuevo tendría efectos muy perjudiciales en la conducibilidad del coche.



- Cámara de expansión amortiguada del depósito de regulación (C_{exp}).

Función: Esta cámara de expansión amortiguada servirá para suavizar las sucesivas fluctuaciones de presión del depósito de regulación.

Requisitos: Habrá de amortiguar la mayor cantidad de modos o frecuencias de vibración propias del sistema D_{reg} .

- Filtro de aire junto a la boca de llenado del D_{ap} (F_{aire1}).

Función: Limpiar de impurezas el aire para no introducir partículas nocivas al sistema.

Requisitos: Parece razonable que sean los mismos que tiene en el vehículo de serie el filtro del aire de la admisión, pudiendo incluso aprovecharse aquél.

- Filtro de aire en el conducto del D_{ap} que comunica con el D_{reg} (F_{aire2}).

Función: La idea es la misma que el filtro anterior, esto es, limpiar de todas aquellas impurezas que pudieran introducirse en el sistema a través del sistema de recarga autónomo en caso de su instalación.

Requisitos: En cuanto a los requisitos de filtrado se seguirán manteniendo los mismos que para el primero.

- Decantador de agua gravitacional del depósito de alta presión (Dec_{agua1})

Función: Recoger el posible agua procedente del aire comprimido a alta presión que pueda irse depositando en el D_{ap} .

Requisitos: En principio los que pueda tener un dispositivo de este tipo en unas condiciones normales de funcionamiento así como el soportar mecánicamente las condiciones de alta presión a las que se verá sometido dentro del depósito.

- Colectores específicos para el aire de escape (Col_{esc})



Función: Es la misma que en cualquier motor térmico. Se destaca este dispositivo puesto que para eliminar el turbo y el catalizador del Smart de serie, habremos de quitar también el colector de escape, puesto que aquéllos se encuentran intercalados en el mismo.

Requisitos: Serán de tamaño, en cuanto a que habrá de ser tal que quepa en el espacio que quede para el mismo. Y ya no serán de forma por haber eliminado los elementos anteriores. Se notará también en este apartado que el aire de escape de nuestro motor podrá alcanzar unas temperaturas teóricas de hasta 150°C bajo cero por lo que, además de la consiguiente pérdida de rigidez que en los materiales del colector de escape pueda darse, habrá de estudiarse también si tan bajas temperaturas pueden afectar o no al correcto funcionamiento del mismo (*posible congelación del aire de escape*).

- Cámara de resonancia (C_{res})

Función: Como tal, eliminará frecuencias especialmente molestas que pueda tener nuestro motor debido a fenómenos de resonancia a determinados regímenes.

Requisitos: Cumplir su función con la menor pérdida de carga posible y con los inconvenientes que, debidos a las bajas temperaturas del escape antes mencionadas, pudieran aparecer.

- Módulo de gestión electrónica del motor (UCM)

Función: Gestiona toda la información del motor que le llega a través de los sensores así como de otros módulos electrónicos de dispositivos del automóvil y los envía a aquellos dispositivos que requieren tal información. En nuestro sistema, su misión fundamental será regular la apertura y cierre de las válvulas de admisión y de escape



así como controlar la válvula reguladora de presión del D_{reg} . Además, mediante S_{P1} controla la presión de D_{ap} y, por tanto, su nivel de llenado.

Requisitos: Deberá tener el número de entradas y salidas necesarias para que pueda gestionar todo lo anterior además de aquello que se mantenga del modelo serie. Y estas entradas y salidas habrán de ser bien analógicas bien digitales en función de las salidas o entradas que proporcionen o requieran cada uno de los sensores u otros módulos. La transmisión de datos ha de ser lo más rápida posible puesto que éste será otro requisito a cumplir por el módulo. Para ello se usará el protocolo estandarizado CAN (Controller Area Network) que es el actualmente aceptado y utilizado por todos los fabricantes de automóviles.

1.1.2.2 Motor neumático tipo II

Como ya se expuso anteriormente, el sistema permanece en este motor invariable al modelo anterior puesto que simplemente representa una modificación en la inyección del aire a los cilindros pero sin cambio alguno en la estructura global del mismo.

Simplemente se mencionarán, como ya se expuso también con anterioridad, las mayores exigencias mecánicas en el D_{reg} y de lectura en el sensor S_{P2} . Así como, los relativos a las bajas temperaturas de escape que, lógicamente, serán también menores.

1.1.2.3 Motor neumático tipo III

El esquema del sistema del motor con ciclo de cuatro tiempos presenta algunas modificaciones respecto al planteado en un principio para el modo de funcionamiento en dos tiempos. El sistema quedaría como sigue:



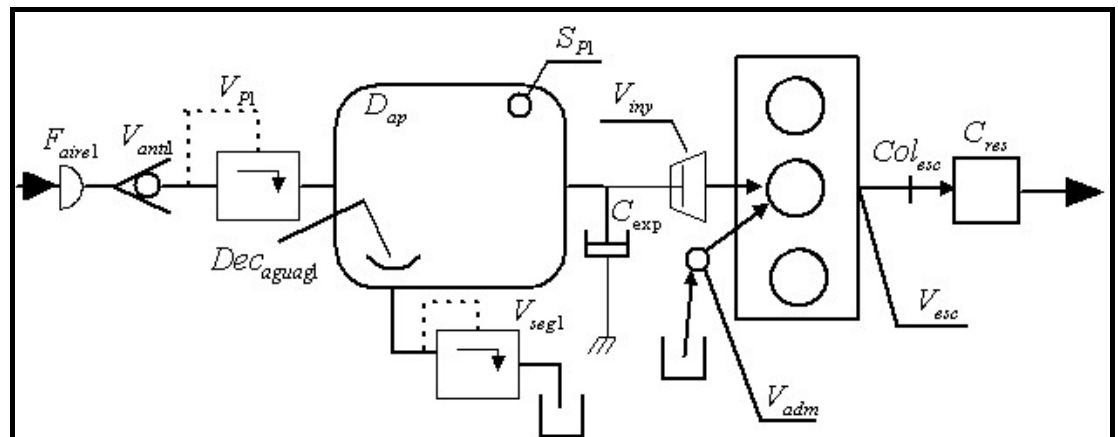


Fig. 3

Las modificaciones que sufrirán cada uno de los elementos del sistema respecto al modo de funcionamiento anterior serán las siguientes:

- Depósito de alta presión (D_{ap})

Función: Sigue siendo la misma que en la opción de dos tiempos. Constituye la reserva energética del vehículo y su volumen es una variable fundamental para conseguir autonomía suficiente en el mismo.

Requisitos: En cuanto a lo que a presión máxima y tamaño se refiere, continúan siendo los mismos, en el sentido de conseguir un equilibrio entre ambos que dote al vehículo de una autonomía razonable para un uso normal del mismo.

En cuanto a la presión mínima a alcanzar en este depósito, ésta habrá de ser ahora la suficiente para que, en tales condiciones, entre aire en el pistón al abrir la válvula que comunique éste con aquél. Esta presión si tiene ahora un valor definido, y se trata de aquélla alcanzada en el pistón tras la carrera de compresión del aire atmosférico admitido, y cuyo valor es de 44,39 bar. No obstante y, como ya se comentó en el modelo de 2T, esta presión mínima no debe alcanzarse en el depósito por lo que a una presión mayor habría de comunicarse al usuario del coche que se le ha acabado el depósito y es necesario un repostaje inmediato.



- Depósito de regulación de presión (D_{reg})

Función: En este caso el sistema carece del mismo puesto que se comunica el aire directamente desde el depósito de alta con los cilindros.

Requisitos: Por tanto no ha lugar requisito alguno.

- Sensor de presión del depósito de alta presión (S_{P1})

Función: Su misión la misma que en el caso anterior.

Requisitos: Como ya se mencionó para el sistema de dos tiempos no son excesivamente importantes.

- Sensor de presión del depósito de regulación de presión (S_{P2})

Función: Puesto que no existe tal depósito, lo mismo ocurre con este componente.

Requisitos: Ninguno por tanto.

- Válvula antiretorno para la boca de llenado del D_{ap} (V_{anti1})

Función: Su funcionamiento no se ve en nada influido por el tipo de ciclo llevado a cabo en el motor.

Requisitos: Y lo mismo ocurre con éstos.

- Válvula reguladora de presión para la boca de llenado del D_{ap} (V_{P1})

Función: Al igual que en la válvula antiretorno anterior, su función no se ve alterada.

Requisitos: Continuarán siendo los mismos.

- Válvula de descarga (seguridad) del D_{ap} (V_{seg1})

Función: Tampoco variará al tratarse de un elemento de seguridad no dependiente del ciclo seguido en el motor.

Requisitos: Los anteriormente mencionados.



- Válvula reguladora de presión entre el D_{ap} y el D_{reg} (V_{reg})

Función: Al no existir el D_{reg} e introducirse directamente el aire desde el D_{ap} a los cilindros no será necesaria. En cambio, se habrá de añadir el *inyector-válvula* antes mencionado que comunique ambos y cuyo control será vital para la regulación de la carga. Tal elemento se comenta a continuación.

Requisitos: Por tanto, innecesarios.

- Inyector-válvula (V_{inv})

Función: La importancia de este elemento es al motor de cuatro tiempos como la válvula reguladora (V_{reg}) lo era para el motor con ciclo de dos. Su función es controlar el paso de aire a los cilindros de forma que según el tiempo que permanezca abierta, y que será regulado por la unidad de control del motor (UCM), se introduzca en el cilindro la cantidad de aire necesaria para aumentar la presión del aire del cilindro hasta el valor de mezcla que marque el par demandado en el eje.

Requisitos: Son fundamentalmente inerciales y de gran importancia para el adecuado funcionamiento del motor. Habrá de ser del mayor diámetro posible dentro de las limitaciones que el tamaño del cilindro del vehículo de serie nos permita. De esta forma, sus tiempos de apertura y cierre serán muy pequeños (puesto que así lo será el levantamiento de la misma) y se podrá controlar al máximo la masa de aire que se deja llegar al cilindro en cada caso. La exactitud y rapidez del control de este elemento serán vitales para que la respuesta del vehículo permanezca invariable a la del de serie.

- Válvulas de admisión de los cilindros (V_{adm})



Función: su función es la misma que en el motor original. Y puesto que ahora la inyección del aire comprimido no se hará por ellas, quedarán intactas a las del modelo serie.

Requisitos: Los mismos que en el Smart de serie. Incluso menores si se tiene en cuenta la no existencia de combustión alguna en el cilindro.

- Válvulas de escape de los cilindros (V_{esc})

Función: Desempeñan la misma que en motor original.

Requisitos: Los mismos que las de admisión.

- Válvula antiretorno del D_{reg} (V_{anti2})

Función: Inexistente ya, puesto que el funcionamiento en retención del vehículo es igual que en el modelo serie (comprimiendo aire atmosférico y dejándolo marchar por el escape). No existe posibilidad alguna de tener presiones negativas en el cilindro.

Requisitos: Ninguno.

- Cámara de expansión amortiguada del depósito de regulación (C_{exp})

Función: La misma que en el modelo con ciclo de dos tiempos.

Requisitos: Puesto que ahora la suavidad del motor va a ser algo menor que en el sistema de dos tiempos este elemento adquiere un papel más importante que en sistema planteado en un comienzo.

- Filtro de aire junto a la boca de llenado del D_{ap} (F_{aire1})

Función: Misma que antes.

Requisitos: Se mantienen invariables.

- Filtro de aire en el conducto del D_{ap} que comunica con el D_{reg} (F_{aire2})



Función: Puesto que no existe tal conducto, no será necesario. Aunque sí habrá de estudiarse su necesidad en caso de añadir al vehículo el sistema de recuperación energética planteado en un principio para el modelo de dos tiempos (en sus dos opciones como se comentará más adelante).

Requisitos: Se seguirán manteniendo los mismos.

- Decantador de agua gravitacional del depósito de alta presión
(*Dec_{aguag1}*)

Función: La misma puesto que este elemento no sufre modificación alguna.

Requisitos: Los mencionados en la opción anterior.

- Colectores específicos para el aire de escape (*Col_{esc}*)

Función: En este caso, este elemento quedará como en el modelo serie, pudiendo incluso mantener el sistema de sobrealimentación de serie. Es preciso mencionar que el hecho de mantener dicho sistema de serie, debido a que el propio modo de funcionamiento del vehículo sí lo permite en este caso, juega un papel importante a la hora de dotar al *motor neumático tipo III* de mayor autonomía, gracias al trabajo añadido que la sobrealimentación proporcionará. Podría pensarse en modificar, en la medida de lo posible (si así lo fuera) la presión de soplado del turbo puesto que, debido a la no existencia de combustible, este motor carece de riesgo de detonación.

Requisitos: En caso de modificar la presión de soplado del turbo, habría que cerciorarse, realizando todos los cálculos y pruebas que hiciesen falta, de que no existirían riesgos de cara a la fiabilidad del turbocompresor y la turbina de accionamiento del mismo. De nuevo habrán de tenerse también ahora siempre presentes las bajas temperaturas que se adquirirán en el escape por si pudieren afectar al funcionamiento normal de los mismos.



- Cámara de resonancia (C_{res})

Función: Este elemento tampoco sufrirá variación de funcionamiento alguna.

Requisitos: Los ya mencionados

- Módulo de gestión electrónica del motor (UCM)

Función: En este caso, su misión fundamental ya no será regular la apertura y cierre de las válvulas puesto que de esto se encargará el árbol de levas que permanecerá intacto al del modelo serie. Su función fundamental ahora será la de controlar el tiempo de apertura de la válvula que comunique el D_{ap} con los cilindros para introducir, en función de la potencia demandada y el régimen, la cantidad de aire necesario para obtener el par necesario en el eje. Además, mediante S_{PI} , seguirá controlando el nivel de llenado de D_{ap} .

Requisitos: Los ya mencionados puesto que sólo cambiarán las entradas y/o salidas que controle.

1.1.2.3 Descripción de las distintas opciones. Ventajas e inconvenientes

En función de la opción que se decida instalar en el motor (sea cual sea el modelo finalmente escogido) se habrán de añadir más o menos elementos adicionales a los que componen los sistemas anteriormente descritos. A continuación, se presentan las ventajas y desventajas que, a priori, pueden implicar cada una de las opciones.

1.1.2.3.1 Opción I: Sistema sin posibilidad de recarga autónoma y sin recuperación de energía



Se trata del sistema tal y como se ha definido ya. La inexistencia de posibilidad de recarga o recuperación de energía implica la no instalación en el vehículo del compresor de recarga del depósito.

Esta opción, cuenta con muchas ventajas puesto que se trata de la más sencilla y, por tanto, de la más barata (objetivo a tener siempre presente). El no añadir más elementos adicionales de los ya comentados para el sistema principal, implica además un menor peso del vehículo y un mayor espacio disponible para el depósito principal de aire (D_{ap}) con lo que se posibilita así llevar el aire a una menor presión o, manteniendo ésta, aumentar la masa transportada de éste. Se trata pues de la opción de mayor simplicidad mecánica.

Los principales inconvenientes que a primera vista pueden presumirse para esta opción están en una posible menor autonomía (a la espera del estudio con cotas reales del vehículo), un menor rendimiento económico (€/km) debido a la no recuperación de energía y, la más importante de todas, la pérdida de versatilidad que supone la no posibilidad de recarga autónoma.

1.1.2.3.2 Opción II: Sistema con posibilidad de recarga autónoma y recuperación de energía en las frenadas.

Esta segunda opción implica la colocación en el vehículo de un compresor y un motor eléctrico monofásico de forma que, una vez agotado el depósito de aire, la recarga autónoma se produce sin más que conectando el motor eléctrico a la red. De esta forma, en unas cuatro o cinco horas, en función de la potencia del motor, el depósito vuelve a estar listo para su uso habitual.



Junto con el sistema anterior, se instalaría un dispositivo de transmisión y embragues que entraría en funcionamiento cada vez que se frenara el vehículo de forma que se aprovechara la energía degradada en tales procesos para mover el eje del compresor y así ir recargando el depósito de alta (D_{ap}).

Se hace notar aquí las especiales características que tal compresor habrá de satisfacer. Tendrá que tratarse de un compresor que alcance una presión muy elevada, por lo que habrá de ser alternativo y de pistón (*no hay compresores de tornillo, paletas, lóbulos, etc. que alcancen nuestras presiones de trabajo*). Y, para alcanzar tal presión de forma razonable, tendrá que tener al menos tres etapas. Lo ideal es que la potencia máxima del compresor sea de *10 - 15 kW (esta elección se ha hecho de acuerdo a un estudio de las potencias típicas de frenado que se llevan a cabo en un ciclo homologado de conducción, así como en algunos otros diseñados para tal fin)* y el motor eléctrico de unos *4 - 5 kW*. En frenada se emplearía hasta el máximo de potencia del compresor y, en recarga, la potencia del motor eléctrico.

En cuanto al proceso de frenada, se comenta brevemente en lo que sigue las dos opciones por las que se podría optar en caso de finalmente incorporar el sistema de recuperación de energía en el motor. La distinción radica en que el sistema entre en funcionamiento junto con los frenos de serie del vehículo o que, por el contrario, sea un sistema adicional de frenado.

Sistema de frenado alternativo al normal de serie instalado en el vehículo

Es aquél en el que los frenos de serie del vehículo entrarían en funcionamiento una vez alcanzada la potencia máxima del compresor, en caso de demandarse una potencia de frenado superior a ésta. En tal caso, la gráfica que representa el par de frenado obtenido en función de la posición del pedal de freno sería de la forma:



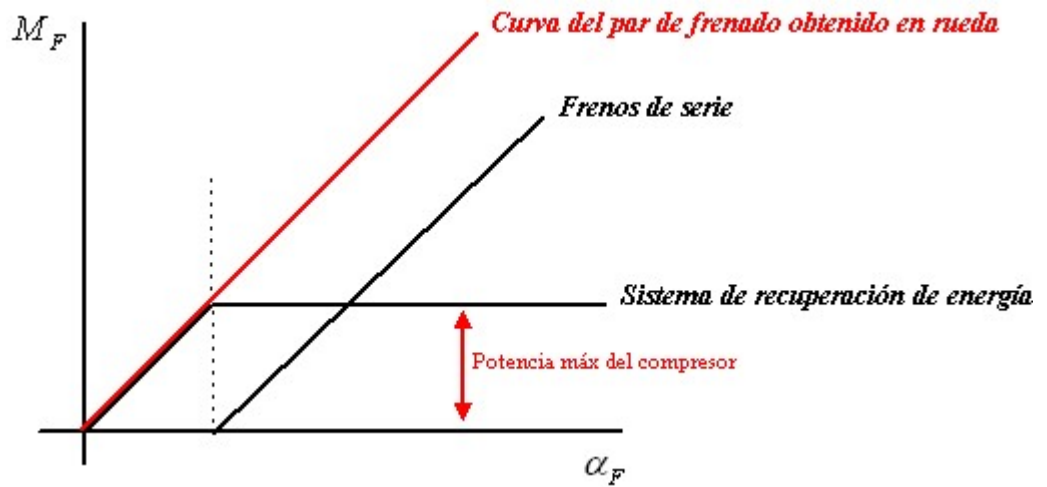


Fig. 4

Puesto que la potencia del compresor es función del par de frenado que se quiera conseguir y de la velocidad de accionamiento del eje, sería necesario, mediante un sistema de desarrollos, jugar con la velocidad de accionamiento del eje del compresor para conseguir siempre el máximo par de frenado posible. Con tal fin se podría pensar en usar un cambio de velocidades mediante ruedas cónicas que permitiera infinitos desarrollos mediante una mayor o menor separación entre las mismas. De esta forma, en función de la velocidad del vehículo y la posición del pedal de freno (*BPP*), la unidad central del motor calcularía la separación de las ruedas para obtener la relación de transmisión que consiguiera el par de frenado máximo y acoplaría, al detectar que se va a producir una situación de frenado, el eje de las ruedas con el del compresor.

El sistema de transmisión podría ser del estilo del que sigue (evidentemente entrando en más detalles si finalmente se opta por la instalación del sistema de recuperación de energía en el vehículo):



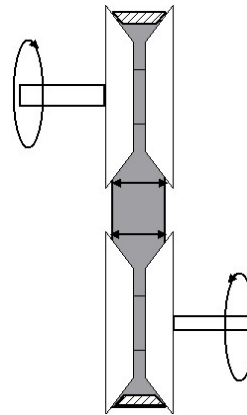


Fig. 5

Sistema de frenado complementario al normal de serie instalado en el vehículo

Esta otra opción de frenado consiste en que los frenos de serie del vehículo entren en funcionamiento desde el momento en el que se comience a frenar de forma que el frenado del vehículo tenga desde el principio dos fuentes de origen, los frenos propiamente dichos y el frenado que se consigue con el compresor.

La gráfica representativa de lo anterior es la que sigue:

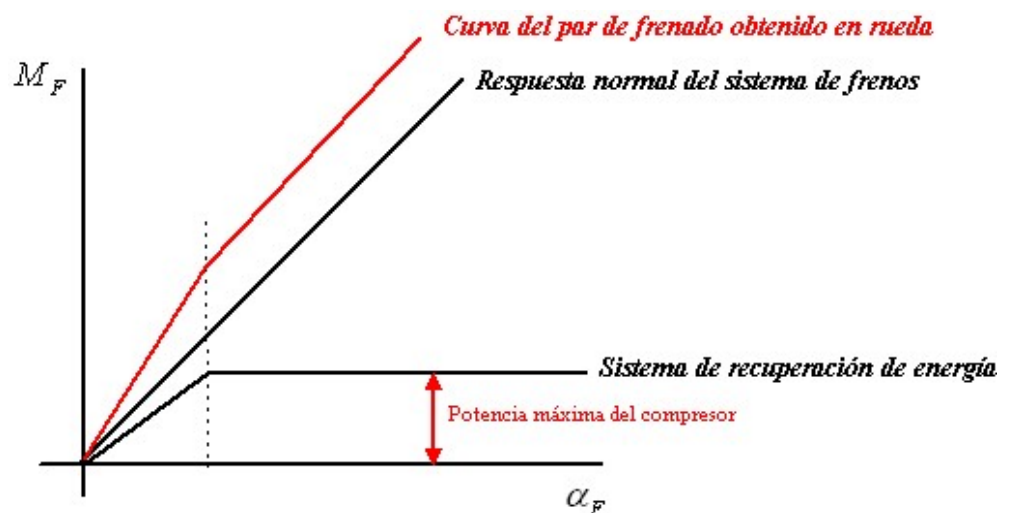


Fig. 6

Esta última modalidad de frenado tiene la ventaja de ser la más sencilla de realizar puesto que no requiere actuar sobre el sistema de frenos del vehículo. En cambio la anterior, donde esto si es necesario puesto que los frenos de serie no han de entrar en



funcionamiento hasta llegado el momento preciso, tiene la ventaja de aprovechar mejor la energía degradada en el proceso y, por tanto, dará una mayor recuperación que con el sistema anterior.

En conclusión, la principal ventaja que tiene esta opción radica en la versatilidad de la que el sistema de recarga dota al automóvil. Además se presupone una mejor autonomía que en la opción anterior aunque, como ya se mencionó anteriormente, esto queda pendiente de estudio hasta no realizar los cálculos suficientes con las cotas reales del vehículo. Como consecuencia del sistema de recuperación de energía parece que se obtendrá en este caso un mejor rendimiento económico (€/km).

En cuanto a las principales desventajas que se presumen de esta segunda opción se destacan todas aquéllas que eran ventajas en la posibilidad anterior. Esto es, mayor peso, mayor complejidad mecánica, menor espacio para el depósito principal, mayor coste y, sobre todo, la pérdida de conducibilidad debida a las vibraciones que se generarían durante la frenada por la entrada en funcionamiento del compresor alternativo.

1.1.2.3.3 Opción III: Sistema con recuperación de energía en las frenadas

Esta última opción se diferencia fundamentalmente de la anterior en que, al no incorporar el sistema autónomo de recarga, se hace innecesaria ya la colocación en el vehículo del motor eléctrico monofásico con la ventaja que, en términos de espacio disponible, esto supone.

Debido a lo anterior, ya no se hace necesario un compresor tan sofisticado puesto que tampoco se requerirá que éste comprima hasta la presión máxima del depósito de alta



(D_{ap}). Bastará que lo haga hasta la presión máxima del depósito de presión variable (D_{reg}), en el caso de los *motores neumáticos tipo I y II*. En el caso del *motor neumático tipo III*, seguirá siendo necesaria la compresión del aire hasta la presión de carga del depósito de alta (D_{ap}) y por tanto se considera esta opción descartada para este motor puesto que, de comprimir hasta 300 bar, se optaría evidentemente por la *opción II* de versatilidad sustancialmente mayor.

Por tanto, para la compresión en los motores de dos tiempos, servirá una simple cabeza compresora (sin calderines ni elementos añadidos), que podrá ser de tornillo (por su reducido tamaño), que permita comprimir hasta las presiones intermedias del D_{reg} (*unos 15 bar en el caso del motor neumático tipo I*).

Esta opción obligaría a añadir al sistema un depósito auxiliar (de unos cincuenta litros), además de los dos ya existentes en el vehículo, que se mantuviera a dicha presión intermedia de forma que, una vez lleno, pudiese usarse, previo acoplamiento mediante una segunda V_{reg} con el D_{reg} , para ir llenando este último a la presión necesaria en cada caso. Este depósito auxiliar implicaría un menor espacio para el D_{ap} que debería ver reducida su capacidad aproximadamente en el valor del depósito auxiliar instalado.

Las ventajas con las que cuenta esta segunda opción están fundamentalmente en la, posiblemente, mejor autonomía que tendría esta opción (aunque habría de esperarse a la realización de los cálculos oportunos) y el mejor rendimiento económico (€/km) como resultado del sistema de recuperación de energía. Las principales desventajas están, como ya se dijo anteriormente, en la pérdida de versatilidad que implica la imposibilidad de recarga autónoma del vehículo y el menor espacio para el depósito principal disponible. También hay que destacar la complejidad que esta opción, con



depósito auxiliar, añade a todo el sistema y, por tanto, el mayor coste que esto implicaría (*mayor que la I pero se entiende que menor que la opción II*).

En comparación con las dos opciones anteriores se mencionará que el peso de ésta es mayor que la *I* pero menor que la *opción II*, debido a la inexistencia del motor eléctrico fundamentalmente. Como principal ventaja respecto a la *opción II* está el hecho de que, debido a las características más simples del compresor mencionadas, las vibraciones durante el proceso de frenada serían menores que en la opción anterior.

Una vez definidos, con sus ventajas e inconvenientes, todos los modelos y opciones que se barajan para la adaptación del motor térmico, se realizarán los cálculos necesarios que permitan que la decisión que se tome sea la que mejor resuelva los objetivos del proyecto con la mayor sencillez y economía posible.

Para ello se atenderá a criterios de autonomía, versatilidad, rentabilidad de la inversión, facilidad de montaje, complejidad mecánica, conducibilidad etc.

1.1.2.4 Primeros cálculos generales: dimensiones, potencia, par,...

A continuación se detallan las principales características del motor instalado en el Smart de serie:



DATOS TÉCNICOS		DATOS TÉCNICOS		
Motor y transmisión				
Ubicación: trasera Orientación: transversal Tipo de turbo: con intercooler Relación compresión: 18,5:1 Sistema de distribución: árbol de levas lateral Sistema de alimentación: diesel - common rail Tipo de combustible: diesel Cambio: 6 velocidades		Capacidad del depósito de combustible: 22 l Coefficiente Penetración: 0,37 Pesos: <i>en vacío:</i> 730 Kg <i>máximo autorizado:</i> 990 Kg Ratio Peso/Kw: <i>con carga:</i> 33 Kg <i>sin carga:</i> 24 Kg		
Desarrollos	1	8,5	[km/h a 1000 rpm]	Potencia: <i>Potencia:</i> 41 cv (30 kW) <i>Régimen máximo:</i> 4.200 rpm <i>Potencia fiscal:</i> 6,84 <i>Potencia Especifica:</i> 51,25 Cv/l <i>Relacion peso potencia:</i> 17,804878 Kg/Cv Par: <i>Par máximo:</i> 100 Nm a 2.200 rpm <i>desde:</i> 1.800 <i>Carga útil:</i> 260 Kg
	2	11,7		
	3	16,3		
	4	23		
	5	31,7		
	6	44,1		
Cilindrada: 0,8 l (799 cc) Consumo: <i>extra-urbano a 120 km/h:</i> 3,1 l/100km <i>urbano:</i> 3,9 l/100km <i>combinado:</i> 3,4 l/100km		Dimensiones y medidas		
Cilindros: <i>Disposición:</i> en línea <i>Número:</i> 3 <i>Diámetro:</i> 65 mm <i>Válvulas por cilindro:</i> 2 <i>Carrera:</i> 79 mm Materiales: <i>de la culata:</i> aluminio <i>del bloque de motor:</i> aluminio		Exterior: <i>Longitud / Anchura / Altura:</i> 2.500 / 1.515 / 1.549 mm <i>Distancia entre ejes:</i> 1.812 mm <i>Vía delantera / trasera:</i> 1.272 / 1.354 mm <i>Giro entre paredes:</i> 8,7 mts Interior, delantero: <i>Ancho:</i> 1.194 mm <i>Alto:</i> 1.013 mm Maletero: <i>método VDA</i> <i>Capacidad máxima / mínima:</i> 363 / 150 l <i>Anchura mínima:</i> 1.005 mm <i>Longitud máxima:</i> 620 mm <i>Altura:</i> 724 mm		
Prestaciones y pesos				
Número asientos: 2 Autonomía: 710 Km Aceleración 0-100: 19,8 seg Velocidad máxima: 135 Km/h				

Tabla b

Respecto al mapa motor del Smart, para la obtención de una curva de plena carga simplificada pero que se aproxime lo más posible a la real que se usaría para cálculos más avanzados, se realizarán las siguientes simplificaciones:

- El punto de máxima potencia coincide con el de máxima velocidad regulada en carga.
- El punto de corte se da para $n = 5000 \text{ rpm}$.
- El par máximo se alcanza en el rango $1800 - 2200 \text{ rpm}$.



- Dado el rango de regímenes considerado (0 – 5000 rpm) y los puntos característicos de par cero, par máximo, potencia máxima y punto de corte, se supondrá que todos ellos se unen mediante rectas para formar la curva de plena carga del motor.
- El coeficiente de crecimiento del par para cada grado de carga será el valor, habitual para vehículos del estilo, de 0,6.

El par para el punto de potencia máxima será el siguiente:

$$(M_e)_{W_{e_{\max}}} = \frac{W_{e_{\max}} [W]}{2 \cdot \pi \cdot n [Hz]} \quad M_e = 68,209 \text{ N}\cdot\text{m}$$

De forma que los puntos más característicos de la curva de plena carga simplificada del motor del Smart Fortwo CDI serán:

Régimen (rpm)	Par (Nm)
0	0
1800	100
2200	100
4200	68,209
5000	0

Tabla c

Siendo la curva, por tanto, la que sigue:



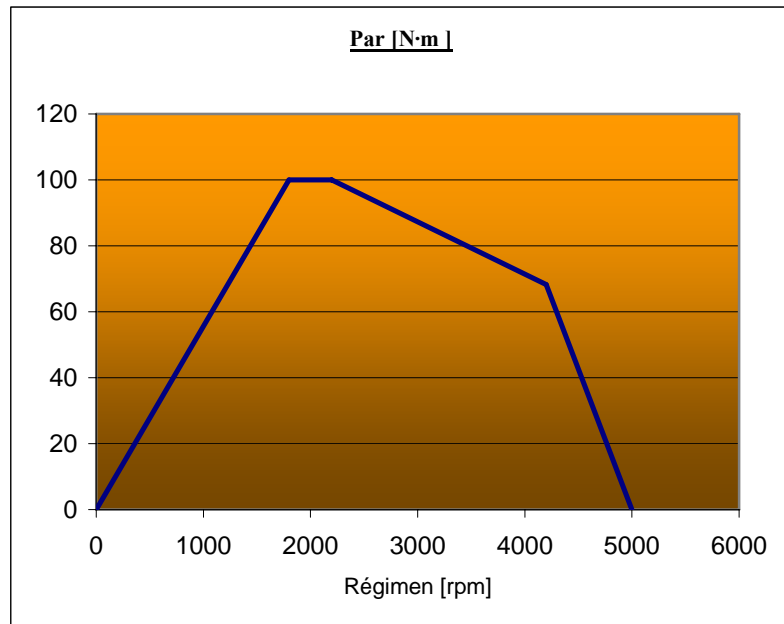


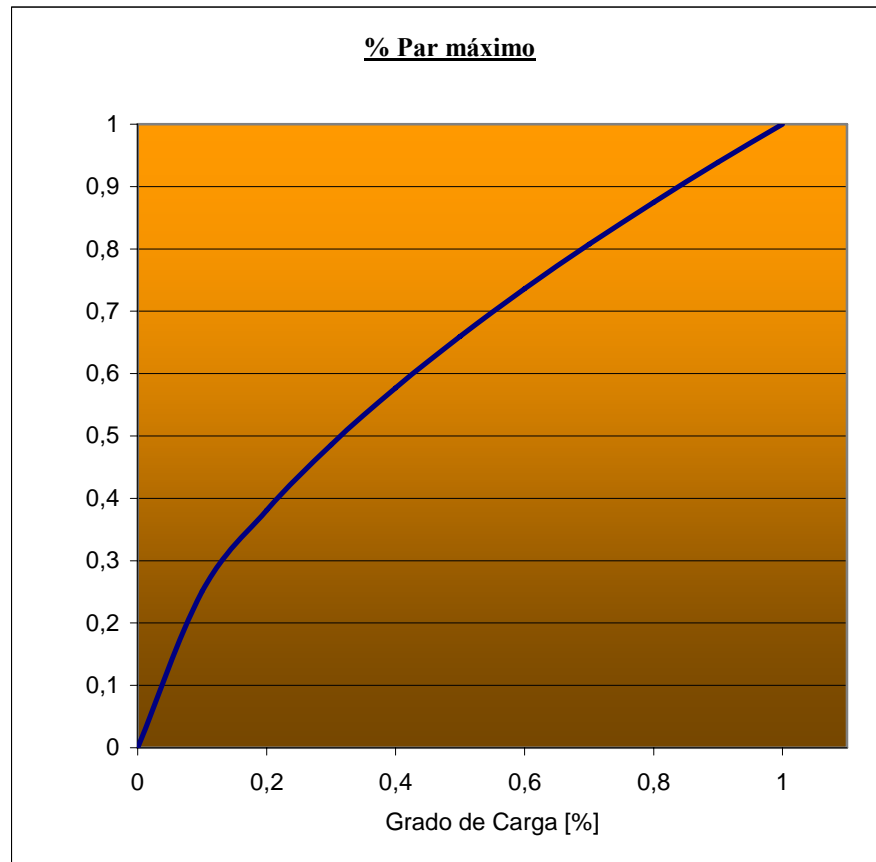
Fig. 7

Respecto al coeficiente de crecimiento de par, su valor de 0,6 nos da el crecimiento del mismo con el grado de carga que se muestra a continuación:

Grado carga	% Par máx
0	0,00%
0,1	25,12%
0,2	38,07%
0,3	48,56%
0,4	57,71%
0,5	65,98%
0,6	73,60%
0,7	80,73%
0,8	87,47%
0,9	93,87%
1	100,00%

Tabla d



**Fig. 8**

Una vez obtenidos los valores del par (máximo) para cada régimen de la curva de plena carga, se calcularán los valores de las curvas de carga parcial para distintos grados de carga mediante la siguiente expresión y de acuerdo con la ley de crecimiento de par antes mencionada:

$$(GC)^{0,6} = \left[\frac{M_e}{M_{e_{\max}}} \right]_{n=cte} \rightarrow [M_e]_{n=cte} = [M_{e_{\max}}]_{n=cte} \cdot (GC)^{0,6}$$

De acuerdo con todo lo anterior, los valores del par efectivo de nuestro motor para todos y cada uno de los regímenes y grados de carga mencionados se presentan en la **Tabla I** del anexo.



Los valores de par en función del régimen y para cada grado de carga estudiado de la **Tabla I**, se presentan en la superficie siguiente:

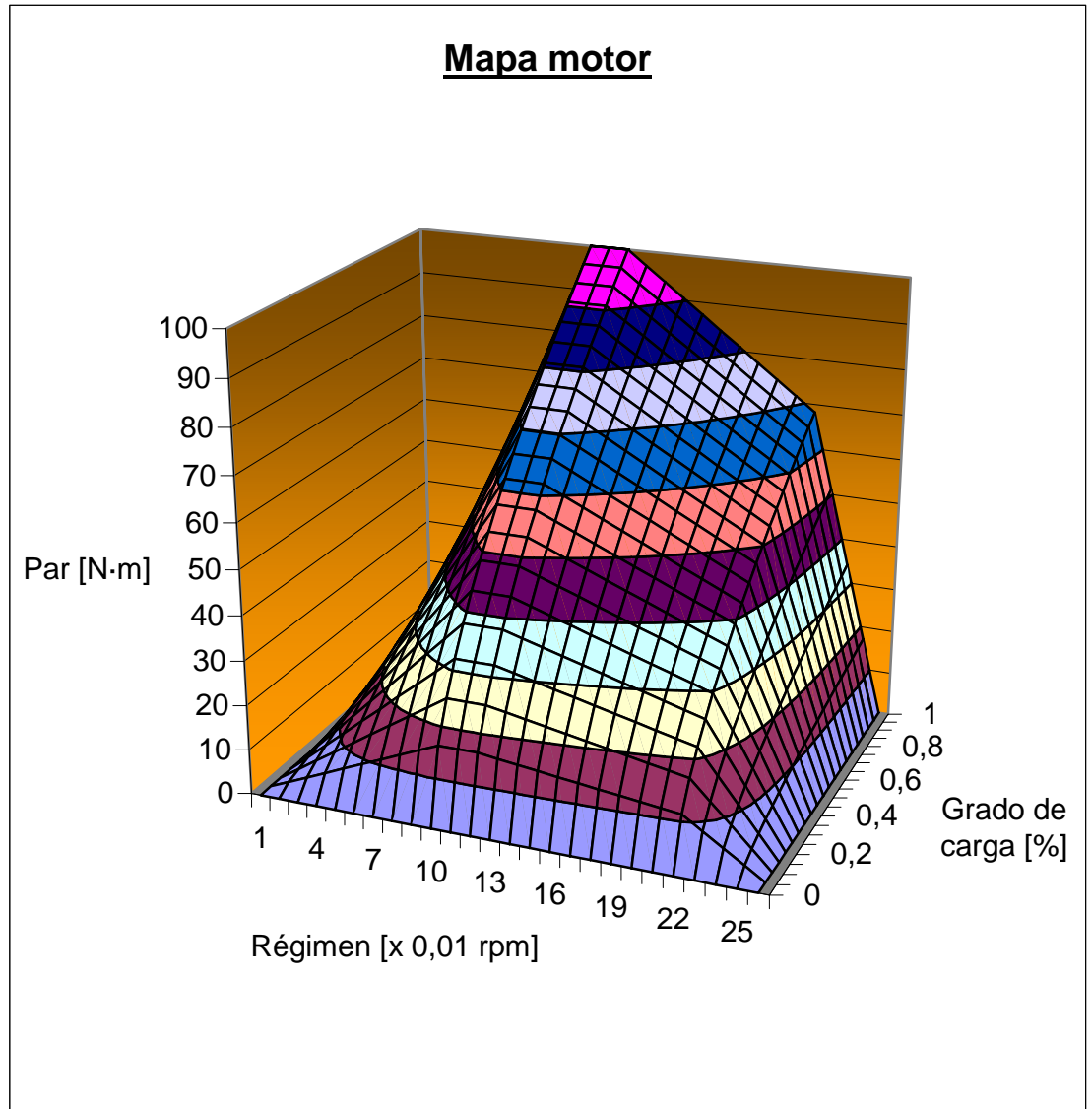


Fig. 9

Con los valores de par anteriores se puede obtener la potencia efectiva según lo que sigue:

$$\dot{W}_e [kW] = M_e [N \cdot m] \cdot 2 \cdot \pi \cdot n [Hz] \cdot 10^{-3}$$

De tal forma que se obtiene la **Tabla II** de datos semejante a la anterior.



Con los valores de par y potencia antes calculados podemos calcular la presión media efectiva requerida en cada punto del mapa según:

- *Modelo de 2T:*
$$pm_e [bar] = \frac{M_e [N \cdot m] \cdot 2 \cdot \pi}{V_T [m^3]} \cdot 10^{-5}$$

- *Modelo de 4T:*
$$pm_e [bar] = \frac{M_e [N \cdot m] \cdot 4 \cdot \pi}{V_T [m^3]} \cdot 10^{-5}$$

Cuyas tablas de resultados también se exponen en el anexo (**Tabla III** y **Tabla IV**).



1.1.3 ELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE FUNCIONAMIENTO

1.1.3.1 Análisis de los ciclos termodinámicos

Para el análisis de los distintos ciclos termodinámicos que tienen lugar en cada uno de los sistemas en estudio se adoptarán, para su estudio teórico, las simplificaciones siguientes en cuanto a las características termodinámicas que se aplicarán al aire.

Se considerará el mismo como gas perfecto de forma que:

<u>Constante de la ecuación de estado de gas ideal</u>	$R=287 \text{ J/kg/K}$
<u>Coefficiente o índice adiabático</u>	$\gamma =1,4$
<u>Calor específico de gas ideal como función de la temperatura:[†]</u>	
$C_p = 28,11 + 0,1967 \cdot 10^{-2} \cdot T + 0,4602 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 - 1,966 \cdot 10^{-9} \cdot T^3$	
<i>Si temperatura atmosférica de $T=300\text{K}^{\dagger}$ obtenemos $C_p = 29,0612 \text{ J/mol/K}$</i>	
<i>Como masa molar del aire $28,97 \text{ g/mol}$, entonces $C_p = 1003,148 \text{ J/kg/K}$</i>	

En cuanto a las condiciones del depósito D_{ap} se trabajará, en principio, con las siguientes:

<u>Presión del depósito de alta</u>	$P_{Dap} = 300 \text{ bar}$
<u>Temperatura constante del depósito de alta e igual a la ambiental</u>	$T_0 = 300 \text{ K}$
<u>Presión atmosférica</u>	$P_0 = 1 \text{ bar}$

[†] Cfr. [ÇENG94] A-7

[†] Será la usada en el proyecto



Para todos los cálculos se han estudiado distintas variaciones en cuanto a la presión del depósito y la masa transportada. El valor dado representa el finalmente adoptado para el proyecto. Las principales razones para optar por tal valor de presión han estado fundamentalmente basadas en la búsqueda del equilibrio óptimo entre el peso máximo admisible del vehículo y presión máxima alcanzable de acuerdo a los compresores portátiles que pueden encontrarse actualmente en el mercado. También se ha tenido presente evidentemente el máximo espacio útil que se podía aprovechar del vehículo con la menor pérdida de habitabilidad posible.

1.1.3.1.1 Ciclos teóricos

A continuación se presentan los ciclos teóricos de cada uno de los motores en estudio, fundamentalmente mediante su correspondiente diagrama PV o del indicador propiamente dicho.

Se describirán en detalle los cálculos realizados para dos puntos representativos del motor como son el de máximo par y el de máxima potencia para, posteriormente, ampliarlos a todo el mapa motor.

Para todos ellos se realizarán las siguientes hipótesis previas:

- Las válvulas abren y cierran de manera instantánea en los puntos muertos superior e inferior o, en su defecto, en el punto determinado por el porcentaje de carrera de inyección para el caso del *motor neumático tipo II*.
- Se desprecian las transferencias de calor entre el fluido y las paredes (proceso adiabático).
- Se desprecian las pérdidas de carga en todas las válvulas y conductos.



- Se modelan las compresiones y expansiones del aire mediante politrópicas de exponente $n = 1,3^1$.
- En cuanto al bombeo de los gases de escape, se considerará un proceso isocórico puesto que, a pesar de que el volumen disminuye, la masa lo hace también de manera proporcional de forma que el volumen específico se mantiene, idealmente, constante durante el proceso.
 - No se considerará inercia alguna en los gases.
 - No se considerará tampoco rendimiento mecánico alguno. Por lo que la presión media indicada se puede considerar igual a la efectiva.
 - Se considerará para los ciclos un rendimiento isentrópico típico de $\eta = 0,95$. Rendimiento que es necesario suponer puesto que no será dato hasta el momento en el que, mediante un prototipo, se pudieran realizar las pruebas pertinentes al motor en un banco de ensayos.
 - Exclusivamente para el *motor neumático tipo III*, se considerará que la inyección del aire se produce también de manera instantánea.

1.1.3.1.1.1 *Motor neumático tipo I*

Este motor sigue un ciclo de renovación de la carga de dos tiempos. El ciclo, teóricamente, queda definido como sigue:

- En el punto muerto superior (*p.m.s.*) se abre la válvula de admisión, de forma que el aire, a la presión media indicada demandada, empuja al pistón durante su desplazamiento hasta el punto muerto inferior (*p.m.i.*), momento en el cual se cierra la válvula de admisión. Se realiza así la carrera de trabajo.

¹ Cfr. [MATA78], capítulo 13, páginas 408-409



- Una vez alcanzado el *p.m.i.* se cierra la válvula de admisión y se abre, de manera instantánea, la de escape. Se trata de la carrera de bombeo del aire de escape al exterior. Un proceso que se considerará, de forma teórica, isocórico.

Un estudio termodinámico del sistema como volumen abierto (*válido también para el motor neumático tipo II*) permite una descripción más correcta, en este sentido, de los procesos que sufre el aire a su paso por el sistema.

Tomando para ello como sistema de estudio el volumen de control indicado en la figura.

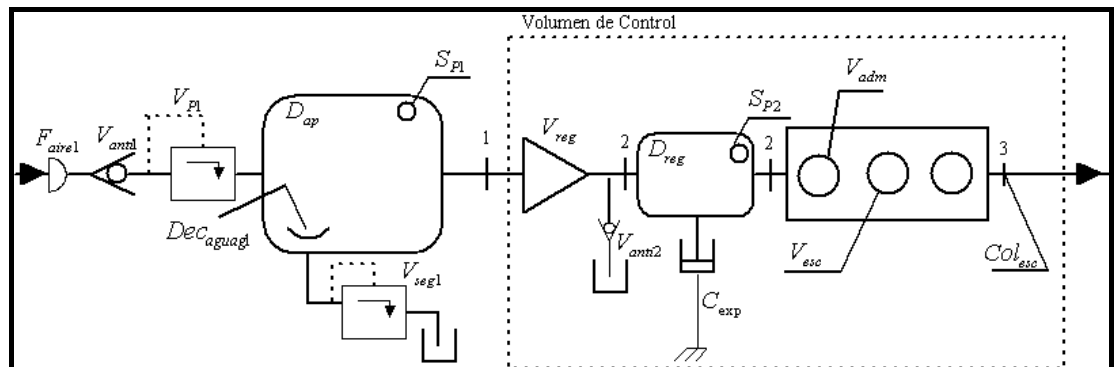


Fig. 10

Puesto que el depósito no significa ningún tipo de proceso termodinámico se considera la frontera del sistema a estudiar comenzando aguas arriba de V_{reg} . Y, por la misma razón, no se considera proceso alguno tras el paso del flujo por D_{reg} .

Partiendo del punto 1 donde se tiene aire a temperatura ambiente, que designaremos como T_0 , y presión la de D_{ap} , los procesos termodinámicos que se producen desde el punto de vista teórico son:

Proceso 1-2: Estrangulamiento, supuesto adiabático, del flujo y, puesto que $\Delta p \approx 0$ y $\Delta ec \approx 0$ podemos suponer con bastante certeza que $h_1 \approx h_2$ considerando por tanto a V_{reg} un dispositivo de estrangulamiento isentálpico. Considerando la entalpía como



función únicamente de la temperatura tenemos que de 1 a 2 se produce idealmente una reducción de presión a temperatura constante.

Proceso 2-3: Proceso de intercambio de energía entre el aire y los pistones mediante una expansión del mismo hasta la presión atmosférica.

Proceso 2-3s: Proceso de intercambio de energía mediante una expansión ideal isentrópica y adiabática hasta la presión atmosférica.

Lo anterior puede expresarse en un diagrama T-S como el que sigue:

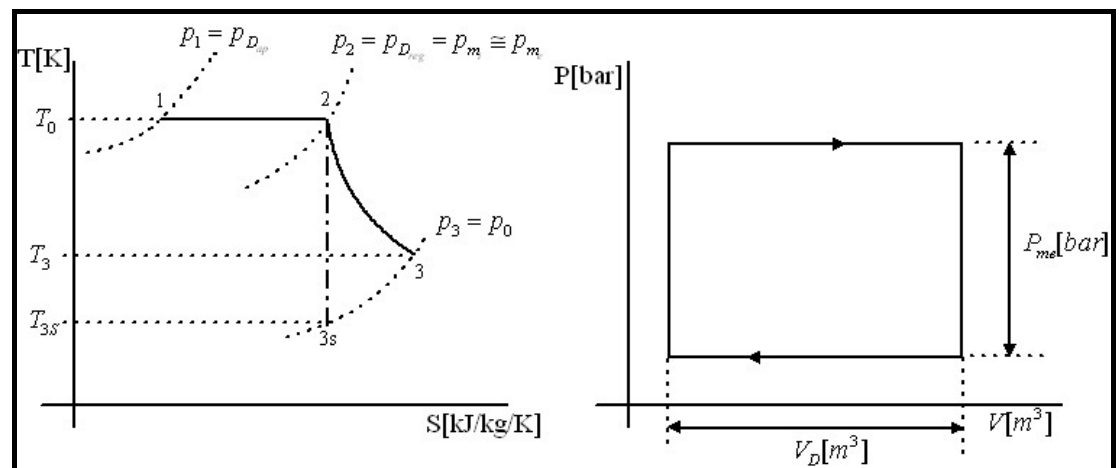


Fig. 11

Se concretará en lo que sigue todo lo mencionado anteriormente para el punto de máximo par y el de máxima potencia del motor.

Ambos puntos quedan perfectamente definidos por:

Punto máx par		Punto máx potencia	
n [rpm]	2000	n [rpm]	4200
GC [%]	100,00 %	GC [%]	100,00 %
M_e [N·m]	100	M_e [N·m]	68,209
\dot{W}_e [kW]	20,944	\dot{W}_e [kW]	30
P_{me} [bar]	7,8638	P_{me} [bar]	5,3638

Tabla e

Con los diagramas del indicador, teóricos, que siguen:



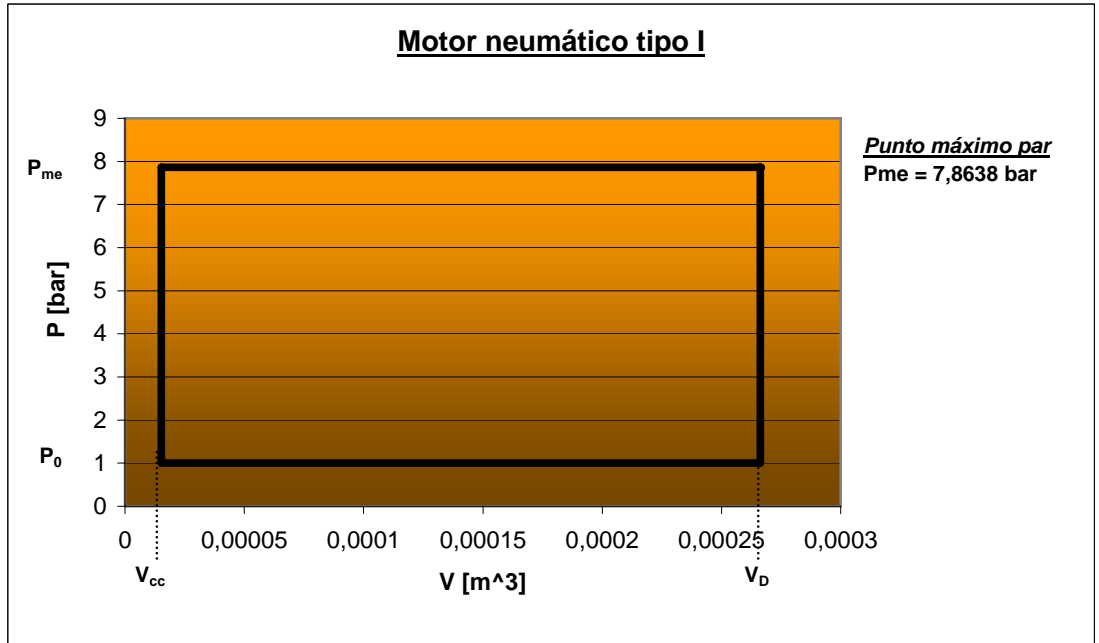


Fig. 12

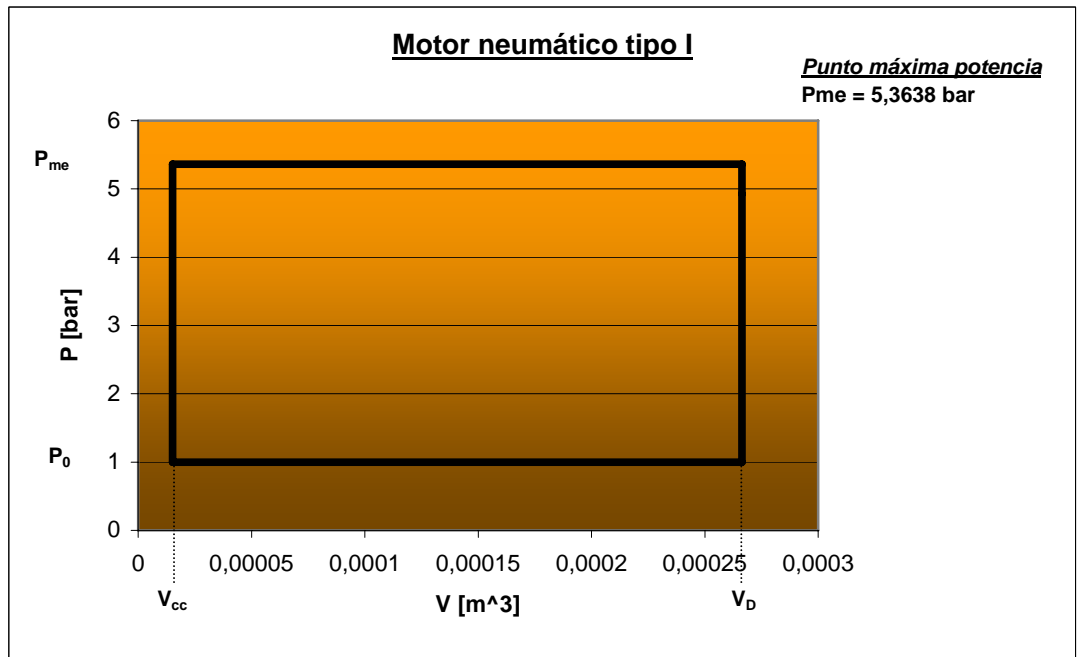


Fig. 13

Cada uno de los estados del diagrama termodinámico de la Fig.11 es conocido y puede calcularse para ambos puntos en estudio, así como para el resto del mapa motor, mediante:



<u>Punto 1</u>	<u>Punto 2</u>	<u>Punto 3s</u>
$P_1 = P_{Dap}$	$P_2 = P_{Dreg} = Pm_i + P_0 \approx Pm_e + P_0$	$P_{3s} = P_0$
$T_1 = T_0$	$T_2 = T_1 = T_0$	$T_{3s} = T_2 \cdot \left(\frac{P_2}{P_{3s}} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$
$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{P_1};$	$v_2 = \frac{R \cdot T_2}{P_2};$	$v_{3s} = \frac{R \cdot T_{3s}}{P_{3s}};$

Tabla f

Y con ello puede obtenerse una primera aproximación del consumo del sistema:

<u>Punto 3: supuesto un rendimiento isentrópico típico del ciclo abierto de $\eta = 0,95^\dagger$.</u>
$\eta_{isentrópico} = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{isentrópico}} = \frac{\dot{m} \cdot (h_2 - h_3)}{\dot{m} \cdot (h_2 - h_{3s})} = \{gasperfecto\} = \frac{T_2 - T_3}{T_2 - T_{3s}} \Rightarrow T_3 = T_2 - \eta \cdot (T_2 - T_{3s})$
Caudal másico:
$\dot{W}_e = \dot{W}_{real} = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) = \{gasperfecto\} = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_3) \Rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{W}_e [kW] 10^3}{C_p \cdot (T_2 - T_3)}$

Tabla g

Los resultados para los dos puntos en estudio son:

[†] Cfr. [WARK99] Capítulo 8, página 397.



Punto par máximo					
Punto	T (K)	T(°C)	p (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
1	300	27	300	0,00287	0,1579
2	300	27	8,864	0,09714	
3s	160,83	-112,17	1	0,46159	
3	167,79	-105,21	1	0,48156	
Punto potencia máxima					
Punto	T (K)	T(°C)	p (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
1	300	27	300	0,00287	0,2555
2	300	27	6,364	0,13530	
3s	176,80	-96,20	1	0,50742	
3	182,96	-90,04	1	0,52510	

Tabla h

La tabla anterior pone de manifiesto las bajas temperaturas a las que puede llegar a salir el aire de escape.

La ampliación de lo anterior para el resto del mapa motor presenta, para las temperaturas de escape T_3 y T_{3s} , los resultados correspondientes a las tablas **Tabla V** y **Tabla VI**. Y, de igual forma, la **Tabla VII** para los flujos máxicos demandados en cada punto del mapa motor.

Con lo anterior se tiene una visión más clara de algunos aspectos relevantes a tener en cuenta en el *motor neumático tipo I*.

Tal es el caso de las bajas temperaturas que alcanza el aire de escape y que se presentan en la figura adjunta en función del régimen y el grado de carga del motor.



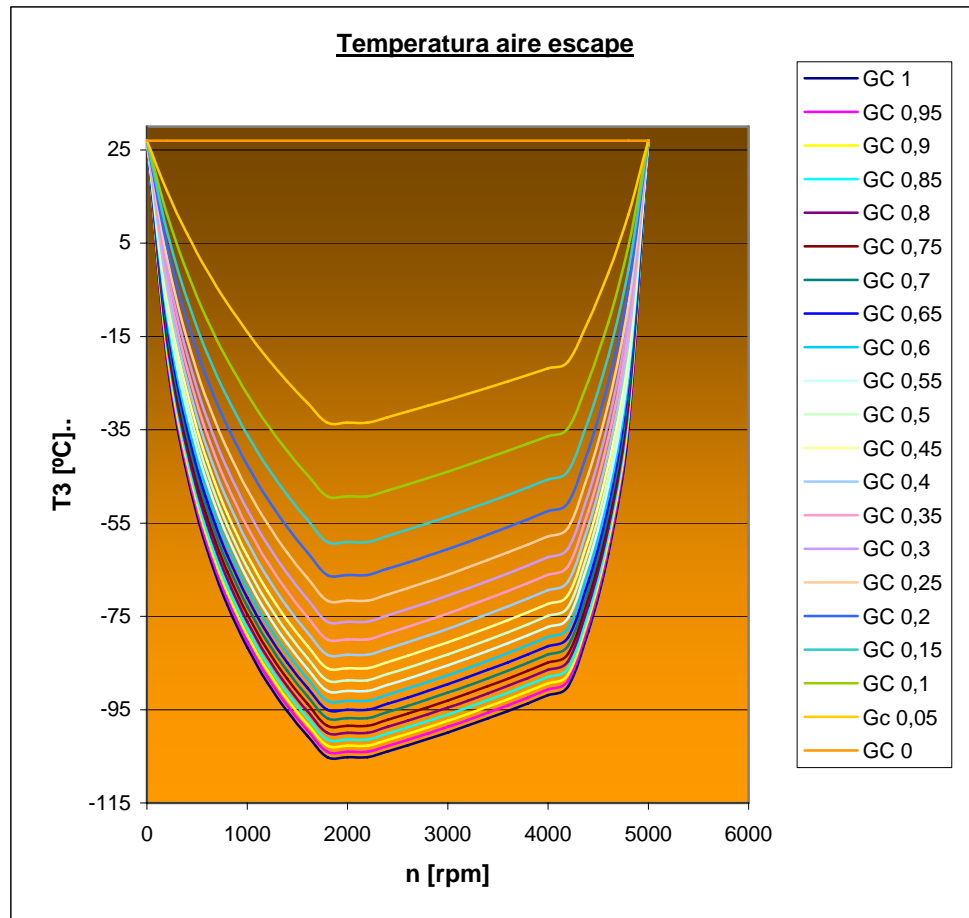


Fig. 14

En cuanto a los flujos máxicos que demanda el motor en cada uno de sus puntos de existencia, la superficie de la Fig.15 representa su variación con el grado de carga.



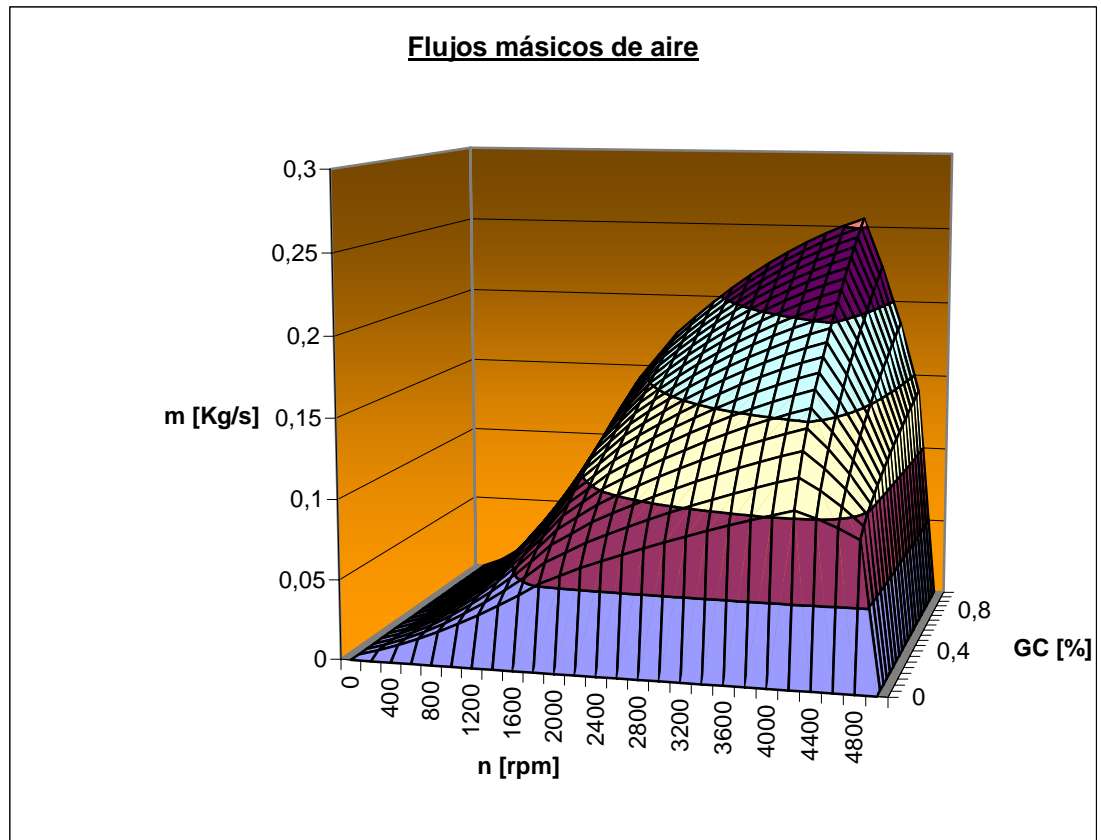


Fig. 15

1.1.3.1.1.2 Motor neumático tipo II

Como ya se explicó, este segundo modelo representa una modificación del anterior pero manteniendo intactos todos los elementos del sistema.

Con objeto de disminuir la pérdida de carga que V_{reg} introduce en el sistema este motor descarga el aire a los cilindros abriendo la válvula de admisión sólo un cierto intervalo de la carrera del pistón (y no toda como ocurría en el anterior) pero manteniendo el ciclo de dos tiempos que rige el proceso de renovación de la carga de su predecesor.

Para cumplir lo anterior el aire ya no se encuentra a la presión media efectiva demandada sino que habrá de descargarse a una presión mayor tal que el trabajo obtenido por ciclo se mantenga invariable.



La figura representa la variación que este motor introduce en el ciclo planteado en un principio.

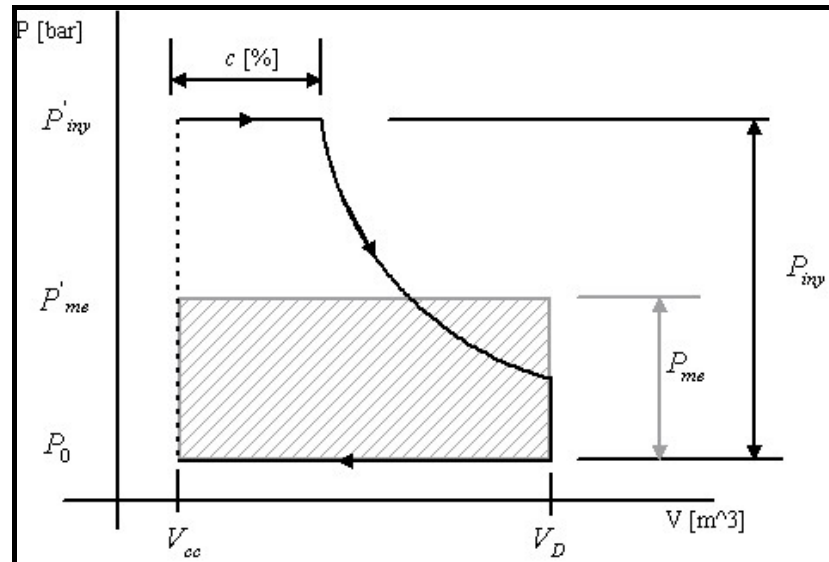


Fig. 16

La modificación introducida no varía en absoluto los procesos termodinámicos a los que se ve sometido el aire del depósito, por lo que sigue siendo de utilidad para este *motor neumático II* el diagrama TS de la Fig.11. Por todo ello, la nomenclatura de los puntos utilizada anteriormente se mantendrá vigente en los estudios que siguen.

La presión de inyección P'_{iny} (absoluta) se calcula mediante una de las dos siguientes expresiones, en función de que consideremos o no el volumen de la cámara de combustión y, por tanto, la relación de compresión del motor de serie (resultado de imponer la igualdad de áreas necesaria para obtener el mismo trabajo).

Despreciando V_{cc}	Considerando V_{cc}
$P'_{iny} = \frac{P'_{me}}{c \cdot \left(1 + \frac{1 - c^{n-1}}{n-1}\right)}$	$P'_{iny} = \frac{P'_{me}}{\frac{c \cdot n}{n-1} + \frac{1}{(r-1) \cdot (n-1)} \cdot \left(1 - r \cdot \left(\frac{1 + c \cdot (r-1)^n}{r}\right)\right)}$



Tabla i

La primera expresión, más sencilla, permite hacerse una idea rápida del orden de magnitud en el que se encuentra la presión en estudio.

A continuación se presentan los diagramas del ciclo correspondientes a los puntos de máximo par y máxima potencia respectivamente para una inyección con $c = 0,5$, esto es, en media carrera del pistón.

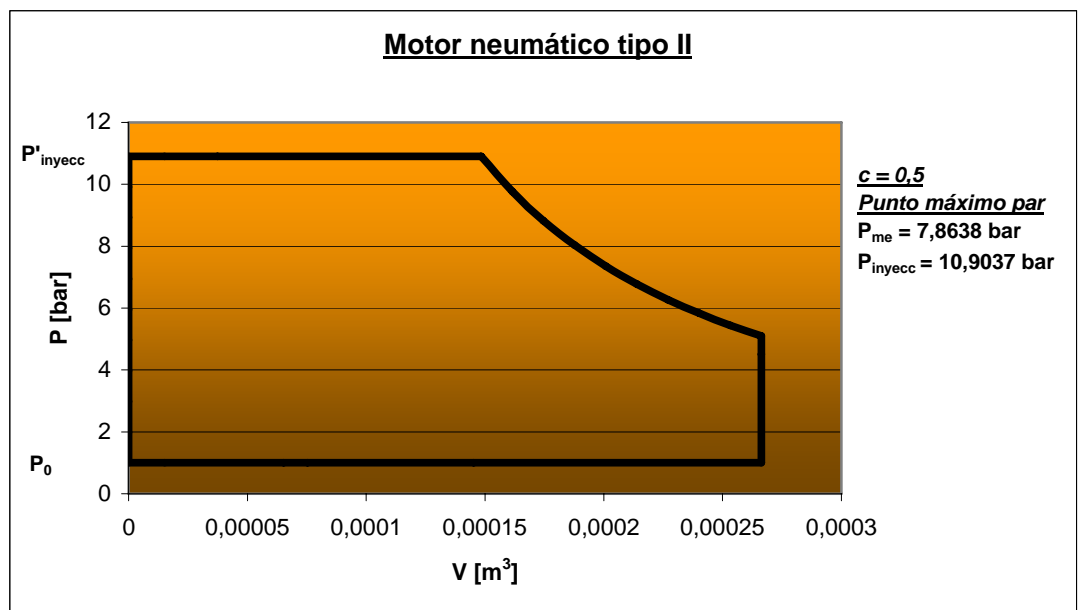


Fig. 17

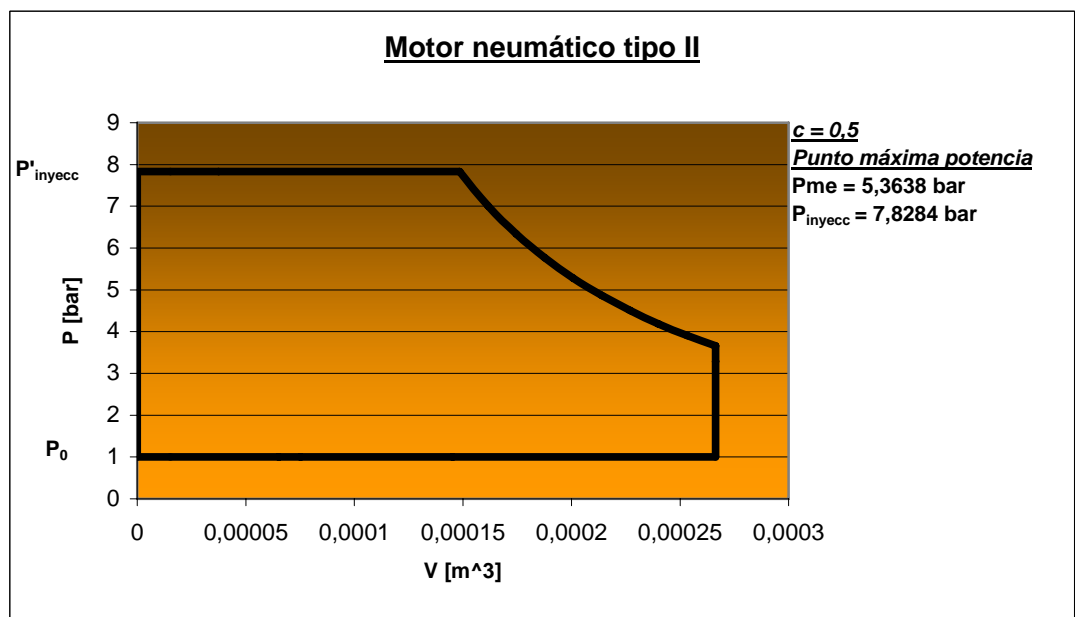


Fig. 18

Un estudio de la variación de dicha presión de inyección en función del porcentaje de carrera del pistón con la admisión abierta (c) refleja la escasa diferencia existente entre los resultados de una y otra fórmula anteriores a valores de c apreciables. Así como, que el error cometido comienza a ser más evidente a 'inyecciones' más rápidas por la importancia que adquiere el pequeño aumento de volumen disponible (V_{cc}) para permitir la entrada de la misma masa de aire pero a una presión menor debido al mayor espacio existente.

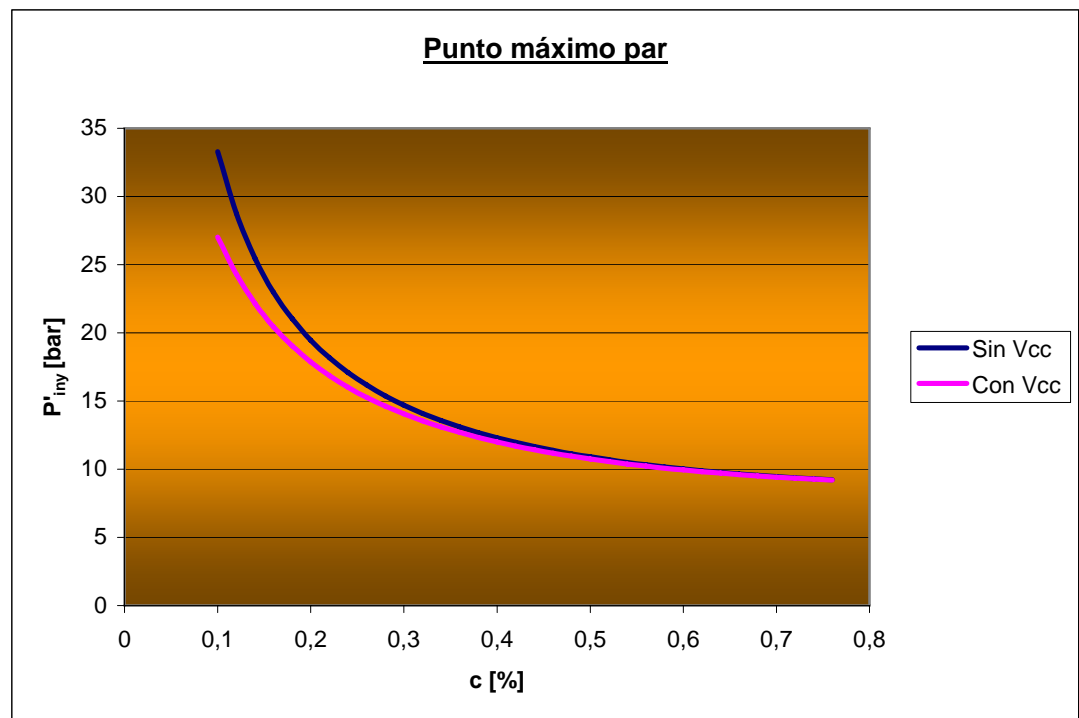


Fig. 19



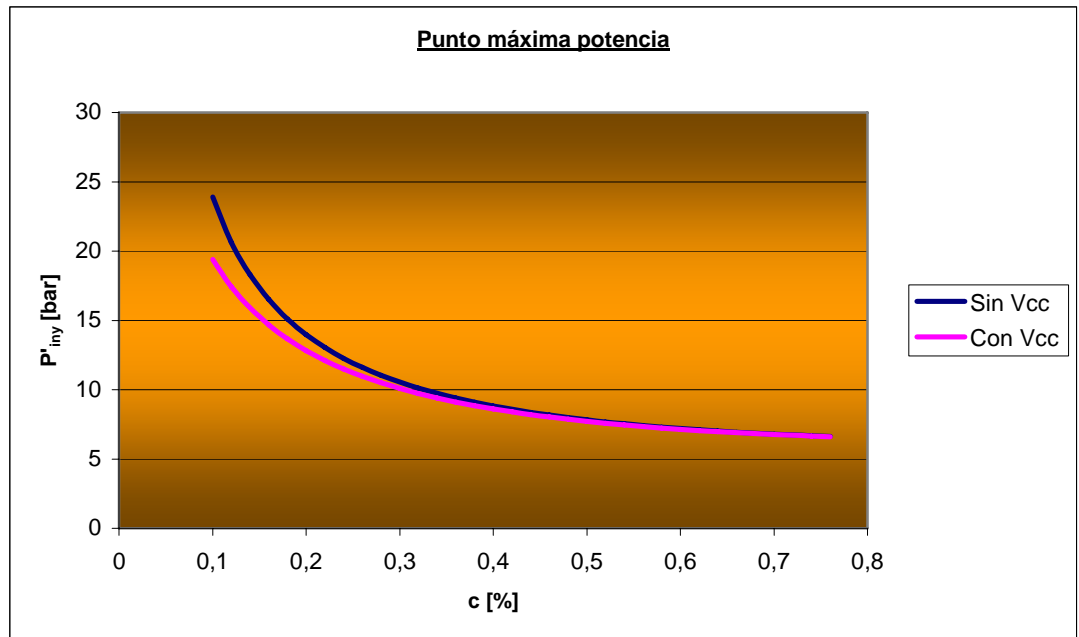


Fig. 20

De igual forma que anteriormente se pueden determinar todos los estados termodinámicos del diagrama de la Fig.11, puesto que la única diferencia existente está en que la expansión se realiza desde una presión mayor.

Siendo de nuevo los resultados para los dos puntos ejemplo ($c = 0,5$) los siguientes[†]:

Punto par máximo					
Punto	T (K)	T (°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
1	300	27	300	0,00287	0,1487
2	300	27	10,748	0,08010	
3s	152,21	-120,79	1	0,43685	
3	159,60	-113,40	1	0,45806	
Punto potencia máxima					
Punto	T (K)	T (°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
1	300	27	300	0,00287	0,2373
2	300	27	7,717	0,11157	
3s	167,33	-105,67	1	0,48023	
3	173,96	-99,04	1	0,49927	

Tabla j

[†] Los datos presentados en la Tabla j si han tenido en cuenta V_{cc}



Los resultados anteriores presentan el problema, previsible desde un principio por otro lado, de alcanzar unas temperaturas del aire de escape más bajas todavía. Esto es debido a comenzar la expansión a una presión mayor, permitiendo así una menor generación de entropía en el proceso de estrangulación del flujo pero alcanzando la presión atmosférica a una temperatura menor.

Si bien es cierto que este problema es perjudicial y puede llegar a ser importante puesto que el vapor de agua que pudiera contener el aire podría formar escarcha en el escape obturándolo, parece a primera vista, y a la espera de un estudio más detallado, que el riesgo sería el mismo en uno u otro modelo puesto que en ambos se alcanzan temperaturas de congelación para el vapor de agua. No obstante, no ha de olvidarse que se trata de temperaturas teóricas que jamás se alcanzarían puesto que el mismo sistema de refrigeración del motor de serie se usaría, en este caso, como circuito de calentamiento y además, se producirían unos fenómenos de transferencia de calor tan severos en el escape que las temperaturas reales a la salida distarían mucho de ser las teóricas calculadas aquí.

De igual forma podrían extrapolarse los cálculos anteriores al resto del campo de existencia del motor pero, en su defecto, y puesto que los dos puntos ejemplo son suficientemente representativos, se estudiará cómo varían los resultados anteriores en función del porcentaje de carrera con inyección de aire comprimido que se considere.

Las gráficas siguientes representan lo anterior:



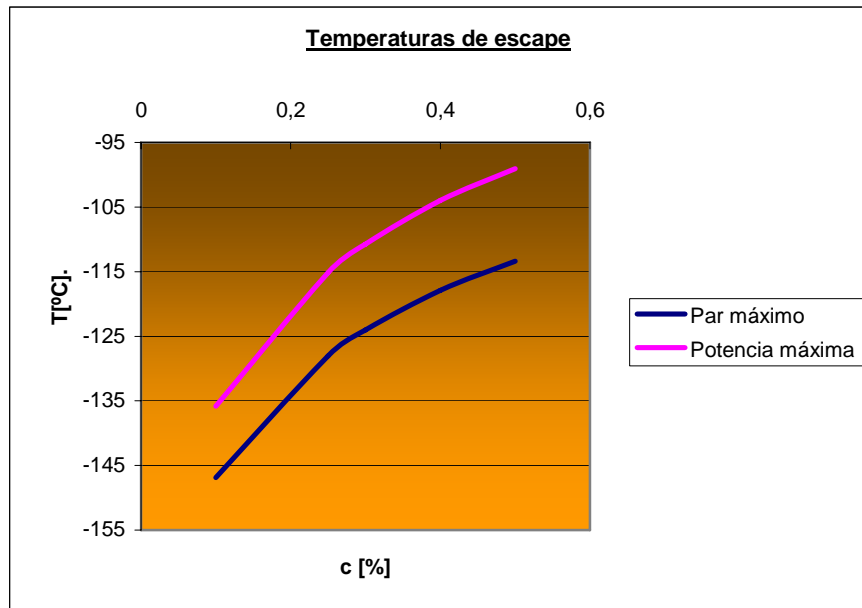


Fig. 21

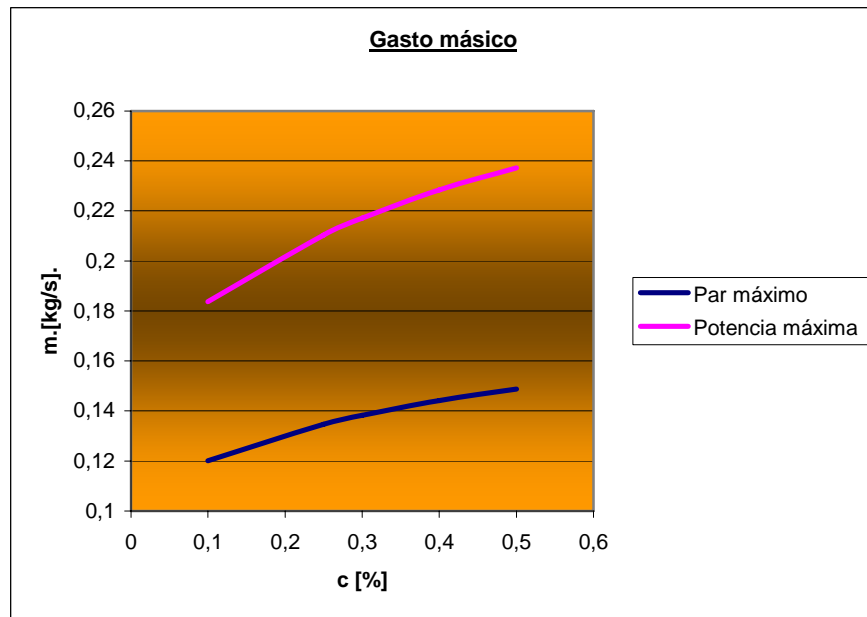


Fig. 22

Las Fig.22 refleja cómo conforme la 'inyección' del aire se realiza durante un tiempo más corto, esto es, en un menor porcentaje de la carrera del pistón y por tanto a una mayor presión, el gasto másico disminuye. Se deduce de esto una mejor autonomía



del modelo. Pero, por otro lado, la Fig.21 indica, como ya se había comentado, las menores temperaturas alcanzadas en el escape conforme el parámetro c disminuya.

En conclusión, para cada punto del mapa de existencia del motor habrá de calcularse el valor de c óptimo que proporcione el menor consumo del vehículo y con las mejores prestaciones sin ser lo suficientemente pequeño, como para que se imposibilite la entrada del aire, o lo suficientemente grande, como para volver a caer en la baja eficiencia del *motor neumático tipo I*.

En definitiva, calcular el porcentaje de carrera de inyección óptimo será análogo a determinar los avances a las aperturas, y retrasos a los cierres, de las válvulas de admisión, y escape respectivamente, que de forma habitual se realizan en todo motor térmico para aprovechar las inercias de los gases durante el proceso de renovación de la carga real.

La tabla que sigue fundamenta los datos reflejados para ambos puntos en las gráficas anteriores. Y de forma más detallada lo hace la **Tabla VIII** del anexo.

c	Par máximo		Potencia máxima	
	Temperatura de escape (°C)	Gasto másico (kg/s)	Temperatura de escape (°C)	Gasto másico (kg/s)
0,5	-113,40	0,1487	-99,04	0,2373
0,4	-117,87	0,1441	-103,95	0,2284
0,3	-124,06	0,1382	-110,76	0,2171
0,25	-128,06	0,1346	-115,16	0,2104
0,1	-146,87	0,1201	-135,84	0,1837

Tabla k



A continuación, la Fig.23, muestra las temperaturas teóricas alcanzadas por el aire de escape. Son las correspondientes a plena carga para los distintos porcentajes de carrera con inyección que han sido estudiados.

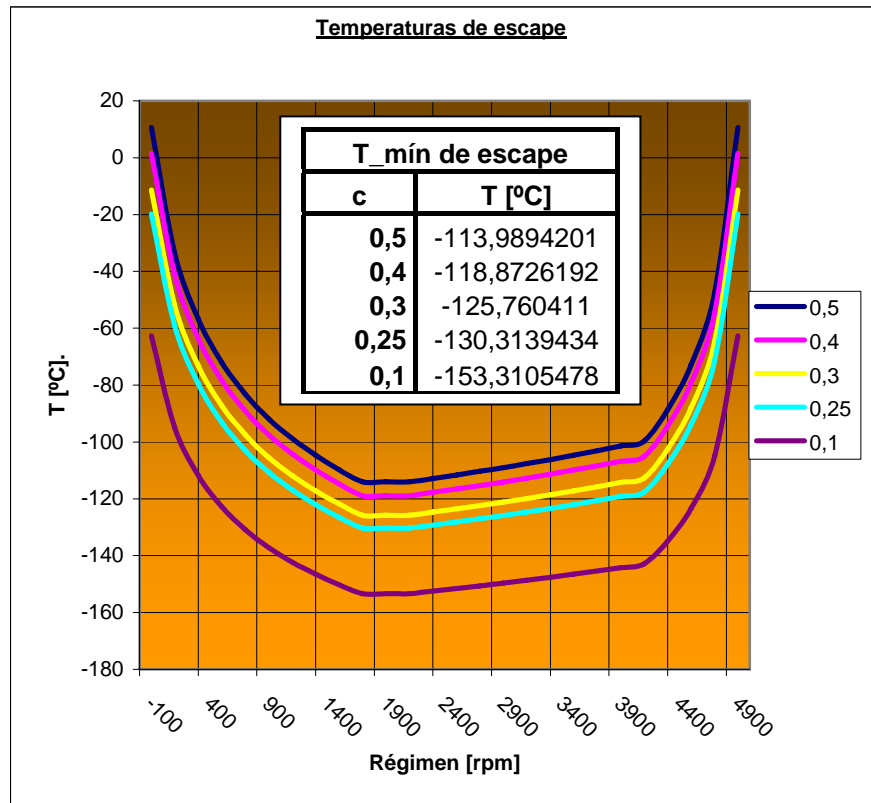


Fig. 23

Puesto que de nuevo en este motor, y de manera más importante que en el primero, las bajas temperaturas de escape pueden presentar problemas, se ha elegido un valor de c suficientemente crítico en este aspecto y se han representado las temperaturas a la salida en función del régimen y para los distintos grados de carga (de igual forma a como se hizo en *el motor neumático tipo I*) para que se tenga una idea gráfica de cómo se produce esta variación (y comprobar que lo hace de forma semejante a como ocurría en el anterior). Siendo, como cabía esperar, de nuevo el punto de máximo par el más perjudicado en este aspecto.



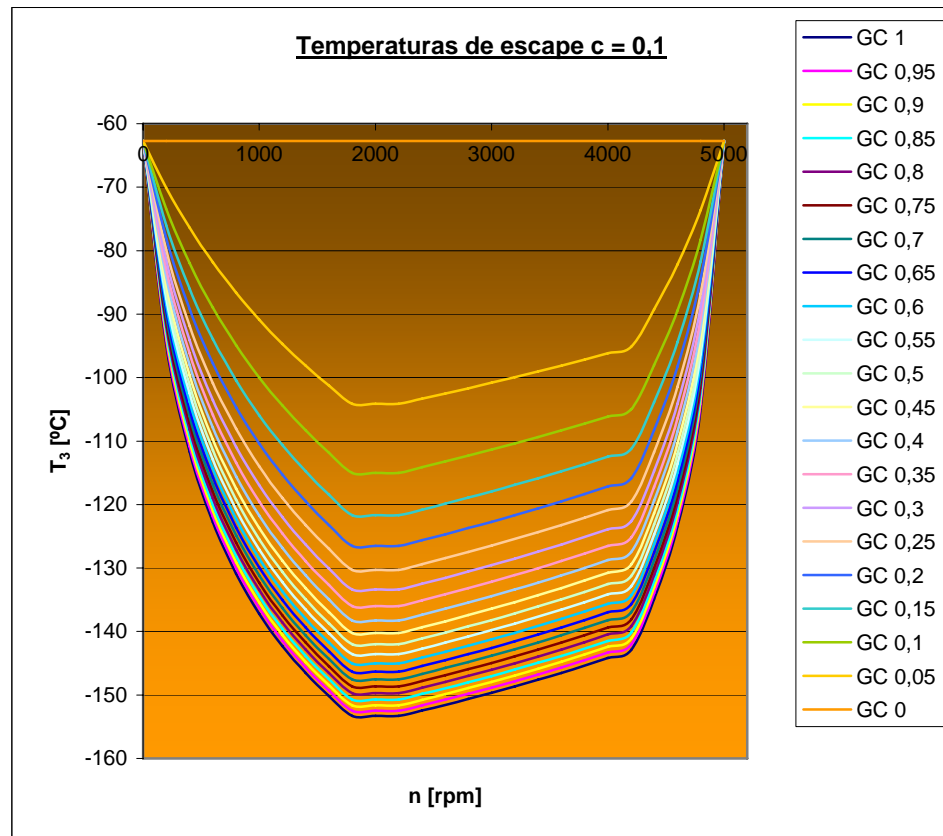


Fig. 24

No obstante, y como ya se dijo anteriormente, la Fig.23 y la Fig.24 son inexistentes, puesto que cada punto del mapa motor tendrá su correspondiente valor de c óptimo y, por tanto, se habría de recalcular cada punto de la figura de arriba por separado hasta reconstruir el gráfico real.

De igual forma ocurre con los consumos máxicos de aire que, de forma únicamente ilustrativa, se presentan en la **Tabla IX**. Dicha tabla de presenta de forma gráfica a continuación.



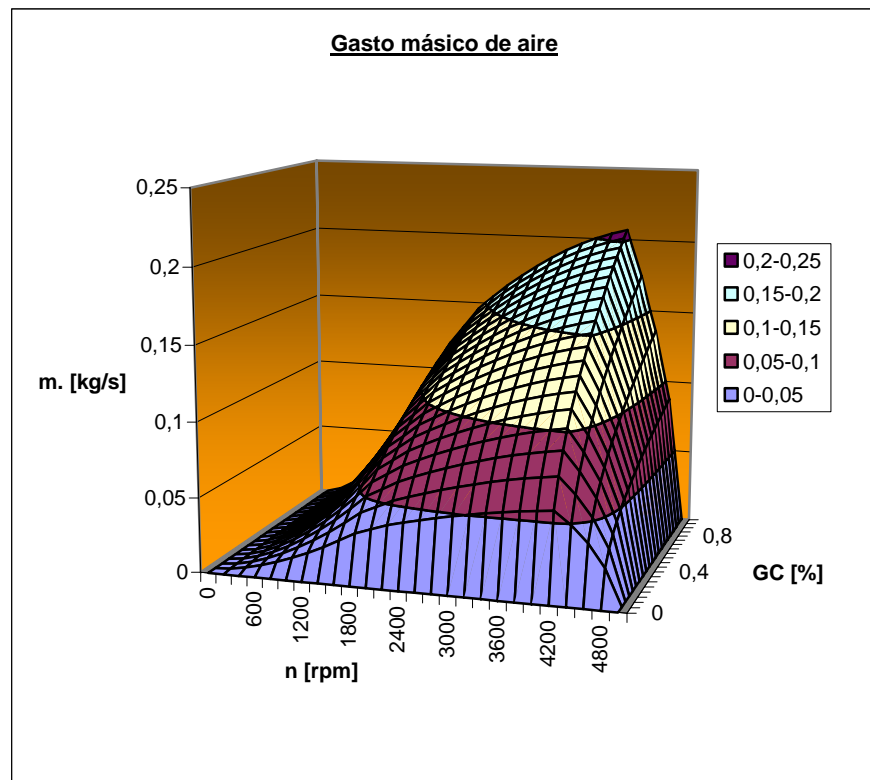


Fig. 25

1.1.3.1.1.3 Motor neumático tipo III

Este motor tiene un modo de funcionamiento totalmente diferente a los anteriores. El ciclo de renovación de la carga es de cuatro tiempos de forma que:

- Comienza con una primera carrera de admisión (que en el ciclo teórico se realiza a presión constante) de forma que el cilindro se llena de aire atmosférico.
- Posteriormente y tras cerrarse la válvula de admisión al alcanzar el pistón el *p.m.s.* se produce la carrera de compresión (llegando la presión a un valor, teórico, de unos 44 bar -si se suprime el turbo- y de unos 71 bar – si se mantiene el mismo a su presión de soplado de 1,6 bar-). El sistema de funcionamiento del *motor neumático tipo III*,



muy semejante al del modelo serie, posibilita el uso del sistema de sobrealimentación que trae consigo el Smart Fortwo CDI.

- Al finalizar la carrera de compresión tiene lugar la inyección del aire comprimido de forma que se alcance en el cilindro la presión necesaria que permita, mediante la expansión del aire, obtener un trabajo por ciclo dos veces mayor del calculado en un principio para el motor neumático tipo I ($\text{área}_{III} = 2 \cdot \text{área}_{II}$).
- Tras la expansión, tiene lugar el bombeo del aire de escape para lo cual, una vez alcanzado el *p.m.i.*, se abre la válvula de escape propiamente dicha.
- Acabado el bombeo del aire a presión atmosférica al exterior, se abre al llegar al *p.m.s.* la válvula de admisión y comienza un nuevo ciclo.

La figura siguiente intenta esquematizar lo anterior:

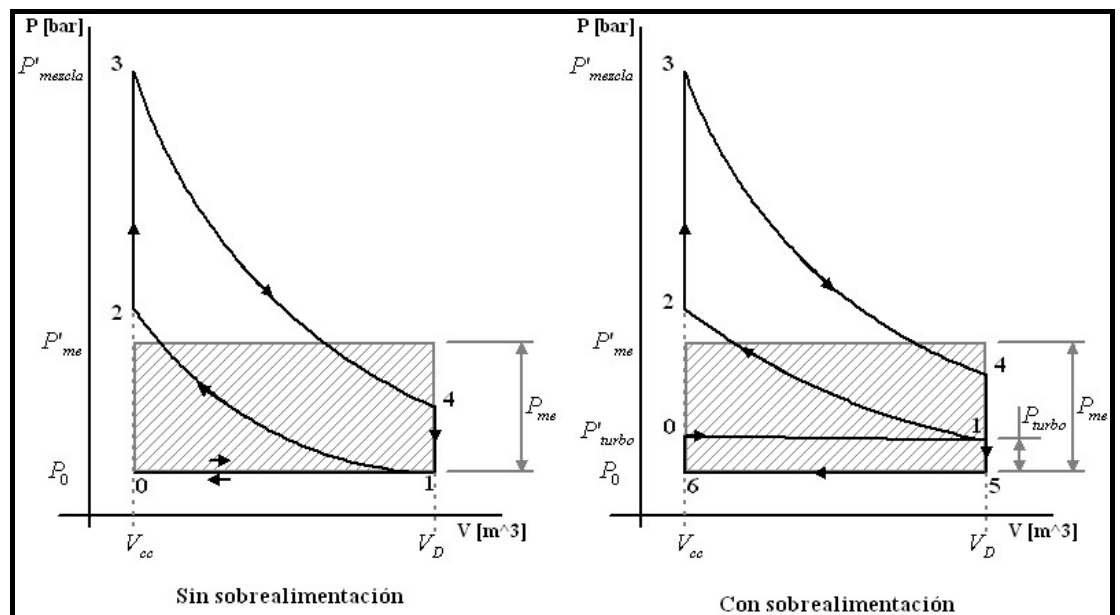


Fig. 26



Según lo anterior, la presión a alcanzar por la mezcla, del aire admitido más el aire inyectado en el *p.m.s.*, puede calcularse mediante las dos expresiones siguientes, en función de que se mantenga o no el sistema de sobrealimentación de serie.

<i>PRESIÓN A ALCANZAR POR LA MEZCLA DE AIRE (P'_{mezcla})</i>	
<i>Eliminando el turbo</i>	<i>Manteniendo el turbo</i>
$\frac{2 \cdot P_{me} \cdot (r-1) \cdot (n-1) - P_0 \cdot r \cdot (1-r^{n-1})}{\left(1 - \frac{1}{r^{n-1}}\right)}$	$\frac{(2 \cdot P_{me} - P_{turbo}) \cdot (r-1) \cdot (n-1) - P_{turbo} \cdot r \cdot (1-r^{n-1})}{\left(1 - \frac{1}{r^{n-1}}\right)}$

Tabla I

Evidentemente se mantendrá el sistema de sobrealimentación de serie puesto que una mayor presión de admisión no tendrá otro efecto más perjudicial que el de mejorar la autonomía del vehículo puesto que al comprimir una mayor masa de aire se alcanzará una presión mayor en la cámara y, por tanto, se habrá de inyectar menor cantidad de aire en la misma.

La principal diferencia de este sistema con los anteriores radica en que el aire que se expansiona proviene de dos fuentes diferentes. Hay una cantidad de aire que proviene de la admisión (y que se introduce en el cilindro por la correspondiente válvula) y el resto del mismo que proviene de la inyección. La masa total a inyectar será aquélla que nos permita alcanzar la presión calculada con las expresiones de la

Tabla I.

Dicha masa se calcula mediante un simple estudio termodinámico suponiendo el proceso de mezcla adiabático-isentrópico así como una inyección instantánea. De esta forma se puede aplicar que:



$$\Delta u_{admitida} + \Delta u_{inyectada} = 0$$

Usando además la ley de conservación de la masa, $M_{escape} = M_{admitida} + M_{inyectada}$, se obtienen las expresiones siguientes:

<u>Temperatura teórica de la mezcla</u>	<u>Masa a inyectar por ciclo</u>
$T_{mezcla} = \frac{T_0}{1 - \frac{R \cdot M_{admitida}}{P_{mezcla} \cdot V_{cc}} \cdot (T_2 - T_0)}$	$M_{inyectada} = \frac{P_{mezcla} \cdot V_{cc}}{R \cdot T_{mezcla}} - M_{admitida}$

Tabla m

Con las expresiones anteriores ya se puede definir el ciclo de funcionamiento del *motor neumático tipo III* para cada punto del mapa motor.

Puesto que el fin de estos primeros cálculos es la elección del sistema que mayor autonomía proporcione pero sin entrar en desarrollos muy elaborados para no complicar en exceso esta primera exposición, no se ha considerado en los resultados que se muestran a continuación el efecto de la sobrealimentación del motor (*puesto que además el resto de sistemas no gozan de la posibilidad de mantener el sistema de sobrealimentación de serie y de esta forma se facilita la comparación entre las posibilidades de uno y otros motores*). No obstante, evidentemente se tendrá en cuenta su efecto beneficioso en la decisión final tomada.

Para los puntos de máximo par y potencia máxima, los resultados son los que se exponen a continuación.

Punto máx par		Punto máx potencia	
P_{mezcla} [bar]	185,96	P_{mezcla} [bar]	140,95
T_{mezcla} [K]	348,53	T_{mezcla} [K]	367,51
$M_{inyectada}$ [kg/ciclo]	0,00250	$M_{inyectada}$ [kg/ciclo]	0,00171

Tabla n



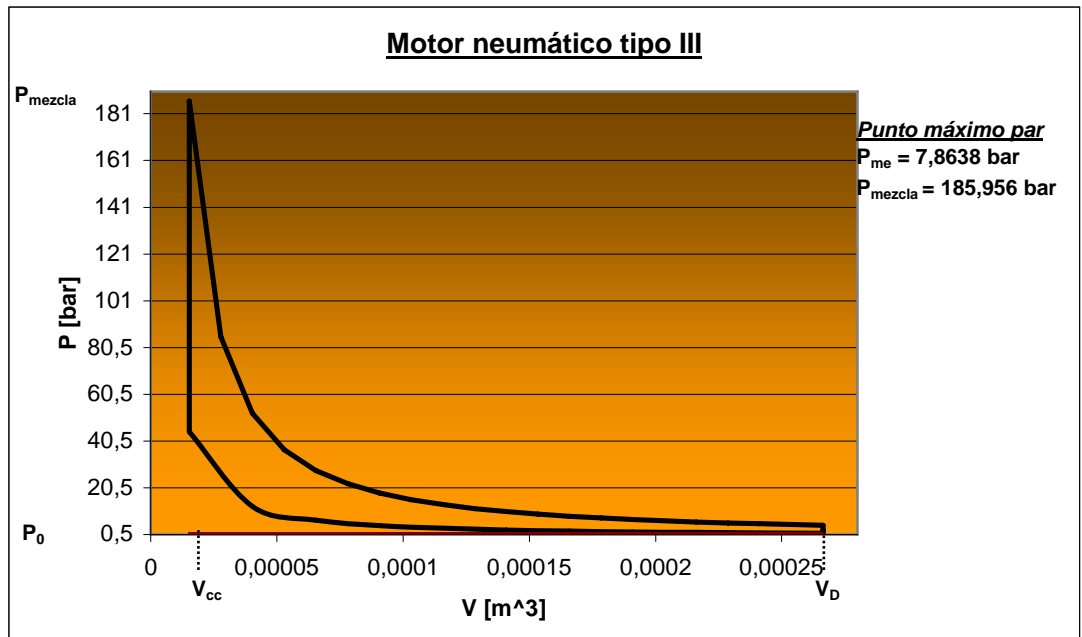


Fig. 27

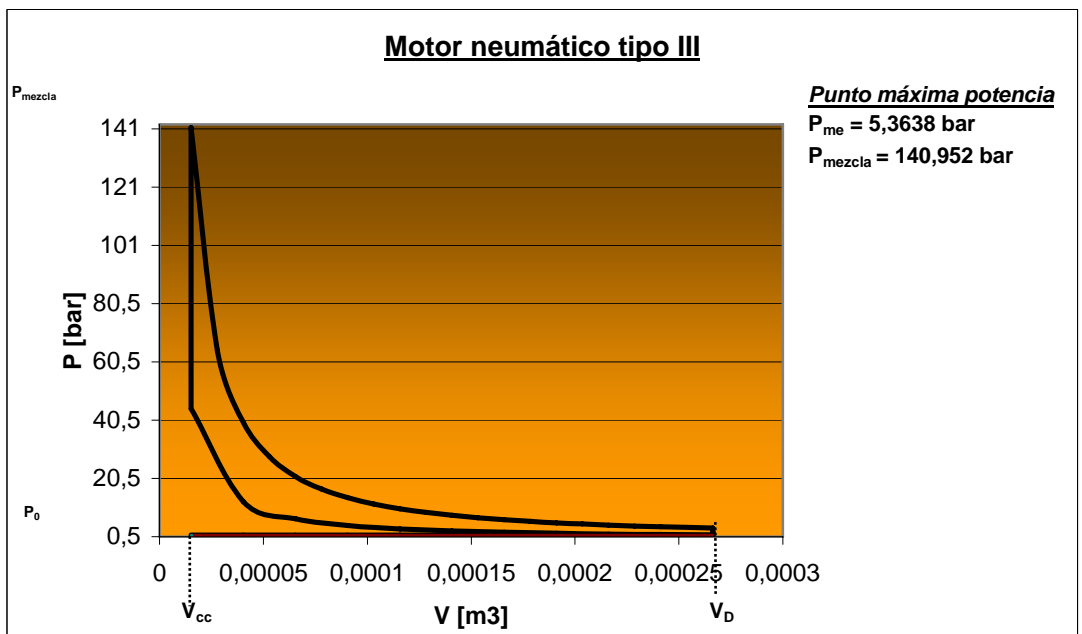


Fig. 28

Otra diferencia fundamental a tener en cuenta en el funcionamiento de este motor radica en la desaparición del D_{reg} existente en los otros dos estudiados previamente.



Mientras que en aquéllos controlábamos en todo momento mediante V_{reg} la presión en D_{reg} con la que íbamos a insuflar el aire a los cilindros, en este caso, al ser el aire introducido en el motor a la presión de D_{ap} lo que habría de controlarse sería el tiempo de apertura de la válvula inyectora necesario para permitir el paso de la masa de aire demandada en el cilindro en cada caso.

De esta forma, este tiempo iría aumentando conforme se fuera vaciando el depósito D_{ap} hasta llegar a un punto en el que, bien la presión en el mismo fuera inferior a la que se encontrara el aire a su entrada en el cilindro, bien el tiempo necesario para inyectar la masa requerida fuera superior al útil en una carrera, se vería imposibilitada la inyección, momento en el cual habría de considerarse el depósito vacío.

La extrapolación de todos los cálculos anteriores para el resto de puntos del campo de existencia del motor se presenta, en el anexo, mediante las tablas **Tabla X**, **Tabla XI**, **Tabla XII** y **Tabla XIII**.

Como ha podido comprobarse en la **Tabla XIII**, el problema de las bajas temperaturas sigue presente también en el *motor neumático tipo III*.

En dicha tabla se ha considerado como temperatura aproximada de escape a la del punto cuatro del ciclo puesto que para el motor neumático tipo III ya no es válido el diagrama TS de la **Fig.11**. Este valor es simplemente ilustrativo.



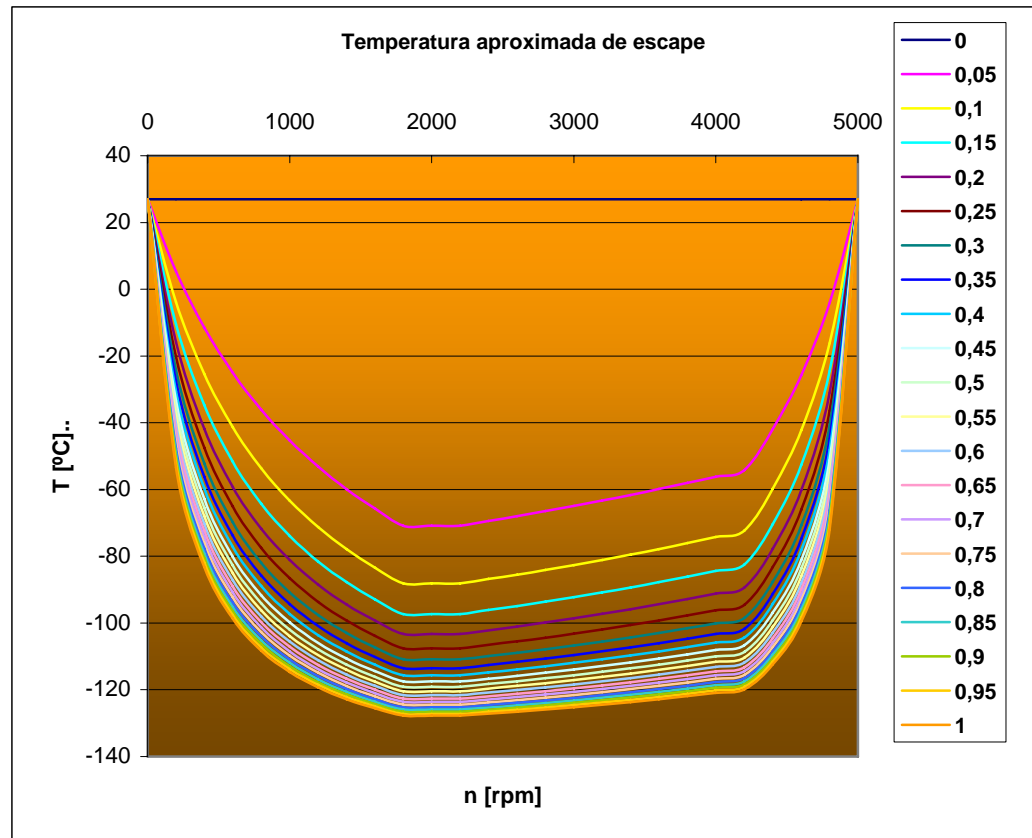


Fig. 29

1.1.3.1.2 Ciclos reales

Esta sección simplemente mencionará que todos los ciclos anteriormente expuestos son, como su propio nombre indicaba, teóricos, y los verdaderos ciclos reales habrían de ser obtenidos mediante el aparato conocido como indicador. Los ciclos teóricos simplemente intentan ser una aproximación lo más cercana posible a la realidad que nos simplifique los cálculos a llevar a cabo.

Como es de esperar, existirán diferencias sustanciales entre los ciclos reales y los teóricos tanto en la forma del diagrama como en los valores de temperaturas y presiones alcanzados. Esto es así en todos los motores y más aún en el que se aborda en este proyecto donde, al no existir experiencias similares en la actualidad, siempre



es necesario un cierto grado de hipótesis o suposición previa que no se confirmará o rechazará hasta el ensayo del prototipo final en un banco de pruebas.

La diferencia de forma consistirá en un perfil distinto en las curvas de compresión y expansión, en la sustitución de los trazos rectilíneos de introducción y sustracción de calor por trazos curvos y el redondeo de los ángulos agudos. Las causas de tales diferencias se fundamentan en las pérdidas de calor (consideradas nulas en el ciclo teórico) y los tiempos de abertura de las válvulas (considerados nulos también en el estudio teórico).

Las diferencias en los valores de presión y temperatura tendrán que ver fundamentalmente con el comportamiento real del aire y no como gas perfecto (aumento de los calores específicos del fluido con la temperatura).

1.1.3.1.3 Ciclos prácticos

En la práctica, debido al comportamiento real del ciclo y no teórico, se hace necesario introducir algunas modificaciones en el proceso de renovación de la carga teórico con el fin de aprovechar adecuadamente las inercias que, en cada momento, los gases tienen durante el proceso.

Será necesario determinar los avances y/o retrasos a las aperturas y/o cierres que de forma óptima nos permitan aprovechar las inercias anteriormente citadas de la forma más adecuada posible para el motor finalmente escogido. Siendo en algunos casos evidente que se mantendrá como en un motor térmico convencional pero no tan claro en otros. Todo esto será objeto de estudio una vez colocado el prototipo en el banco de pruebas oportuno.



1.1.3.2 Autonomía

A continuación se presentan los cálculos referentes a la autonomía de cada uno de los tres modelos y opciones estudiados para tomar la decisión final de optar por uno u otro.

Para dicho cálculo se ha estudiado un ciclo de conducción muy semejante al homologado pero no tan largo, para no ser excesiva la cantidad de datos con la que operar. No obstante, se referirá a este ciclo como “ciclo homologado” a pesar de ello, para no complicar la exposición.

Dicho ciclo constaría de una aceleración hasta 18 kilómetros por hora en diez segundos para frenarlo en otros diez y dejándolo al ralenti durante diez más. Seguidamente se llevaría una aceleración mayor (*hasta 36 km/h en 20s*) y se volvería a frenar en el mismo tiempo para dejarlo al ralenti durante otro periodo similar. Después vendría una aceleración más brusca (*hasta 54 km/h en 35s*) y se finalizaría mediante un frenando progresivo, con un leve escalón manteniendo el vehículo durante unos 6s a 36 km/h. El tiempo total considerado sería de 180 segundos. La Fig.30 representa lo anterior.



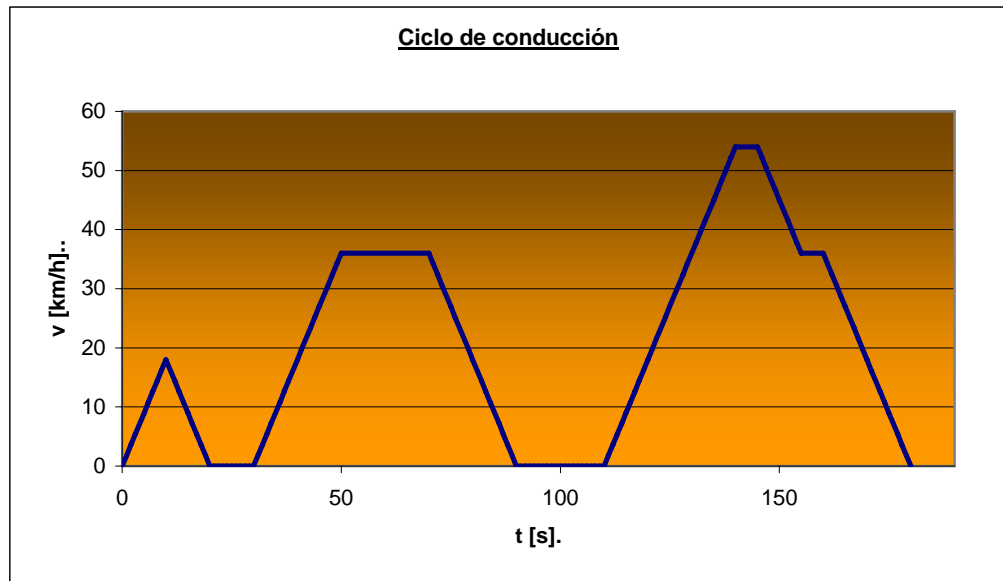


Fig. 30

Los datos del vehículo utilizados para los cálculos que a continuación se expondrán han sido los siguientes:

Parámetros vehículo			
m_{veh} [kg]	900	$\eta_{m.electrico}$	95,00%
C_x	0,373	$\eta_{compresor}$	90,00%
A_{fp} [m ²]	1,947	$\eta_{m.neumatico}$	90,00%
ρ_{aire} [kg/m ³]	1,2929	$\eta_{transmision}$	90,00%
f	0,015	D_{ap} [m ³]	0,3

Tabla o

La capacidad del depósito D_{ap} ha sido elegida como un valor que, a priori, se cree razonable que pueda ser conseguido de acuerdo con las dimensiones del Smart, no obstante, una vez haya sido escogida la alternativa tecnológica de entre las tres que se barajan, habrá de estudiarse cómo conseguir esos trescientos litros de depósito en el automóvil.

Primero se han hecho los cálculos referentes a la energía necesaria para llevar a cabo la compresión del aire hasta la presión de 300 bar del D_{ap} para, posteriormente,



calcular la distancia que se puede recorrer con cada kWh_e (kilovatio hora eléctrico) consumido en la compresión, el rendimiento económico ($€/km$) y una primera estimación de la autonomía de cada opción de funcionamiento.

1.1.3.2.1 Energía de compresión

Para el cálculo de la energía de compresión se supuso un compresor de tres etapas con refrigeración intermedia con camisa de agua entre cada una de las mismas. De acuerdo con esto, se supuso un valor del exponente politrópico de 1,25[†].

Las condiciones del depósito y por tanto, la masa de aire transportada, serán:

Condiciones depósito	
P [bar]	300
V [m ³]	0,3
T [K]	300

m [kg]	104,53
--------	--------

Tabla p

Salvo en el caso de la *opción III*, en la que el volumen del D_{ap} sería de $0,25 m^3$, con el fin de poder colocar un depósito auxiliar de recuperación de 50 litros en el vehículo como ya se comentó en el apartado 1.1.2.3.3. respecto a los requerimientos de esta opción.

Y los rendimientos tanto del motor eléctrico como del compresor se supusieron los de la **Tabla o**. Valores razonables para este tipo de máquinas.

Conocido todo lo anterior se calculó la energía eléctrica necesaria para llenar un depósito del vehículo:

[†] Cfr. [MATA78]. Capítulo 12, página 367.



	W_min	W_real	W_max
	C. Isoterma	C.politrópica	C.Adiabático-Isentrópica
[kWh]	16,68	20,29	22,15

Tabla q

1.1.3.2.2 Balance energético

Conocida la energía almacenada en el depósito, el paso siguiente es calcular la energía consumida por el vehículo a lo largo del ciclo de conducción propuesto para hacer una primera estimación de la autonomía del mismo.

Se calculó la fuerza en rueda en cada instante del trayecto mediante la expresión:

$$F_R = m \cdot (a + g \cdot f) + 1/2 \cdot A_{fp} \cdot C_x \cdot \rho_{aire} \cdot v^{2\ddagger}$$

Conocida la fuerza en rueda la potencia es inmediata y con ello se obtuvieron los resultados siguientes que corresponden a la energía neta desarrollada en rueda a lo largo del ciclo de conducción (*se ha descompuesto también el total en trabajo desarrollado como motor y como freno*).

W_neto [J]	W_motor [J]	W_freno [J]
186830	277625	-90794

Tabla r

Llegados a este punto es preciso mencionar que este estudio energético no hace distinción entre un tipo u otro de motor ya que no se ve influido por el tipo de sistema de funcionamiento planteado en cada caso. Es por esto por lo que los resultados derivados de este estudio simplemente servirán para dar una primera idea estimativa de la ventaja que puede suponer el sistema de recuperación de energía en el vehículo (*esto es, de las opciones II y III frente a la I*). No obstante, para la elección de una u otra opción habrán de tenerse en cuenta no tanto tales resultados,

[†] Viento en calma y trayecto sin pendientes.



sino también las implicaciones que la instalación de una u otra opción suponga en términos de facilidad de montaje, economía, rentabilidad, complejidad, etc ya comentados anteriormente.

En la tabla que sigue se presentan los resultados obtenidos para el ciclo de conducción en estudio donde, a los trabajos ya presentados en la **Tabla r**, se ha añadido uno más que representa el trabajo neto de accionamiento del sistema de recuperación de energía durante todo el trayecto (*simbolizado en la tabla como sistema auxiliar*). Se presentan también los ahorros energéticos obtenidos durante el ciclo. A saber,

$$Ahorromáx.(%) = \left(1 - \frac{W_{neto}}{W_{motor}}\right) \cdot 100 \quad Ahorroteórico(%) = \frac{W_{stma_aux}}{W_{motor}} \cdot 100$$

$$Ahorroreal(%) = Ahorroteórico \cdot \eta_{compresor}$$

Conocido el ahorro energético real y los rendimientos de la **Tabla o** se puede obtener la autonomía por kWh_e del vehículo y con la **Tabla q** sacar una primera estimación de la autonomía del mismo.

	Opción I	Opción II y III
W_{neto} [J]	186830	
W_{motor} [J]	277625	
W_{freno} [J]	-90794	
$W_{stma\ aux}$ [J]		90560
% Ahorro máx.		32,70%
% Ahorro teórico		32,62%
% Ahorro real		29,36%
$\eta_{eléctrico}$ [km/kWh_e]	9,2	13,0
$\eta_{económico}$ [km/€[†]]	102,3	144,8
Autonomía [km]	187	264

Tabla s

[†] Rendimiento económico del vehículo supuesto un valor de la energía de 0,09 €/Kwh_e. Fuente: Iberdrola



1.1.3.2.3 Autonomía teórica

Un estudio más detallado de la autonomía, y ahora sí teniendo presente el modo de funcionamiento de cada uno de los motores neumáticos tipo, lo representa el realizado teniendo en cuenta un balance másico a lo largo del trayecto realizado.

Primeramente, a partir de la potencia motora en rueda durante el ciclo de conducción, y con el rendimiento de la transmisión supuesto en la **Tabla o**, se calculará la potencia efectiva que está dando nuestro motor en cada instante.

Por otro lado, y a partir de la velocidad del vehículo, se obtienen los distintos regímenes de motor a los que podrá estar éste funcionando en función de la marcha elegida, mediante la siguiente expresión:

$$n_r [rpm] = \frac{v[m/s] \cdot 3,6}{d_i \left[\frac{km/h}{1000rpm} \right] \cdot 10^{-3}}$$

Conocido el régimen y la potencia suministrada por el motor se tienen fijados los distintos puntos en los que podrá estar éste funcionando en función del desarrollo en el que nos encontremos. De todos ellos, el motor deberá funcionar en aquél punto que de entre aquéllos que pertenezcan al mapa de existencia del motor asumido en la **Fig.9**, presente el menor consumo. Obviamente, esto será válido para todos los motores estudiados.

Para cada motor a estudiar se habrá de calcular la masa consumida a lo largo del ciclo, así como la recuperada en caso de tratarse de una de las opciones con sistema de recuperación de energía integrado, para, con todos esos datos, poder llevar a cabo un balance másico que nos permita, con la masa de partida de la **Tabla p**, una aproximación más real de la autonomía de la que consta cada modelo.



En lo que se refiere a los cálculos del sistema de recuperación de energía se supuso una compresión con rendimiento isentrópico el de la **Tabla o**, comprimiendo hasta 300 bares en la *opción II* y hasta 15 bares en la *opción III*. A saber,

$$\dot{m}_{recuperada} [kg / s] = \frac{\dot{W} [kW]}{C_p \left[\frac{kJ}{kg \cdot K} \right] \cdot \frac{T_1}{\eta_{ic}} \cdot \left(r_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) [K]}$$

En lo que sigue se presentan los resultados obtenidos para cada motor.

1.1.3.2.3.1 Motor neumático tipo I

Los resultados para este motor se calculan de igual forma a como se hizo para el cálculo de los puntos del ciclo termodinámico teórico del mismo. Conocido el punto de trabajo en el que se encuentra éste, es inmediato conocer la presión a la que se ha de inyectar el aire durante toda la carrera ‘motora’ (*es la mitad de la presión media efectiva del motor de serie*) y con ello, son conocidos todos los puntos del ciclo TS de la **Fig.11** y, por tanto, el flujo másico demandado por el motor en cada instante.

Teniendo presente que, como ya se dijo, no todos los puntos calculados pertenecerán al campo de existencia del motor y que el motor habrá de trabajar en el desarrollo que menor consumo tenga, los resultados obtenidos para el *motor neumático tipo I* son los siguientes:

Motor neumático tipo I			
	Opción I	Opción II	Opción III
Masa consumida en el ciclo [kg]	3,3359		
Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06714	0,27797
Ahorro másico [%]	0	2,01%	8,33%
$\eta_{m\acute{a}sico}$ [km/kg]	0,3073	0,3136	0,3352
Autonomía teórica [km]	32,1	32,8	29,2

Tabla t



Los resultados de la tabla anterior muestran la enorme disparidad existente entre los resultados del apartado anterior y los obtenidos al realizar un balance másico en el depósito del vehículo. Esto es debido, como ya se mencionó en el apartado 1.1.2.1.1. a la excesiva pérdida de carga que V_{reg} introduce en el sistema y que disminuye drásticamente la eficiencia energética del proceso.

Puesto que tales autonomías hacen inviable el uso normal del vehículo, queda pues descartado el *motor neumático tipo I*, en sus tres posibles opciones, reduciendo la matriz de la **Tabla a** a cinco únicas posibles soluciones para el proyecto.

1.1.3.2.3.2 *Motor neumático tipo II*

Como ya se comentó, este motor fue resultado de intentar disminuir la pérdida de carga introducida por la válvula reguladora mediante una estrangulación menor y una inyección más corta durante la carrera de trabajo del motor.

Previsiblemente la autonomía habrá de aumentar puesto que al expansionarse el aire desde una presión mayor éste alcanzará la presión atmosférica a una temperatura menor y, por tanto, al aumentar el salto entálpico producido en la expansión para una misma potencia, evidentemente se disminuirá el flujo másico consumido.

El porcentaje de carrera durante el que habría de hacerse la inyección habría de ser el óptimo en cada caso. Para facilitar los cálculos se realizó el estudio de la autonomía teórica del vehículo para una serie de valores del parámetro c tipo de forma que pudiera tenerse una idea sencilla de en qué rangos, grosso modo, podría encontrarse la autonomía del vehículo. Por esto mismo, la autonomía real sería algo mayor que la calculada aquí.



Operando de igual forma a como se hizo en el apartado anterior los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Motor neumático tipo II				
c [%]		Opción I	Opción II	Opción III
50%	Masa consumida en el ciclo [kg]	2,9583		
	Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114	0,23736
	Ahorro másico [%]	0	2,07%	8,02%
	$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	0,3465	0,3538	0,3767
	Autonomía teórica [km]	36,2	37,0	32,8
40%	Masa consumida en el ciclo [kg]	2,7874		
	Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114	0,23736
	Ahorro másico [%]	0	2,19%	8,52%
	$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	0,3677	0,3760	0,4020
	Autonomía teórica [km]	38,4	39,3	35,0
30%	Masa consumida en el ciclo [kg]	2,5793		
	Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114	0,23736
	Ahorro másico [%]	0	2,37%	9,20%
	$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	0,3974	0,4071	0,4377
	Autonomía teórica [km]	41,5	42,5	38,1
25%	Masa consumida en el ciclo [kg]	2,4587		
	Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114	0,23736
	Ahorro másico [%]	0	2,49%	9,65%
	$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	0,4169	0,4275	0,4614
	Autonomía teórica [km]	43,6	44,7	40,2
10%	Masa consumida en el ciclo [kg]	1,9931		
	Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114	0,23736
	Ahorro másico [%]	0	3,07%	11,91%
	$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	0,5143	0,5306	0,5838
	Autonomía teórica [km]	53,8	55,5	50,9

Tabla u

Como puede comprobarse en la tabla, la mejora conseguida mediante el sistema de inyecciones a presión manteniendo el sistema de dos tiempos sigue siendo inviable para el uso normal del automóvil. Es por esto que de nuevo se volverá a reducir la matriz de posibilidades que se propuso en la **Tabla a** quedando únicamente como



posible solución del proyecto la correspondiente al motor neumático tipo III en sus dos variantes (*opciones I y II*).

1.1.3.2.3.3 Motor neumático tipo III

Continuando los cálculos generales para los otros dos motores ya estudiados y partiendo de la presión media efectiva que requeriría el motor si continuara su funcionamiento en dos tiempos, podría calcularse la presión que habría de alcanzar la mezcla tras la inyección en el ciclo de cuatro tiempos (*mediante la expresión primera de la Tabla 1 puesto que no se consideran todavía los efectos de la sobrealimentación*). De esta forma, y tras calcular la temperatura a alcanzar por la mezcla, se obtendría la masa a inyectar por ciclo durante cada instante del trayecto de conducción propuesto. Y esto, junto con el régimen del desarrollo de la transmisión escogido para tener el menor consumo en cada momento, permitiría conocer el gasto másico en cada segundo durante el desarrollo del ciclo homologado.

Los resultados para el *motor neumático tipo III* son los presentados en la tabla siguiente:

Motor neumático tipo III		
	Opción I	Opción II
Masa consumida en el ciclo [kg]	0,6142	
Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06114
Ahorro másico [%]	0	9,95%
η másico [km/kg]	1,6687	1,8532
Autonomía teórica [km]	174,4	193,7

Tabla v

La tabla anterior muestra un rendimiento másico mucho mayor que en los motores I y II y además unos valores para la autonomía mucho más parecidos a los calculados en 1.1.3.2.2.:



Motor neumático tipo III		
	Opción I	Opción II
Autonomía - Balance energético [km]	186,8	264,4
Autonomía teórica - Balance másico [km]	174,4	193,7

Tabla w

1.1.3.3 Elección final

Debido a que las autonomías conseguidas para *el motor neumático tipo III* si permitirían un uso normal y cómodo del vehículo, será éste el motor neumático escogido *para la adaptación del Smart Fortwo CDI* de serie.

En cuanto a las dos posibles opciones barajadas, se optará por la **Opción I**, a pesar de ser la que goza de una menor autonomía.

El principal motivo para escoger esta opción ha estado en la mayor simplicidad de adaptación que supone la no existencia del sistema autónomo de recarga y del sistema de recuperación de energía en las frenadas. Si bien es cierto que tal elección supone una pérdida importante de versatilidad en el uso del vehículo, el aumento en la autonomía que supondría la recuperación de energía no compensaría el incremento en la inversión debido al elevado precio de los componentes de la *opción II (al menos para este primer prototipo)*. Además, se tiene presente que la autonomía será algo mayor que la calculada una vez se tenga en cuenta para los cálculos el sistema de sobrealimentación del motor de serie.

La adaptación que deberá sufrir el motor térmico para convertirse en neumático consistirá simplemente en sustituir el sistema de inyección HPCR que lleva de serie, por un *inyector-válvula* que deberá diseñarse de acuerdo a las dimensiones de que se



dispone en la culata. El nuevo inyector mantendrá la forma exterior de su predecesor pero tendrá un funcionamiento interior diferente.

La razón de la designación que se le ha dado a dicho inyector radica en que, a diferencia de un inyector ‘common rail’ común que es capaz de realizar hasta cinco inyecciones durante la carrera[†], este *inyector-válvula* deberá abrirse al máximo para dejar pasar la mayor cantidad de aire posible en el menor tiempo. Será el tiempo de apertura del mismo lo que permita que éste deje pasar la cantidad de aire necesaria al cilindro para obtener en el eje la potencia demandada. Además, este tiempo de apertura irá aumentando conforme el D_{ap} se vaya vaciando.

Los tres inyectores (uno para cada cilindro) deberán ir directamente comunicados con el depósito D_{ap} , el cual, deberá ser montado en el vehículo restando la menor habitabilidad posible al mismo. Para ello se usará el maletero, el depósito de combustible y, de ser necesario, la parte de detrás de los asientos. Respecto a la capacidad final del mismo, y tras tomar cotas reales sobre el vehículo, finalmente se optó por mantener ésta en los 300 litros planteados desde un principio (*ver plano número 10*). La ubicación del mismo sobre el vehículo se plantea en la imagen siguiente:



Fig. 31

[†] Contando pre- y post- inyecciones



Adicionalmente a esto, se habrá de reconvertir el sistema de refrigeración del motor de serie para que funcione como circuito de calentamiento *(de forma que las bajas temperaturas de escape que se calcularon, y que serán todavía menores al expansionarse de nuevo los gases de escape en la turbina del sistema de turboalimentación, no dificulten el funcionamiento normal del motor)*.

En cuanto a la posibilidad planteada de congelación del vapor de agua del aire en el tubo de escape queda descartada puesto que al provenir el aire de un centro de compresión exterior dicho centro constaría de un sistema de secado y filtrado del aire como suele ser habitual en instalaciones de este tipo. No obstante se seguirá manteniendo el F_{aire1} como medida de seguridad del sistema ante posibles impurezas.



1.1.4 AUTONOMÍA DEL SISTEMA SOBREALIMENTADO

A continuación se corregirá la autonomía teórica del *motor neumático tipo III*[†] considerando el sistema de turboalimentación que se había omitido desde un principio.

El ciclo que se calculará ahora será el siguiente:

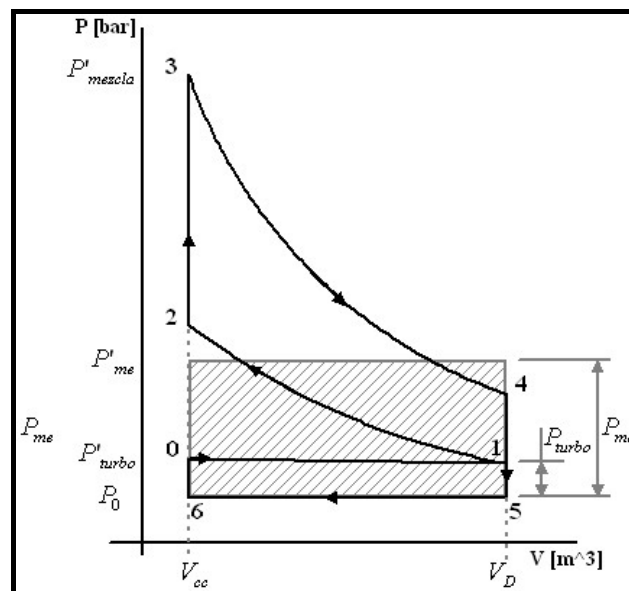


Fig. 32

Puesto que el valor de la presión de soplado del turbo depende de la presión de salida de los gases de escape, en la medida que el eje de la turbina está unido al del turbocompresor, no puede considerarse ésta constante e igual a su valor nominal de soplado de 1,6 bares sino que habrá de calcularse el mapa de turbo para cada punto de existencia del motor.

[†] En lo que sigue se dejará la nomenclatura de motores neumáticos tipo para referirse al motor tipo III como el motor a desarrollar en el proyecto, sin apodos o similares de cualquier tipo.



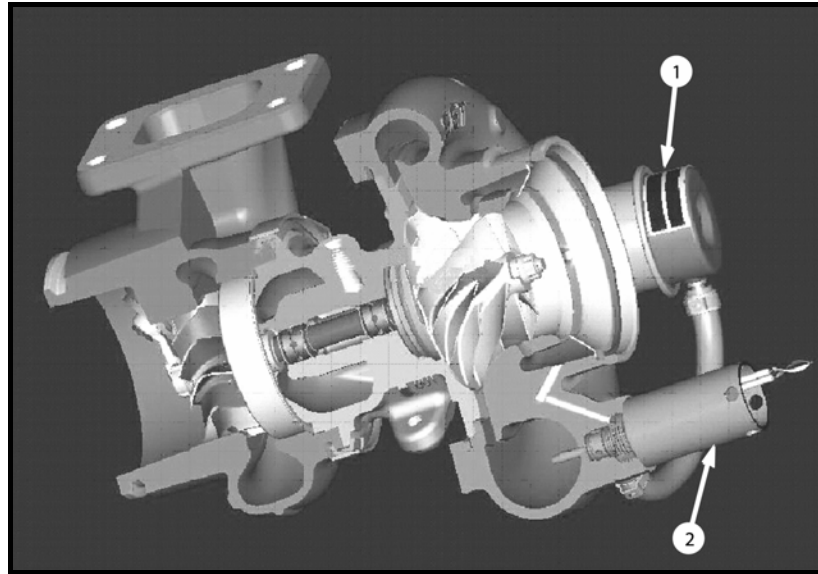


Fig. 33

La obtención del mapa de la turboalimentación del motor se realizará mediante el cálculo iterativo que a continuación se detalla:

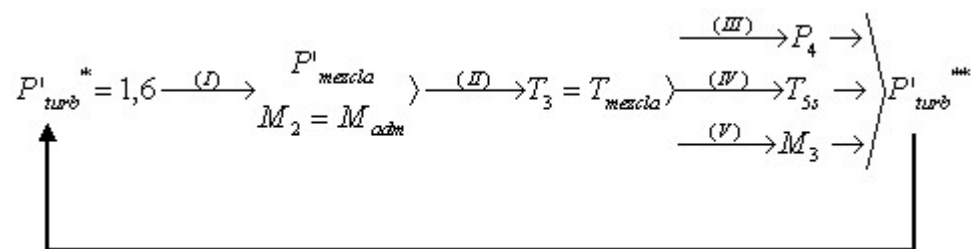


Fig. 34

Siendo las fórmulas a las que se refiere en la Fig.34 las expuestas en la siguiente tabla:

<i>Cálculo iterativo de la sobrealimentación del motor</i>	
I	$P_{mezcla}^i = P_{turb}^i \cdot r^n - \frac{(n-1) \cdot (r-1) - r^{n-1}}{1 - r^{n-1}} \cdot (2 \cdot P_{me} - \Delta P_{turb})$



II	$T_3 = \frac{T_0}{1 - \frac{R \cdot M_2}{P'_{mezcla} \cdot V_{cc}} \cdot (T_2 - T_0)}$
III	$P_4 = \frac{P'_{mezcla}}{r^n}$
IV	$T_{5s} = T_3 \cdot \left(\frac{P_0}{P'_{mezcla}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \cdot r^{\frac{\gamma-n}{\gamma}}$
V	$P'_{turb} \frac{\gamma-1}{\gamma} - P_0 \frac{\gamma-1}{\gamma} = \eta_{ic} \cdot \eta_{it} \cdot \frac{M_3}{M_{adm}} \cdot \frac{T_{5s}}{T_6} \cdot \left(P_4 \frac{\gamma-1}{\gamma} - P_0 \frac{\gamma-1}{\gamma} \right)$

Tabla x

Las expresiones anteriores se han calculado teniendo en cuenta los rendimientos *adiabático-isentrópicos* tanto de la turbina como del compresor mediante la ecuación que rige el acoplamiento de ambos:

$$\dot{W}_C = \dot{m}_{adm} \cdot C_p \cdot (T_1 - T_6) \cdot \frac{1}{\eta_{mC}} = \dot{m}_{escape} \cdot C_p \cdot (T_4 - T_5) \cdot \eta_{mT} = \dot{W}_T \dagger$$

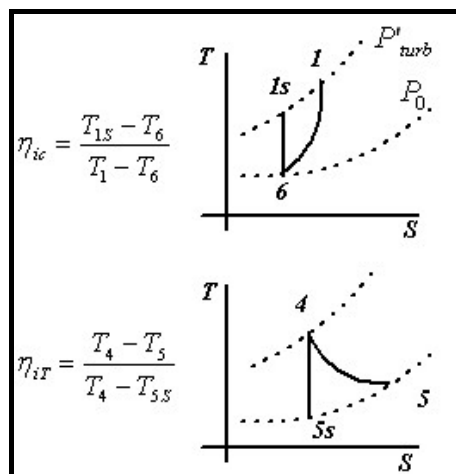


Fig. 35

† Se han despreciado los rendimientos mecánicos y se han tomado ambos rendimientos isentrópicos con el valor típico de 0,95



Los resultados obtenidos fueron los que se muestran en las tablas **Tabla XIV**, **Tabla XV**, **Tabla XVI**, **Tabla XVII** y **Tablas XVIII** del anexo.

Una vez obtenido el mapa de soplado del sistema de sobrealimentación (**Tabla XIV**) se recalculó la autonomía del vehículo de igual forma a como se hizo en apartados anteriores obteniéndose los siguientes resultados:

Motor neumático tipo III		
	Opción I	Opción II
Masa consumida en el ciclo [kg]	0,4084	
Masa recuperada en el ciclo [kg]	0	0,06126
Ahorro másico [%]	0	15,00%
$\eta_{\text{másico}}$ [km/kg]	2,5098	2,9527
Autonomía teórica [km]	262,3	308,6

Tabla y

La autonomía que revela la **Tabla y** no es real puesto que llegará un momento en el que, aún teniendo todavía aire a presión en el depósito, será imposible introducirlo en los cilindros debido a que, como se explicará en el apartado siguiente 1.1.5., la presión a la que se encuentra el aire en el interior de los mismos será superior a la remanente en el depósito. Sería éste el punto de depósito vacío en el vehículo.

Se ha considerado esta presión del depósito de alta de 72 bares puesto que se trata de la que más menos habría en la cámara tras la carrera de compresión de la admisión y a la presión de soplado nominal del sistema de sobrealimentación.

Con ello se han corregido los valores anteriores para dar la autonomía teórica finalmente alcanzada en el vehículo comparándose de nuevo con los de 1.1.3.2.2.[†]:

[†] Se mantienen todavía los resultados para las dos opciones de funcionamiento planteadas con el fin de que se tenga una idea de la pérdida que ha supuesto la elección realizada.



Motor neumático tipo III		
	Opción I	Opción II
Autonomía - Balance energético [km]	186,8	264,4
Autonomía teórica final - Balance másico [km]	199,4	234,6

Tabla z



1.1.5 EVOLUCIÓN DEL SISTEMA DURANTE EL VACIADO DEL DEPÓSITO

Durante los cálculos anteriores se ha mantenido en todo momento la suposición de proceso de inyección instantáneo. Tal hipótesis es útil durante los primeros pasos del cálculo pero, llegados a este punto, se hace necesario hilar más fino para tener una idea lo más aproximada posible de la evolución del sistema durante su funcionamiento.

En lo que sigue se calculará el tiempo de inyección teórico para cada punto del mapa motor y se estudiará cómo irá variando el mismo conforme se produzca el vaciado del depósito. Evidentemente según vaya disminuyendo la presión en el mismo irá aumentando el tiempo necesario para inyectar una misma cantidad de aire (*la demandada de acuerdo al punto en el que nos encontremos*).

Puesto que todavía no sabemos qué pinta tiene el ciclo real del motor (pese a que podamos hacernos una idea medianamente aproximada de acuerdo a lo comentado en los puntos 1.1.3.1.2. y 1.1.3.1.3.) este cálculo vislumbrará la forma definitiva a la que el ciclo del motor neumático se asemejará finalmente.

Para ello, obviando la hipótesis de inyección instantánea anteriormente mencionada, se supuso el ciclo que se muestra a continuación, y de él se obtuvo la expresión que habría de satisfacer la presión de la mezcla para cada punto de existencia del motor:



Mediante la aplicación del primer principio al volumen de control que representa la cámara de combustión del cilindro durante el proceso de inyección (*considerando el proceso adiabático*), así como la conservación de la masa durante el proceso, se obtiene una segunda ecuación con la que poder conocer (junto con la de la **Tabla aa**) el valor de la presión del punto 3 y del porcentaje de carrera que dura la inyección. Esto es:

$$M_{admitida} + m_{inyectada} \cdot c \cdot t_{carrera} = M_{escape}$$

$$-W = \sum m_s h_s - \sum m_e h_e^\dagger$$

Siendo la ecuación mencionada antes la que sigue:

<i>Temperatura real del punto 3 y ecuación de c</i>	
$T_{mezcla} = \frac{V_{cc} \cdot P'_{mezcla} \cdot [1 + c \cdot (r - 1)]}{R \cdot \left(\frac{P'_{turb} \cdot V_{cc} \cdot r}{R \cdot T_0} + m \cdot c \cdot \frac{30}{n[rpm]} \right)}$	
$\frac{c \cdot V_{cc} \cdot (1 - r)}{2} \cdot (P'_{mezcla} + P'_{turb} \cdot r^n) = \frac{P'_{turb} \cdot V_{cc} \cdot r \cdot C_p}{R \cdot T_0} \cdot [T_{mezcla} - T_0 \cdot r^{n-1}] + m \cdot c \cdot \frac{30}{n[rpm]} \cdot C_p \cdot [T_{mezcla} - T_0]$	

Tabla bb

Donde el valor del flujo másico inyectado en el cilindro queda definido mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli en la expresión siguiente, corregida mediante el término C_D correspondiente al coeficiente medio de descarga del *inyector-válvula* diseñado:

[†] Se ha considerado como positivo para el balance energético todo trabajo que salga del sistema.



Consideración de flujo incompresible

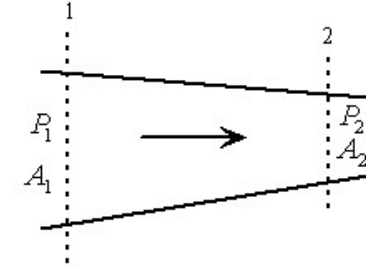
$$m = C_D \cdot A_2 \cdot \left(\frac{2 \cdot \rho \cdot (P_1 - P_2)}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2} \right)^{\frac{1}{2}}$$


Fig. 37

Donde P_1 representa la presión del depósito D_{ap} y P_2 la que se encontraría el aire a su entrada al cilindro. Y las secciones A_1 y A_2 son las siguientes:

$$A_1 = \pi \cdot D_p^2 / 4$$

$$A_2 = \pi / 4 \cdot (D_p^2 - D_s^2)$$

El término C_D de la expresión anterior se ha calculado, según propuso Taylor, mediante la siguiente expresión[†]:

$$C_D = 1,45 \cdot \frac{L_v}{D_v}$$

Tales valores geométricos, obtenidos mediante medición sobre el inyector de serie (puesto que como ya se dijo se mantendrá invariable la forma exterior del inyector), y que pueden consultarse en planos, son los siguientes:

$$L_v = 3,1 \text{ mm}; D_v = 7,15 \text{ mm}$$

Por consiguiente, de ambas tablas (**Tabla aa** y **Tabla bb**) se pueden obtener para cada punto de existencia del motor y para una determinada presión en el depósito de alta, el valor real aproximado de la presión que se alcanza tras el proceso de inyección del aire así como los tiempos de inyección teóricos del mismo.

[†] Cfr. [MUÑO89] pag.130



Estos tiempos de inyección son menores que los reales puesto que consideran una apertura y cierre instantáneos de la válvula y, por tanto, habrán de ser corregidos conforme se tenga diseñado el *inyector-válvula* del motor neumático.

El número total de puntos elegidos para la realización de este cálculo se corresponderá con el número de puntos que habrían de programarse en la *UCM* y, por tanto, cuanto mayor sea éste, mayor exactitud en la inyección realizará el motor, con las consiguientes repercusiones que esto tendría sobre la suavidad de funcionamiento del vehículo.

Por todo ello, para cada uno de los 546 puntos del mapa motor que se han estudiado (cada uno de los que se representaron en la Fig. 9) se han considerado 120 puntos más que se corresponden con distintas presiones por las que pasaría el depósito D_{ap} durante su vaciado. La razón principal de escoger este número de puntos y no otro ha estado en que el número total de puntos a estudiar fuera lo más cercano posible a una potencia de 2^n , con el fin de aprovechar al máximo la memoria de que se dispusiera en el micro en el que fueran a programarse y almacenarse los mismos.

En cuanto al vaciado del depósito, a priori se presenta la duda de cuál será el límite de inyección del sistema y, por tanto, el punto en el que haya de considerarse agotado el mismo.

Esto es, podría ocurrir que conforme se fuera vaciando el depósito, y al ir por tanto aumentando los tiempos de inyección del aire necesarios, se alcanzara un valor del parámetro c mayor que uno, en cuyo caso habría de considerarse en ese instante el depósito vacío puesto que el sistema no sería capaz de realizar el trabajo por ciclo demandado. O, por el contrario, que los valores de c no aumentaran tan rápido y se mantuvieran por debajo de uno hasta que la presión en el D_{ap} disminuyera tanto que



la inyección se viera imposibilitada debido a que la presión en el cilindro fuera superior a la presión de la que se dispusiera en el depósito. Tras calcular estos valores para plena carga se vio que era la presión del D_{ap} el factor limitante del funcionamiento del sistema, de tal forma que una vez alcanzada en el depósito la presión de 72 bares (*la que se tiene tras la compresión a la presión de soplado nominal del turbo*), habría de considerarse éste vacío por la imposibilidad de inyectar más aire.

Una vez conocido lo anterior se hace necesario estudiar cuál de todos los puntos del motor es el más desfavorable puesto que, previo a cualquier diseño que vaya a realizarse del funcionamiento del inyector, lo que ocurra para este punto reflejará también lo que en los demás pueda darse.

Este punto es el de potencia máxima puesto que se trata de aquél en el que la relación entre la masa a introducir en el cilindro y el tiempo hábil para llevar a cabo tal proceso se conjugan de manera más crítica.

La gráfica siguiente muestra la tendencia a plena carga del tiempo útil de inyección (*el que tarda el pistón en recorrer una carrera del cilindro*) y el tiempo teórico que dura la misma (*función de la masa a inyectar en el cilindro*), así como la diferencia entre ambos (*que se hará mínima en el punto más desfavorable*). Todas ellas se han calculado considerando la mínima presión que pudiere tenerse en el depósito (*los 72 bares antes mencionados*), comprobándose que esto es así para el punto de potencia máxima.



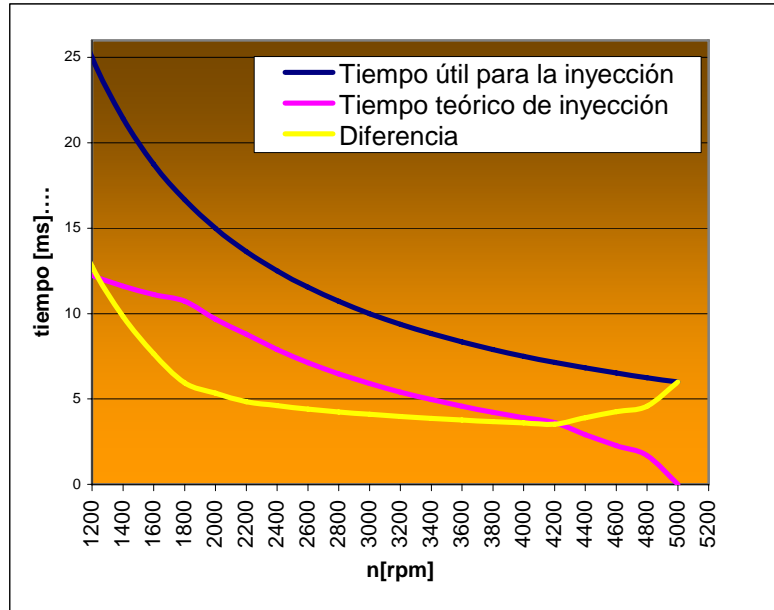


Fig. 38[†]

Los resultados para dicho punto son los que se muestran a continuación:

Punto de máxima potencia (4200 rpm)							
P_{Dap} [bar]	P_{mezcla} [bar]	c [%]	t_{inyecc. teórico} [ms]	P_{Dap} [bar]	P_{mezcla} [bar]	c [%]	t_{inyecc. teórico} [ms]
300	5,843	41,74%	2,982	185	3,287	45,54%	3,253
298,1	5,801	41,80%	2,986	183,1	3,243	45,61%	3,258
296,2	5,760	41,86%	2,990	181,2	3,199	45,68%	3,263
294,3	5,718	41,92%	2,995	179,3	3,156	45,74%	3,267
292,3	5,676	41,99%	2,999	177,4	3,112	45,81%	3,272
290,4	5,634	42,05%	3,003	175,5	3,068	45,88%	3,277
288,5	5,592	42,11%	3,008	173,5	3,024	45,95%	3,282
286,6	5,550	42,17%	3,012	171,6	2,980	46,01%	3,287
284,7	5,508	42,23%	3,016	169,7	2,936	46,08%	3,292
282,8	5,466	42,29%	3,021	167,8	2,892	46,15%	3,296
280,8	5,424	42,35%	3,025	165,9	2,848	46,22%	3,301
278,9	5,382	42,41%	3,029	164	2,804	46,29%	3,306
277	5,339	42,47%	3,034	162,1	2,759	46,35%	3,311
275,1	5,297	42,53%	3,038	160,1	2,715	46,42%	3,316
273,2	5,255	42,60%	3,043	158,2	2,670	46,49%	3,321
271,3	5,213	42,66%	3,047	156,3	2,626	46,56%	3,326
269,3	5,171	42,72%	3,051	154,3	2,581	46,63%	3,331
267,4	5,129	42,78%	3,056	152,4	2,537	46,70%	3,336
265,5	5,086	42,84%	3,060	150,5	2,492	46,77%	3,341
263,6	5,044	42,91%	3,065	148,6	2,447	46,84%	3,346
261,7	5,002	42,97%	3,069	146,7	2,402	46,91%	3,351

[†] Únicamente se ha representado la zona crítica de la gráfica



259,8	4,959	43,03%	3,074	144,8	2,357	46,98%	3,356
257,8	4,917	43,09%	3,078	142,8	2,311	47,05%	3,361
255,9	4,875	43,15%	3,082	140,9	2,266	47,12%	3,366
254	4,832	43,22%	3,087	139	2,221	47,19%	3,371
252,1	4,790	43,28%	3,091	137,1	2,175	47,27%	3,376
250,2	4,748	43,34%	3,096	135,2	2,129	47,34%	3,381
248,3	4,705	43,41%	3,100	133,3	2,083	47,41%	3,386
246,4	4,663	43,47%	3,105	131,3	2,037	47,48%	3,392
244,4	4,620	43,53%	3,109	129,4	1,991	47,55%	3,397
242,5	4,578	43,59%	3,114	127,5	1,944	47,63%	3,402
240,6	4,535	43,66%	3,118	125,6	1,898	47,70%	3,407
238,7	4,492	43,72%	3,123	123,7	1,851	47,77%	3,412
236,8	4,450	43,79%	3,128	121,8	1,804	47,85%	3,418
234,9	4,407	43,85%	3,132	119,9	1,756	47,92%	3,423
232,9	4,364	43,91%	3,137	117,9	1,709	48,00%	3,428
231	4,322	43,98%	3,141	116	1,661	48,07%	3,434
229,1	4,279	44,04%	3,146	114,1	1,613	48,15%	3,439
227,2	4,236	44,10%	3,150	112,2	1,564	48,23%	3,445
225,3	4,193	44,17%	3,155	110,3	1,515	48,30%	3,450
223,4	4,151	44,23%	3,159	108,4	1,466	48,38%	3,456
221,4	4,108	44,30%	3,164	106,4	1,416	48,46%	3,462
219,5	4,065	44,36%	3,169	104,5	1,366	48,54%	3,467
217,6	4,022	44,43%	3,173	102,6	1,315	48,62%	3,473
215,7	3,979	44,49%	3,178	100,7	1,263	48,70%	3,479
213,8	3,936	44,56%	3,183	98,82	1,211	48,79%	3,485
211,9	3,893	44,62%	3,187	96,91	1,158	48,87%	3,491
209,9	3,850	44,69%	3,192	94,99	1,104	48,96%	3,497
208	3,807	44,75%	3,196	93,08	1,049	49,05%	3,503
206,1	3,764	44,82%	3,201	91,16	0,992	49,14%	3,510
204,2	3,721	44,88%	3,206	89,24	0,934	49,23%	3,516
202,3	3,677	44,95%	3,211	87,33	0,874	49,33%	3,523
200,4	3,634	45,01%	3,215	85,41	0,812	49,43%	3,530
198,5	3,591	45,08%	3,220	83,5	0,747	49,53%	3,538
196,5	3,548	45,14%	3,225	81,58	0,678	49,64%	3,546
194,6	3,504	45,21%	3,229	79,66	0,604	49,76%	3,554
192,7	3,461	45,28%	3,234	77,75	0,522	49,89%	3,564
190,8	3,417	45,34%	3,239	75,83	0,428	50,04%	3,575
188,9	3,374	45,41%	3,244	73,92	0,310	50,23%	3,588
187	3,330	45,48%	3,248	72	0,118	50,55%	3,610

Tabla cc

En la **Tabla cc** se observa que en el momento en el que se ha alcanzado en el depósito la presión mínima para poder asegurar la inyección, sólo ha sido requerido inyectar en el 50,55% de la carrera de trabajo. Se confirma así, para este punto y, por



extensión, para el resto de puntos del mapa motor, que el límite de funcionamiento del sistema lo impondrá la presión en el D_{ap} y no el parámetro c .

La extensión del cálculo de los tiempos de inyección teóricos al resto del mapa motor se encuentra en la documentación presentada de manera adjunta.



1.1.6 COMENTARIO A LOS TRANSITORIOS DEL VEHÍCULO

En lo que sigue se hará mención al funcionamiento del vehículo durante los transitorios de la conducción y a la posible influencia que la adaptación del vehículo llevada a cabo pudiera haber ocasionado en dichos procesos.

Primeramente, se entiende por régimen transitorio aquél en el que la velocidad, la carga o la temperatura son anormales o están modificándose con cierta rapidez. Los principales en el motor de serie son el arranque en frío, el calentamiento, las aceleraciones y las deceleraciones.

En general y puesto que las diferencias (*en cuanto al proceso de renovación de la carga se refiere*) entre el motor neumático y el de serie no son elevadas, parece razonable suponer que los mismos estudios que se llevaron a cabo en el segundo de cara a mantener un funcionamiento correcto de los mismos, son también válidos para el primero.

Simplemente se hacen necesarios ciertos comentarios aclarativos a los mismos.

En cuanto al arranque en frío y al calentamiento del vehículo de serie, lo que se hace, una vez arrancado el motor, es cortocircuitar mediante un “by-pass” el flujo de agua al radiador para impedir la refrigeración de éste durante los primeros momentos de funcionamiento y así conseguir que llegue antes a su temperatura de funcionamiento óptima. Una vez alcanzada ésta, y para no sobrepasar su valor, comienza a funcionar la refrigeración del motor haciendo pasar el flujo de agua que viene del mismo por el radiador del coche. El elemento regulador de todo eso es el termostato.



Pues bien, en el motor neumático no van a existir problemas de altas sino de bajas temperaturas, como ya se ha venido comentando, y además, no habrá una temperatura óptima en la que el motor funcione de manera más efectiva sino que, todo lo más, se podrían fijar ciertos valores (*excesivamente bajos de la misma y fundamentalmente en el escape*) por debajo de los cuales no se podrían asegurar determinadas propiedades mecánicas de algunos materiales, perdiendo fiabilidad el sistema.

Debido a esto el circuito, que en el caso que nos aborda será por tanto de calentamiento, funcionará en todo momento y sin by-pass alguno del mismo. Por ello, no existirá este transitorio en el Smart neumático y tampoco será necesario mantener el termostato de serie.

En cuanto a lo que a los procesos transitorios de aceleración y deceleración se refiere y debido a la semejanza entre ambos motores, no parece necesario un tratamiento excesivamente especial ya que, al igual que en el vehículo de serie, estarán caracterizados por una demanda mayor (*o menor en función del caso*) de potencia en el cigüeñal y, generalmente, por un incremento (*o decremento*) del número de revoluciones. Ello implicaría la apertura del inyector-válvula durante un tiempo mayor (*o menor*) al del instante inmediatamente anterior, para así dejar pasar una mayor (*o menor*) cantidad de aire a la cámara.

En cambio, si parece claro que será la progresiva disminución de la presión del depósito D_{ap} , y por tanto el progresivo aumento de los tiempos de inyección del aire, la que podrá ser causante de mayores irregularidades en la marcha del vehículo y, sobre todo, en su respuesta más o menos rápida ante procesos transitorios. Todo esto



sería objeto de estudio en el banco de ensayos oportuno al que el motor fuera sometido.



1.1.7 DISEÑO DEL INYECTOR

Se avanzará en esta sección en el diseño del *inyector-válvula* del vehículo para poder, una vez desarrollado el mismo, corregir los tiempos de inyección teóricos anteriores, en los que se supuso una apertura y cierre de las válvulas instantánea.

Como muestran los planos el sistema consta de un actuador polimérico que es accionado mediante un solenoide y es devuelto a su posición por un resorte.

Al llegar la señal a la bobina proveniente de la *UCM* se genera un campo magnético que se ve amplificado al magnetizarse el hierro colocado dentro de la bobina. De esta forma se crea un electroimán de igual polaridad al imán permanente[†] que se encuentra enroscado en la punta del actuador de forma que ambos se repelen haciendo que dicha fuerza de repulsión venza la fuerza del resorte que mantiene a la válvula cerrada y abriéndose ésta posibilitando así la inyección.

Posteriormente, y una vez que deje de excitarse la bobina la fuerza elástica será de nuevo la encargada de retornar la válvula a su posición inicial.

Por tanto el diseño del *inyector-válvula* implicará determinar las características del resorte a colocar en el mismo así como del arrollamiento de cobre que conformará la bobina y la determinación de los materiales que se emplearán en la fabricación de cada uno de los componentes del mismo.

Para el diseño se ha mantenido la forma exterior del inyector de serie de forma que el nuevo elemento encaje perfectamente en el hueco en el que se encuentra aquél actualmente.

[†] Este imán será de neodimio por ser más potente, barato y menos frágil que los de Samario-Cobalto



1.1.7.1 Requisitos de los componentes principales.

Se definirá en esta sección los componentes que conformarán el inyector-válvula así como sus principales características; información toda ella necesaria previa a cálculos más detallados que se harán después.

Todo lo que aquí se describa deberá corroborarse con los planos que, de cada elemento, se adjuntan en el apartado correspondiente a los mismos.

Dicho esto se describirá en lo que sigue cada uno de los elementos principales que conformarán el inyector, sin tener en cuenta elementos accesorios que, aún perteneciendo al mismo, carezcan de importancia relevante en esta sección.

Sólo se concretarán aquéllos que por sus especiales condiciones de funcionamiento o por la necesidad de algunas de sus características para cálculos posteriores difieran de las del sistema “*HPCR injection system*” de serie.

Componentes del inyector-válvula:

- **Actuador y válvula:** Debido a la fricción constante a la que se va a ver sometido este elemento durante la marcha del vehículo y puesto que se trata de un elemento de especial relevancia para el correcto funcionamiento del sistema es preciso que no exista riesgo alguno de posible “gripaje” o atascamiento del mismo que introduzca irregularidades en la inyección del aire y, por tanto, en la marcha del Smart. Por todo ello este elemento será fabricado de un termoplástico autolubricado denominado *Torlón 4301*[†] compuesto por una poliamidaimida (*como material base*), grafito (*carga de*

[†] Facilitado por GGBearings – *Polymer Bearings*



refuerzo para facilitar la autolubricación del elemento) y PTFE (politetrafluoretileno). La densidad de este material $1,45 \text{ gr/cm}^3$ junto con el volumen total de ambos elementos (ver planos) de $2,2382 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ nos permite obtener la masa final del conjunto:

$$m_{av} = 3,24539 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

- **Hilo**: En el correcto diseño de la bobina radicaré el mejor o peor funcionamiento del conjunto. Se utilizará hilo esmaltado de cobre recocido especial para este tipo de aplicaciones, con un radio de la espira media de $5,5 \text{ mm}$. Se ha considerado el aumento de la resistividad eléctrica del Cu con la temperatura de forma que, para una temperatura de ensayo de referencia de unos 75°C †:

$$\rho_{\text{Cu}(75^\circ\text{C})} = \rho_{\text{Cu}(20^\circ\text{C})} \cdot (1 + \alpha_{10} \cdot \Delta T) = 0,020938 \mu\Omega \cdot \text{m}^\dagger$$

El diámetro del hilo será el necesario para conseguir, en el circuito magnético, la fuerza magnetomotriz necesaria para accionar la válvula.

- **Material ferromagnético**: Se ha elegido, como material magnético blando de baja coercividad y buena remanencia, el óxido de Hierro-Cobalto † también habitual en este tipo de aplicaciones. Y se ha considerado una permeabilidad relativa constante de 2000 .

El resto de elementos del sistema no merecen especial mención y se fabricarán de los mismos materiales que los usados en el modelo de serie: siendo la mayoría aceros con ninguno o escaso acabado superficial.

† Cfr.[SAIZ87] apartado 3.4.

† Cfr [CHAC02] pág.8

† 57% Fe, 28% O, 15% Co



1.1.7.2 Cálculo de la fuerza magnética necesaria

Será necesario conocer la fuerza magnética necesaria para con ella, y a partir de la teoría de campos, poder obtener el número de espiras que habrá de tener el bobinado.

Previo al desarrollo de los cálculos es necesario establecer el criterio de diseño con el que los mismos serán realizados puesto que tal criterio condicionará el funcionamiento posterior del *inyector-válvula*.

Se diseñará el mismo para que, en el punto más desfavorable durante el proceso de inyección del aire (*el de potencia máxima, como se vio en 1.1.5.*), el tiempo de apertura de la válvula no sea superior a un cierto porcentaje c' del tiempo de inyección teórico definido para la inyección.

Conocido esto se obtienen dos primeras ecuaciones resultado de aplicar las condiciones de la estática correspondientes a las posiciones de inyector cerrado y completamente abierto respectivamente:

$$k \cdot x_0 \geq P_{m\acute{a}x\ Dap} \cdot A_v$$

$$F \geq k \cdot (x_0 + L_v) - m_{av} \cdot g$$

Es necesaria además una ecuación más donde quede plasmado el criterio de diseño elegido. Se trata de la ecuación dinámica de la apertura del elemento:

$$F + m \cdot g - k \cdot (x_0 + X_{ap\ RMS}) = m \cdot \ddot{X}_{ap\ RMS}$$

Puesto que se trata de una ecuación dinámica característica de cada punto en el que se encuentre el conjunto *actuador-válvula*, se ha hecho un cálculo aproximado de la fuerza media necesaria para su movimiento tomando valores, tanto de la aceleración de la válvula como de su posición, suficientemente característicos.



Para ello se ha asumido el movimiento, tanto durante la apertura como el cierre, como armónico simple y se ha tomado como valor suficientemente característico de la posición y la aceleración, el eficaz de la ley senoidal que rige el mismo (*como aquel valor constante, tanto de la posición como de la aceleración del elemento, que implicaría el mismo gasto energético que la ley periódica, en un elemento de igual masa y durante un tiempo de un periodo*).

De acuerdo con lo anterior se tiene:

$$X_{apRMS} = \frac{L_v}{2} \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

$$\ddot{X}_{apRMS} = \frac{L_v}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{t_{ap}} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

1.1.7.3 Cálculo de la energía magnética necesaria

Se calculará en lo que sigue las características del campo magnético que será creado por la bobina. Para ello se ha despreciado el pequeño agujero que tiene el material ferromagnético en su eje, simplificando la configuración al estudio del campo creado por un solenoide corto con un hierro compacto en su interior.

La figura siguiente muestra la configuración y los parámetros que se considerarán para el cálculo, donde R representa el radio medio del espacio destinado a alojar a la bobina en el *inyector-válvula* diseñado:



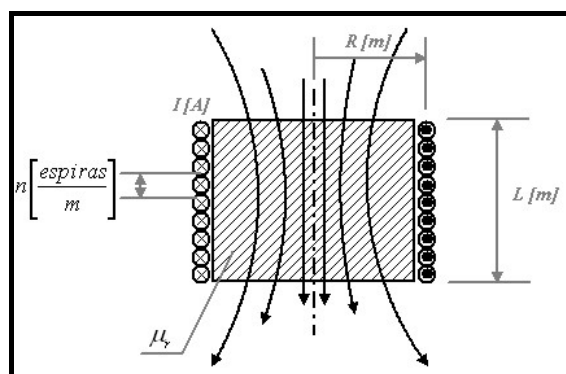


Fig. 39

A continuación se representa un croquis de la disposición genérica anterior sobre los planos del diseño realizado:

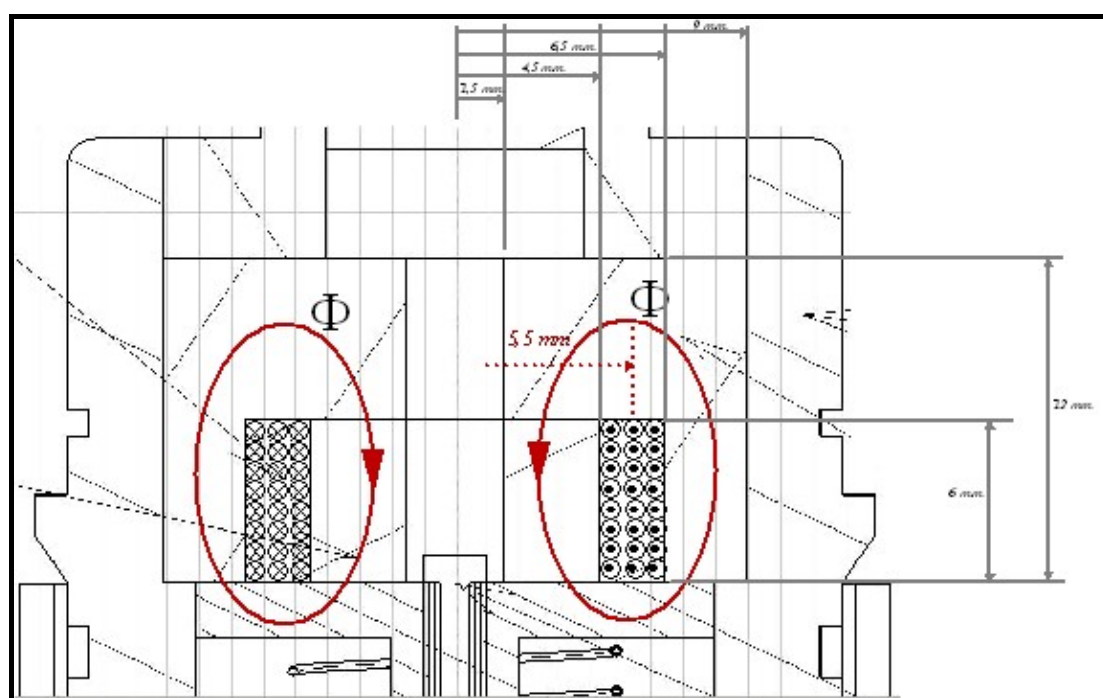


Fig. 40

Se calculará el campo creado por una espira en un punto de su eje y posteriormente se integrarán todas ellas para obtener de esta forma el campo magnético total en el eje creado por el bobinado.



Puesto que evidentemente el campo no es igual en todos y cada uno de los puntos del interior del solenoide se obtendrá el valor aproximado del campo en la zona central del bobinado y mayorando, si fuera necesario en un cierto valor, el número de espiras necesarias con el fin de estar seguros de que el bobinado será capaz de mover el actuador. No obstante el actuador como se ve en la figura anterior lleva en su parte superior un imán de neodimio que ayuda a mantener el actuador cerrado mediante la atracción del ferromagnético cuando la bobina no está excitada. Y, al excitarse ésta, se ve repelido por el electroimán que conforma el arrollamiento del hilo de cobre sobre el mismo hierro anterior.

El cálculo del campo magnético creado por una única espira en un punto de su eje se calculó mediante la ley de Biot-Savart de forma que se obtuvo lo siguiente:

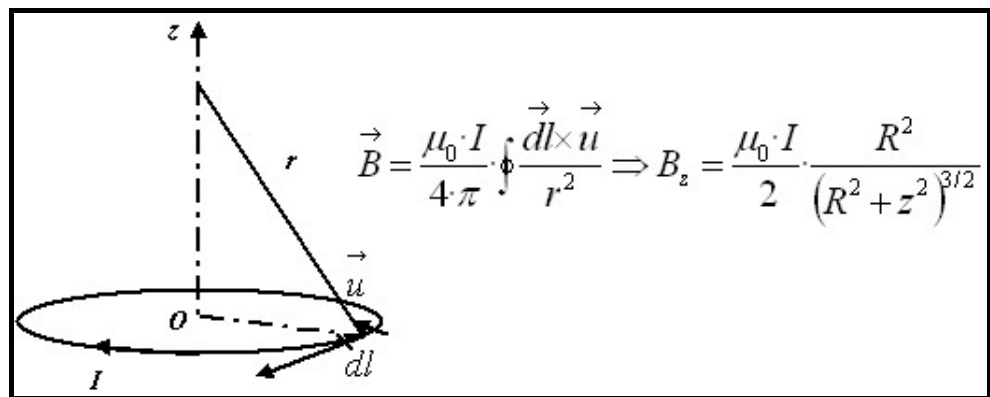


Fig. 41

Posteriormente se integró lo anterior para el número total de espiras en el bobinado.

Esto es:

$$dN = n \cdot dz \Rightarrow N = n \cdot L,$$

(siendo n el número de espiras arrolladas por unidad de longitud)



Obteniéndose que el campo creado por el bobinado en el punto medio de su eje venía expresado mediante la expresión:

$$B_z = \frac{\mu \cdot I \cdot n \cdot L}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{L^2}{4} + \bar{R}^2}}$$

Y quedando por tanto la energía magnética por unidad de volumen almacenada por el campo magnético definida como sigue:

$$U_m = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} = \frac{\mu \cdot I^2 \cdot n^2}{8} \cdot \frac{L^2}{\frac{L^2}{4} + \bar{R}^2}$$

Puesto que la intensidad depende de la tensión de la batería del vehículo (que es constante) y de la resistencia del bobinado, su valor dependerá únicamente del diámetro del hilo, escogido en función de las dimensiones del espacio reservado para la colocación de la bobina. De igual forma el término n dependerá únicamente del diámetro del hilo, además de las dimensiones geométricas anteriormente mencionadas. De acuerdo con esto, la fuerza magnetomotriz quedará definida mediante la expresión siguiente, función únicamente del diámetro del hilo:

$$\mathcal{F}.m.m. = n \cdot I = \frac{U_{bat} \cdot \phi^2}{8 \cdot R \cdot L \cdot \rho_{Cu}}$$

En conclusión, toda la transformación electromecánica que se produce al excitar la bobina va a dar como resultado una fuerza sobre el actuador de valor el de la tabla:

<i>Transformación electromecánica de la energía</i>
$F = \frac{\mu \cdot U_{bat}^2 \cdot \pi \cdot \phi^4}{512 \cdot \rho_{Cu}^2 \cdot \left(\frac{L^2}{4} + \bar{R}^2 \right)}$

Tabla dd



1.1.7.4 Resultados diseño

Con las ecuaciones del punto 1.1.7.2. y la **Tabla dd** del 1.1.7.3 se obtienen los parámetros de diseño correspondientes tanto al resorte necesario a colocar en el *inyector-válvula* como al número de espiras por unidad de longitud que ha de tener el solenoide y el diámetro de hilo a usar.

Puesto que el valor de compresión inicial del muelle dependerá del valor del parámetro c' (*del criterio de diseño fijado*), éste no podrá tomarse al azar y deberá ser aquél que, de acuerdo con las dimensiones geométricas, no implique un diseño extremadamente exigente que haga que la fuerza necesaria para mover el actuador sea excesivamente elevada y que, al mismo tiempo, permita el uso de las secciones comerciales habituales para los hilos de cobre esmaltados.

De acuerdo con lo anterior un estudio de los resultados para distintos valores del parámetro de diseño c' , (*esto es, para distintos tiempos de apertura de la válvula*), se muestra en la siguiente tabla:



Estudio de posibles diseños					
c' [%]	k [N/m]	x₀ [mm]	F [N]	Diámetro hilo bobina [mm]	n° espiras [espiras/m]
10,00%	224089	3,365	1449	0,1783	62923
10,83%	190940	3,949	1346	0,1750	65281
11,67%	164637	4,580	1264	0,1723	67353
12,50%	143417	5,257	1199	0,1700	69177
13,33%	126050	5,982	1145	0,1681	70785
14,17%	111657	6,753	1100	0,1664	72206
15,00%	99595	7,571	1063	0,1650	73466
15,83%	89387	8,435	1031	0,1638	74584
16,67%	80672	9,347	1004	0,1627	75581
17,50%	73172	10,300	980,8	0,1617	76472
18,33%	66671	11,310	960,7	0,1609	77270
19,17%	61000	12,360	943,1	0,1601	77987
20,00%	56022	13,460	927,7	0,1595	78633
20,83%	51630	14,600	914	0,1589	79216
21,67%	47735	15,800	902	0,1584	79745
22,50%	44265	17,030	891,2	0,1579	80224
23,33%	41159	18,320	881,6	0,1575	80661
24,17%	38370	19,650	872,9	0,1571	81060
25,00%	35854	21,030	865,1	0,1567	81424
25,83%	33578	22,460	858,1	0,1564	81758
26,67%	31513	23,930	851,7	0,1561	82065
27,50%	29632	25,450	845,8	0,1558	82348
28,33%	27914	27,010	840,5	0,1556	82608
29,17%	26342	28,620	835,6	0,1554	82849
30,00%	24899	30,280	831,2	0,1552	83071

Tabla ce

Y de un modo más gráfico en la figura siguiente:



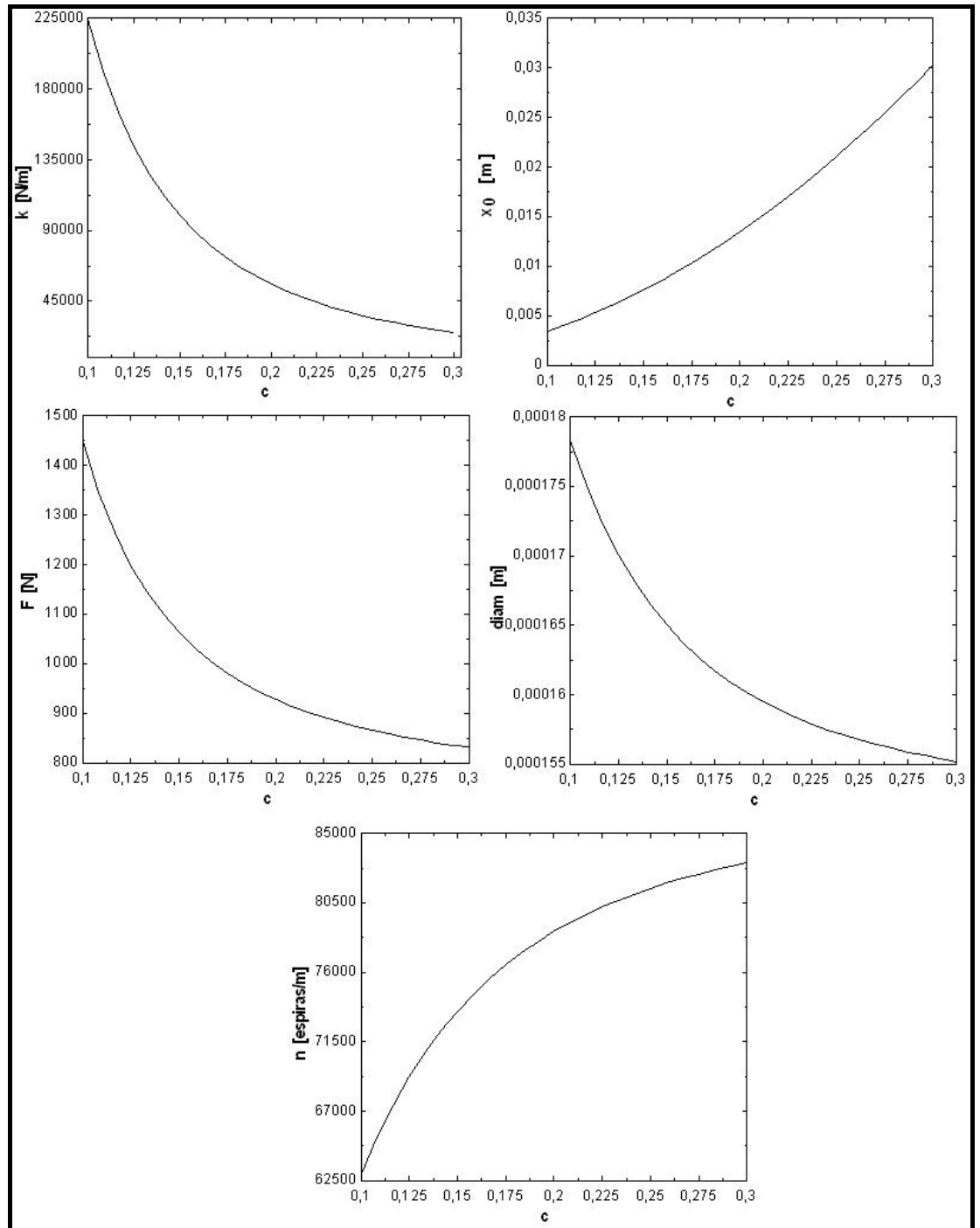


Fig. 42



De acuerdo a los diámetros de hilos esmaltados que suelen ser habituales en la fabricación de bobinados, se eligió finalmente uno de $0,16 \text{ mm}$ de diámetro de forma que, como se explicó anteriormente, no se impusieran condiciones excesivamente severas al diseño pero si se realizara de manera suficientemente óptima.

Los resultados finalmente escogidos fueron:

Resultados diseño	
$c' [\%]$	19,17%
$k [\text{N/m}]$	61000
$x_0 [\text{mm}]$	12,360
$F [\text{N}]$	943,1
Diám. hilo [mm]	0,1601
$n [\text{espiras/m}]$	77987

Tabla ff

De acuerdo con la tabla anterior y las dimensiones de que se dispone para el bobinado, el número de espiras totales de la bobina serían:

$$N = n \cdot L \approx 468 \text{ _espiras}$$



1.1.8 CORRECCIÓN DE TIEMPOS DE INYECCIÓN

Diseñado el *inyector-válvula* puede hacerse una aproximación más real de los tiempos de inyección teóricos que se propusieron en un principio dejando ya de suponer una apertura y cierre instantáneos de la válvula.

Asumiendo ambos movimientos como armónicos simples, el tiempo de inyección real (*corregido por tanto*) será:

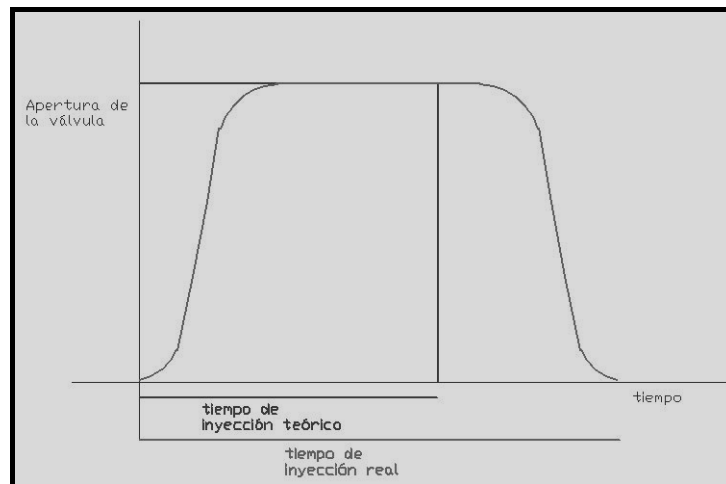


Fig. 43

$$t_{inyección_real} = t_{inyección_teórico} + 0,5 \cdot (t_{ap} + t_{cierre})$$

Luego para la corrección anterior bastará conocer los tiempos de apertura y cierre del inyector. En cuanto al tiempo de apertura, éste es resultado directo del diseño llevado a cabo y se calculará, por tanto, como sigue:

$$t_{ap} = c' \cdot t_{inyección_teórico}$$



Para el cálculo del tiempo de cierre de la válvula se habrá de plantear la ecuación dinámica que rige el proceso de cierre y para ello se supuso, como ya se hizo anteriormente, el valor eficaz del movimiento armónico que rige el proceso como el valor más representativo del mismo.

De acuerdo con esto la ecuación que permite obtener el tiempo de cierre de la válvula será la siguiente:

$$k \cdot (x_0 + X_{\text{cierreRMS}}) - m \cdot g = m \cdot \ddot{X}_{\text{cierreRMS}}$$

Y despejando de la ecuación anterior queda una expresión de la forma:

$$t_{\text{cierre}} = \sqrt{\frac{m \cdot \frac{3,1}{2} \cdot 10^{-3} \cdot \pi^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}}{k \cdot \left[x_0 + \frac{3,1}{2} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{1,5} \right] - m \cdot g}}$$

Los resultados para el punto de potencia máxima, que como se demostró ya, representa la situación más desfavorable durante el funcionamiento del motor, serán:

Criterio diseño: $t_{ap} = c'[\%] \cdot t_{inv \text{ teórica}}$ en pto+desfav	
Tiempo de apertura [ms]	0,6922
Tiempo de cierre [ms]	0,2009

Tabla gg

En cuanto al resultado de la corrección de los tiempos de inyección para todos y cada uno de los puntos del mapa motor, el cálculo correspondiente se acompaña en la documentación adjunta. A continuación se muestran, en una tabla semejante a la **Tabla cc**, y donde se han suprimido los valores correspondientes a la presión y el parámetro c (que permanecen invariables), los resultados para el punto de máxima potencia:



Punto de máxima potencia (4200 rpm)							
P_{Dap} [bar]	t_{inyecc_real} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{inyecc_real} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{inyecc_real} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{inyecc_real} [ms]
300	3,429	242,5	3,561	185	3,700	127,5	3,849
298,1	3,433	240,6	3,565	183,1	3,705	125,6	3,854
296,2	3,437	238,7	3,570	181,2	3,710	123,7	3,859
294,3	3,442	236,8	3,575	179,3	3,714	121,8	3,865
292,3	3,446	234,9	3,579	177,4	3,719	119,9	3,870
290,4	3,450	232,9	3,584	175,5	3,724	117,9	3,875
288,5	3,455	231	3,588	173,5	3,729	116	3,881
286,6	3,459	229,1	3,593	171,6	3,734	114,1	3,886
284,7	3,463	227,2	3,597	169,7	3,739	112,2	3,892
282,8	3,468	225,3	3,602	167,8	3,743	110,3	3,897
280,8	3,472	223,4	3,606	165,9	3,748	108,4	3,903
278,9	3,476	221,4	3,611	164	3,753	106,4	3,909
277	3,481	219,5	3,616	162,1	3,758	104,5	3,914
275,1	3,485	217,6	3,620	160,1	3,763	102,6	3,920
273,2	3,490	215,7	3,625	158,2	3,768	100,7	3,926
271,3	3,494	213,8	3,630	156,3	3,773	98,82	3,932
269,3	3,498	211,9	3,634	154,3	3,778	96,91	3,938
267,4	3,503	209,9	3,639	152,4	3,783	94,99	3,944
265,5	3,507	208	3,643	150,5	3,788	93,08	3,950
263,6	3,512	206,1	3,648	148,6	3,793	91,16	3,957
261,7	3,516	204,2	3,653	146,7	3,798	89,24	3,963
259,8	3,521	202,3	3,658	144,8	3,803	87,33	3,970
257,8	3,525	200,4	3,662	142,8	3,808	85,41	3,977
255,9	3,529	198,5	3,667	140,9	3,813	83,5	3,985
254	3,534	196,5	3,672	139	3,818	81,58	3,993
252,1	3,538	194,6	3,676	137,1	3,823	79,66	4,001
250,2	3,543	192,7	3,681	135,2	3,828	77,75	4,011
248,3	3,547	190,8	3,686	133,3	3,833	75,83	4,022
246,4	3,552	188,9	3,691	131,3	3,839	73,92	4,035
244,4	3,556	187	3,695	129,4	3,844	72	4,057

Tabla hh

A pesar de lo anterior, el mapa tridimensional de puntos que supone la corrección de tiempos realizada no sería el que habría de programarse en la *UCM* puesto que no se corresponde con el tiempo de excitación de la bobina. Piénsese que ésta no está excitada durante el tiempo que dura el cierre de la misma. Por tanto, el mapa de puntos que habría de programarse en la *UCM* del motor sería el correspondiente a los tiempos reales anteriores menos el tiempo que dura el cierre de la válvula.



Este tiempo correspondería al tiempo de accionamiento del relé de cierre del circuito de excitación de la bobina. Para activar este circuito lo que se hace en el motor de serie, y que se mantendrá invariable para el motor neumático, es mantener la bobina a la tensión fijada y hacer o no masa mediante la excitación o no del relé. La siguiente figura muestra lo anterior para el Smart de serie:

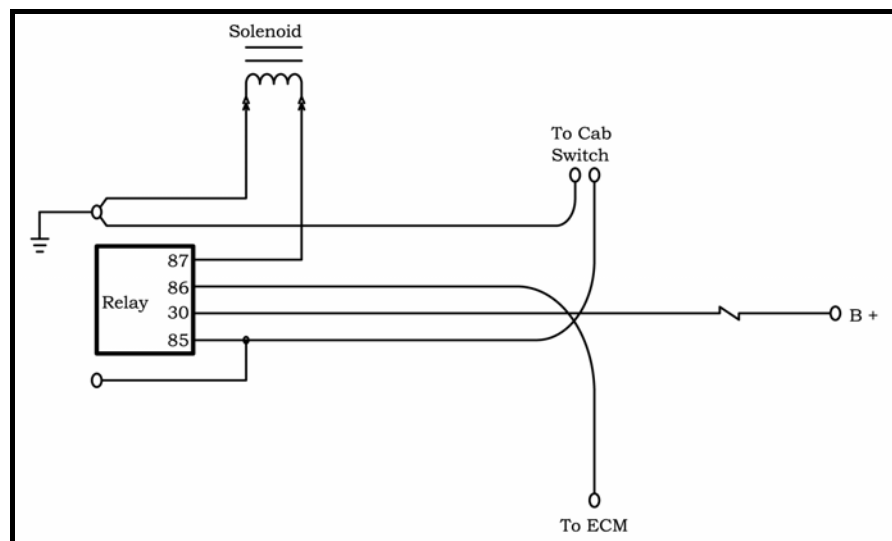


Fig. 44

Los datos de excitación del relé comentado para el punto de máxima potencia, y que ya si serían los que habrían de programarse en la UCM (ECM en la Fig.44), son los siguientes (*de nuevo el resto de valores se acompañan en la información adjunta*):



Punto de máxima potencia (4200 rpm)							
P_{Dap} [bar]	t_{excitación relé} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{excitación relé} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{excitación relé} [ms]	P_{Dap} [bar]	t_{excitación relé} [ms]
300	3,228	242,5	3,360	185	3,499	127,5	3,648
298,1	3,232	240,6	3,364	183,1	3,504	125,6	3,653
296,2	3,236	238,7	3,369	181,2	3,509	123,7	3,658
294,3	3,241	236,8	3,374	179,3	3,513	121,8	3,664
292,3	3,245	234,9	3,378	177,4	3,518	119,9	3,669
290,4	3,249	232,9	3,383	175,5	3,523	117,9	3,674
288,5	3,254	231	3,387	173,5	3,528	116	3,680
286,6	3,258	229,1	3,392	171,6	3,533	114,1	3,685
284,7	3,262	227,2	3,396	169,7	3,538	112,2	3,691
282,8	3,267	225,3	3,401	167,8	3,542	110,3	3,696
280,8	3,271	223,4	3,405	165,9	3,547	108,4	3,702
278,9	3,275	221,4	3,410	164	3,552	106,4	3,708
277	3,280	219,5	3,415	162,1	3,557	104,5	3,713
275,1	3,284	217,6	3,419	160,1	3,562	102,6	3,719
273,2	3,289	215,7	3,424	158,2	3,567	100,7	3,725
271,3	3,293	213,8	3,429	156,3	3,572	98,82	3,731
269,3	3,297	211,9	3,433	154,3	3,577	96,91	3,737
267,4	3,302	209,9	3,438	152,4	3,582	94,99	3,743
265,5	3,306	208	3,442	150,5	3,587	93,08	3,749
263,6	3,311	206,1	3,447	148,6	3,592	91,16	3,756
261,7	3,315	204,2	3,452	146,7	3,597	89,24	3,762
259,8	3,320	202,3	3,457	144,8	3,602	87,33	3,769
257,8	3,324	200,4	3,461	142,8	3,607	85,41	3,776
255,9	3,328	198,5	3,466	140,9	3,612	83,5	3,784
254	3,333	196,5	3,471	139	3,617	81,58	3,792
252,1	3,337	194,6	3,475	137,1	3,622	79,66	3,800
250,2	3,342	192,7	3,480	135,2	3,627	77,75	3,810
248,3	3,346	190,8	3,485	133,3	3,632	75,83	3,821
246,4	3,351	188,9	3,490	131,3	3,638	73,92	3,834
244,4	3,355	187	3,494	129,4	3,643	72	3,856

Tabla ii



1.1.9 SISTEMA DE CALENTAMIENTO

1.1.9.1 Comentario previo

En esta sección se presentará una introducción al estudio más detallado que habría de hacerse respecto a la adaptación del sistema de “refrigeración” del vehículo. Con ello simplemente quiere dejarse constancia de algo que ya se comentó con anterioridad, esto es, que a pesar de las bajas temperaturas del aire de escape (*teóricas*) calculadas, éste saldría a una temperatura muy superior. Piénsese que en los motores térmicos habituales la combustión regular puede producir temperaturas máximas comprendidas entre los 1700-2500°C y, sin embargo, esta temperatura dista muchísimo de ser aquélla a la que son finalmente expulsados los gases de escape del vehículo. Las pérdidas de calor que se producen durante el funcionamiento del motor, ya sea mediante la transmisión de calor al aceite del sistema de lubricación, al refrigerante o mediante radiación a las distintas partes colindantes del motor, disminuyen en gran medida la temperatura de los gases de escape. Un balance térmico en un motor, referido a la unidad de tiempo, lo demuestra:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_N + \dot{Q}_r + \dot{Q}_g + \dot{Q}_{res} + \dot{Q}_a + \dot{Q}_{ra}$$

siendo:

\dot{Q}_t → Calor equivalente introducido en el motor debido al combustible suministrado por unidad de tiempo.

\dot{Q}_N → Calor equivalente a la potencia efectiva en el motor.



\dot{Q}_r → Calor transmitido al refrigerante

\dot{Q}_g → Calor equivalente al estado térmico perdido en los gases de escape.

\dot{Q}_{res} → Calor equivalente correspondiente a la combustión incompleta.

\dot{Q}_a → Calor transmitido al aceite.

\dot{Q}_{ra} → Calor transmitido por radiación.

Mediante el diagrama de Sankey siguiente queda gráficamente demostrada la influencia que lo anterior tiene sobre el estado térmico final de los gases de escape.

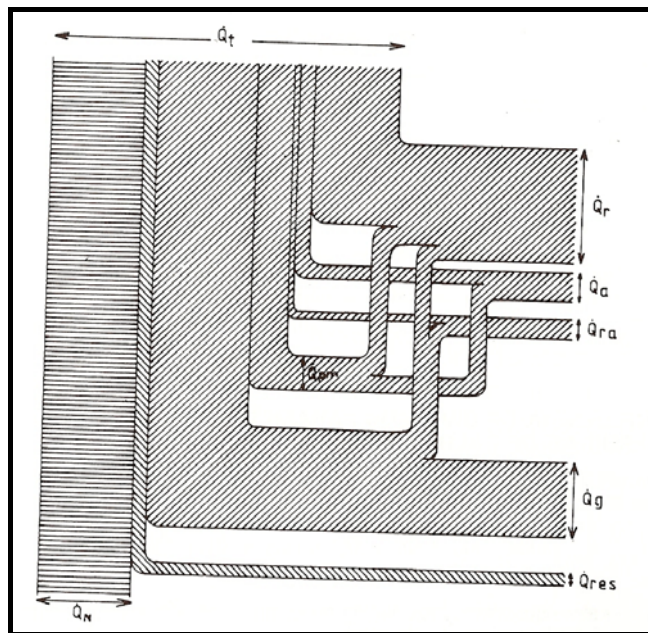


Fig. 45[†]

Donde el calor \dot{Q}_{pm} es el equivalente a las pérdidas mecánicas del motor y se disipa mediante el refrigerante y el calor absorbido por el aceite.

La Fig.45 pone de manifiesto cómo del calor total que es necesario disipar, -el introducido por el combustible menos el equivalente a la potencia obtenida y el que

[†] Cfr. [MUÑO89]. Páginas 71 y 72



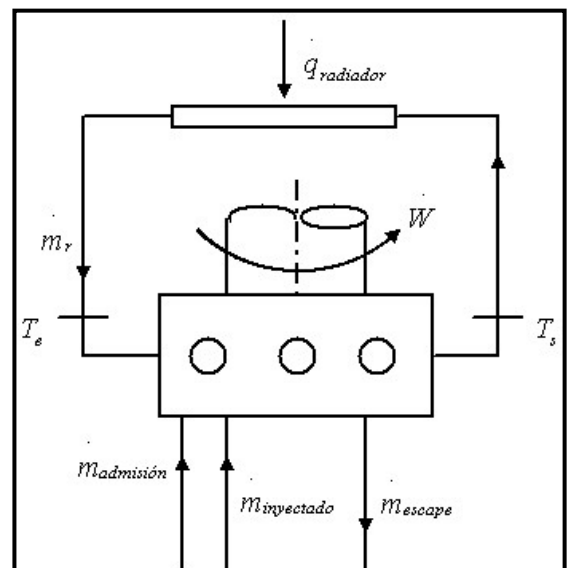
finalmente se va con los gases de escape-, la mayor parte del mismo se elimina mediante el circuito de refrigeración. Representando por tanto, el correspondiente al disipado por el aceite, el residual y el transmitido por radiación una cantidad muy pequeña.

Dicho esto, en lo que sigue se estudiará las implicaciones de lo arriba mencionado en términos del motor neumático.

1.1.9.2 Extensión al motor neumático

En el caso del motor neumático, los enormes gradientes térmicos que se producirían tanto entre el colector de escape y el aire ambiente, como entre éste último y las paredes del bloque implicarían unos severos procesos de transmisión de calor que aumentarían de forma considerable las temperaturas a las que finalmente el aire sería devuelto al exterior.

No obstante, la readaptación del sistema



de refrigeración del motor de serie iría encaminada a aumentar el estado térmico del aire de escape en la medida de lo posible, para así evitar riesgo alguno de fallos derivados de tan bajas temperaturas. También serviría para homogeneizar las temperaturas del resto de elementos constituyentes del sistema.

El circuito de refrigeración se reconvertiría en un sistema de calentamiento de forma que el “refrigerante” saldría del motor a una temperatura menor de la que entró y



volvería a aumentar su temperatura en el radiador del coche. Como ya se explicó en **1.1.6.** el termostato del sistema podría suprimirse puesto que el refrigerante pasaría en todo momento por el intercambiador agua-aire del Smart de serie.

Con respecto al elemento “refrigerante”, éste dejaría de ser agua puesto que su elevado punto de fusión podría ocasionar problemas a la hora de trabajar con tan bajas temperaturas. De forma gráfica, la evolución de la temperatura aproximada (*teórica*) del aire de escape, la **Tabla XVII** calculada en **1.1.4.**, tiene el siguiente aspecto:

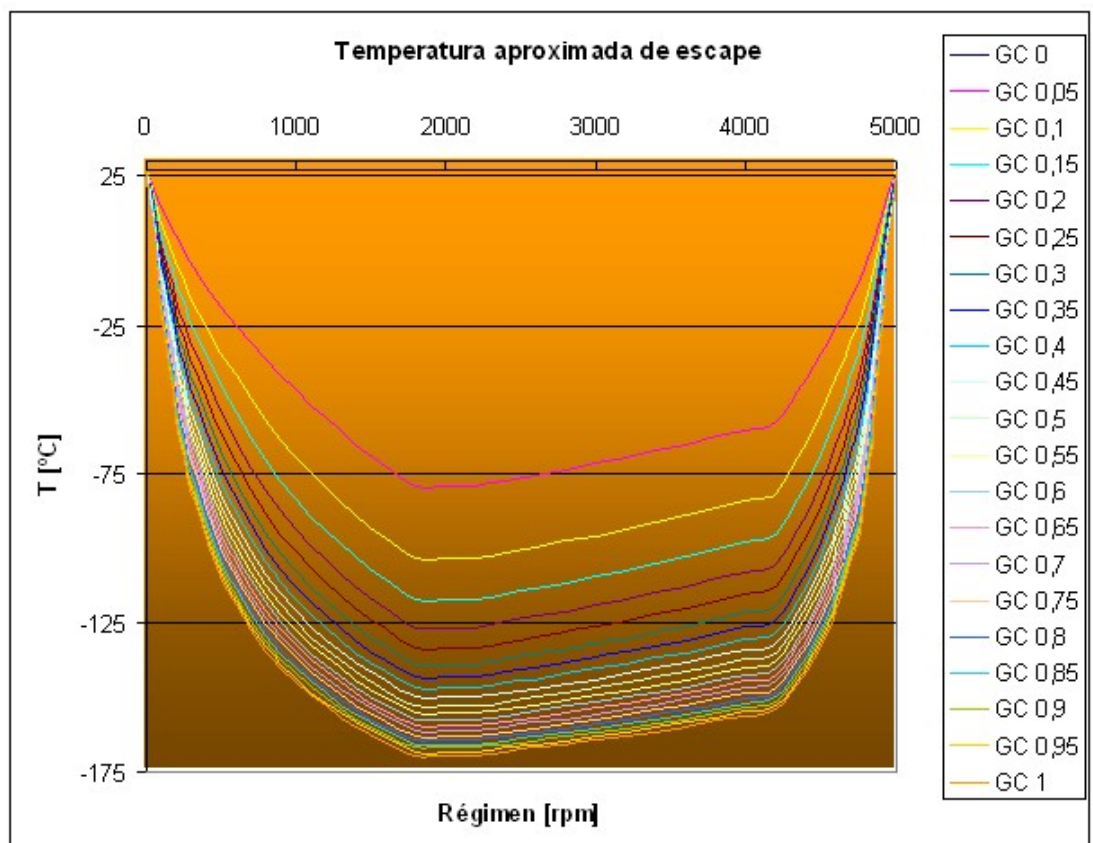


Fig. 46



1.1.9.2.1 Medio “refrigerante”

Como consecuencia de lo anterior, el fluido calentador del motor que finalmente se usaría sería un alcohol y, concretamente, se trataría del 1-propanol (IUPAC)[†]. La elección del propanol se hizo debida al amplio rango de temperaturas en el que éste se mantiene en fase líquida. Algunas de sus propiedades fundamentales usadas en los cálculos posteriores fueron:

Alcohol propílico	
T _{fusión} [°C]	-126,50
T _{ebullición} [°C]	97,40
C _p [J/mol·K]	158,60 [†]
C _p [kJ/kg·K]	2,64
P _m [g/mol]	60,10
ρ [kg/m ₃]	800,00

Tabla jj

1.1.9.2.2 Suposiciones realizadas

Para esta primera aproximación de la temperatura real de salida del aire se han tenido que hacer ciertas suposiciones referentes al sistema de refrigeración del vehículo Smart Fortwo CDI de serie. Ello es debido a que se trata de información confidencial de la marca que no está disponible a nivel público (*se trata por ejemplo, de los datos referentes a las curvas de la bomba de recirculación del agua y a parámetros de diseño del radiador del coche*).

Las suposiciones llevadas a cabo han sido las siguientes:

$$\text{Potencia de la bomba} = 0,5\% \cdot \text{Potencia efectiva del motor}$$

$$\text{Caudal a trasegar por la bomba} = 2 \text{ litros por kW y minuto en condiciones de máxima potencia}$$

[†] Alcohol propílico normal o etilcarbinol

[†] Cfr. [PAZA70]



El salto de temperaturas en el radiador sufrido por el “refrigerante” tiene un valor típico de 8°C[†]

1.1.9.2.3 Cálculo aproximado de la temperatura de escape

Si tal y como se vio en el balance térmico expuesto en **1.1.9.1.**, se desprecia para este primer cálculo tanto el calor transmitido por radiación como el transmitido al aceite, *(debido a que su aportación a la disipación final de calor en el motor es pequeña respecto a la conseguida con el circuito de refrigeración)*, y además, se tiene presente que el término correspondiente a la combustión incompleta de los gases es nulo, puesto que no existe tal combustión, la expresión de dicho balance se reduce a:

$$\dot{Q}_t = \dot{Q}_N + \dot{Q}_r + \dot{Q}_g$$

Cálculo del calor transmitido por el “refrigerante”

Se calculó, mediante la ecuación de Taylor y Toong[†], la cantidad media de calor transmitido por unidad de tiempo desde el medio “refrigerante”, en función de un coeficiente global de película:

$$\dot{Q}_r = h_m \cdot A_p \cdot (\bar{T}_r - \bar{T}_g)$$

siendo:

h_m – coeficiente global de película

A_p – Sección del émbolo

T_g – Temperatura media del aire a lo largo de un ciclo

T_r – Temperatura media del alcohol

La expresión del coeficiente global de película, según proponen estos autores, viene dada por:

[†] Cfr. [MUÑO89] página 77.

[†] Cfr. [GIME03]



$$h_m = 10,4 \cdot \frac{k_g}{\mu^{0,75}} \cdot \dot{m}'^{0,75} \cdot D^{0,25}$$

siendo:

k_g – Conductividad térmica del aire

μ – Viscosidad del aire

\dot{m}' - Gasto másico por unidad de superficie de émbolo ($\dot{m}' = \rho \cdot C_m$)

Cálculo del calor suministrado por el aire inyectado

Este calor equivale a la energía total que puede extraerse del aire a presión inyectado en la cámara. Su obtención puede hacerse calculando el trabajo empleado en comprimir cada kilogramo de aire mediante el compresor de tres etapas con refrigeración intermedia que se planteó en 1.1.3.2.1. de forma que su valor haría las veces de la capacidad calorífica del combustible en el motor térmico de serie. Dicho valor es el que sigue:

	W [J/kg]
Etapas	199172,3
Total	597516,8

Tabla kk

De esta forma el valor de la energía total extraíble del aire inyectado sería:

$$\dot{Q}_t = \dot{m}_{\text{inyectado}} \cdot W_{\text{compresión}}$$

Cálculo del calor equivalente al estado térmico del aire de escape

Este calor vendría expresado mediante la diferencia de entalpías entre el aire que entra al motor y el que sale por el escape mediante la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_{\text{aire}} \cdot C_p \cdot (T_0 - T_{\text{escape}})$$



Una vez conocidas todas las expresiones de los calores del balance térmico propuesto, la expresión que permite obtener el valor de la temperatura de escape real para cada punto del motor sería:

$$T_{escape} = T_0 - \frac{\dot{m}_{inyectada} \cdot W_{compresión} - \dot{W} - h_m \cdot A_p \cdot (\bar{T}_r - \bar{T}_g)}{\dot{m}_{escape} \cdot C_p}$$

donde el valor de la temperatura media del refrigerante se obtiene de aplicar el primer principio al radiador del vehículo:

$$\bar{T}_r = T_g + \frac{\dot{m}_r \cdot C_{pr} \cdot (T_e - T_s)}{h_m \cdot A_p}$$

El resultado de los cálculos anteriores para todos los puntos del motor se presenta en la **Tabla XIX**.

Dicha tabla pone de manifiesto cómo, previsiblemente, las temperaturas de escape son mucho más elevadas de lo que los cálculos teóricos podían hacer creer en un principio, confirmando así lo dicho en **1.1.9.2**. Piénsese además que estas temperaturas no son tampoco las reales sino que simplemente representan una aproximación más cercana a la realidad de lo que fueron las calculadas en un principio, puesto que la temperatura final de escape del aire sería todavía mayor al tener en cuenta transferencia de calor al medio lubricante y la radiación a las otras partes del motor. Además, aunque el uso de fórmulas semiempíricas permita aproximarse más a la realidad de lo que se conseguiría con cálculos meramente teóricos, nunca podrán ser fiel reflejo de los valores que finalmente, serían medidos en el prototipo al realizar las pruebas pertinentes.



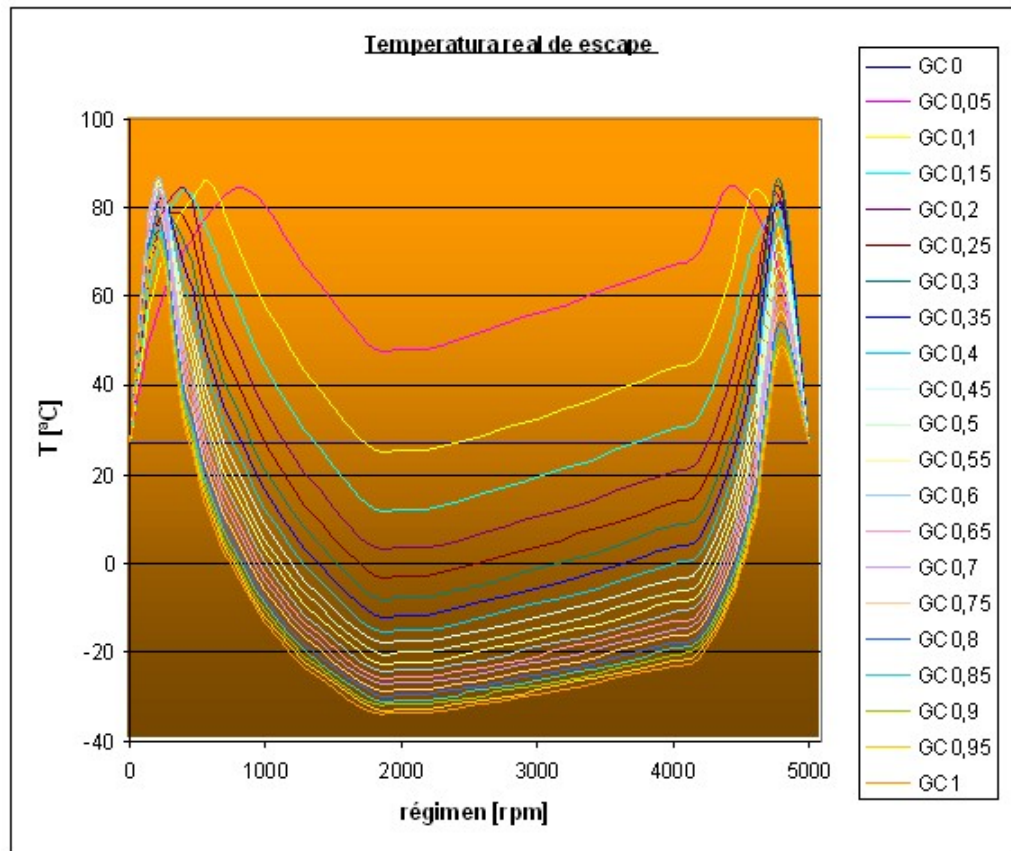


Fig. 47



1.1.10 CONCLUSIÓN FINAL

Todo lo expuesto aquí representa muchos de los estudios, si no los más importantes, que habrían de tenerse presentes a la hora de adaptar el motor de serie para su funcionamiento mediante aire comprimido. Con ellos, se reprogramaría la *UCM* del motor y, manteniendo la mayoría de las entradas, añadiendo otras nuevas necesarias ahora (*caso del S_{PI} por ejemplo*) y suprimiendo las inútiles, se procedería a llevar a cabo los estudios de regulación automática del mismo.

Respecto a las características del depósito, no se ha profundizado mucho en aspectos de diseño, salvo en su forma (*presentada en el plano n°10*), puesto que, debido a sus especiales características de resistencia, fiabilidad y bajo peso, saldría más rentable la subcontratación del mismo a empresas especializadas[†].

Por último, la adaptación del vehículo simplemente supondría sustituir los inyectores de serie por los inyectores-válvula diseñados, unir éstos con el D_{ap} y reprogramar la *UCM* como ya se ha explicado. La adaptación del sistema de refrigeración debería hacerse mediante una limpieza previa del mismo, para no dejar impurezas en el sistema que pudieran ocasionar funcionamientos inadecuados de los procesos de calentamiento del motor. Y para finalizar, debería modificarse el aceite de lubricación por uno de mayor resistencia a las bajas temperaturas existentes en el nuevo motor del Smart neumático.

[†] Si en cambio se ha buscado suministrador, como puede comprobarse en el documento n°3.



1.2.

Estudio Económico



1.2. Estudio económico

1.2.1 VIABILIDAD DE LA ADAPTACIÓN DEL VEHÍCULO

1.2.1.1 Descripción ciclos de conducción. Razonamiento del ciclo escogido

A continuación se expondrán las razones económicas que demuestran que este proyecto es perfectamente válido desde el punto de vista económico.

Para ello se hará una comparación entre ambos motores (*Diesel y Neumático*) durante una conducción urbana. El principal motivo de ello radica en que el coche neumático estaría únicamente destinado para su funcionamiento en ciudad puesto que conducciones agresivas hacen que éste pierda autonomía de manera drástica.

Una comparación entre distintos tipos de conducción demuestra lo anterior. A continuación, se expondrán tres ciclos distintos que han sido estudiados para demostrar esto. A saber:

- Ciclo Homologado: El ciclo de conducción usado para los cálculos de autonomía del automóvil.
- Ciclo de conducción Aceleración-Frenada: Una conducción más agresiva que la anterior que consiste únicamente en una aceleración y una frenada bruscas del vehículo.
- Ciclo de conducción Deportiva: Semejante al anterior pero con una aceleración y una frenada mayores todavía.



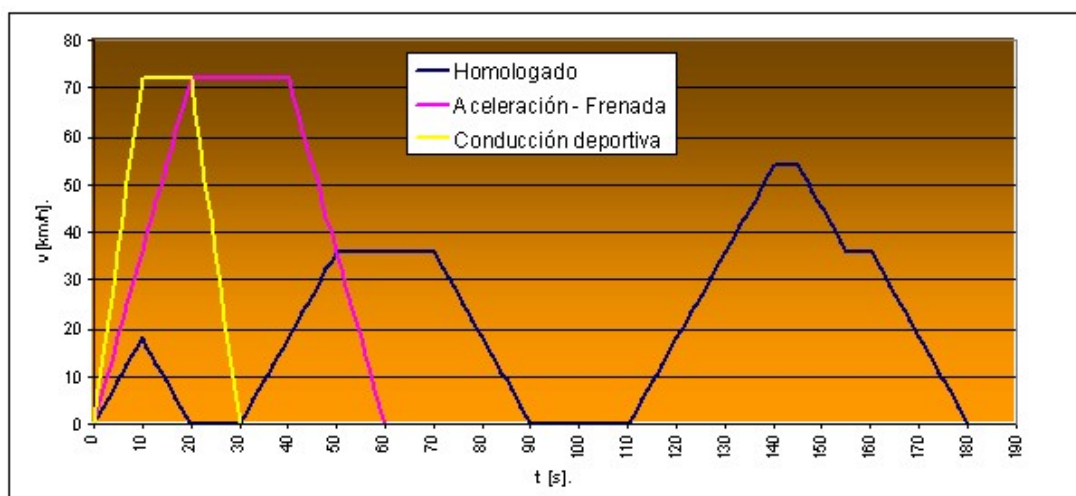


Fig. 48

Los resultados que revelan los cálculos de la autonomía del vehículo para los anteriores modelos de conducción son los siguientes:

	Homologado	Aceleración-frenada	Conducción-deportiva
	OPCIÓN 1	OPCIÓN 1	OPCIÓN 1
AUTONOMÍA TEÓRICA [km]	199,4	99,3	56,4

Tabla II

.Donde queda latente el efecto extremadamente negativo que conducciones más agresivas tienen sobre la autonomía del vehículo.

1.2.1.2 Comparación motor neumático con motor de serie.

El ciclo finalmente escogido para la comparación a llevar a cabo fue el que se denomina “Homologado”. Esta denominación se debe a la semejanza relativamente grande que existe entre este ciclo de conducción propuesto y el que se usa para la homologación de las emisiones de los vehículos de serie.



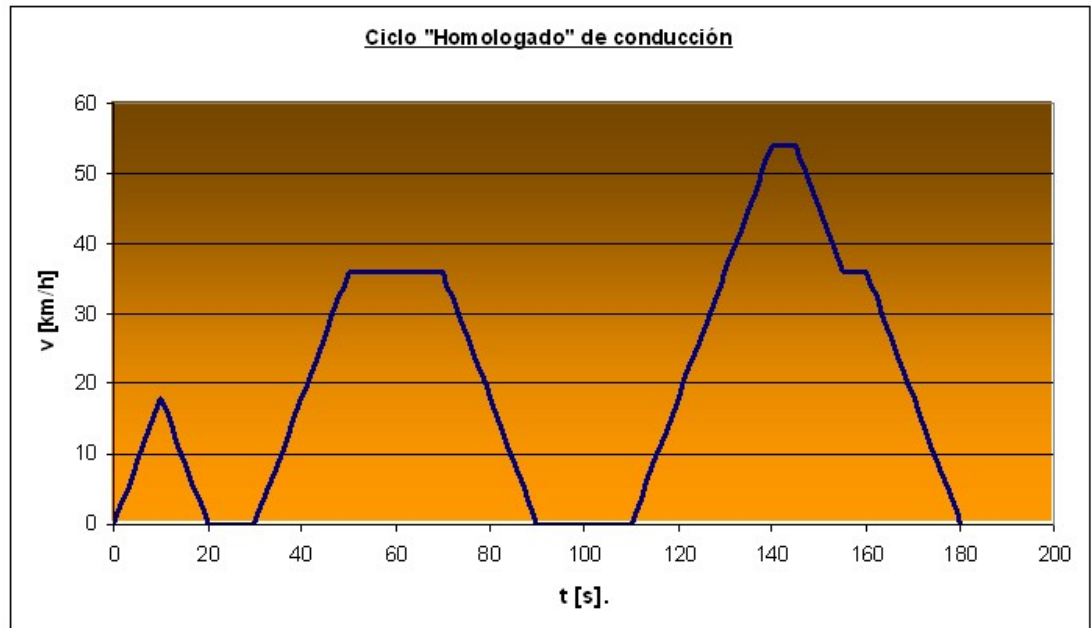


Fig. 49

Para la comparación que va a realizarse se usó el consumo urbano del Smart de serie y se supuso un coste por litro del combustible diesel, ambos los siguientes:

$$g_{SMART} = 0,039 \text{ litros/km}$$

$$\text{Combustible Diesel} = 1,015 \text{ €/litro}$$

Para el motor neumático se usó la autonomía por kilogramo de aire que se calculó en el apartado 1.1.3.2. pero previamente se modificó ésta con el rendimiento másico del vehículo debido a que el depósito, como ya se vio también en 1.1.4., no llega a vaciarse del todo sino que alcanzados los 72 bares ha de considerarse agotado. De acuerdo con esto se tiene:

$$\text{Autonomía por kilo} = 2,51 \text{ km/kg}$$

$$\text{Rendimiento másico: } \eta_{\text{másico}} = 0,76$$

$$\text{Autonomía teórica} = 1,91 \text{ km/kg}$$



Para el cálculo del precio del aire comprimido se tuvo en cuenta el precio de la energía eléctrica supuesto en 1.1.3.2.2. y la energía de compresión de 1.1.3.2.1. y con ambos se obtuvo:

$$\text{Coste}_{\text{aire_comprimido}} = C_e [\text{€/kWh}_e] \cdot G_e [\text{kWh}_e/\text{kg}] = 1,75 \text{ c€/kg}$$

Con los anteriores datos referentes a la autonomía y el costo del llenado del depósito de los mismos, se calculó el rendimiento económico de cada motor, donde se aprecia ya la enorme ventaja que supone el proyecto abordado en términos económicos:

Rendimiento económico		
Motor Diesel	25,26	km/€
Motor Neumático	109,18	km/€

Tabla mm

Para tener una idea del dinero que podría ahorrarse con este sistema supóngase dos conductores, uno con un vehículo con motor térmico y otro con motor neumático, que hagan un uso medio del vehículo de unos $50 \text{ km/día}^\dagger$ unos 225 días al año. Esto supone 11250 km al año. Si dividimos este valor por el rendimiento económico de cada vehículo se tiene que, mientras el propietario del vehículo de serie se ha gastado unos 445€ en todo el año, el conductor del vehículo adaptado únicamente ha utilizado 103€ .

Lo anterior supone un ahorro nada despreciable de $342,28\text{€/año}$. Y por tanto:

AHORRO ECONÓMICO	
M. Neumático Vs M. Térmico	76,86%

Tabla nn

[†] Algo muy sencillo en una ciudad como Madrid simplemente con el hecho de ir y volver al trabajo.



Esto es, “de cada 100€ que se gastan ambos conductores en sus respectivos autos, el poseedor del motor neumático ahorrará 76,86€ cada vez, mientras que el poseedor del motor de serie lo invertirá todo en su vehículo”.



1.2.2 RENTABILIDAD ECONÓMICA DE LA ADAPTACIÓN

1.2.2.1 Cálculos económicos

A continuación y para demostrar la viabilidad económica del proyecto se estudiará la rentabilidad de la inversión que la adaptación del vehículo supone.

Para ello se supondrá un uso más normal del vehículo, que el supuesto anteriormente, que consistiría en la realización de *75km/día (correspondientes, por ejemplo, a ir y volver al trabajo más el uso del utilitario para algún recado más)* durante *230 días laborables al año*. La razón del cambio está en que el escenario anterior no era excesivamente optimista puesto que, en un uso urbano normal, habitualmente se superan los *11250 km/anales* que ello implica. Valiéndonos del ahorro que lo anterior supone (*y que ya fue calculado en 1.2.1.2.*), del coste estimado de la adaptación del Smart de serie y de una estimación de los costes de mantenimiento del vehículo a lo largo de su vida útil, se llevarán a cabo los cálculos referidos al periodo de retorno de la inversión así como a la rentabilidad de la misma.

En cuanto a los costes de mantenimiento del vehículo una vez adaptado, se supuso un desembolso de *15€ cada dos años (correspondientes a una hora de trabajo de un operario más pequeñas reparaciones sin importancia)*.

Además de los datos anteriores, referentes al uso del vehículo, se tomó un valor del incremento del precio del combustible de un *17%* anual, valor aparentemente lógico



en los tiempos que corren[†], una inflación del 4% y el interés de una posible inversión alternativa, diferente a la aquí propuesta, de un 6%.

En resumen, los datos que se tuvieron presente en este estudio fueron los siguientes:

- Inversión inicial: $C_{inv}=4568,81€$
- Ahorro anual: $Ah=524,84€$
- Coste de mantenimiento anual: $C_{man}=7,5€/año$ (15 euros cada dos años)
- Incremento previsto del coste de combustible sustituido (g): 17% anual
- Valor de la inflación actual (i): 4%
- Interés de una inversión alternativa (e): 8%

Con los datos anteriores, puede calcularse el ahorro anual que se va percibiendo. Para ello es preciso ir corrigiendo oportunamente los valores, para tener presente el beneficio que supone el aumento anual del precio del combustible supuesto, así como la disminución que el interés genera sobre el valor actual del dinero.

De igual forma pueden calcularse los gastos de mantenimiento que, de forma semejante, se verán perjudicados por la inflación pero beneficiados por la depreciación que genera el valor de e .

Con todo ello, puede conocerse el beneficio neto que se sacaría cada año posterior a la inversión inicial y ver el tiempo necesario para ver la misma rentabilizada.

Las fórmulas que expresan matemáticamente lo anterior se presentan en la tabla siguiente:

[†] El combustible de automoción subió un 32,7 % de agosto a octubre del 2004 respecto a los niveles alcanzados en el mismo periodo de 2003. Fuente: El Mundo.es: Lunes 29 de noviembre de 2004



Año t	Ahorro anual	$Ah_t = Ah \cdot \left(\frac{1+g}{1+e}\right)^t$	Retorno en t años
	Ahorro neto	$Ah_{neto} = \sum_{t=1}^{t=t-1} Ah_t + Ah \cdot \left(\frac{1+g}{1+e}\right)^t$	
	Mantenimiento anual	$C_{man_t} = C_{man} \cdot \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^t$	
	Mantenimiento neto	$C_{man_{neto}} = \sum_{t=1}^{t=t-1} C_{man_t} + C_{man} \cdot \left(\frac{1+i}{1+e}\right)^t$	
	Beneficio año t	$B_t = Ah_{neto} - C_{man_{neto}} - C_{inv}$	

Tabla oo

A continuación se presentan los resultados del período de retorno de la inversión:

Año t	Ah_t	Ah_{neto}	C_{man_t}	$C_{man_{neto}}$	B_t
1	568,58	568,58	7,22	7,22	-4007,46
2	615,96	1184,54	6,95	14,18	-3398,45
3	667,29	1851,82	6,70	20,87	-2737,86
4	722,90	2574,72	6,45	27,32	-2021,41
5	783,14	3357,86	6,21	33,53	-1244,49
6	848,40	4206,25	5,98	39,51	-402,07
7	919,10	5125,35	5,76	45,27	511,27
8	995,69	6121,04	5,55	50,82	1501,41
9	1078,66	7199,71	5,34	56,16	2574,74
10	1168,55	8368,26	5,14	61,30	3738,15
11	1265,93	9634,19	4,95	66,25	4999,13
12	1371,43	11005,62	4,77	71,02	6365,78
13	1485,71	12491,33	4,59	75,61	7846,90
14	1609,52	14100,85	4,42	80,03	9452,00
15	1743,65	15844,49	4,26	84,29	11191,39
16	1888,95	17733,45	4,10	88,39	13076,24
17	2046,36	19779,81	3,95	92,34	15118,66
18	2216,89	21996,71	3,80	96,14	17331,75
19	2401,64	24398,34	3,66	99,80	19729,73
20	2601,77	27000,11	3,53	103,33	22327,97
21	2818,59	29818,70	3,40	106,73	25143,16
22	3053,47	32872,17	3,27	109,99	28193,36
23	3307,92	36180,09	3,15	113,14	31498,14
24	3583,58	39763,68	3,03	116,17	35078,69
25	3882,22	43645,89	2,92	119,09	38957,99
26	4205,73	47851,63	2,81	121,91	43160,91
27	4556,21	52407,84	2,71	124,61	47714,42



28	4935,90	57343,74	2,61	127,22	52647,71
29	5347,22	62690,96	2,51	129,73	57992,42
30	5792,82	68483,78	2,42	132,15	63782,82
31	6275,56	74759,34	2,33	134,48	70056,05
32	6798,52	81557,86	2,24	136,72	76852,34

Tabla pp

Para distintos valores de la rentabilidad de la inversión alternativa se irán calculando de nuevo los parámetros anteriores de ahorro anual, coste de mantenimiento y beneficio, con el fin de estudiar para qué interés de la inversión alternativa el proyecto dejaría de ser rentable. Dicho interés variable se designará con el parámetro r .

Las fórmulas matemáticas de lo anterior se presentan de nuevo en la tabla:

Año t	Ahorro anual	$Ah_t = Ah \cdot \left(\frac{\left(\frac{1+g}{1+r} \right)^{t+1} - \frac{1+g}{1+r}}{\frac{1+g}{1+r} - 1} \right)$	Retorno en t años
	Mantenimiento anual	$C_{man_t} = C_{man} \cdot \left(\frac{\left(\frac{1+i}{1+r} \right)^{t+1} - \frac{1+i}{1+r}}{\frac{1+i}{1+r} - 1} \right)$	
	Beneficio año t	$B_t = Ah_t - C_{man_t} - C_{inv}$	

Tabla qq

Y los resultados de la TIR serían:

r	Ahorro	Mantenimiento	Beneficio
0,01	12778,34	87,91	8121,61
0,02	11971,43	83,12	7319,50
0,03	11230,69	78,70	6583,18
0,04	10549,80	74,60	5906,38
0,05	9923,14	70,82	5283,52
0,06	9345,68	67,30	4709,57



0,07	8812,91	64,04	4180,06
0,08	8320,77	61,01	3690,95
0,09	7865,62	58,18	3238,62
0,10	7444,19	55,55	2819,83
0,11	7053,55	53,10	2431,64
0,12	6691,02	50,81	2071,40
0,13	6354,22	48,67	1736,74
0,14	6040,96	46,66	1425,49
0,15	5749,30	44,78	1135,71
0,16	5477,46	43,02	865,63
0,17	5223,81	41,36	613,64
0,18	4986,91	39,81	378,30
0,19	4765,42	38,34	158,27
0,20	4558,14	36,96	-47,64
0,21	4363,95	35,66	-240,52
0,22	4181,86	34,43	-421,38
0,23	4010,95	33,27	-591,13
0,24	3850,39	32,18	-750,60
0,25	3699,40	31,14	-900,55
0,26	3557,29	30,16	-1041,67
0,27	3423,42	29,22	-1174,61
0,28	3297,20	28,34	-1299,95
0,29	3178,09	27,50	-1418,22
0,30	3065,59	26,70	-1529,92
0,31	2959,25	25,94	-1635,50
0,32	2858,64	25,22	-1735,38
0,33	2763,39	24,53	-1829,95
0,34	2673,13	23,87	-1919,56
0,35	2587,53	23,25	-2004,52
0,36	2506,30	22,65	-2085,16
0,37	2429,15	22,08	-2161,74
0,38	2355,81	21,53	-2234,53
0,39	2286,06	21,01	-2303,76
0,40	2219,67	20,51	-2369,65
0,41	2156,43	20,03	-2432,41
0,42	2096,15	19,57	-2492,23
0,43	2038,66	19,13	-2549,28
0,44	1983,78	18,71	-2603,74

Tabla rr

1.2.2.2 Conclusión

De los cálculos anteriores se desprende que el retorno de la inversión se produciría a partir de los seis años siguientes a la adaptación del vehículo. Ello supondría,



teniendo en cuenta una vida útil del vehículo de unos *10 años*, que habría cuatro años del uso del vehículo donde se estaría ganando dinero.

Por último, la TIR, nada despreciable, del *19%* indica la rentabilidad del proyecto. A continuación se presenta la gráfica VAN-r que muestra cómo los beneficios van disminuyendo al ir creciendo el interés de la inversión alternativa.

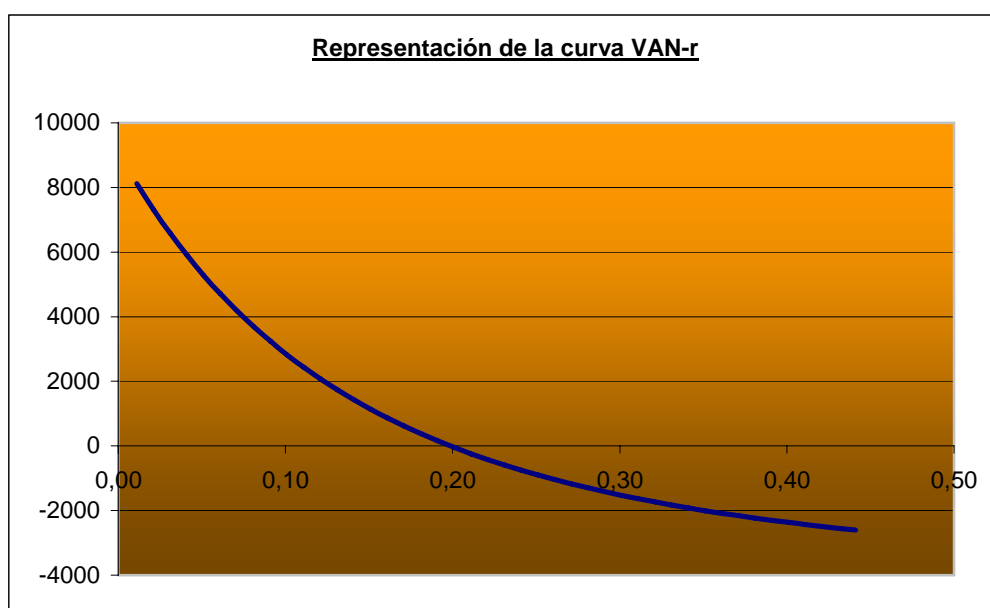


Fig. 50



1.3.

Anexos



1.3. Anexos

1.3.1. Notaciones

- D_{ap} *Depósito de alta presión.*
- D_{reg} *Depósito de regulación de presión.*
- S_{P1} *Sensor de presión del depósito de alta presión*
- S_{P2} *Sensor de presión del depósito de regulación*
- V_{anti1} *Válvula antiretorno para la boca de llenado del depósito de alta*
alta
- V_{P1} *Válvula reguladora de presión para la boca de llenado del*
depósito de alta presión
- Δep *Incremento de energía potencial*
- Δec *Incremento de energía cinética*
- $[kWh_e]$ *Kilovatio hora eléctrico*
- V_{seg1} *Válvula de descarga del depósito de alta presión*
- V_{reg} *Válvula reguladora de presión entre el depósito de alta*
presión y el de regulación.
- V_{adm} *Válvulas de admisión de los cilindros.*
- V_{esc} *Válvulas de escape de los cilindros.*
- V_{anti2} *Válvula antiretorno del depósito de regulación*
- C_{exp} *Cámara de expansión amortiguada del depósito de regulación*
- F_{aire1} *Filtro de aire junto a la boca de llenado del depósito de alta*



- F_{aire2} *Filtro de aire entre el depósito de alta presión y el de regulación*
- Dec_{aguag1} *Decantador de agua gravitacional del depósito de alta presión*
- Col_{esc} *Colectores específicos de escape.*
- C_{res} *Cámara de resonancia en el escape.*
- V_{iny} *Válvula de inyección*
- UCM *Unidad de control del motor o módulo electrónico de control*
- $p.m.s.$ *Punto muerto superior*
- $p.m.i.$ *Punto muerto inferior*
- N *Número total de espiras*



1.3.2. Variables y unidades

• M_e	Par efectivo.....[N·m]
• P_{me}	Presión media efectiva (la del ciclo 2T y relativa).....[bar]
• P_{mi}	Presión media indicada (la del ciclo 2T y relativa).....[bar]
• P'_{me}	Presión media efectiva (la del ciclo 2T y absoluta).....[bar]
• P'_{mi}	Presión media indicada (la del ciclo 2T y absoluta).....[bar]
• $\eta_{económico}$	Valor, en euros, que cuesta recorrer cada kilómetro.....[€/km]
• W_e	Trabajo efectivo.....[J]
• \dot{W}_e	Potencia efectiva.....[W]
• GC	Grado de carga.....[%]
• α	Posición del pedal del acelerador (APP – Accelerator Pedal Position).....[%]
• α_F	Posición del pedal de freno (BPP – Brake Pedal Position).[%]
• n_r	Régimen de giro del cigüeñal.....[rpm]
• R	Constante de la ecuación de estado de gas ideal.....[J/kg/K]
• γ	Coeficiente o índice adiabático.....---
• C_p	Calor específico a presión constante.....[J/kg/K]
• C_v	Calor específico a volumen constante.....[J/kg/K]
• V_T	Cilindrada total.....[m ³]
• V_D	Cilindrada unitaria (por pistón).....[m ³]
• V_{cc}	Volumen de la cámara de combustión.....[m ³]
• P	Presiones relativas.....[bar]



• P'	Presiones absolutas.....[bar]
• W	Trabajos.....[J]
• \dot{W}	Potencias.....[J/s]
• T	Temperaturas.....[K]
• v	Volúmenes específicos.....[m ³ /kg]
• ρ	Densidades.....[m ³ /kg]
• η	Rendimientos.....[pu]
• \dot{m}	Flujos máxicos.....[kg/s]
• c	Porcentaje de la carrera con inyección del aire o que dura la inyección.....[pu]
• c'	Porcentaje del tiempo de inyección teórico que dura la apertura de la válvula.....[pu]
• r	Relación de compresión del motor de serie.....---
• n	Coficiente politrópico de compresión y expansión.....---
• m_{veh}	Masa del vehículo.....[kg]
• C_x	Coficiente de penetración del vehículo.....---
• A_{fp}	Área frontal proyectada del vehículo.....[m ²]
• f	Coficiente de fricción a la rodadura.....---
• d_i	Desarrollo de la transmisión en la marcha i[km/hora/1000rpm]
• r_c	Relación de compresión del compresor.....---
• P'_{turb}	Presión absoluta de soplado del turbo.....[bar]



- $\Delta P'_{turb}$ Incremento de presión diferencial que supone el sistema de sobrealimentación.....[bar]
- C_D Coeficiente de descarga medio del inyector-válvula.....---
- D_p Diámetro interior de la pipa de inyección del aire.....[mm]
- D_s Diámetro de la caña de la válvula.....[mm]
- L_v Levantamiento máximo de la válvula.....[mm]
- D_v Diámetro de la válvula.....[mm]
- μ Permeabilidad magnética del material ferromagnético...[H/m]
- μ_r Permeabilidad magnética relativa del material ferromagnético
- μ_0 Permeabilidad magnética del vacío.....[H/m]
- I Intensidad que circula por la bobina.....[A]
- \bar{R} Radio de la espira media.....[mm]
- L Longitud del solenoide.....[mm]
- n Número de espiras por unidad de longitud.....[espiras/m]
- U_m Energía magnética por unidad de volumen.....[J/m³]
- Φ Flujo magnético.....[wb]
- α_{t0} Coeficiente de temperatura del material para la temperatura de referencia t_0[K⁻¹]
- ρ_{Cu} Resistividad eléctrica del cobre.....[$\mu\Omega\cdot m$]
- ϕ_{cond} Diámetro del hilo del bobinado.....[mm]
- $\mathcal{F}.m.m.$ Fuerza magnetomotriz.....[A]
- A_v Área superior de la válvula.....[mm²]



- m_{av} Masa total del conjunto actuador-válvula.....[kg]
- t_{ap} Tiempo de apertura del inyector.....[ms]
- t_{cierre} Tiempo de cierre del inyector.....[ms]
- k Constante elástica del resorte.....[N/m]
- x_0 Compresión inicial del resorte.....[mm]
- U_{bat} Tensión generada por la batería.....[V]
- X_{apRMS} Valor eficaz de la ley senoidal de la apertura de la válvula.....[mm]
- \ddot{X}_{apRMS} Valor eficaz de la deriva segunda de la ley senoidal de la apertura de la válvula.....[mm/s²]
- $X_{cierreRMS}$ Valor eficaz de la ley senoidal del cierre de la válvula.....[mm]
- $\ddot{X}_{cierreRMS}$ Valor eficaz de la deriva segunda de la ley senoidal del cierre de la válvula.....[mm/s²]
- \dot{Q} Calor.....[W]
- P_m Peso molecular.....[kg/kmol]
- h_m Coeficiente global de película.....[W/m²/K]
- A_p Sección del émbolo.....[mm²]
- T_r Temperatura media del alcohol.....[K]
- T_g Temperatura media del aire a lo largo de un ciclo.....[K]
- k_g Conductividad térmica del aire.....[W/m/K]
- μ Viscosidad del aire.....[N·s/m²]



- m' Gasto másico por unidad de superficie de émbolo....[kg/s/m²]
- C_{pr} Calor específico a presión constante del refrigerante..[J/kg/K]
- C_{inv} Coste total de la adaptación final del Smart.....[€]
- Ah Ahorro anual al precio actual del dinero.....[€]
- Ah_t Ahorro anual al precio del dinero en el año t[€]
- C_{man} Coste de mantenimiento al precio actual del dinero.....[€]
- C_{mant} Coste de mantenimiento al precio del dinero en el año t [€]
- Ah_{neto} Ahorro neto en el año t[€]
- $C_{man_{neto}}$ Coste de mantenimiento neto en el año t[€]
- B_t Beneficio en el año t[€]
- g Incremento anual previsto del precio del combustible.[pu/año]
- i Valor de la inflación actual.....[pu]
- e Interés de una inversión alternativa.....[pu]
- r Rentabilidad inversión alternativa.....[pu]
- T_e Temperatura del alcohol a su entrada al motor.....[°C]
- T_a Temperatura del alcohol a su salida del motor.....[°C]
- C_e Coste aproximado de la electricidad.....[€/kWh_e]
- G_e Gasto eléctrico por kilogramo de aire comprimido...[kWh_e/kg]



1.3.3. Bibliografía

- [MATA78] Mataix, Claudio, “Termodinámica Técnica y Máquinas Térmicas”, Madrid, ICAI. 1978.
- [MUÑO89] Muñoz, M., F.Payri, “Motores de Combustión Interna Alternativos”, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. 1989.
- [GIAC80] Giacosa, Dante. “Motori Endotermici”, Milán, Ulrico Hoepli. 1980.
- [OCHO96] García-Ochoa García, Francisco, “Elementos de Electromagnetismo Clásico”, Madrid, UPCo. 1996.
- [PURCE88] Purcell, Edward M., “Berkeley Physics Course 2/e, Volume 2-Electricity and Magnetism”, Harvard University, McGraw-Hill Book Company. 1988.
- [WARK99] Wark, Kenneth, Donald E. Richards, “Thermodynamics”, McGraw-Hill Book Company. 1999.
- [GIME03] Giménez, Félix, “Apuntes de Motores de Combustión Interna Alternativos”, Madrid, ICAI. 2003.
- [ÇENG94] Çengel, Yunus A., Michael A. Boles, “Thermodynamics”, USA, McGraw-Hill. 1994.
- [SAIZ87] Sáiz Chicharro, Ángel, “Máquinas eléctricas I – Parte 1: Transformadores”, Madrid, ICAI. 1987.



- **[CHAC02]** Chacón de Antonio, F.Julián, “Teoría de Circuitos”, Madrid, ICAI, Departamento de Electrotecnia y Sistemas. 2002.
- **[PAZA70]** Paz Andrade, M.I.; Paz, J.M.; Recacho, E., “Contribución a la microcalorimetría de los calores específicos de sólidos y líquidos”, An. Quim., 1970.
- **[TECN96]** “Apuntes Tecnologías de Fabricación y Tecnología de Máquinas”, Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, 1996.
- **[WHIT79]** White, Frank M., “Fluid Mechanics”, USA, McGraw-Hill. 1979.
- **[INCR02]** Incropera, Frank P., David P. DeWitt, “Fundamentals of Heat and Mass Transfer”, USA, Wiley. 2002.



1.3.4. Tablas y resultados

- **Tabla I:** *Par Efectivo.*
- **Tabla II:** *Potencia efectiva.*
- **Tabla III:** *Presión media efectiva (2T).*
- **Tabla IV:** *Presión media efectiva (4T).*
- **Tabla V:** *Temperatura del punto 3s (m.n.t.I).*
- **Tabla VI:** *Temperatura del punto 3 (m.n.t.I).*
- **Tabla VII:** *Flujo másico de aire demandado del D_{ap} (m.n.t.I).*
- **Tabla VIII:** *Datos para distintos porcentajes de carrera con inyección (m.n.t.II).*
- **Tabla IX:** *Flujo másico de aire demandado del D_{ap} (m.n.t.II).*
- **Tabla X:** *Presión teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III sin turbo).*
- **Tabla XI:** *Temperatura teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III sin turbo).*
- **Tabla XII:** *Masa teórica a inyectar por ciclo (m.n.t.III sin turbo).*
- **Tabla XIII:** *Temperatura teórica de escape (m.n.t.III sin turbo).*
- **Tabla XIV:** *Mapa de las presiones de soplado del sistema de sobrealimentación (m.n.t.III con turbo).*
- **Tabla XV:** *Presión teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III con turbo).*
- **Tabla XVI:** *Temperatura teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III con turbo).*
- **Tabla XVII:** *Temperatura teórica aproximada de escape (m.n.t.III con turbo).*
- **Tabla XVIII:** *Masa teórica a inyectar por ciclo (m.n.t.III con turbo).*
- **Tabla XIX:** *Temperatura real aproximada de escape (m.n.t.III con turbo).*



Tabla I: Par Efectivo

Grado carga [%]	Par efectivo [N-m]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	1,841	3,683	5,524	7,365	9,207	11,048	12,890	14,731	16,572	16,572	16,572	16,045
0,1	0	2,791	5,582	8,373	11,164	13,955	16,746	19,537	22,328	25,119	25,119	25,119	24,320
0,15	0	3,560	7,119	10,679	14,239	17,798	21,358	24,918	28,478	32,037	32,037	32,037	31,019
0,2	0	4,230	8,461	12,691	16,921	21,152	25,382	29,612	33,843	38,073	38,073	38,073	36,863
0,25	0	4,836	9,673	14,509	19,346	24,182	29,018	33,855	38,691	43,528	43,528	43,528	42,144
0,3	0	5,395	10,791	16,186	21,582	26,977	32,373	37,768	43,164	48,559	48,559	48,559	47,016
0,35	0	5,918	11,837	17,755	23,673	29,592	35,510	41,428	47,347	53,265	53,265	53,265	51,572
0,4	0	6,412	12,824	19,236	25,648	32,060	38,472	44,884	51,296	57,708	57,708	57,708	55,873
0,45	0	6,882	13,763	20,645	27,526	34,408	41,289	48,171	55,052	61,934	61,934	61,934	59,965
0,5	0	7,331	14,661	21,992	29,322	36,653	43,984	51,314	58,645	65,975	65,975	65,975	63,878
0,55	0	7,762	15,524	23,286	31,048	38,810	46,572	54,334	62,096	69,858	69,858	69,858	67,637
0,6	0	8,178	16,356	24,534	32,712	40,890	49,068	57,246	65,424	73,602	73,602	73,602	71,262
0,65	0	8,580	17,161	25,741	34,321	42,902	51,482	60,063	68,643	77,223	77,223	77,223	74,768
0,7	0	8,970	17,941	26,911	35,882	44,852	53,823	62,793	71,764	80,734	80,734	80,734	78,168
0,75	0	9,350	18,699	28,049	37,399	46,748	56,098	65,447	74,797	84,147	84,147	84,147	81,472
0,8	0	9,719	19,438	29,156	38,875	48,594	58,313	68,031	77,750	87,469	87,469	87,469	84,688
0,85	0	10,079	20,158	30,236	40,315	50,394	60,473	70,552	80,630	90,709	90,709	90,709	87,825
0,9	0	10,430	20,861	31,291	41,722	52,152	62,583	73,013	83,444	93,874	93,874	93,874	90,890
0,95	0	10,774	21,549	32,323	43,097	53,872	64,646	75,421	86,195	96,969	96,969	96,969	93,887
1	0	11,111	22,222	33,333	44,444	55,556	66,667	77,778	88,889	100,000	100,000	100,000	96,821
Regimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Par efectivo [N·m]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15,519	14,992	14,465	13,938	13,411	12,884	12,358	11,831	11,304	8,478	5,652	2,826	0
23,522	22,723	21,925	21,126	20,328	19,529	18,730	17,932	17,133	12,850	8,567	4,283	0
30,000	28,982	27,963	26,945	25,926	24,908	23,889	22,871	21,852	16,389	10,926	5,463	0
35,652	34,442	33,232	32,021	30,811	29,600	28,390	27,180	25,969	19,477	12,985	6,492	0
40,760	39,376	37,992	36,609	35,225	33,841	32,457	31,074	29,690	22,267	14,845	7,422	0
45,472	43,928	42,384	40,841	39,297	37,753	36,209	34,666	33,122	24,841	16,561	8,280	0
49,878	48,185	46,492	44,798	43,105	41,412	39,718	38,025	36,332	27,249	18,166	9,083	0
54,039	52,204	50,370	48,535	46,701	44,866	43,031	41,197	39,362	29,522	19,681	9,841	0
57,996	56,027	54,058	52,089	50,120	48,151	46,182	44,213	42,245	31,683	21,122	10,561	0
61,781	59,683	57,586	55,488	53,391	51,294	49,196	47,099	45,001	33,751	22,501	11,250	0
65,417	63,196	60,975	58,754	56,533	54,312	52,091	49,871	47,650	35,737	23,825	11,912	0
68,922	66,583	64,243	61,903	59,563	57,223	54,883	52,543	50,204	37,653	25,102	12,551	0
72,313	69,858	67,403	64,948	62,493	60,038	57,583	55,128	52,673	39,505	26,337	13,168	0
75,601	73,035	70,468	67,901	65,335	62,768	60,202	57,635	55,068	41,301	27,534	13,767	0
78,796	76,121	73,446	70,771	68,096	65,421	62,746	60,071	57,396	43,047	28,698	14,349	0
81,908	79,127	76,346	73,565	70,785	68,004	65,223	62,443	59,662	44,746	29,831	14,915	0
84,942	82,058	79,174	76,291	73,407	70,523	67,640	64,756	61,872	46,404	30,936	15,468	0
87,905	84,921	81,937	78,952	75,968	72,984	69,999	67,015	64,031	48,023	32,015	16,008	0
90,804	87,721	84,638	81,556	78,473	75,390	72,307	69,225	66,142	49,607	33,071	16,536	0
93,642	90,463	87,284	84,105	80,926	77,746	74,567	71,388	68,209	51,157	34,105	17,052	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. I



Tabla II: Potencia efectiva

Grado carga [%]	Potencia efectiva [kW]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0,039	0,154	0,347	0,617	0,964	1,388	1,890	2,468	3,124	3,471	3,818	4,033
0,1	0	0,058	0,234	0,526	0,935	1,461	2,104	2,864	3,741	4,735	5,261	5,787	6,112
0,15	0	0,075	0,298	0,671	1,193	1,864	2,684	3,653	4,771	6,039	6,710	7,381	7,796
0,2	0	0,089	0,354	0,797	1,418	2,215	3,190	4,341	5,670	7,177	7,974	8,771	9,265
0,25	0	0,101	0,405	0,912	1,621	2,532	3,647	4,963	6,483	8,205	9,116	10,028	10,592
0,3	0	0,113	0,452	1,017	1,808	2,825	4,068	5,537	7,232	9,153	10,170	11,187	11,816
0,35	0	0,124	0,496	1,116	1,983	3,099	4,462	6,074	7,933	10,040	11,156	12,271	12,961
0,4	0	0,134	0,537	1,209	2,149	3,357	4,835	6,580	8,595	10,878	12,086	13,295	14,043
0,45	0	0,144	0,577	1,297	2,306	3,603	5,189	7,062	9,224	11,674	12,971	14,269	15,071
0,5	0	0,154	0,614	1,382	2,457	3,838	5,527	7,523	9,826	12,436	13,818	15,200	16,054
0,55	0	0,163	0,650	1,463	2,601	4,064	5,852	7,966	10,404	13,168	14,631	16,094	16,999
0,6	0	0,171	0,685	1,542	2,740	4,282	6,166	8,393	10,962	13,874	15,415	16,957	17,910
0,65	0	0,180	0,719	1,617	2,875	4,493	6,469	8,806	11,501	14,556	16,174	17,791	18,791
0,7	0	0,188	0,752	1,691	3,006	4,697	6,764	9,206	12,024	15,218	16,909	18,600	19,646
0,75	0	0,196	0,783	1,762	3,133	4,895	7,049	9,595	12,532	15,861	17,624	19,386	20,476
0,8	0	0,204	0,814	1,832	3,257	5,089	7,328	9,974	13,027	16,488	18,319	20,151	21,284
0,85	0	0,211	0,844	1,900	3,377	5,277	7,599	10,343	13,510	17,098	18,998	20,898	22,073
0,9	0	0,218	0,874	1,966	3,495	5,461	7,864	10,704	13,981	17,695	19,661	21,627	22,843
0,95	0	0,226	0,903	2,031	3,611	5,641	8,124	11,057	14,442	18,278	20,309	22,340	23,596
1	0	0,233	0,931	2,094	3,723	5,818	8,378	11,403	14,893	18,850	20,944	23,038	24,334
Regimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Potencia efectiva [kW]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,225	4,396	4,544	4,671	4,775	4,857	4,917	4,956	4,972	3,906	2,723	1,420	0
6,404	6,663	6,888	7,079	7,238	7,362	7,454	7,511	7,536	5,921	4,127	2,153	0
8,168	8,498	8,785	9,029	9,231	9,390	9,506	9,580	9,611	7,552	5,263	2,746	0
9,707	10,099	10,440	10,730	10,970	11,159	11,297	11,385	11,422	8,974	6,255	3,263	0
11,098	11,546	11,936	12,268	12,542	12,758	12,916	13,016	13,058	10,260	7,151	3,731	0
12,381	12,880	13,315	13,686	13,992	14,233	14,409	14,521	14,568	11,446	7,978	4,162	0
13,580	14,129	14,606	15,012	15,347	15,612	15,805	15,928	15,979	12,555	8,751	4,566	0
14,713	15,307	15,824	16,264	16,628	16,914	17,124	17,256	17,312	13,603	9,481	4,946	0
15,791	16,428	16,983	17,455	17,845	18,153	18,378	18,520	18,580	14,599	10,175	5,309	0
16,821	17,500	18,091	18,594	19,010	19,337	19,577	19,729	19,793	15,551	10,839	5,655	0
17,811	18,530	19,156	19,689	20,128	20,475	20,729	20,890	20,957	16,467	11,477	5,988	0
18,766	19,523	20,182	20,744	21,207	21,573	21,840	22,009	22,081	17,349	12,092	6,309	0
19,689	20,484	21,175	21,764	22,251	22,634	22,914	23,092	23,167	18,203	12,687	6,619	0
20,584	21,415	22,138	22,754	23,262	23,663	23,956	24,142	24,220	19,030	13,264	6,920	0
21,454	22,320	23,074	23,716	24,245	24,663	24,969	25,162	25,244	19,835	13,824	7,213	0
22,301	23,201	23,985	24,652	25,203	25,637	25,955	26,156	26,241	20,618	14,370	7,497	0
23,127	24,061	24,873	25,565	26,136	26,587	26,916	27,125	27,213	21,381	14,902	7,775	0
23,934	24,900	25,741	26,457	27,048	27,514	27,855	28,071	28,162	22,127	15,422	8,046	0
24,723	25,721	26,590	27,330	27,940	28,421	28,774	28,997	29,091	22,857	15,931	8,312	0
25,496	26,525	27,421	28,184	28,813	29,310	29,673	29,903	30,000	23,571	16,429	8,571	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. II



Tabla III: Presión media efectiva (2T)

Grado carga [%]		Presión media efectiva 2T [bar]											
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0,145	0,290	0,434	0,579	0,724	0,869	1,014	1,158	1,303	1,303	1,303	1,262
0,1	0	0,219	0,439	0,658	0,878	1,097	1,317	1,536	1,756	1,975	1,975	1,975	1,913
0,15	0	0,280	0,560	0,840	1,120	1,400	1,680	1,959	2,239	2,519	2,519	2,519	2,439
0,2	0	0,333	0,665	0,998	1,331	1,663	1,996	2,329	2,661	2,994	2,994	2,994	2,899
0,25	0	0,380	0,761	1,141	1,521	1,902	2,282	2,662	3,043	3,423	3,423	3,423	3,314
0,3	0	0,424	0,849	1,273	1,697	2,121	2,546	2,970	3,394	3,819	3,819	3,819	3,697
0,35	0	0,465	0,931	1,396	1,862	2,327	2,792	3,258	3,723	4,189	4,189	4,189	4,055
0,4	0	0,504	1,008	1,513	2,017	2,521	3,025	3,530	4,034	4,538	4,538	4,538	4,394
0,45	0	0,541	1,082	1,623	2,165	2,706	3,247	3,788	4,329	4,870	4,870	4,870	4,716
0,5	0	0,576	1,153	1,729	2,306	2,882	3,459	4,035	4,612	5,188	5,188	5,188	5,023
0,55	0	0,610	1,221	1,831	2,442	3,052	3,662	4,273	4,883	5,494	5,494	5,494	5,319
0,6	0	0,643	1,286	1,929	2,572	3,216	3,859	4,502	5,145	5,788	5,788	5,788	5,604
0,65	0	0,675	1,349	2,024	2,699	3,374	4,048	4,723	5,398	6,073	6,073	6,073	5,880
0,7	0	0,705	1,411	2,116	2,822	3,527	4,233	4,938	5,643	6,349	6,349	6,349	6,147
0,75	0	0,735	1,470	2,206	2,941	3,676	4,411	5,147	5,882	6,617	6,617	6,617	6,407
0,8	0	0,764	1,529	2,293	3,057	3,821	4,586	5,350	6,114	6,878	6,878	6,878	6,660
0,85	0	0,793	1,585	2,378	3,170	3,963	4,755	5,548	6,341	7,133	7,133	7,133	6,906
0,9	0	0,820	1,640	2,461	3,281	4,101	4,921	5,742	6,562	7,382	7,382	7,382	7,147
0,95	0	0,847	1,695	2,542	3,389	4,236	5,084	5,931	6,778	7,625	7,625	7,625	7,383
1	0	0,874	1,748	2,621	3,495	4,369	5,243	6,116	6,990	7,864	7,864	7,864	7,614
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Presión media efectiva 2T [bar]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1,220	1,179	1,137	1,096	1,055	1,013	0,972	0,930	0,889	0,667	0,444	0,222	0
1,850	1,787	1,724	1,661	1,599	1,536	1,473	1,410	1,347	1,011	0,674	0,337	0
2,359	2,279	2,199	2,119	2,039	1,959	1,879	1,799	1,718	1,289	0,859	0,430	0
2,804	2,708	2,613	2,518	2,423	2,328	2,233	2,137	2,042	1,532	1,021	0,511	0
3,205	3,096	2,988	2,879	2,770	2,661	2,552	2,444	2,335	1,751	1,167	0,584	0
3,576	3,454	3,333	3,212	3,090	2,969	2,847	2,726	2,605	1,953	1,302	0,651	0
3,922	3,789	3,656	3,523	3,390	3,257	3,123	2,990	2,857	2,143	1,429	0,714	0
4,250	4,105	3,961	3,817	3,672	3,528	3,384	3,240	3,095	2,322	1,548	0,774	0
4,561	4,406	4,251	4,096	3,941	3,787	3,632	3,477	3,322	2,492	1,661	0,831	0
4,858	4,693	4,528	4,364	4,199	4,034	3,869	3,704	3,539	2,654	1,769	0,885	0
5,144	4,970	4,795	4,620	4,446	4,271	4,096	3,922	3,747	2,810	1,874	0,937	0
5,420	5,236	5,052	4,868	4,684	4,500	4,316	4,132	3,948	2,961	1,974	0,987	0
5,687	5,494	5,300	5,107	4,914	4,721	4,528	4,335	4,142	3,107	2,071	1,036	0
5,945	5,743	5,541	5,340	5,138	4,936	4,734	4,532	4,330	3,248	2,165	1,083	0
6,196	5,986	5,776	5,565	5,355	5,145	4,934	4,724	4,513	3,385	2,257	1,128	0
6,441	6,222	6,004	5,785	5,566	5,348	5,129	4,910	4,692	3,519	2,346	1,173	0
6,680	6,453	6,226	5,999	5,773	5,546	5,319	5,092	4,866	3,649	2,433	1,216	0
6,913	6,678	6,443	6,209	5,974	5,739	5,505	5,270	5,035	3,776	2,518	1,259	0
7,141	6,898	6,656	6,413	6,171	5,929	5,686	5,444	5,201	3,901	2,601	1,300	0
7,364	7,114	6,864	6,614	6,364	6,114	5,864	5,614	5,364	4,023	2,682	1,341	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. III



Tabla IV: Presión media efectiva (4T)

Grado carga [%]	Presión media efectiva 4T [bar]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0,290	0,579	0,869	1,158	1,448	1,738	2,027	2,317	2,606	2,606	2,606	2,524
0,1	0	0,439	0,878	1,317	1,756	2,195	2,634	3,073	3,512	3,951	3,951	3,951	3,825
0,15	0	0,560	1,120	1,680	2,239	2,799	3,359	3,919	4,479	5,039	5,039	5,039	4,879
0,2	0	0,665	1,331	1,996	2,661	3,327	3,992	4,657	5,323	5,988	5,988	5,988	5,798
0,25	0	0,761	1,521	2,282	3,043	3,803	4,564	5,325	6,085	6,846	6,846	6,846	6,628
0,3	0	0,849	1,697	2,546	3,394	4,243	5,091	5,940	6,789	7,637	7,637	7,637	7,394
0,35	0	0,931	1,862	2,792	3,723	4,654	5,585	6,516	7,446	8,377	8,377	8,377	8,111
0,4	0	1,008	2,017	3,025	4,034	5,042	6,051	7,059	8,068	9,076	9,076	9,076	8,788
0,45	0	1,082	2,165	3,247	4,329	5,412	6,494	7,576	8,658	9,741	9,741	9,741	9,431
0,5	0	1,153	2,306	3,459	4,612	5,765	6,918	8,071	9,223	10,376	10,376	10,376	10,046
0,55	0	1,221	2,442	3,662	4,883	6,104	7,325	8,545	9,766	10,987	10,987	10,987	10,638
0,6	0	1,286	2,572	3,859	5,145	6,431	7,717	9,003	10,290	11,576	11,576	11,576	11,208
0,65	0	1,349	2,699	4,048	5,398	6,747	8,097	9,446	10,796	12,145	12,145	12,145	11,759
0,7	0	1,411	2,822	4,233	5,643	7,054	8,465	9,876	11,287	12,698	12,698	12,698	12,294
0,75	0	1,470	2,941	4,411	5,882	7,352	8,823	10,293	11,764	13,234	13,234	13,234	12,814
0,8	0	1,529	3,057	4,586	6,114	7,643	9,171	10,700	12,228	13,757	13,757	13,757	13,319
0,85	0	1,585	3,170	4,755	6,341	7,926	9,511	11,096	12,681	14,266	14,266	14,266	13,813
0,9	0	1,640	3,281	4,921	6,562	8,202	9,843	11,483	13,124	14,764	14,764	14,764	14,295
0,95	0	1,695	3,389	5,084	6,778	8,473	10,167	11,862	13,556	15,251	15,251	15,251	14,766
1	0	1,748	3,495	5,243	6,990	8,738	10,485	12,233	13,980	15,728	15,728	15,728	15,228
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Presión media efectiva 4T [bar]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,441	2,358	2,275	2,192	2,109	2,026	1,944	1,861	1,778	1,333	0,889	0,444	0
3,699	3,574	3,448	3,323	3,197	3,071	2,946	2,820	2,695	2,021	1,347	0,674	0
4,718	4,558	4,398	4,238	4,078	3,917	3,757	3,597	3,437	2,578	1,718	0,859	0
5,607	5,417	5,227	5,036	4,846	4,655	4,465	4,275	4,084	3,063	2,042	1,021	0
6,411	6,193	5,975	5,758	5,540	5,322	5,105	4,887	4,670	3,502	2,335	1,167	0
7,152	6,909	6,666	6,423	6,180	5,938	5,695	5,452	5,209	3,907	2,605	1,302	0
7,845	7,578	7,312	7,046	6,779	6,513	6,247	5,980	5,714	4,286	2,857	1,429	0
8,499	8,210	7,922	7,633	7,345	7,056	6,768	6,479	6,191	4,643	3,095	1,548	0
9,121	8,812	8,502	8,192	7,883	7,573	7,263	6,954	6,644	4,983	3,322	1,661	0
9,717	9,387	9,057	8,727	8,397	8,067	7,737	7,408	7,078	5,308	3,539	1,769	0
10,288	9,939	9,590	9,241	8,891	8,542	8,193	7,843	7,494	5,621	3,747	1,874	0
10,840	10,472	10,104	9,736	9,368	9,000	8,632	8,264	7,896	5,922	3,948	1,974	0
11,373	10,987	10,601	10,215	9,829	9,443	9,056	8,670	8,284	6,213	4,142	2,071	0
11,890	11,487	11,083	10,679	10,276	9,872	9,468	9,065	8,661	6,496	4,330	2,165	0
12,393	11,972	11,551	11,131	10,710	10,289	9,868	9,448	9,027	6,770	4,513	2,257	0
12,882	12,445	12,007	11,570	11,133	10,695	10,258	9,821	9,383	7,038	4,692	2,346	0
13,359	12,906	12,452	11,999	11,545	11,092	10,638	10,185	9,731	7,298	4,866	2,433	0
13,825	13,356	12,887	12,417	11,948	11,479	11,009	10,540	10,071	7,553	5,035	2,518	0
14,281	13,796	13,312	12,827	12,342	11,857	11,372	10,887	10,403	7,802	5,201	2,601	0
14,728	14,228	13,728	13,228	12,728	12,228	11,728	11,228	10,728	8,046	5,364	2,682	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. IV



Tabla V: Temperatura del punto 3s (m.n.t.I)

Grado carga [%]	Temperatura del punto 3s [°C]												
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
0,05	27,00	15,63	5,97	-2,38	-9,72	-16,23	-22,08	-27,38	-32,20	-36,63	-36,63	-36,63	-35,40
0,1	27,00	10,47	-2,63	-13,37	-22,43	-30,22	-37,03	-43,05	-48,44	-53,30	-53,30	-53,30	-51,96
0,15	27,00	6,57	-8,79	-20,96	-30,95	-39,38	-46,63	-52,97	-58,58	-63,59	-63,59	-63,59	-62,21
0,2	27,00	3,37	-13,68	-26,83	-37,43	-46,24	-53,74	-60,23	-65,95	-71,03	-71,03	-71,03	-69,63
0,25	27,00	0,61	-17,77	-31,64	-42,66	-51,72	-59,37	-65,96	-71,73	-76,83	-76,83	-76,83	-75,43
0,3	27,00	-1,83	-21,30	-35,73	-47,05	-56,29	-64,04	-70,68	-76,47	-81,57	-81,57	-81,57	-80,17
0,35	27,00	-4,03	-24,41	-39,29	-50,84	-60,20	-68,02	-74,69	-80,48	-85,58	-85,58	-85,58	-84,18
0,4	27,00	-6,03	-27,20	-42,43	-54,17	-63,62	-71,48	-78,16	-83,95	-89,04	-89,04	-89,04	-87,64
0,45	27,00	-7,87	-29,72	-45,26	-57,14	-66,66	-74,54	-81,23	-87,00	-92,07	-92,07	-92,07	-90,69
0,5	27,00	-9,59	-32,03	-47,82	-59,82	-69,39	-77,28	-83,96	-89,73	-94,78	-94,78	-94,78	-93,40
0,55	27,00	-11,18	-34,15	-50,16	-62,25	-71,86	-79,76	-86,44	-92,19	-97,21	-97,21	-97,21	-95,84
0,6	27,00	-12,68	-36,13	-52,32	-64,49	-74,12	-82,03	-88,69	-94,42	-99,43	-99,43	-99,43	-98,06
0,65	27,00	-14,10	-37,97	-54,32	-66,55	-76,20	-84,11	-90,76	-96,47	-101,45	-101,45	-101,45	-100,09
0,7	27,00	-15,44	-39,69	-56,19	-68,47	-78,13	-86,03	-92,66	-98,36	-103,32	-103,32	-103,32	-101,96
0,75	27,00	-16,71	-41,31	-57,93	-70,26	-79,93	-87,82	-94,44	-100,11	-105,05	-105,05	-105,05	-103,70
0,8	27,00	-17,92	-42,85	-59,57	-71,93	-81,60	-89,48	-96,09	-101,74	-106,66	-106,66	-106,66	-105,32
0,85	27,00	-19,08	-44,30	-61,12	-73,51	-83,18	-91,05	-97,63	-103,27	-108,17	-108,17	-108,17	-106,83
0,9	27,00	-20,19	-45,68	-62,59	-74,99	-84,67	-92,52	-99,09	-104,70	-109,58	-109,58	-109,58	-108,25
0,95	27,00	-21,25	-46,99	-63,97	-76,40	-86,07	-93,91	-100,46	-106,05	-110,91	-110,91	-110,91	-109,58
1	27,00	-22,27	-48,24	-65,30	-77,73	-87,40	-95,22	-101,75	-107,33	-112,17	-112,17	-112,17	-110,85
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura del punto 3s [°C]												
27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
-34,14	-32,85	-31,53	-30,18	-28,79	-27,36	-25,90	-24,39	-22,85	-13,74	-2,92	10,28	27,00
-50,58	-49,16	-47,69	-46,19	-44,64	-43,03	-41,38	-39,67	-37,91	-27,27	-14,05	3,12	27,00
-60,79	-59,32	-57,80	-56,24	-54,62	-52,95	-51,22	-49,42	-47,56	-36,20	-21,71	-2,12	27,00
-68,19	-66,70	-65,16	-63,57	-61,92	-60,22	-58,45	-56,61	-54,69	-42,93	-27,64	-6,35	27,00
-73,98	-72,48	-70,94	-69,33	-67,67	-65,94	-64,15	-62,29	-60,35	-48,33	-32,49	-9,93	27,00
-78,73	-77,23	-75,68	-74,07	-72,40	-70,66	-68,86	-66,98	-65,02	-52,84	-36,60	-13,05	27,00
-82,74	-81,24	-79,69	-78,08	-76,41	-74,67	-72,86	-70,97	-69,00	-56,71	-40,18	-15,82	27,00
-86,20	-84,71	-83,16	-81,55	-79,88	-78,14	-76,33	-74,44	-72,47	-60,10	-43,34	-18,32	27,00
-89,25	-87,76	-86,22	-84,61	-82,94	-81,21	-79,40	-77,51	-75,53	-63,12	-46,18	-20,59	27,00
-91,97	-90,48	-88,94	-87,34	-85,68	-83,95	-82,14	-80,25	-78,27	-65,83	-48,75	-22,69	27,00
-94,42	-92,94	-91,40	-89,81	-88,15	-86,42	-84,61	-82,73	-80,75	-68,29	-51,11	-24,63	27,00
-96,64	-95,17	-93,64	-92,05	-90,40	-88,67	-86,87	-84,99	-83,02	-70,55	-53,27	-26,44	27,00
-98,68	-97,21	-95,69	-94,11	-92,46	-90,74	-88,94	-87,06	-85,10	-72,63	-55,28	-28,13	27,00
-100,56	-99,10	-97,58	-96,01	-94,36	-92,65	-90,86	-88,98	-87,02	-74,55	-57,15	-29,73	27,00
-102,30	-100,85	-99,34	-97,77	-96,13	-94,42	-92,63	-90,76	-88,80	-76,35	-58,90	-31,24	27,00
-103,92	-102,48	-100,97	-99,41	-97,77	-96,07	-94,29	-92,42	-90,47	-78,03	-60,55	-32,66	27,00
-105,44	-104,00	-102,50	-100,94	-99,31	-97,62	-95,84	-93,98	-92,03	-79,61	-62,10	-34,02	27,00
-106,87	-105,43	-103,94	-102,38	-100,76	-99,07	-97,30	-95,45	-93,50	-81,09	-63,56	-35,31	27,00
-108,21	-106,78	-105,29	-103,74	-102,13	-100,44	-98,68	-96,83	-94,89	-82,50	-64,96	-36,54	27,00
-109,48	-108,05	-106,57	-105,03	-103,42	-101,74	-99,98	-98,13	-96,20	-83,83	-66,28	-37,72	27,00
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. V



Tabla VI: Temperatura del punto 3 (m.n.t.I)

Grado carga [%]	Temperatura del punto 3 [°C]												
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
0,05	27,00	16,20	7,02	-0,91	-7,88	-14,07	-19,63	-24,66	-29,24	-33,45	-33,45	-33,45	-32,28
0,1	27,00	11,29	-1,14	-11,35	-19,96	-27,36	-33,82	-39,55	-44,67	-49,29	-49,29	-49,29	-48,01
0,15	27,00	7,60	-7,00	-18,56	-28,06	-36,06	-42,95	-48,97	-54,30	-59,06	-59,06	-59,06	-57,75
0,2	27,00	4,55	-11,65	-24,14	-34,20	-42,58	-49,70	-55,87	-61,30	-66,13	-66,13	-66,13	-64,80
0,25	27,00	1,93	-15,53	-28,71	-39,18	-47,79	-55,05	-61,31	-66,79	-71,64	-71,64	-71,64	-70,31
0,3	27,00	-0,39	-18,89	-32,59	-43,35	-52,13	-59,49	-65,80	-71,29	-76,15	-76,15	-76,15	-74,81
0,35	27,00	-2,48	-21,84	-35,97	-46,95	-55,84	-63,27	-69,60	-75,10	-79,95	-79,95	-79,95	-78,62
0,4	27,00	-4,38	-24,49	-38,96	-50,11	-59,09	-66,56	-72,90	-78,40	-83,23	-83,23	-83,23	-81,91
0,45	27,00	-6,13	-26,88	-41,65	-52,93	-61,98	-69,46	-75,81	-81,30	-86,12	-86,12	-86,12	-84,80
0,5	27,00	-7,76	-29,07	-44,08	-55,48	-64,57	-72,07	-78,42	-83,89	-88,69	-88,69	-88,69	-87,38
0,55	27,00	-9,27	-31,10	-46,30	-57,79	-66,92	-74,42	-80,77	-86,23	-91,00	-91,00	-91,00	-89,70
0,6	27,00	-10,70	-32,97	-48,36	-59,91	-69,06	-76,57	-82,91	-88,35	-93,11	-93,11	-93,11	-91,81
0,65	27,00	-12,04	-34,72	-50,26	-61,87	-71,04	-78,55	-84,87	-90,29	-95,03	-95,03	-95,03	-93,74
0,7	27,00	-13,32	-36,36	-52,03	-63,69	-72,87	-80,38	-86,68	-92,09	-96,80	-96,80	-96,80	-95,52
0,75	27,00	-14,52	-37,90	-53,69	-65,39	-74,58	-82,08	-88,36	-93,75	-98,45	-98,45	-98,45	-97,17
0,8	27,00	-15,68	-39,35	-55,25	-66,98	-76,17	-83,66	-89,93	-95,30	-99,98	-99,98	-99,98	-98,70
0,85	27,00	-16,77	-40,73	-56,72	-68,48	-77,67	-85,15	-91,40	-96,75	-101,41	-101,41	-101,41	-100,14
0,9	27,00	-17,83	-42,04	-58,11	-69,89	-79,08	-86,54	-92,78	-98,11	-102,75	-102,75	-102,75	-101,49
0,95	27,00	-18,84	-43,29	-59,43	-71,23	-80,41	-87,86	-94,08	-99,40	-104,02	-104,02	-104,02	-102,76
1	27,00	-19,81	-44,48	-60,68	-72,50	-81,68	-89,11	-95,32	-100,61	-105,21	-105,21	-105,21	-103,96
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura del punto 3 [°C]												
27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
-31,08	-29,86	-28,60	-27,32	-26,00	-24,64	-23,25	-21,82	-20,36	-11,70	-1,42	11,12	27,00
-46,70	-45,35	-43,96	-42,53	-41,05	-39,53	-37,96	-36,34	-34,66	-24,55	-12,00	4,31	27,00
-56,40	-55,00	-53,56	-52,08	-50,54	-48,95	-47,31	-45,60	-43,83	-33,04	-19,28	-0,67	27,00
-63,43	-62,02	-60,56	-59,04	-57,48	-55,86	-54,17	-52,43	-50,61	-39,43	-24,90	-4,68	27,00
-68,93	-67,51	-66,04	-64,52	-62,94	-61,30	-59,59	-57,82	-55,98	-44,56	-29,51	-8,08	27,00
-73,44	-72,02	-70,54	-69,01	-67,43	-65,78	-64,07	-62,28	-60,42	-48,85	-33,42	-11,04	27,00
-77,25	-75,83	-74,35	-72,82	-71,24	-69,59	-67,87	-66,07	-64,20	-52,53	-36,82	-13,68	27,00
-80,54	-79,12	-77,65	-76,12	-74,54	-72,89	-71,17	-69,37	-67,50	-55,75	-39,83	-16,05	27,00
-83,44	-82,02	-80,56	-79,03	-77,45	-75,80	-74,08	-72,28	-70,41	-58,61	-42,52	-18,21	27,00
-86,02	-84,61	-83,15	-81,63	-80,05	-78,40	-76,68	-74,89	-73,01	-61,19	-44,97	-20,20	27,00
-88,34	-86,94	-85,48	-83,97	-82,39	-80,75	-79,03	-77,24	-75,37	-63,53	-47,20	-22,05	27,00
-90,46	-89,06	-87,61	-86,10	-84,53	-82,89	-81,18	-79,39	-77,52	-65,67	-49,26	-23,77	27,00
-92,40	-91,00	-89,56	-88,05	-86,49	-84,85	-83,15	-81,36	-79,49	-67,65	-51,17	-25,38	27,00
-94,18	-92,79	-91,35	-89,86	-88,29	-86,66	-84,96	-83,18	-81,32	-69,48	-52,94	-26,89	27,00
-95,84	-94,46	-93,02	-91,53	-89,97	-88,35	-86,65	-84,87	-83,01	-71,18	-54,61	-28,32	27,00
-97,38	-96,00	-94,57	-93,09	-91,53	-89,92	-88,22	-86,45	-84,60	-72,78	-56,17	-29,68	27,00
-98,82	-97,45	-96,03	-94,54	-93,00	-91,39	-89,70	-87,93	-86,08	-74,28	-57,64	-30,97	27,00
-100,17	-98,81	-97,39	-95,91	-94,37	-92,77	-91,08	-89,32	-87,47	-75,69	-59,04	-32,19	27,00
-101,45	-100,09	-98,68	-97,21	-95,67	-94,07	-92,39	-90,64	-88,79	-77,02	-60,36	-33,37	27,00
-102,65	-101,30	-99,89	-98,43	-96,90	-95,30	-93,63	-91,88	-90,04	-78,29	-61,61	-34,49	27,00
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. VI



Tabla VII: Flujo másico de aire demandado del D_{ap} (m.n.t.I)

Grado carga [%]	Flujo másico de aire demandado de D_{ap} [kg/s]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0,0036	0,0077	0,0124	0,0176	0,0234	0,0297	0,0365	0,0437	0,0515	0,0572	0,0630	0,0678
0,1	0	0,0037	0,0083	0,0137	0,0199	0,0268	0,0345	0,0429	0,0520	0,0619	0,0687	0,0756	0,0812
0,15	0	0,0038	0,0087	0,0147	0,0216	0,0295	0,0382	0,0479	0,0585	0,0699	0,0777	0,0855	0,0917
0,2	0	0,0039	0,0091	0,0155	0,0231	0,0317	0,0415	0,0522	0,0640	0,0768	0,0854	0,0939	0,1006
0,25	0	0,0040	0,0095	0,0163	0,0244	0,0338	0,0443	0,0560	0,0689	0,0829	0,0921	0,1013	0,1085
0,3	0	0,0041	0,0098	0,0170	0,0256	0,0356	0,0469	0,0595	0,0733	0,0885	0,0983	0,1081	0,1157
0,35	0	0,0042	0,0101	0,0177	0,0267	0,0373	0,0493	0,0627	0,0775	0,0936	0,1040	0,1144	0,1223
0,4	0	0,0043	0,0104	0,0183	0,0278	0,0389	0,0515	0,0657	0,0813	0,0984	0,1093	0,1202	0,1285
0,45	0	0,0043	0,0107	0,0188	0,0288	0,0404	0,0536	0,0685	0,0849	0,1029	0,1143	0,1257	0,1344
0,5	0	0,0044	0,0109	0,0194	0,0297	0,0418	0,0556	0,0711	0,0883	0,1072	0,1191	0,1310	0,1399
0,55	0	0,0045	0,0112	0,0199	0,0306	0,0431	0,0575	0,0737	0,0916	0,1112	0,1236	0,1360	0,1452
0,6	0	0,0045	0,0114	0,0204	0,0314	0,0444	0,0593	0,0761	0,0947	0,1151	0,1279	0,1407	0,1503
0,65	0	0,0046	0,0116	0,0209	0,0323	0,0457	0,0611	0,0785	0,0977	0,1189	0,1321	0,1453	0,1552
0,7	0	0,0046	0,0118	0,0213	0,0330	0,0469	0,0628	0,0807	0,1007	0,1225	0,1362	0,1498	0,1598
0,75	0	0,0047	0,0120	0,0218	0,0338	0,0480	0,0644	0,0829	0,1035	0,1260	0,1400	0,1541	0,1644
0,8	0	0,0048	0,0122	0,0222	0,0345	0,0492	0,0660	0,0850	0,1062	0,1294	0,1438	0,1582	0,1688
0,85	0	0,0048	0,0124	0,0226	0,0353	0,0503	0,0675	0,0871	0,1088	0,1327	0,1475	0,1622	0,1731
0,9	0	0,0049	0,0126	0,0230	0,0360	0,0513	0,0690	0,0891	0,1114	0,1359	0,1511	0,1662	0,1772
0,95	0	0,0049	0,0128	0,0234	0,0366	0,0524	0,0705	0,0910	0,1139	0,1391	0,1545	0,1700	0,1813
1	0	0,0050	0,0130	0,0238	0,0373	0,0534	0,0719	0,0929	0,1163	0,1421	0,1579	0,1737	0,1852
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Flujo másico de aire demandado de Dap [kg/s]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0725	0,0771	0,0815	0,0857	0,0898	0,0938	0,0975	0,1012	0,1047	0,1006	0,0955	0,0892	0
0,0866	0,0918	0,0968	0,1015	0,1060	0,1103	0,1144	0,1182	0,1218	0,1145	0,1055	0,0946	0
0,0976	0,1033	0,1087	0,1138	0,1187	0,1232	0,1275	0,1315	0,1353	0,1254	0,1134	0,0989	0
0,1070	0,1131	0,1189	0,1243	0,1294	0,1343	0,1387	0,1429	0,1467	0,1347	0,1201	0,1027	0
0,1153	0,1218	0,1279	0,1336	0,1390	0,1440	0,1487	0,1530	0,1569	0,1429	0,1261	0,1060	0
0,1229	0,1297	0,1361	0,1421	0,1477	0,1529	0,1577	0,1621	0,1661	0,1504	0,1316	0,1091	0
0,1299	0,1370	0,1437	0,1499	0,1557	0,1611	0,1661	0,1706	0,1747	0,1574	0,1367	0,1119	0
0,1364	0,1438	0,1507	0,1572	0,1632	0,1688	0,1739	0,1785	0,1826	0,1639	0,1414	0,1145	0
0,1425	0,1502	0,1574	0,1641	0,1703	0,1760	0,1812	0,1860	0,1902	0,1700	0,1459	0,1170	0
0,1484	0,1563	0,1637	0,1706	0,1770	0,1829	0,1882	0,1930	0,1973	0,1758	0,1501	0,1194	0
0,1539	0,1621	0,1698	0,1769	0,1834	0,1894	0,1949	0,1998	0,2041	0,1813	0,1542	0,1217	0
0,1593	0,1677	0,1755	0,1828	0,1896	0,1957	0,2013	0,2062	0,2106	0,1866	0,1581	0,1239	0
0,1644	0,1730	0,1811	0,1886	0,1954	0,2017	0,2074	0,2124	0,2169	0,1917	0,1618	0,1260	0
0,1693	0,1782	0,1865	0,1941	0,2011	0,2075	0,2133	0,2184	0,2229	0,1966	0,1654	0,1280	0
0,1741	0,1832	0,1916	0,1995	0,2066	0,2131	0,2190	0,2242	0,2287	0,2014	0,1689	0,1300	0
0,1787	0,1880	0,1967	0,2046	0,2120	0,2186	0,2245	0,2298	0,2344	0,2060	0,1722	0,1319	0
0,1832	0,1927	0,2015	0,2097	0,2171	0,2239	0,2299	0,2353	0,2399	0,2105	0,1755	0,1337	0
0,1876	0,1973	0,2063	0,2146	0,2221	0,2290	0,2352	0,2406	0,2452	0,2148	0,1787	0,1355	0
0,1919	0,2017	0,2109	0,2193	0,2270	0,2340	0,2402	0,2457	0,2504	0,2190	0,1818	0,1373	0
0,1960	0,2061	0,2154	0,2240	0,2318	0,2389	0,2452	0,2508	0,2555	0,2232	0,1848	0,1390	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. VII



Tabla VIII: Datos para distintos porcentajes de carrera con inyección (m.n.t.II)

c	Punto par máximo						Punto potencia máxima					
	Punto	T (K)	T(°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)	Punto	T (K)	T(°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
0,5	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1487	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,2373
	2	300,00	27,00	10,75	0,08010		2	300,00	27,00	7,72	0,11157	
	3s	152,21	-120,79	1,00	0,43685		3s	167,33	-105,67	1,00	0,48023	
	3	159,60	-113,40	1,00	0,45806		3	173,96	-99,04	1,00	0,49927	
0,4	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1441	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,2284
	2	300,00	27,00	12,00	0,07177		2	300,00	27,00	8,61	0,09996	
	3s	147,51	-125,49	1,00	0,42335		3s	162,16	-110,84	1,00	0,46538	
	3	155,13	-117,87	1,00	0,44523		3	169,05	-103,95	1,00	0,48517	
0,3	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1382	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,2171
	2	300,00	27,00	14,05	0,06127		2	300,00	27,00	10,09	0,08534	
	3s	140,99	-132,01	1,00	0,40465		3s	154,99	-118,01	1,00	0,44483	
	3	148,94	-124,06	1,00	0,42747		3	162,24	-110,76	1,00	0,46564	
0,25	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1346	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,2104
	2	300,00	27,00	15,63	0,05510		2	300,00	27,00	11,22	0,07674	
	3s	136,78	-136,22	1,00	0,39255		3s	150,36	-122,64	1,00	0,43153	
	3	144,94	-128,06	1,00	0,41597		3	157,84	-115,16	1,00	0,45300	



0,1	Punto	T (K)	T(°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)	Punto	T (K)	T(°C)	P (bar)	v (m3/kg)	m. (kg/s)
	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1201	1	300,00	27,00	400,00	0,00215	0,1837
2	300,00	27,00	27,01	0,03187	2		300,00	27,00	19,39	0,04439		
3s	116,98	-156,02	1,00	0,33572	3s		128,59	-144,41	1,00	0,36906		
3	126,13	-146,87	1,00	0,36199	3		137,16	-135,84	1,00	0,39366		

Tabla. VIII



Tabla IX: Flujo másico de aire demandado del D_{ap} (m.n.t.II)

Grado carga [%]	Flujo másico de aire demandado de D_{ap} [kg/s]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	0,0007	0,0024	0,0049	0,0081	0,0118	0,0161	0,0209	0,0262	0,0320	0,0355	0,0391	0,0417
0,1	0	0,0010	0,0033	0,0066	0,0108	0,0158	0,0215	0,0279	0,0349	0,0427	0,0474	0,0522	0,0556
0,15	0	0,0012	0,0040	0,0079	0,0128	0,0187	0,0254	0,0330	0,0414	0,0507	0,0563	0,0620	0,0661
0,2	0	0,0013	0,0045	0,0089	0,0144	0,0210	0,0287	0,0373	0,0469	0,0574	0,0638	0,0701	0,0748
0,25	0	0,0015	0,0049	0,0097	0,0158	0,0231	0,0315	0,0410	0,0516	0,0633	0,0703	0,0773	0,0824
0,3	0	0,0016	0,0053	0,0105	0,0171	0,0249	0,0340	0,0444	0,0559	0,0686	0,0762	0,0838	0,0893
0,35	0	0,0017	0,0056	0,0112	0,0182	0,0266	0,0364	0,0475	0,0598	0,0735	0,0816	0,0898	0,0956
0,4	0	0,0018	0,0060	0,0118	0,0192	0,0282	0,0386	0,0503	0,0635	0,0780	0,0867	0,0954	0,1016
0,45	0	0,0019	0,0063	0,0124	0,0202	0,0296	0,0406	0,0530	0,0670	0,0823	0,0915	0,1006	0,1071
0,5	0	0,0020	0,0065	0,0130	0,0212	0,0310	0,0425	0,0556	0,0702	0,0864	0,0960	0,1056	0,1124
0,55	0	0,0021	0,0068	0,0135	0,0220	0,0323	0,0443	0,0580	0,0733	0,0903	0,1003	0,1103	0,1174
0,6	0	0,0022	0,0070	0,0140	0,0229	0,0336	0,0461	0,0603	0,0763	0,0940	0,1044	0,1148	0,1222
0,65	0	0,0023	0,0073	0,0145	0,0237	0,0348	0,0478	0,0626	0,0792	0,0975	0,1083	0,1192	0,1268
0,7	0	0,0023	0,0075	0,0149	0,0244	0,0359	0,0494	0,0647	0,0819	0,1009	0,1122	0,1234	0,1312
0,75	0	0,0024	0,0077	0,0154	0,0252	0,0370	0,0509	0,0668	0,0846	0,1043	0,1158	0,1274	0,1355
0,8	0	0,0025	0,0079	0,0158	0,0259	0,0381	0,0524	0,0688	0,0871	0,1075	0,1194	0,1313	0,1397
0,85	0	0,0025	0,0081	0,0162	0,0266	0,0392	0,0539	0,0707	0,0896	0,1106	0,1229	0,1352	0,1437
0,9	0	0,0026	0,0083	0,0166	0,0273	0,0402	0,0553	0,0726	0,0921	0,1136	0,1262	0,1389	0,1477
0,95	0	0,0026	0,0085	0,0170	0,0279	0,0412	0,0567	0,0745	0,0944	0,1166	0,1295	0,1425	0,1515
1	0	0,0027	0,0087	0,0174	0,0286	0,0421	0,0581	0,0763	0,0967	0,1194	0,1327	0,1460	0,1552
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Flujo másico de aire demandado de Dap [kg/s]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,0442	0,0464	0,0486	0,0505	0,0522	0,0538	0,0552	0,0564	0,0574	0,0492	0,0385	0,0236	0
0,0589	0,0619	0,0647	0,0673	0,0696	0,0717	0,0735	0,0751	0,0764	0,0656	0,0518	0,0326	0
0,0699	0,0734	0,0767	0,0797	0,0824	0,0849	0,0870	0,0888	0,0904	0,0776	0,0614	0,0391	0
0,0791	0,0831	0,0867	0,0901	0,0931	0,0958	0,0982	0,1003	0,1019	0,0874	0,0691	0,0444	0
0,0871	0,0915	0,0955	0,0992	0,1025	0,1054	0,1080	0,1102	0,1121	0,0959	0,0758	0,0488	0
0,0944	0,0991	0,1034	0,1074	0,1109	0,1141	0,1168	0,1192	0,1211	0,1035	0,0817	0,0528	0
0,1011	0,1061	0,1107	0,1149	0,1187	0,1220	0,1249	0,1274	0,1295	0,1105	0,0871	0,0563	0
0,1073	0,1126	0,1175	0,1219	0,1259	0,1294	0,1325	0,1351	0,1372	0,1169	0,0920	0,0595	0
0,1131	0,1187	0,1238	0,1285	0,1326	0,1363	0,1395	0,1422	0,1444	0,1229	0,0967	0,0625	0
0,1187	0,1245	0,1299	0,1347	0,1390	0,1429	0,1462	0,1490	0,1513	0,1286	0,1010	0,0653	0
0,1240	0,1300	0,1356	0,1406	0,1451	0,1491	0,1526	0,1555	0,1578	0,1340	0,1051	0,0680	0
0,1290	0,1353	0,1411	0,1463	0,1510	0,1551	0,1586	0,1616	0,1641	0,1392	0,1090	0,0705	0
0,1339	0,1404	0,1464	0,1517	0,1566	0,1608	0,1645	0,1676	0,1700	0,1441	0,1128	0,0728	0
0,1386	0,1453	0,1514	0,1570	0,1620	0,1663	0,1701	0,1733	0,1758	0,1488	0,1164	0,0751	0
0,1431	0,1500	0,1563	0,1621	0,1672	0,1717	0,1755	0,1788	0,1814	0,1534	0,1198	0,0773	0
0,1475	0,1546	0,1611	0,1670	0,1722	0,1768	0,1808	0,1841	0,1867	0,1578	0,1231	0,0793	0
0,1517	0,1590	0,1657	0,1717	0,1771	0,1818	0,1859	0,1893	0,1919	0,1621	0,1264	0,0814	0
0,1558	0,1633	0,1702	0,1764	0,1819	0,1867	0,1908	0,1943	0,1970	0,1663	0,1295	0,0833	0
0,1599	0,1675	0,1746	0,1809	0,1865	0,1914	0,1957	0,1992	0,2020	0,1703	0,1325	0,0852	0
0,1638	0,1716	0,1788	0,1853	0,1910	0,1960	0,2004	0,2039	0,2068	0,1743	0,1355	0,0870	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. IX



Tabla X: Presión teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III sin turbo)

Grado carga [%]	Presión de mezcla [bar]													
0	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394
0,05	44,394	47,001	49,607	52,214	54,821	57,427	60,034	62,641	65,247	67,854	67,854	67,854	67,854	67,108
0,1	44,394	48,345	52,296	56,247	60,198	64,149	68,100	72,051	76,002	79,953	79,953	79,953	79,953	78,822
0,15	44,394	49,433	54,472	59,511	64,551	69,590	74,629	79,668	84,707	89,747	89,747	89,747	89,747	88,305
0,2	44,394	50,382	56,371	62,360	68,348	74,337	80,325	86,314	92,303	98,291	98,291	98,291	98,291	96,578
0,25	44,394	51,240	58,087	64,933	71,780	78,626	85,473	92,320	99,166	106,013	106,013	106,013	106,013	104,054
0,3	44,394	52,032	59,670	67,308	74,946	82,584	90,222	97,860	105,498	113,136	113,136	113,136	113,136	110,950
0,35	44,394	52,772	61,150	69,528	77,906	86,284	94,663	103,041	111,419	119,797	119,797	119,797	119,797	117,400
0,4	44,394	53,471	62,548	71,625	80,702	89,779	98,856	107,933	117,010	126,087	126,087	126,087	126,087	123,490
0,45	44,394	54,136	63,877	73,619	83,361	93,102	102,844	112,586	122,327	132,069	132,069	132,069	132,069	129,282
0,5	44,394	54,771	65,149	75,526	85,903	96,281	106,658	117,036	127,413	137,790	137,790	137,790	137,790	134,821
0,55	44,394	55,382	66,370	77,358	88,346	99,334	110,323	121,311	132,299	143,287	143,287	143,287	143,287	140,143
0,6	44,394	55,971	67,548	79,125	90,702	102,279	113,856	125,433	137,010	148,587	148,587	148,587	148,587	145,275
0,65	44,394	56,540	68,687	80,834	92,980	105,127	117,273	129,420	141,566	153,713	153,713	153,713	153,713	150,238
0,7	44,394	57,093	69,792	82,490	95,189	107,888	120,587	133,286	145,985	158,684	158,684	158,684	158,684	155,050
0,75	44,394	57,629	70,865	84,101	97,336	110,572	123,807	137,043	150,278	163,514	163,514	163,514	163,514	159,727
0,8	44,394	58,152	71,910	85,668	99,426	113,185	126,943	140,701	154,459	168,217	168,217	168,217	168,217	164,281
0,85	44,394	58,662	72,930	87,197	101,465	115,733	130,001	144,269	158,536	172,804	172,804	172,804	172,804	168,722
0,9	44,394	59,159	73,925	88,691	103,456	118,222	132,988	147,753	162,519	177,284	177,284	177,284	177,284	173,060
0,95	44,394	59,646	74,899	90,151	105,404	120,656	135,909	151,161	166,414	181,666	181,666	181,666	181,666	177,302
1	44,394	60,123	75,852	91,581	107,311	123,040	138,769	154,498	170,227	185,956	185,956	185,956	185,956	181,456
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	



Presión de mezcla [bar]												
44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394	44,394
66,362	65,617	64,871	64,125	63,379	62,633	61,887	61,142	60,396	56,395	52,395	48,394	44,394
77,692	76,561	75,431	74,301	73,170	72,040	70,909	69,779	68,648	62,585	56,521	50,458	44,394
86,863	85,421	83,979	82,538	81,096	79,654	78,212	76,770	75,329	67,595	59,861	52,128	44,394
94,864	93,151	91,437	89,724	88,011	86,297	84,584	82,870	81,157	71,966	62,775	53,585	44,394
102,095	100,136	98,177	96,218	94,259	92,300	90,341	88,382	86,424	75,916	65,409	54,901	44,394
108,765	106,580	104,394	102,209	100,024	97,838	95,653	93,468	91,282	79,560	67,838	56,116	44,394
115,003	112,606	110,208	107,811	105,414	103,017	100,620	98,223	95,826	82,968	70,110	57,252	44,394
120,893	118,296	115,698	113,101	110,504	107,907	105,310	102,713	100,116	86,185	72,255	58,324	44,394
126,494	123,707	120,920	118,133	115,345	112,558	109,771	106,984	104,196	89,246	74,295	59,345	44,394
131,852	128,883	125,914	122,945	119,975	117,006	114,037	111,068	108,099	92,173	76,246	60,320	44,394
136,999	133,855	130,711	127,568	124,424	121,280	118,136	114,992	111,848	94,985	78,121	61,257	44,394
141,962	138,650	135,338	132,025	128,713	125,400	122,088	118,776	115,463	97,696	79,929	62,161	44,394
146,762	143,287	139,812	136,336	132,861	129,386	125,910	122,435	118,960	100,318	81,677	63,035	44,394
151,417	147,784	144,150	140,517	136,883	133,250	129,617	125,983	122,350	102,861	83,372	63,883	44,394
155,940	152,153	148,366	144,579	140,792	137,006	133,219	129,432	125,645	105,332	85,019	64,707	44,394
160,344	156,408	152,471	148,535	144,599	140,662	136,726	132,789	128,853	107,738	86,623	65,509	44,394
164,640	160,557	156,475	152,393	148,311	144,228	140,146	136,064	131,982	110,085	88,188	66,291	44,394
168,835	164,610	160,386	156,161	151,936	147,712	143,487	139,262	135,037	112,377	89,716	67,055	44,394
172,938	168,574	164,210	159,846	155,482	151,118	146,754	142,390	138,026	114,618	91,210	67,802	44,394
176,956	172,455	167,955	163,455	158,954	154,454	149,953	145,453	140,953	116,813	92,673	68,534	44,394
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. X



Tabla XI: Temperatura teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III sin turbo)

Grado carga [%]	Temperatura de mezcla [°C]												
0	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90
0,05	446,90	395,04	354,59	322,14	295,55	273,35	254,54	238,40	224,39	212,13	212,13	212,13	215,48
0,1	446,90	373,01	321,23	282,93	253,45	230,06	211,05	195,30	182,03	170,70	170,70	170,70	173,77
0,15	446,90	357,01	298,82	258,07	227,95	204,78	186,40	171,46	159,08	148,66	148,66	148,66	151,47
0,2	446,90	344,22	281,88	240,03	209,98	187,36	169,71	155,57	143,98	134,30	134,30	134,30	136,90
0,25	446,90	333,48	268,30	225,98	196,29	174,31	157,38	143,95	133,02	123,96	123,96	123,96	126,39
0,3	446,90	324,20	256,99	214,57	185,37	164,03	147,76	134,94	124,59	116,04	116,04	116,04	118,33
0,35	446,90	316,01	247,33	205,03	176,35	155,63	139,96	127,69	117,83	109,73	109,73	109,73	111,89
0,4	446,90	308,69	238,93	196,87	168,73	148,60	133,47	121,69	112,26	104,53	104,53	104,53	106,60
0,45	446,90	302,06	231,52	189,77	162,18	142,58	127,95	116,61	107,55	100,16	100,16	100,16	102,14
0,5	446,90	296,01	224,89	183,51	156,45	137,36	123,18	112,23	103,52	96,42	96,42	96,42	98,32
0,55	446,90	290,43	218,92	177,94	151,39	132,77	119,01	108,41	100,01	93,17	93,17	93,17	94,99
0,6	446,90	285,28	213,49	172,93	146,86	128,70	115,31	105,04	96,91	90,31	90,31	90,31	92,07
0,65	446,90	280,48	208,53	168,39	142,79	125,04	112,01	102,04	94,16	87,77	87,77	87,77	89,47
0,7	446,90	275,99	203,96	164,26	139,10	121,74	109,04	99,33	91,69	85,50	85,50	85,50	87,15
0,75	446,90	271,78	199,74	160,46	135,73	118,74	106,34	96,89	89,45	83,45	83,45	83,45	85,04
0,8	446,90	267,81	195,81	156,96	132,64	115,99	103,88	94,66	87,42	81,58	81,58	81,58	83,13
0,85	446,90	264,07	192,16	153,72	129,79	113,47	101,62	92,62	85,56	79,88	79,88	79,88	81,39
0,9	446,90	260,52	188,73	150,70	127,15	111,14	99,54	90,75	83,86	78,31	78,31	78,31	79,79
0,95	446,90	257,15	185,52	147,89	124,70	108,98	97,61	89,01	82,28	76,87	76,87	76,87	78,31
1	446,90	253,95	182,49	145,26	122,41	106,96	95,82	87,40	80,82	75,53	75,53	75,53	76,94
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura de mezcla [°C]												
446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90	446,90
218,96	222,56	226,30	230,19	234,23	238,44	242,82	247,39	252,15	281,68	320,13	372,24	446,90
176,97	180,32	183,82	187,48	191,31	195,34	199,57	204,01	208,69	238,72	280,64	343,25	446,90
154,41	157,50	160,74	164,14	167,72	171,50	175,48	179,69	184,14	213,28	255,70	323,11	446,90
139,63	142,50	145,52	148,70	152,06	155,61	159,36	163,34	167,57	195,61	237,63	307,53	446,90
128,94	131,63	134,47	137,46	140,63	143,98	147,53	151,31	155,34	182,29	223,59	294,80	446,90
120,74	123,28	125,96	128,79	131,79	134,97	138,36	141,96	145,80	171,75	212,20	284,04	446,90
114,18	116,59	119,13	121,83	124,69	127,72	130,96	134,40	138,08	163,11	202,69	274,73	446,90
108,77	111,07	113,50	116,08	118,81	121,72	124,82	128,12	131,66	155,84	194,56	266,53	446,90
104,22	106,42	108,75	111,22	113,84	116,64	119,61	122,80	126,21	149,62	187,50	259,23	446,90
100,31	102,43	104,67	107,04	109,57	112,26	115,13	118,20	121,50	144,20	181,28	252,65	446,90
96,92	98,95	101,11	103,40	105,84	108,44	111,22	114,19	117,38	139,43	175,74	246,67	446,90
93,93	95,89	97,98	100,19	102,55	105,07	107,76	110,64	113,73	135,19	170,76	241,19	446,90
91,27	93,17	95,19	97,34	99,62	102,06	104,67	107,46	110,47	131,38	166,26	236,15	446,90
88,89	90,73	92,69	94,77	96,99	99,36	101,89	104,61	107,54	127,93	162,15	231,48	446,90
86,73	88,53	90,43	92,45	94,61	96,91	99,38	102,03	104,88	124,79	158,38	227,14	446,90
84,78	86,52	88,37	90,34	92,44	94,69	97,09	99,67	102,45	121,91	154,91	223,09	446,90
82,99	84,69	86,49	88,41	90,46	92,65	94,99	97,51	100,22	119,27	151,70	219,30	446,90
81,35	83,00	84,76	86,63	88,63	90,77	93,06	95,52	98,17	116,82	148,72	215,73	446,90
79,83	81,44	83,16	84,99	86,95	89,03	91,27	93,68	96,28	114,55	145,93	212,36	446,90
78,42	80,00	81,68	83,47	85,38	87,42	89,62	91,97	94,51	112,44	143,33	209,18	446,90
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XI



Tabla XII: Masa teórica a inyectar por ciclo (m.n.t.III sin turbo)

Grado carga [%]	Masa a inyectar [kg/ciclo]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,05	0	4,61E-05	9,22E-05	1,38E-04	1,84E-04	2,30E-04	2,76E-04	3,23E-04	3,69E-04	4,15E-04	4,15E-04	4,15E-04	4,01E-04
0,1	0	6,98E-05	1,40E-04	2,10E-04	2,79E-04	3,49E-04	4,19E-04	4,89E-04	5,59E-04	6,29E-04	6,29E-04	6,29E-04	6,09E-04
0,15	0	8,91E-05	1,78E-04	2,67E-04	3,56E-04	4,45E-04	5,34E-04	6,24E-04	7,13E-04	8,02E-04	8,02E-04	8,02E-04	7,76E-04
0,2	0	1,06E-04	2,12E-04	3,18E-04	4,23E-04	5,29E-04	6,35E-04	7,41E-04	8,47E-04	9,53E-04	9,53E-04	9,53E-04	9,22E-04
0,25	0	1,21E-04	2,42E-04	3,63E-04	4,84E-04	6,05E-04	7,26E-04	8,47E-04	9,68E-04	1,09E-03	1,09E-03	1,09E-03	1,05E-03
0,3	0	1,35E-04	2,70E-04	4,05E-04	5,40E-04	6,75E-04	8,10E-04	9,45E-04	1,08E-03	1,22E-03	1,22E-03	1,22E-03	1,18E-03
0,35	0	1,48E-04	2,96E-04	4,44E-04	5,92E-04	7,40E-04	8,89E-04	1,04E-03	1,18E-03	1,33E-03	1,33E-03	1,33E-03	1,29E-03
0,4	0	1,60E-04	3,21E-04	4,81E-04	6,42E-04	8,02E-04	9,63E-04	1,12E-03	1,28E-03	1,44E-03	1,44E-03	1,44E-03	1,40E-03
0,45	0	1,72E-04	3,44E-04	5,17E-04	6,89E-04	8,61E-04	1,03E-03	1,21E-03	1,38E-03	1,55E-03	1,55E-03	1,55E-03	1,50E-03
0,5	0	1,83E-04	3,67E-04	5,50E-04	7,34E-04	9,17E-04	1,10E-03	1,28E-03	1,47E-03	1,65E-03	1,65E-03	1,65E-03	1,60E-03
0,55	0	1,94E-04	3,88E-04	5,83E-04	7,77E-04	9,71E-04	1,17E-03	1,36E-03	1,55E-03	1,75E-03	1,75E-03	1,75E-03	1,69E-03
0,6	0	2,05E-04	4,09E-04	6,14E-04	8,19E-04	1,02E-03	1,23E-03	1,43E-03	1,64E-03	1,84E-03	1,84E-03	1,84E-03	1,78E-03
0,65	0	2,15E-04	4,29E-04	6,44E-04	8,59E-04	1,07E-03	1,29E-03	1,50E-03	1,72E-03	1,93E-03	1,93E-03	1,93E-03	1,87E-03
0,7	0	2,24E-04	4,49E-04	6,73E-04	8,98E-04	1,12E-03	1,35E-03	1,57E-03	1,80E-03	2,02E-03	2,02E-03	2,02E-03	1,96E-03
0,75	0	2,34E-04	4,68E-04	7,02E-04	9,36E-04	1,17E-03	1,40E-03	1,64E-03	1,87E-03	2,11E-03	2,11E-03	2,11E-03	2,04E-03
0,8	0	2,43E-04	4,86E-04	7,30E-04	9,73E-04	1,22E-03	1,46E-03	1,70E-03	1,95E-03	2,19E-03	2,19E-03	2,19E-03	2,12E-03
0,85	0	2,52E-04	5,04E-04	7,57E-04	1,01E-03	1,26E-03	1,51E-03	1,77E-03	2,02E-03	2,27E-03	2,27E-03	2,27E-03	2,20E-03
0,9	0	2,61E-04	5,22E-04	7,83E-04	1,04E-03	1,30E-03	1,57E-03	1,83E-03	2,09E-03	2,35E-03	2,35E-03	2,35E-03	2,27E-03
0,95	0	2,70E-04	5,39E-04	8,09E-04	1,08E-03	1,35E-03	1,62E-03	1,89E-03	2,16E-03	2,43E-03	2,43E-03	2,43E-03	2,35E-03
1	0	2,78E-04	5,56E-04	8,34E-04	1,11E-03	1,39E-03	1,67E-03	1,95E-03	2,22E-03	2,50E-03	2,50E-03	2,50E-03	2,42E-03
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Masa a inyectar [kg/ciclo]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3,88E-04	3,75E-04	3,62E-04	3,49E-04	3,36E-04	3,22E-04	3,09E-04	2,96E-04	2,83E-04	2,12E-04	1,41E-04	7,07E-05	0
5,89E-04	5,69E-04	5,49E-04	5,29E-04	5,09E-04	4,89E-04	4,69E-04	4,49E-04	4,29E-04	3,22E-04	2,14E-04	1,07E-04	0
7,51E-04	7,25E-04	7,00E-04	6,74E-04	6,49E-04	6,23E-04	5,98E-04	5,72E-04	5,47E-04	4,10E-04	2,73E-04	1,37E-04	0
8,92E-04	8,62E-04	8,32E-04	8,01E-04	7,71E-04	7,41E-04	7,10E-04	6,80E-04	6,50E-04	4,87E-04	3,25E-04	1,62E-04	0
1,02E-03	9,85E-04	9,51E-04	9,16E-04	8,81E-04	8,47E-04	8,12E-04	7,78E-04	7,43E-04	5,57E-04	3,71E-04	1,86E-04	0
1,14E-03	1,10E-03	1,06E-03	1,02E-03	9,83E-04	9,45E-04	9,06E-04	8,67E-04	8,29E-04	6,22E-04	4,14E-04	2,07E-04	0
1,25E-03	1,21E-03	1,16E-03	1,12E-03	1,08E-03	1,04E-03	9,94E-04	9,51E-04	9,09E-04	6,82E-04	4,55E-04	2,27E-04	0
1,35E-03	1,31E-03	1,26E-03	1,21E-03	1,17E-03	1,12E-03	1,08E-03	1,03E-03	9,85E-04	7,39E-04	4,92E-04	2,46E-04	0
1,45E-03	1,40E-03	1,35E-03	1,30E-03	1,25E-03	1,20E-03	1,16E-03	1,11E-03	1,06E-03	7,93E-04	5,29E-04	2,64E-04	0
1,55E-03	1,49E-03	1,44E-03	1,39E-03	1,34E-03	1,28E-03	1,23E-03	1,18E-03	1,13E-03	8,45E-04	5,63E-04	2,82E-04	0
1,64E-03	1,58E-03	1,53E-03	1,47E-03	1,41E-03	1,36E-03	1,30E-03	1,25E-03	1,19E-03	8,94E-04	5,96E-04	2,98E-04	0
1,72E-03	1,67E-03	1,61E-03	1,55E-03	1,49E-03	1,43E-03	1,37E-03	1,31E-03	1,26E-03	9,42E-04	6,28E-04	3,14E-04	0
1,81E-03	1,75E-03	1,69E-03	1,63E-03	1,56E-03	1,50E-03	1,44E-03	1,38E-03	1,32E-03	9,89E-04	6,59E-04	3,30E-04	0
1,89E-03	1,83E-03	1,76E-03	1,70E-03	1,63E-03	1,57E-03	1,51E-03	1,44E-03	1,38E-03	1,03E-03	6,89E-04	3,44E-04	0
1,97E-03	1,90E-03	1,84E-03	1,77E-03	1,70E-03	1,64E-03	1,57E-03	1,50E-03	1,44E-03	1,08E-03	7,18E-04	3,59E-04	0
2,05E-03	1,98E-03	1,91E-03	1,84E-03	1,77E-03	1,70E-03	1,63E-03	1,56E-03	1,49E-03	1,12E-03	7,46E-04	3,73E-04	0
2,13E-03	2,05E-03	1,98E-03	1,91E-03	1,84E-03	1,76E-03	1,69E-03	1,62E-03	1,55E-03	1,16E-03	7,74E-04	3,87E-04	0
2,20E-03	2,12E-03	2,05E-03	1,98E-03	1,90E-03	1,83E-03	1,75E-03	1,68E-03	1,60E-03	1,20E-03	8,01E-04	4,01E-04	0
2,27E-03	2,20E-03	2,12E-03	2,04E-03	1,96E-03	1,89E-03	1,81E-03	1,73E-03	1,66E-03	1,24E-03	8,28E-04	4,14E-04	0
2,34E-03	2,26E-03	2,18E-03	2,10E-03	2,02E-03	1,95E-03	1,87E-03	1,79E-03	1,71E-03	1,28E-03	8,53E-04	4,27E-04	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XII



Tabla XIII: Temperatura teórica de escape (m.n.t.III sin turbo)

Grado carga [%]	Temperatura aproximada de escape [°C]												
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
0,05	27,00	5,39	-11,47	-24,99	-36,07	-45,32	-53,16	-59,89	-65,72	-70,83	-70,83	-70,83	-69,44
0,1	27,00	-3,79	-25,37	-41,33	-53,62	-63,36	-71,28	-77,85	-83,38	-88,10	-88,10	-88,10	-86,82
0,15	27,00	-10,46	-34,71	-51,69	-64,24	-73,90	-81,56	-87,78	-92,94	-97,29	-97,29	-97,29	-96,11
0,2	27,00	-15,79	-41,77	-59,21	-71,73	-81,16	-88,51	-94,40	-99,24	-103,27	-103,27	-103,27	-102,18
0,25	27,00	-20,27	-47,43	-65,06	-77,43	-86,59	-93,65	-99,25	-103,80	-107,58	-107,58	-107,58	-106,57
0,3	27,00	-24,13	-52,14	-69,82	-81,99	-90,88	-97,66	-103,00	-107,32	-110,88	-110,88	-110,88	-109,92
0,35	27,00	-27,54	-56,16	-73,79	-85,74	-94,38	-100,91	-106,02	-110,13	-113,51	-113,51	-113,51	-112,61
0,4	27,00	-30,60	-59,67	-77,20	-88,92	-97,31	-103,61	-108,52	-112,45	-115,67	-115,67	-115,67	-114,81
0,45	27,00	-33,36	-62,76	-80,15	-91,65	-99,82	-105,91	-110,64	-114,41	-117,49	-117,49	-117,49	-116,67
0,5	27,00	-35,88	-65,52	-82,76	-94,04	-101,99	-107,90	-112,46	-116,10	-119,05	-119,05	-119,05	-118,26
0,55	27,00	-38,20	-68,01	-85,08	-96,15	-103,90	-109,64	-114,06	-117,56	-120,41	-120,41	-120,41	-119,65
0,6	27,00	-40,35	-70,27	-87,17	-98,03	-105,60	-111,18	-115,46	-118,85	-121,60	-121,60	-121,60	-120,87
0,65	27,00	-42,35	-72,34	-89,06	-99,73	-107,13	-112,56	-116,71	-120,00	-122,66	-122,66	-122,66	-121,95
0,7	27,00	-44,22	-74,24	-90,79	-101,27	-108,50	-113,80	-117,84	-121,03	-123,60	-123,60	-123,60	-122,92
0,75	27,00	-45,98	-76,00	-92,37	-102,67	-109,75	-114,92	-118,86	-121,96	-124,46	-124,46	-124,46	-123,79
0,8	27,00	-47,63	-77,63	-93,83	-103,96	-110,90	-115,95	-119,79	-122,80	-125,24	-125,24	-125,24	-124,59
0,85	27,00	-49,19	-79,16	-95,18	-105,15	-111,95	-116,89	-120,64	-123,58	-125,95	-125,95	-125,95	-125,32
0,9	27,00	-50,67	-80,59	-96,43	-106,25	-112,92	-117,76	-121,42	-124,29	-126,60	-126,60	-126,60	-125,99
0,95	27,00	-52,07	-81,92	-97,60	-107,27	-113,82	-118,56	-122,14	-124,95	-127,20	-127,20	-127,20	-126,60
1	27,00	-53,41	-83,19	-98,70	-108,22	-114,66	-119,30	-122,81	-125,55	-127,76	-127,76	-127,76	-127,17
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura aproximada de escape [°C]												
27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
-67,99	-66,49	-64,93	-63,31	-61,62	-59,87	-58,05	-56,14	-54,16	-41,85	-25,83	-4,11	27,00
-85,49	-84,09	-82,63	-81,11	-79,51	-77,83	-76,07	-74,22	-72,27	-59,75	-42,29	-16,20	27,00
-94,89	-93,60	-92,25	-90,83	-89,34	-87,77	-86,11	-84,35	-82,50	-70,35	-52,68	-24,58	27,00
-101,05	-99,85	-98,59	-97,27	-95,87	-94,39	-92,83	-91,17	-89,40	-77,72	-60,21	-31,08	27,00
-105,50	-104,38	-103,20	-101,95	-100,63	-99,23	-97,75	-96,18	-94,50	-83,27	-66,06	-36,38	27,00
-108,92	-107,86	-106,75	-105,56	-104,31	-102,99	-101,58	-100,08	-98,48	-87,66	-70,80	-40,87	27,00
-111,65	-110,65	-109,59	-108,47	-107,27	-106,01	-104,66	-103,23	-101,69	-91,26	-74,77	-44,75	27,00
-113,91	-112,95	-111,94	-110,86	-109,72	-108,51	-107,22	-105,84	-104,37	-94,29	-78,16	-48,16	27,00
-115,80	-114,89	-113,92	-112,89	-111,79	-110,63	-109,39	-108,06	-106,64	-96,88	-81,10	-51,21	27,00
-117,43	-116,55	-115,62	-114,63	-113,57	-112,45	-111,26	-109,98	-108,60	-99,14	-83,69	-53,95	27,00
-118,85	-118,00	-117,10	-116,14	-115,13	-114,05	-112,89	-111,65	-110,32	-101,13	-86,00	-56,44	27,00
-120,09	-119,27	-118,40	-117,48	-116,50	-115,45	-114,33	-113,13	-111,84	-102,90	-88,07	-58,72	27,00
-121,20	-120,41	-119,57	-118,67	-117,72	-116,70	-115,62	-114,45	-113,20	-104,49	-89,95	-60,82	27,00
-122,19	-121,42	-120,61	-119,74	-118,82	-117,83	-116,77	-115,64	-114,42	-105,92	-91,66	-62,77	27,00
-123,09	-122,34	-121,55	-120,71	-119,81	-118,85	-117,82	-116,72	-115,53	-107,23	-93,23	-64,58	27,00
-123,91	-123,18	-122,41	-121,59	-120,71	-119,78	-118,77	-117,70	-116,54	-108,43	-94,68	-66,27	27,00
-124,65	-123,94	-123,19	-122,39	-121,54	-120,63	-119,65	-118,60	-117,47	-109,53	-96,02	-67,85	27,00
-125,34	-124,65	-123,91	-123,13	-122,30	-121,41	-120,45	-119,43	-118,32	-110,55	-97,26	-69,34	27,00
-125,97	-125,29	-124,58	-123,82	-123,00	-122,13	-121,20	-120,19	-119,11	-111,50	-98,42	-70,74	27,00
-126,55	-125,90	-125,20	-124,45	-123,65	-122,80	-121,89	-120,91	-119,85	-112,38	-99,51	-72,06	27,00
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XIII



Tabla XIV: Mapa de las presiones de soplado del sistema de sobrealimentación (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Mapa del turbo (P'_{turb} [bar])												
0	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002	1,002
0,05	1,002	1,167	1,307	1,433	1,549	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,1	1,002	1,241	1,437	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,15	1,002	1,298	1,534	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,2	1,002	1,346	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,25	1,002	1,387	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,3	1,002	1,424	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,35	1,002	1,458	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,4	1,002	1,490	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,45	1,002	1,519	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,5	1,002	1,547	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,55	1,002	1,573	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,6	1,002	1,598	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,65	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,7	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,75	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,8	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,85	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,9	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
0,95	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
1	1,002	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600	1,600
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Tabla XV: Presión teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Presión de la mezcla teórica [bar]												
0	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503
0,05	44,503	52,913	60,477	67,536	74,251	78,663	81,270	83,876	86,483	89,090	89,090	89,090	88,344
0,1	44,503	56,892	67,752	77,483	81,434	85,385	89,336	93,287	97,238	101,189	101,189	101,189	100,058
0,15	44,503	59,990	73,370	80,747	85,786	90,826	95,865	100,904	105,943	110,982	110,982	110,982	109,541
0,2	44,503	62,620	77,607	83,595	89,584	95,573	101,561	107,550	113,538	119,527	119,527	119,527	117,813
0,25	44,503	64,947	79,323	86,169	93,016	99,862	106,709	113,555	120,402	127,248	127,248	127,248	125,289
0,3	44,503	67,056	80,906	88,544	96,182	103,820	111,458	119,096	126,734	134,372	134,372	134,372	132,186
0,35	44,503	68,999	82,386	90,764	99,142	107,520	115,898	124,277	132,655	141,033	141,033	141,033	138,636
0,4	44,503	70,811	83,784	92,861	101,938	111,015	120,092	129,169	138,246	147,323	147,323	147,323	144,726
0,45	44,503	72,514	85,113	94,855	104,596	114,338	124,080	133,821	143,563	153,305	153,305	153,305	150,517
0,5	44,503	74,127	86,384	96,762	107,139	117,517	127,894	138,271	148,649	159,026	159,026	159,026	156,057
0,55	44,503	75,662	87,606	98,594	109,582	120,570	131,558	142,547	153,535	164,523	164,523	164,523	161,379
0,6	44,503	77,129	88,784	100,361	111,938	123,515	135,092	146,669	158,246	169,823	169,823	169,823	166,510
0,65	44,503	77,776	89,923	102,069	114,216	126,363	138,509	150,656	162,802	174,949	174,949	174,949	171,474
0,7	44,503	78,329	91,027	103,726	116,425	129,124	141,823	154,522	167,221	179,919	179,919	179,919	176,286
0,75	44,503	78,865	92,101	105,336	118,572	131,808	145,043	158,279	171,514	184,750	184,750	184,750	180,963
0,8	44,503	79,388	93,146	106,904	120,662	134,420	148,179	161,937	175,695	189,453	189,453	189,453	185,517
0,85	44,503	79,898	94,165	108,433	122,701	136,969	151,237	165,504	179,772	194,040	194,040	194,040	189,958
0,9	44,503	80,395	95,161	109,927	124,692	139,458	154,223	168,989	183,755	198,520	198,520	198,520	194,295
0,95	44,503	80,882	96,135	111,387	126,640	141,892	157,144	172,397	187,649	202,902	202,902	202,902	198,538
1	44,503	81,359	97,088	112,817	128,546	144,276	160,005	175,734	191,463	207,192	207,192	207,192	202,692
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Presión de la mezcla teórica [bar]												
44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503	44,503
87,598	86,852	86,107	85,361	84,615	83,869	83,123	82,377	81,632	77,631	68,012	57,035	44,503
98,928	97,797	96,667	95,536	94,406	93,275	92,145	91,015	89,884	83,821	77,757	62,826	44,503
108,099	106,657	105,215	103,773	102,332	100,890	99,448	98,006	96,564	88,831	81,097	67,309	44,503
116,100	114,387	112,673	110,960	109,246	107,533	105,819	104,106	102,393	93,202	84,011	71,104	44,503
123,331	121,372	119,413	117,454	115,495	113,536	111,577	109,618	107,659	97,152	86,645	74,455	44,503
130,001	127,815	125,630	123,445	121,259	119,074	116,889	114,703	112,518	100,796	89,074	77,352	44,503
136,239	133,841	131,444	129,047	126,650	124,253	121,856	119,459	117,062	104,204	91,346	78,488	44,503
142,128	139,531	136,934	134,337	131,740	129,143	126,546	123,949	121,352	107,421	93,491	79,560	44,503
147,730	144,943	142,156	139,368	136,581	133,794	131,007	128,219	125,432	110,482	95,531	80,580	44,503
153,088	150,119	147,150	144,180	141,211	138,242	135,273	132,304	129,335	113,408	97,482	81,556	44,503
158,235	155,091	151,947	148,803	145,659	142,516	139,372	136,228	133,084	116,220	99,357	82,493	44,503
163,198	159,886	156,573	153,261	149,949	146,636	143,324	140,011	136,699	118,932	101,164	83,397	44,503
167,998	164,523	161,048	157,572	154,097	150,622	147,146	143,671	140,195	121,554	102,913	84,271	44,503
172,653	169,019	165,386	161,753	158,119	154,486	150,853	147,219	143,586	124,097	104,608	85,119	44,503
177,176	173,389	169,602	165,815	162,028	158,241	154,454	150,668	146,881	126,568	106,255	85,942	44,503
181,580	177,644	173,707	169,771	165,834	161,898	157,962	154,025	150,089	128,974	107,859	86,744	44,503
185,875	181,793	177,711	173,629	169,546	165,464	161,382	157,300	153,217	131,320	109,424	87,527	44,503
190,071	185,846	181,621	177,397	173,172	168,947	164,723	160,498	156,273	133,612	110,951	88,291	44,503
194,174	189,810	185,446	181,082	176,718	172,354	167,990	163,626	159,262	135,854	112,446	89,038	44,503
198,191	193,691	189,191	184,690	180,190	175,690	171,189	166,689	162,188	138,049	113,909	89,769	44,503
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XV



Tabla XVI: Temperatura teórica a alcanzar tras el proceso de inyección (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Temperatura teórica de la mezcla [°C]												
0	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532
0,05	447,532	426,493	408,287	392,768	379,439	360,820	338,978	319,819	302,877	287,788	287,788	287,788	291,934
0,1	447,532	416,741	392,318	371,750	337,700	309,772	286,450	266,683	249,714	234,989	234,989	234,989	238,999
0,15	447,532	409,415	381,110	343,124	307,210	278,624	255,330	235,984	219,660	205,701	205,701	205,701	209,484
0,2	447,532	403,413	370,566	321,771	285,112	256,563	233,700	214,979	199,367	186,150	186,150	186,150	189,720
0,25	447,532	398,281	355,009	304,813	267,941	239,710	217,400	199,327	184,387	171,830	171,830	171,830	175,213
0,3	447,532	393,775	341,856	290,812	254,009	226,218	204,489	187,034	172,704	160,730	160,730	160,730	163,950
0,35	447,532	389,746	330,476	278,938	242,364	215,063	193,904	177,026	163,247	151,787	151,787	151,787	154,864
0,4	447,532	386,097	320,461	268,668	232,414	205,619	185,007	168,661	155,379	144,375	144,375	144,375	147,326
0,45	447,532	382,756	311,530	259,648	223,768	197,477	177,383	161,527	148,695	138,098	138,098	138,098	140,937
0,5	447,532	379,674	303,483	251,629	216,153	190,355	170,749	155,345	142,923	132,693	132,693	132,693	135,431
0,55	447,532	376,811	296,169	244,429	209,373	184,052	164,904	149,919	137,870	127,973	127,973	127,973	130,620
0,6	447,532	374,136	289,474	237,911	203,280	178,418	159,702	145,104	133,399	123,805	123,805	123,805	126,369
0,65	447,532	368,965	283,308	231,968	197,762	173,341	155,031	140,793	129,405	120,089	120,089	120,089	122,576
0,7	447,532	363,846	277,600	226,516	192,732	168,733	150,805	136,903	125,808	116,748	116,748	116,748	119,166
0,75	447,532	359,017	272,292	221,489	188,120	164,524	146,957	133,369	122,546	113,723	113,723	113,723	116,076
0,8	447,532	354,446	267,334	216,832	183,869	160,660	143,433	130,140	119,571	110,967	110,967	110,967	113,261
0,85	447,532	350,108	262,689	212,501	179,934	157,095	140,191	127,175	116,843	108,444	108,444	108,444	110,682
0,9	447,532	345,980	258,322	208,456	176,277	153,792	137,194	124,438	114,329	106,121	106,121	106,121	108,307
0,95	447,532	342,043	254,204	204,668	172,865	150,719	134,412	121,903	112,003	103,974	103,974	103,974	106,112
1	447,532	338,282	250,312	201,108	169,672	147,852	131,821	119,545	109,842	101,981	101,981	101,981	104,074
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura teórica de la mezcla [°C]												
447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532	447,532
296,214	300,635	305,203	309,926	314,812	319,870	325,109	330,538	336,170	370,335	391,777	416,397	447,532
243,167	247,502	252,015	256,716	261,618	266,734	272,078	277,665	283,513	320,205	369,147	402,954	447,532
213,431	217,552	221,859	226,365	231,085	236,034	241,229	246,688	252,433	289,214	340,337	393,244	447,532
193,454	197,363	201,460	205,760	210,276	215,027	220,030	225,307	230,881	267,075	318,893	385,516	447,532
178,758	182,477	186,383	190,490	194,814	199,373	204,186	209,276	214,668	250,056	301,893	379,056	447,532
167,330	170,880	174,614	178,547	182,696	187,078	191,714	196,627	201,841	236,365	287,876	373,006	447,532
158,097	161,497	165,079	168,857	172,847	177,068	181,541	186,289	191,338	224,999	276,003	362,400	447,532
150,429	153,697	157,142	160,780	164,627	168,702	173,026	177,621	182,516	215,345	265,743	352,966	447,532
143,924	147,073	150,396	153,907	157,625	161,567	165,754	170,210	174,962	206,998	256,740	344,472	447,532
138,314	141,355	144,567	147,964	151,563	155,384	159,446	163,773	168,393	199,678	248,742	336,753	447,532
133,409	136,352	139,463	142,756	146,247	149,956	153,903	158,112	162,609	193,186	241,566	329,683	447,532
129,072	131,926	134,945	138,142	141,534	145,140	148,981	153,080	157,463	187,372	235,073	323,164	447,532
125,201	127,973	130,907	134,016	137,317	140,828	144,570	148,567	152,845	182,123	229,157	317,121	447,532
121,718	124,415	127,270	130,298	133,514	136,938	140,588	144,489	148,668	177,352	223,732	311,493	447,532
118,561	121,189	123,972	126,924	130,062	133,403	136,968	140,780	144,866	172,988	218,733	306,228	447,532
115,684	118,247	120,962	123,844	126,909	130,173	133,659	137,388	141,387	168,976	214,103	301,286	447,532
113,047	115,550	118,202	121,018	124,014	127,207	130,617	134,268	138,185	165,269	209,798	296,632	447,532
110,618	113,064	115,658	118,413	121,344	124,470	127,810	131,387	135,227	161,832	205,781	292,236	447,532
108,372	110,765	113,304	116,000	118,871	121,934	125,207	128,714	132,481	158,631	202,019	288,074	447,532
106,287	108,630	111,116	113,759	116,573	119,575	122,786	126,227	129,925	155,641	198,485	284,122	447,532
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XVI



Tabla XVII: Temperatura teórica aproximada de escape (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Temperatura teórica aproximada de escape [°C]												
	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400
0	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06
0,05	27,06	4,95	-11,89	-25,33	-36,41	-46,71	-56,41	-64,97	-72,57	-79,37	-79,37	-79,37	-77,50
0,1	27,06	-4,25	-25,71	-41,87	-56,98	-69,47	-79,97	-88,95	-96,70	-103,49	-103,49	-103,49	-101,64
0,15	27,06	-10,89	-35,04	-54,57	-70,62	-83,52	-94,13	-103,03	-110,61	-117,16	-117,16	-117,16	-115,38
0,2	27,06	-16,19	-42,39	-64,09	-80,58	-93,57	-104,09	-112,80	-120,16	-126,46	-126,46	-126,46	-124,75
0,25	27,06	-20,63	-49,29	-71,70	-88,37	-101,31	-111,67	-120,18	-127,31	-133,38	-133,38	-133,38	-131,74
0,3	27,06	-24,48	-55,13	-78,00	-94,73	-107,56	-117,74	-126,04	-132,96	-138,83	-138,83	-138,83	-137,24
0,35	27,06	-27,88	-60,21	-83,38	-100,08	-112,76	-122,75	-130,86	-137,59	-143,28	-143,28	-143,28	-141,74
0,4	27,06	-30,93	-64,68	-88,04	-104,68	-117,20	-127,01	-134,93	-141,49	-147,01	-147,01	-147,01	-145,52
0,45	27,06	-33,69	-68,68	-92,15	-108,70	-121,06	-130,69	-138,44	-144,83	-150,22	-150,22	-150,22	-148,76
0,5	27,06	-36,22	-72,30	-95,83	-112,25	-124,45	-133,91	-141,50	-147,75	-153,00	-153,00	-153,00	-151,59
0,55	27,06	-38,56	-75,59	-99,13	-115,43	-127,47	-136,77	-144,22	-150,33	-155,47	-155,47	-155,47	-154,08
0,6	27,06	-40,73	-78,61	-102,14	-118,31	-130,19	-139,34	-146,65	-152,64	-157,66	-157,66	-157,66	-156,31
0,65	27,06	-43,10	-81,40	-104,89	-120,92	-132,65	-141,66	-148,84	-154,72	-159,64	-159,64	-159,64	-158,31
0,7	27,06	-45,37	-83,98	-107,42	-123,31	-134,90	-143,77	-150,83	-156,60	-161,43	-161,43	-161,43	-160,13
0,75	27,06	-47,51	-86,39	-109,76	-125,52	-136,96	-145,71	-152,65	-158,33	-163,07	-163,07	-163,07	-161,80
0,8	27,06	-49,54	-88,65	-111,93	-127,56	-138,87	-147,49	-154,33	-159,92	-164,58	-164,58	-164,58	-163,33
0,85	27,06	-51,46	-90,77	-113,96	-129,45	-140,63	-149,14	-155,88	-161,38	-165,97	-165,97	-165,97	-164,74
0,9	27,06	-53,30	-92,76	-115,87	-131,22	-142,28	-150,68	-157,33	-162,74	-167,26	-167,26	-167,26	-166,05
0,95	27,06	-55,05	-94,65	-117,65	-132,88	-143,81	-152,11	-158,67	-164,01	-168,47	-168,47	-168,47	-167,27
1	27,06	-56,72	-96,43	-119,33	-134,44	-145,26	-153,46	-159,93	-165,20	-169,59	-169,59	-169,59	-168,41
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Temperatura teórica aproximada de escape [°C]												
27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06	27,06
-75,57	-73,58	-71,52	-69,40	-67,21	-64,95	-62,60	-60,18	-57,67	-42,49	-26,17	-4,57	27,06
-99,71	-97,72	-95,65	-93,49	-91,25	-88,92	-86,49	-83,95	-81,30	-64,79	-43,02	-16,59	27,06
-113,53	-111,60	-109,59	-107,49	-105,30	-103,01	-100,61	-98,09	-95,46	-78,73	-55,81	-24,93	27,06
-122,97	-121,11	-119,17	-117,14	-115,01	-112,78	-110,44	-107,98	-105,39	-88,77	-65,38	-31,41	27,06
-130,02	-128,23	-126,35	-124,38	-122,32	-120,16	-117,88	-115,48	-112,95	-96,55	-73,01	-36,73	27,06
-135,58	-133,85	-132,03	-130,12	-128,12	-126,02	-123,80	-121,46	-118,99	-102,85	-79,33	-41,31	27,06
-140,13	-138,45	-136,69	-134,84	-132,89	-130,84	-128,68	-126,40	-123,98	-108,12	-84,71	-46,01	27,06
-143,96	-142,32	-140,61	-138,81	-136,91	-134,91	-132,80	-130,57	-128,21	-112,63	-89,37	-50,19	27,06
-147,24	-145,65	-143,98	-142,22	-140,37	-138,42	-136,36	-134,17	-131,86	-116,55	-93,48	-53,97	27,06
-150,10	-148,55	-146,92	-145,20	-143,39	-141,48	-139,47	-137,33	-135,06	-120,01	-97,15	-57,41	27,06
-152,63	-151,11	-149,52	-147,84	-146,07	-144,20	-142,22	-140,13	-137,90	-123,10	-100,45	-60,56	27,06
-154,89	-153,40	-151,84	-150,19	-148,46	-146,63	-144,69	-142,63	-140,45	-125,88	-103,45	-63,47	27,06
-156,92	-155,47	-153,93	-152,32	-150,62	-148,82	-146,92	-144,90	-142,75	-128,40	-106,19	-66,18	27,06
-158,77	-157,34	-155,83	-154,25	-152,58	-150,81	-148,94	-146,96	-144,85	-130,70	-108,71	-68,70	27,06
-160,46	-159,05	-157,57	-156,02	-154,37	-152,64	-150,80	-148,84	-146,77	-132,82	-111,05	-71,06	27,06
-162,01	-160,63	-159,17	-157,64	-156,02	-154,31	-152,50	-150,58	-148,53	-134,78	-113,21	-73,28	27,06
-163,44	-162,08	-160,65	-159,14	-157,55	-155,87	-154,08	-152,19	-150,17	-136,59	-115,23	-75,38	27,06
-164,77	-163,43	-162,02	-160,54	-158,97	-157,31	-155,55	-153,68	-151,69	-138,29	-117,13	-77,36	27,06
-166,01	-164,69	-163,30	-161,84	-160,29	-158,65	-156,92	-155,08	-153,11	-139,87	-118,90	-79,24	27,06
-167,17	-165,87	-164,50	-163,05	-161,53	-159,91	-158,20	-156,38	-154,44	-141,36	-120,58	-81,03	27,06
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XVII



Tabla XVIII: Masa teórica a inyectar por ciclo (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Masa a inyectar [kg/ciclo]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0,05	0	1,95E-05	4,33E-05	6,93E-05	9,70E-05	1,35E-04	1,81E-04	2,27E-04	2,73E-04	3,19E-04	3,19E-04	3,19E-04	3,06E-04
0,1	0	3,14E-05	7,02E-05	1,14E-04	1,84E-04	2,54E-04	3,24E-04	3,93E-04	4,63E-04	5,33E-04	5,33E-04	5,33E-04	5,13E-04
0,15	0	4,16E-05	9,32E-05	1,72E-04	2,61E-04	3,50E-04	4,39E-04	5,28E-04	6,17E-04	7,06E-04	7,06E-04	7,06E-04	6,81E-04
0,2	0	5,08E-05	1,16E-04	2,22E-04	3,28E-04	4,34E-04	5,40E-04	6,46E-04	7,51E-04	8,57E-04	8,57E-04	8,57E-04	8,27E-04
0,25	0	5,94E-05	1,47E-04	2,68E-04	3,89E-04	5,10E-04	6,31E-04	7,52E-04	8,73E-04	9,94E-04	9,94E-04	9,94E-04	9,59E-04
0,3	0	6,75E-05	1,75E-04	3,10E-04	4,45E-04	5,80E-04	7,15E-04	8,50E-04	9,85E-04	1,12E-03	1,12E-03	1,12E-03	1,08E-03
0,35	0	7,51E-05	2,01E-04	3,49E-04	4,97E-04	6,45E-04	7,93E-04	9,41E-04	1,09E-03	1,24E-03	1,24E-03	1,24E-03	1,19E-03
0,4	0	8,25E-05	2,25E-04	3,86E-04	5,46E-04	7,07E-04	8,67E-04	1,03E-03	1,19E-03	1,35E-03	1,35E-03	1,35E-03	1,30E-03
0,45	0	8,96E-05	2,49E-04	4,21E-04	5,93E-04	7,66E-04	9,38E-04	1,11E-03	1,28E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,45E-03	1,41E-03
0,5	0	9,64E-05	2,71E-04	4,55E-04	6,38E-04	8,22E-04	1,01E-03	1,19E-03	1,37E-03	1,56E-03	1,56E-03	1,56E-03	1,50E-03
0,55	0	1,03E-04	2,93E-04	4,87E-04	6,81E-04	8,76E-04	1,07E-03	1,26E-03	1,46E-03	1,65E-03	1,65E-03	1,65E-03	1,60E-03
0,6	0	1,10E-04	3,14E-04	5,18E-04	7,23E-04	9,28E-04	1,13E-03	1,34E-03	1,54E-03	1,75E-03	1,75E-03	1,75E-03	1,69E-03
0,65	0	1,19E-04	3,34E-04	5,49E-04	7,63E-04	9,78E-04	1,19E-03	1,41E-03	1,62E-03	1,84E-03	1,84E-03	1,84E-03	1,78E-03
0,7	0	1,29E-04	3,53E-04	5,78E-04	8,02E-04	1,03E-03	1,25E-03	1,48E-03	1,70E-03	1,92E-03	1,92E-03	1,92E-03	1,86E-03
0,75	0	1,38E-04	3,72E-04	6,06E-04	8,40E-04	1,07E-03	1,31E-03	1,54E-03	1,78E-03	2,01E-03	2,01E-03	2,01E-03	1,94E-03
0,8	0	1,48E-04	3,91E-04	6,34E-04	8,77E-04	1,12E-03	1,36E-03	1,61E-03	1,85E-03	2,09E-03	2,09E-03	2,09E-03	2,02E-03
0,85	0	1,57E-04	4,09E-04	6,61E-04	9,13E-04	1,17E-03	1,42E-03	1,67E-03	1,92E-03	2,17E-03	2,17E-03	2,17E-03	2,10E-03
0,9	0	1,66E-04	4,27E-04	6,88E-04	9,49E-04	1,21E-03	1,47E-03	1,73E-03	1,99E-03	2,25E-03	2,25E-03	2,25E-03	2,18E-03
0,95	0	1,74E-04	4,44E-04	7,13E-04	9,83E-04	1,25E-03	1,52E-03	1,79E-03	2,06E-03	2,33E-03	2,33E-03	2,33E-03	2,25E-03
1	0	1,83E-04	4,61E-04	7,39E-04	1,02E-03	1,29E-03	1,57E-03	1,85E-03	2,13E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,41E-03	2,33E-03
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400



Masa a inyectar [kg/ciclo]												
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2,93E-04	2,80E-04	2,66E-04	2,53E-04	2,40E-04	2,27E-04	2,14E-04	2,01E-04	1,87E-04	1,17E-04	7,12E-05	3,19E-05	0
4,93E-04	4,73E-04	4,53E-04	4,33E-04	4,13E-04	3,93E-04	3,73E-04	3,53E-04	3,33E-04	2,26E-04	1,19E-04	5,16E-05	0
6,55E-04	6,30E-04	6,04E-04	5,79E-04	5,53E-04	5,28E-04	5,02E-04	4,77E-04	4,51E-04	3,15E-04	1,78E-04	6,85E-05	0
7,97E-04	7,66E-04	7,36E-04	7,06E-04	6,76E-04	6,45E-04	6,15E-04	5,85E-04	5,54E-04	3,92E-04	2,29E-04	8,37E-05	0
9,24E-04	8,90E-04	8,55E-04	8,21E-04	7,86E-04	7,51E-04	7,17E-04	6,82E-04	6,47E-04	4,62E-04	2,76E-04	9,78E-05	0
1,04E-03	1,00E-03	9,65E-04	9,26E-04	8,88E-04	8,49E-04	8,11E-04	7,72E-04	7,33E-04	5,26E-04	3,19E-04	1,12E-04	0
1,15E-03	1,11E-03	1,07E-03	1,03E-03	9,83E-04	9,41E-04	8,98E-04	8,56E-04	8,14E-04	5,86E-04	3,59E-04	1,32E-04	0
1,26E-03	1,21E-03	1,16E-03	1,12E-03	1,07E-03	1,03E-03	9,81E-04	9,35E-04	8,89E-04	6,43E-04	3,97E-04	1,51E-04	0
1,36E-03	1,31E-03	1,26E-03	1,21E-03	1,16E-03	1,11E-03	1,06E-03	1,01E-03	9,62E-04	6,97E-04	4,33E-04	1,69E-04	0
1,45E-03	1,40E-03	1,35E-03	1,29E-03	1,24E-03	1,19E-03	1,14E-03	1,08E-03	1,03E-03	7,49E-04	4,68E-04	1,86E-04	0
1,54E-03	1,49E-03	1,43E-03	1,37E-03	1,32E-03	1,26E-03	1,21E-03	1,15E-03	1,10E-03	7,99E-04	5,01E-04	2,03E-04	0
1,63E-03	1,57E-03	1,51E-03	1,45E-03	1,39E-03	1,34E-03	1,28E-03	1,22E-03	1,16E-03	8,47E-04	5,33E-04	2,19E-04	0
1,71E-03	1,65E-03	1,59E-03	1,53E-03	1,47E-03	1,41E-03	1,35E-03	1,28E-03	1,22E-03	8,93E-04	5,64E-04	2,34E-04	0
1,80E-03	1,73E-03	1,67E-03	1,60E-03	1,54E-03	1,48E-03	1,41E-03	1,35E-03	1,28E-03	9,38E-04	5,94E-04	2,49E-04	0
1,88E-03	1,81E-03	1,74E-03	1,68E-03	1,61E-03	1,54E-03	1,47E-03	1,41E-03	1,34E-03	9,82E-04	6,23E-04	2,64E-04	0
1,95E-03	1,88E-03	1,81E-03	1,75E-03	1,68E-03	1,61E-03	1,54E-03	1,47E-03	1,40E-03	1,02E-03	6,51E-04	2,78E-04	0
2,03E-03	1,96E-03	1,89E-03	1,81E-03	1,74E-03	1,67E-03	1,60E-03	1,52E-03	1,45E-03	1,07E-03	6,79E-04	2,92E-04	0
2,10E-03	2,03E-03	1,95E-03	1,88E-03	1,81E-03	1,73E-03	1,66E-03	1,58E-03	1,51E-03	1,11E-03	7,06E-04	3,05E-04	0
2,18E-03	2,10E-03	2,02E-03	1,95E-03	1,87E-03	1,79E-03	1,71E-03	1,64E-03	1,56E-03	1,15E-03	7,32E-04	3,18E-04	0
2,25E-03	2,17E-03	2,09E-03	2,01E-03	1,93E-03	1,85E-03	1,77E-03	1,69E-03	1,61E-03	1,18E-03	7,58E-04	3,31E-04	0
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XVIII



Tabla XIX: Temperatura real aproximada de escape (m.n.t.III con turbo)

Grado carga [%]	Temperatura real de escape [°C]													
0	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
0,05	27,00	55,72	70,51	79,21	84,62	80,63	71,00	62,54	55,07	48,42	48,42	48,42	50,25	
0,1	27,00	64,38	79,43	85,45	70,43	58,11	47,83	39,11	31,62	25,13	25,13	25,13	26,90	
0,15	27,00	69,75	84,03	72,82	56,98	44,37	34,10	25,57	18,37	12,21	12,21	12,21	13,88	
0,2	27,00	73,56	84,93	63,41	47,24	34,64	24,56	16,30	9,42	3,59	3,59	3,59	5,16	
0,25	27,00	76,45	78,07	55,93	39,66	27,21	17,37	9,40	2,81	-2,73	-2,73	-2,73	-1,24	
0,3	27,00	78,74	72,26	49,75	33,52	21,26	11,68	3,98	-2,34	-7,62	-7,62	-7,62	-6,20	
0,35	27,00	80,59	67,25	44,51	28,38	16,34	7,01	-0,44	-6,51	-11,57	-11,57	-11,57	-10,21	
0,4	27,00	82,13	62,83	39,98	23,99	12,17	3,08	-4,13	-9,98	-14,84	-14,84	-14,84	-13,54	
0,45	27,00	83,43	58,89	36,01	20,18	8,58	-0,28	-7,27	-12,93	-17,61	-17,61	-17,61	-16,35	
0,5	27,00	84,54	55,34	32,47	16,82	5,44	-3,21	-10,00	-15,48	-19,99	-19,99	-19,99	-18,78	
0,55	27,00	85,50	52,11	29,29	13,83	2,66	-5,78	-12,39	-17,71	-22,07	-22,07	-22,07	-20,90	
0,6	27,00	86,33	49,16	26,42	11,14	0,18	-8,08	-14,52	-19,68	-23,91	-23,91	-23,91	-22,78	
0,65	27,00	84,22	46,44	23,80	8,71	-2,06	-10,14	-16,42	-21,44	-25,55	-25,55	-25,55	-24,45	
0,7	27,00	81,96	43,92	21,39	6,49	-4,09	-12,00	-18,13	-23,03	-27,02	-27,02	-27,02	-25,96	
0,75	27,00	79,83	41,58	19,17	4,46	-5,95	-13,70	-19,69	-24,47	-28,36	-28,36	-28,36	-27,32	
0,8	27,00	77,82	39,40	17,12	2,58	-7,65	-15,25	-21,12	-25,78	-29,57	-29,57	-29,57	-28,56	
0,85	27,00	75,90	37,35	15,21	0,85	-9,23	-16,68	-22,42	-26,98	-30,69	-30,69	-30,69	-29,70	
0,9	27,00	74,08	35,42	13,43	-0,77	-10,68	-18,01	-23,63	-28,09	-31,71	-31,71	-31,71	-30,75	
0,95	27,00	72,35	33,60	11,76	-2,27	-12,04	-19,23	-24,75	-29,12	-32,66	-32,66	-32,66	-31,71	
1	27,00	70,69	31,89	10,19	-3,68	-13,30	-20,37	-25,79	-30,07	-33,54	-33,54	-33,54	-32,61	
Régimen [rpm]	0	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	



Temperatura real de escape [°C]												
27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00	27,00
52,13	54,08	56,10	58,18	60,34	62,57	64,88	67,27	69,76	84,83	79,68	64,65	27,00
28,74	30,65	32,64	34,71	36,87	39,13	41,49	43,95	46,53	62,72	84,30	73,83	27,00
15,62	17,44	19,34	21,33	23,41	25,59	27,88	30,29	32,82	49,05	71,59	78,99	27,00
6,81	8,53	10,34	12,24	14,23	16,32	18,53	20,86	23,32	39,28	62,14	82,37	27,00
0,33	1,97	3,69	5,50	7,41	9,42	11,54	13,79	16,17	31,77	54,64	84,75	27,00
-4,71	-3,15	-1,50	0,23	2,06	4,00	6,04	8,21	10,51	25,74	48,46	86,00	27,00
-8,79	-7,29	-5,71	-4,04	-2,28	-0,42	1,56	3,65	5,88	20,72	43,22	81,33	27,00
-12,17	-10,73	-9,21	-7,60	-5,91	-4,11	-2,20	-0,17	1,98	16,46	38,69	77,16	27,00
-15,04	-13,65	-12,18	-10,63	-8,99	-7,26	-5,41	-3,44	-1,35	12,78	34,72	73,42	27,00
-17,51	-16,17	-14,75	-13,25	-11,67	-9,98	-8,19	-6,28	-4,24	9,55	31,19	70,01	27,00
-19,67	-18,38	-17,00	-15,55	-14,01	-12,38	-10,64	-8,78	-6,80	6,69	28,03	66,90	27,00
-21,59	-20,33	-19,00	-17,59	-16,09	-14,50	-12,81	-11,00	-9,06	4,13	25,17	64,02	27,00
-23,29	-22,07	-20,78	-19,41	-17,95	-16,40	-14,75	-12,99	-11,10	1,81	22,56	61,35	27,00
-24,83	-23,64	-22,38	-21,05	-19,63	-18,12	-16,51	-14,79	-12,94	-0,29	20,16	58,87	27,00
-26,22	-25,06	-23,84	-22,53	-21,15	-19,68	-18,10	-16,42	-14,62	-2,22	17,96	56,55	27,00
-27,49	-26,36	-25,16	-23,89	-22,54	-21,10	-19,56	-17,92	-16,16	-3,99	15,92	54,37	27,00
-28,66	-27,55	-26,38	-25,14	-23,82	-22,41	-20,91	-19,30	-17,57	-5,62	14,02	52,32	27,00
-29,73	-28,65	-27,50	-26,29	-25,00	-23,62	-22,14	-20,57	-18,87	-7,14	12,25	50,38	27,00
-30,72	-29,66	-28,54	-27,35	-26,09	-24,74	-23,29	-21,75	-20,08	-8,55	10,59	48,54	27,00
-31,64	-30,60	-29,51	-28,34	-27,10	-25,78	-24,36	-22,84	-21,21	-9,87	9,03	46,80	27,00
2600	2800	3000	3200	3400	3600	3800	4000	4200	4400	4600	4800	5000

Tabla. XIX

