

Sesión del día 12 de Noviembre de 1922

Discurso de recepción

sobre

Motores térmicos y su porvenir

POR

D. TEÓFILO GONZÁLEZ BERGANZA

SEÑORES ACADÉMICOS:

Pocas veces, quizás ninguna, en actos como este la Academia de Ciencias de Zaragoza habrá recibido en su seno a persona que, cual yo, se vea más obligada a la gratitud. Y es que ésta debe meditar en razón inversa de los méritos del beneficiario. Los míos son tan escasos, que estimo como un honor inmerecido y superior a mí mismo el haber sido llamado a formar parte de esta doctísima Corporación, constituida por personalidades ilustres y de gran valer científico.

Mi primera impresión, al llegar a mi conocimiento el hecho de que la bondad de los señores Académicos me hacía el honor de llamarme para colaborar con ellos en los fines y tareas, que tan alto han puesto el nombre de esta Academia, fue la de preguntarme cuál era el concepto, la razón por que se me llamaba. Siendo el objeto de tan culta entidad el cultivo, adelantamiento y propagación de las Ciencias y sus aplicaciones, y habida cuenta de mis propias y escasas capacidades, y de la índole de profesión a que me consagro, es claro, que sólo el último concepto de propagador de la Ciencia y más concretamente de sus aplicaciones, puede haber movido a los señores Académicos a abrirme de modo tan cortés e inmerecido las puertas de la Academia.

Y en efecto, de cuantas personas tienen contacto diario con el saber humano, unas se dedican al cultivo puro y desinteresado de la Ciencia por la Ciencia misma. Despreocupadas de las ventajas prácticas e inmediatas que ella pueda aportar, se mueven en un plano de alta idealidad: son los creadores, los poetas de la Ciencia, que también ésta tiene su poesía. Otras personas, siguiendo las investigaciones y descubrimientos de las primeras, ensayan y estudian la manera de aplicar éstos, buscando su utilidad práctica inmediata, y finalmente, otras limitan su actividad a la utilización de los conocimientos teóricos y prácticos aportados por las dos primeras. Honrosamente, de las dos primeras y más importantes categorías cuenta la Academia de Ciencias de Zaragoza con una brillantísima representación. Yo me quedaré como el representante único de la última y menos importante categoría, y bien claro se ve, que sólo puedo contribuir al progreso de la Ciencia dentro, como antes he dicho, del último y más modesto de los objetos de la Academia, el de la "propagación de sus aplicaciones."

Mas, en este terreno, ofrezco con sincero entusiasmo y sin limitación alguna cuanto mi capacidad me permita, así como poner a contribución toda mi voluntad al servicio de la Academia, intentando hacerme digno de ella, y mostrando de esta manera que aprecio y agradezco, con toda verdad y con todo afecto para sus dignísimos miembros, a quienes saludo efusivamente, el inmerecido honor que me han discernido, y que constituye uno de los galardones que he de tener en más estima.

Y ahora perdonadme que en cumplimiento de un deber reglamentario moleste vuestra atención. Expresaré unas cuantas ideas sobre "LOS MOTORES TÉRMICOS Y SU PORVENIR."

LA MÁQUINA DE VAPOR

Desde que los trabajos de James Watt, realizados en la segunda mitad del siglo XVIII, dieron como resultado la invención de la máquina de vapor, grande y de capital importancia ha sido su influencia en el desarrollo y progreso

industrial de la sociedad humana. No sólo la industria hubo de modificarse al encontrar un nuevo elemento que la permitiera disponer de un agente motor eficaz y poderoso, sino que, mediante ella, pudo más tarde Stephenson inventar la locomotora, y Fulton aplicarla a la propulsión de los navíos, hechos ambos que marcan el comienzo del inmenso desarrollo de los transportes terrestres y marítimos, que tanto y tan poderosamente habían de cambiar las condiciones económicas en que la industria y la producción en general se desenvolvían, y hasta por la repercusión inevitable y la concatenación lógica del mundo económico con el social, y hasta con el moral, había de señalar una era nueva en la vida del mundo, al permitir establecer relaciones, no sólo de comercio, sino también afectivas y de ideas, entre los pueblos más apartados de la tierra, o al menos intensificar aquellas en alto grado, merced al acercamiento que supone una mayor velocidad y rapidez en su realización.

Estos dos hechos, que fueron dos consecuencias importantísimas que se derivaron de la invención de Watt, bastarían para que la máquina de vapor sea merecedora de toda alabanza, y la humanidad haya de considerar a ella y a su inventor como a unos de sus más grandes bienhechores. Quizá, y fuera del mundo estrictamente científico, no se haya hecho el aprecio debido al genio de Watt; tal vez, porque los descubrimientos científicos habidos en todos los órdenes durante el último siglo, se han sucedido con tal rapidez, y han sido de tan capital importancia, que la emoción de lo presente ha distraído la atención de quien brilló más distante cronológicamente, y la maravilla de las conquistas que el ingenio humano logró en su lucha con la naturaleza, y sobre todo en el campo de la electricidad, hizo aparecer como en un plano de más modesta categoría a quien, como Watt, dedicó su inmenso talento a una invención de aspecto menos sorprendente, hecha, además, en tiempos en que los medios de publicidad eran escasos, y los hombres a quienes las conquistas científicas interesaban, o eran capaces de comprenderlas, bien poco numerosos todavía. Aún no había llegado el vulgo a intervenir con la colaboración de su aplauso y de su interés en la labor científica de aquel tiempo.

Es claro que Watt tuvo sus predecesores, como tuvo también sus continuadores. Entre los primeros merecen citarse, entre otros, a Denis Papin y Newcomen, y hasta el niño Potter, a quien su natural afición al juego infantil le sugiere la idea de la maniobra automática de las válvulas. Después de Watt, sólo cuestiones de detalle, si bien importantísimas, muchas de ellas, pero que no atañían a la esencia de su invención, fueron modificando la máquina de vapor hasta llevarla al estado presente, en el que no caben ya mejoramientos esenciales. Los perfeccionamientos más importantes se refirieron a la substitución del mecanismo de balancín por el más sencillo de biela y manubrio, al aumento de la presión y de la expansión del vapor, a la expansión fraccionada, al empleo del vapor recalentado, etc.

¿Cabe decir, sin embargo, que la máquina de vapor alternativa sea un motor perfecto? Desde luego, no. Siendo un motor térmico habrá que acudir para su análisis a los conocimientos de la Termodinámica, y preguntarnos si la transformación del calor en trabajo proporciona un buen rendimiento, o más concreta y científicamente, si el rendimiento térmico de la máquina de vapor es siquiera aceptable. Desgraciadamente este rendimiento tiene un valor bien exiguo. Bien es verdad que no se ha logrado a la hora presente inventar un motor térmico que satisfaga en este aspecto las exigencias de nuestro deseo. Sería preciso para ello que el motor desarrollase exactamente el ciclo de Carnot, y que la diferencia entre las temperaturas de las dos isotérmicas del ciclo sea bastante grande. El ciclo teórico de la máquina de vapor es el ciclo de Rankine, que en realidad no difiere gran cosa del ciclo de Carnot, mas las distintas causas de pérdida de trabajo, como son los estrangulamientos del vapor a su entrada y salida del cilindro, la influencia del espacio muerto, y sobre todo la acción térmica complejísima de las paredes, que destruye completamente la adiabaticidad de la curva de expansión, y modifica igualmente las restantes fases del ciclo, separan más y más el ciclo real de la máquina del ciclo de Carnot, y disminuyen considerablemente el rendimiento térmico.

Por otra parte, la naturaleza misma del agente motor hace que la diferencia entre las temperaturas extremas del ciclo sea realmente exigua. Para el vapor de agua saturado la ley de variación de la presión en función de la temperatura, manifiesta, bien claramente, que para incrementos constantes de aquella los de esta forman una serie decreciente, y tanto más rápida cuanto mayor es la presión. Ello demuestra la imposibilidad de conseguir una alta temperatura para la isotérmica superior, so pena de utilizar presiones elevadísimas para el vapor de admisión. Esta dificultad se ha resuelto en parte con el empleo del vapor recalentado, que, sin variar la presión, permite elevar la temperatura, a la vez que modifica de manera notable, y en sentido favorable, la acción perjudicial de las paredes. Pero las constantes mecánicas de resistencia de los metales, y la resistencia a la acción del calor de los aceites de lubricación disminuyen cuando la temperatura aumenta, y limitan por ello el grado de recalentamiento. En la práctica corriente no se suele pasar de una temperatura de 350° . Sería de desear que los progresos de la Metalurgia lograsen preparar aceros especiales, sobre todo para las turbinas de vapor, que permitan la obtención de temperaturas elevadas, hasta de 500° a 700° , ya que las características termodinámicas del vapor a estas temperaturas son extremadamente ventajosas.

Respecto a la temperatura de la isotérmica inferior, empleando condensadores perfeccionados, como el vacuum de Mr. Parsons y la bomba Leblanc, podrá a lo sumo obtenerse una temperatura de 30° , que corresponde a un grado de vacío de un 95 por 100 aproximadamente. Conviene advertir, sin embargo, que estos grados elevados de vacío sólo son prácticamente ventajosos en las turbinas de vapor. De todas suertes, se ve, que aun exagerando los límites extremos de temperatura entre los cuales el vapor evoluciona, la diferencia o desnivel térmico del ciclo es bien poco considerable.

Hasta ahora sólo el rendimiento térmico indicado, o sea el que se refiere al trabajo mecánico recogido sobre el émbolo, ha sido considerado en este análisis. Mas, lo que real-

mente interesa industrialmente es el rendimiento térmico efectivo del conjunto de la instalación, incluida la caldera y cuantos aparatos auxiliares, como el recalentador, economizador, condensador, etc., consumen calor, o bien trabajo mecánico a él equivalente. Teniendo en cuenta todas estas causas de pérdida, el citado rendimiento térmico efectivo resulta considerablemente disminuído. Aun cuando no es posible dar valores absolutos de este rendimiento, pues depende de la perfección de la máquina y del generador, del modo de conducirlos, del combustible empleado, etc.; un sencillo cálculo en las hipótesis más favorables, haría ver que se halla comprendido entre un 10 y un 15 por 100, valor verdaderamente desconsolador, y que ha sido el acicate que ha impulsado a los inventores a buscar otros motores que aventajen a la máquina de vapor en este respecto.

Apareció entonces el motor de combustión interna, y hasta la misma turbina de vapor a luchar con la máquina de émbolo. Cabe, pues, preguntarse, si ésta, que puede decirse ha sido el motor clásico del siglo XIX, ¿será al fin suplantada por sus competidores, en complicidad, además, con la turbina hidráulica y el motor eléctrico? Difícil y aventurado sería en los momentos presentes contestar a esta pregunta con una afirmación rotunda. Cierto, que es grande el camino recorrido a la fecha por sus rivales, tanto en lo que se refiere a la extensión de sus aplicaciones, cuanto a los perfeccionamientos experimentados desde su aparición; pero aún la máquina de vapor se defiende por sus propiedades mecánicas de regularidad y elasticidad de potencia, y por la seguridad de su funcionamiento, en cuyas propiedades no han logrado aventajarla los restantes motores térmicos hoy en uso. Y aun económicamente en muchos casos, puede competir con sus rivales, sobre todo si se la dota de todos sus aparatos complementarios, como recalentador, condensador, etc. Es claro que con ello se complica la instalación, desapareciendo la primitiva sencillez de la máquina de vapor, comparable entonces con la complicación del motor de combustión interna, necesitado de gran número de órganos y aparatos auxiliares; pero con la ventaja sobre éste de no impedir el funciona-

miento del motor en caso de avería de uno de ellos. Puede prescindirse del recalentador, del condensador, etc., si bien con detrimento de la economía, pero no del aparato de encendido, por ejemplo, o de otro órgano auxiliar de un motor de explosión.

A pesar de todo, mucho se va restringiendo el empleo de la máquina de émbolo, y hasta en el campo en que parecía había de dominar de modo absoluto, en la locomoción ferroviaria, va perdiendo su monopolio. Pronto la locomotora eléctrica reemplazará a la de vapor. A la hora presente la substitución de un sistema de tracción por otro es sólo un problema, cuya solución ha de buscarse en consideraciones de orden económico y financiero, y hasta político, ya que técnicamente puede considerársele resuelto.

La locomotora de vapor ofrece, desde luego, inconvenientes de importancia. Su rendimiento mecánico es pequeño y variable con el régimen de marcha. Las condiciones y velocidad de funcionamiento del motor están ligadas a la velocidad del tren, lo que trae como consecuencia el que la energía del vapor, y por consiguiente, la del combustible, no sean aprovechadas en las condiciones de máximo efecto útil. Se comprende, por tanto, que habrá en cada caso una velocidad de marcha para la cual el consumo de combustible sea mínimo. Su potencia de arranque es débil, lo que determina una aceleración de escaso valor en la puesta en marcha, con la consiguiente pérdida de tiempo en las paradas. Por otra parte, la potencia de la locomotora está en relación con el valor de la superficie de calefacción de su caldera, y es claro, que para aumentar aquélla será menester aumentar en la proporción debida las dimensiones y peso de la locomotora, lo que puede determinar una carga excesiva por eje sobre el carril, y consiguientemente, la necesidad de emplear mayor número de ejes acoplados, dificultándose el paso de las curvas. Por ello para grandes potencias se ha recurrido al empleo de locomotoras articuladas, que distribuyen los ejes motores en dos grupos accionados cada uno por un par de cilindros, disposición complicada en su construcción y manejo. Y finalmente, la variación periódica del par motor,

derivada, por una parte, del funcionamiento mismo de la máquina de vapor, y de otra, de las propiedades del mecanismo de biela y manivela, origina movimientos perturbadores de la locomora, que determinan sobrecargas sobre los carriles y aumentan la resistencia del tren. Tiene en cambio la locomotora de vapor la inmensa ventaja de llevar en sí misma la fuente de energía, bastándola encontrar en ruta provisiones de agua, combustible y lubricantes, mientras que la locomotora eléctrica estará siempre bajo la dependencia de la central y cualquier avería en ésta o en la canalización interrumpirá el servicio en toda la zona afectada.

Todas las desventajas de la tracción por vapor resultan remediadas en gran parte las unas, y otras anuladas en su totalidad con la tracción eléctrica, que permite aumentar la capacidad de transporte de las líneas, y dar mayor elasticidad a la explotación. Pero tanto como sus ventajas influye en el deseo de recurrir a la tracción eléctrica, el justificado afán de aprovechar la energía de la hulla blanca, substra-yéndose así a la tiranía del carbón. Es claro, que no habrá más remedio en muchos casos que recurrir a la energía térmica, ya como central principal, ya como complementaria o de socorro.

Según esto, si la tracción eléctrica llega a imponerse de modo absoluto ¿la máquina de vapor será desplazada completamente de la industria de los transportes? ¿Cabrá su empleo en las centrales térmicas a que acabo de referirme? Desde luego que cabe su utilización, mas, los progresos modernos en la construcción y empleo de las turbinas de vapor, que por lo menos para las grandes potencias, necesarias en esta clase de aplicaciones, dan un rendimiento térmico efectivo comparable con el de las mejores máquinas alternativas de expansión múltiple, y por otra parte, su disposición, regularidad de funcionamiento y velocidad de rotación, que permite su acoplamiento directo con los generadores eléctricos, las hacen particularmente aptas y más ventajosas para este empleo que la máquina de vapor alternativa.

Y aun en algunas centrales térmicas, de no mucha potencia, o en casos particulares, podrá acudir al empleo del

motor de combustión interna, como por ejemplo, cuando sea posible disponer del gas de los altos hornos como residuo de la industria metalúrgica.

Y no sólo en los transportes terrestres, sino en los marítimos, ha ya comenzado de hecho a declinar el imperio absoluto que la máquina de émbolo ejercía, y ha sido precisamente su hermana la turbina de vapor la que primeramente le ha disputado su hegemonía. A Parsons se deben los primeros ensayos para la aplicación de las turbinas de vapor a la marina, quien en 1894 fundó la "Parsons Marine Steam Turbine Company". Después de la turbina Parsons se abrieron también camino en la navegación la Rateau y la Curtis, que tienen sobre aquella las ventajas de su más pequeña velocidad de máximo rendimiento, y su menor emplazamiento. La primera ventaja deriva del hecho de ser las dos últimas turbinas de acción y la primera de reacción.

Después de la turbina de vapor ha sido también el motor de combustión interna el que ha venido a luchar en este campo con la máquina alternativa. Numerosos tipos se han creado con este objeto, utilizando todos ellos el petróleo como combustible; pero creo que el motor Diesel ha de ser el preferido por las ventajas que ofrece sobre el motor de explosión. Es claro que para trasatlánticos de gran tonelaje y de gran potencia son preferibles las turbinas de vapor, pero para embarcaciones de pequeño y medio tonelaje en las que estas ofrecerían un débil rendimiento, y tendrían, además, otros inconvenientes, los motores de petróleo pueden reemplazar ventajosamente a la máquina de vapor, principalmente porque la ausencia de generadores, y el más fácil almacenamiento del combustible, aumentan la capacidad útil de transporte y el radio de acción del navío, facilitan la maniobra y disminuyen el personal necesario.

Y si en los transportes, tanto terrestres como marítimos, es donde la máquina de vapor parecía tener más sólidamente asentado su predominio, va siendo este socavado; en las industrias manufactureras y extractivas, incluyendo entre las primeras los talleres de construcción y reparación de máquinas, va con más razón retringiéndose su empleo. Aquí es

también preferentemente la electrificación la que se va imponiendo, sobre todo en los grandes centros de población, en los que es fácil la constitución de grandes entidades financieras que tomen a su cargo el suministro de energía eléctrica, utilizando para su producción saltos de agua, en combinación, si se quiere, para mayor seguridad de los grandes intereses industriales que a ellas se confían, con centrales térmicas de socorro.

En estas condiciones las pequeñas fábricas y talleres no han dudado un momento en adoptar el motor eléctrico como medio de obtener la fuerza motriz que necesitan, y hasta la electrificación ha hecho posible el establecimiento de muchos de estos pequeños talleres, para los cuales la fuerza motriz por vapor les hubiera supuesto un gasto de instalación desproporcionado con su capital. Es claro, que hoy pueden acudir al motor de gasolina o petróleo de pequeña potencia, como antes ocurría con el motor de gas del alumbrado; pero, en general será de instalación más sencilla y más económico de explotación recurrir a la energía eléctrica contratada.

En fábricas y talleres de importancia cuya capacidad financiera les consienta mostrarse independientes de la empresa suministradora de fluido eléctrico, el problema de la electrificación es exclusivamente económico, ya que técnicamente presenta ventajas evidentes en gran número de industrias.

Considero fuera de la índole de este insignificante trabajo el entrar a detallar los distintos sistemas de electrificación hoy en uso; ni discutir, siquiera fuera en términos generales, los casos en que debe ser empleado cada uno.

El adoptar uno u otro, acudiendo al motor único para toda la fábrica, al motor por grupos o al motor independiente para cada máquina, es un problema que ha de ser resuelto en cada caso en relación con la naturaleza de la industria; bastando citar que uno de los elementos a tener en cuenta preferentemente para la elección de sistema es el factor de carga de la instalación mecánica, o sea la relación entre la potencia media consumida y la máxima necesaria en

un momento dado, del cual depende en gran medida el rendimiento económico del motor.

Pero, es más; la electrificación no se ha limitado a proporcionar la fuerza motriz que las máquinas operadoras necesitan, sino que a la vez ha influido en ellas modificando su disposición mecánica, como por ejemplo, ocurre con las máquinas de acepillar de los talleres de construcción. Los clásicos mecanismos de inversión de marcha con retorno rápido del carro han sido reemplazados por dispositivos eléctricos diversos, que en este, como en muchos otros casos, proporcionan una mayor sencillez y un funcionamiento más adecuado, con la consiguiente mejora del rendimiento o capacidad de trabajo de la máquina.

Como resumen del análisis somero, y por tanto incompleto, que precede, se ve que la importancia de la máquina de vapor alternativa ha ido decayendo paulatinamente. Mas, aunque su desaparición llegue a ser completa, pasando a la categoría de hecho histórico, merced a los progresos que aún pueden ser realizados, y que lo serán seguramente, en la técnica eléctrica y en los motores de combustión interna, quedará el recuerdo de su existencia y apogeo unido al de la creación de la gran industria moderna, que sólo fue posible mediante ella al disponer de un motor potente, capaz de producir la energía que esta necesitaba, a la vez que también exigía para su posibilidad y desarrollo transportes intensos y rápidos, que el ferrocarril y la navegación a vapor le consintieron. Por todo ello, la máquina de vapor ha de ser por siempre venerada, y no sin pena, como cuando se despide a un antiguo amigo y bienhechor, había de ser abandonada.

LA TURBINA DE VAPOR

A Carlos Parsons y Gustavo de Laval corresponde la gloria de haber llegado, cada uno por su lado, a la invención de la turbina de vapor; que, apenas transcurrido un siglo de la invención de Watt, había de venir a ser una temible competidora de la máquina de émbolo, y a substituir a ésta

en muchas de sus más importantes aplicaciones. Sin embargo, antes que ellos algunos sabios y constructores habían expresado la idea, o intentado realizarla, de utilizar la velocidad del vapor, obtenida merced a un salto de presión, en forma análoga a como es aprovechada la energía del agua en una turbina hidráulica, y el mismo Watt en 1784 obtuvo un privilegio por una turbina de reacción por él inventada. El ingeniero francés Tournaire se expresaba en 1853, treinta años antes de los trabajos de Parsons y Laval, en los siguientes términos: "Los fluidos elásticos adquieren enormes velocidades bajo la influencia de presiones, por débiles que éstas sean. Para utilizar convenientemente estas velocidades empleando ruedas sencillas análogas a las turbinas de agua, será preciso admitir un movimiento de rotación extraordinariamente rápido, y hacer extremadamente pequeña la suma de los orificios, aun para un gasto grande de fluido. Se eludirán estas dificultades, haciendo perder al vapor o al gas su presión, sea de una manera gradual y continua, sea por presiones sucesivas, y haciéndole obrar muchas veces sobre los álabes de turbinas convenientemente dispuestas". Queda en estas palabras perfectamente definida la turbina de vapor, y vislumbrada claramente la necesidad del fraccionamiento del salto total de presión para reducir la velocidad de rotación.

Y la conocida eolipila de Herón de Alejandría, realizada ciento veinte años antes de nuestra era, es en realidad una turbina. Sólo que en aquella, verdadero juguete de física, la velocidad de salida del vapor es solamente debida a la diferencia de presiones entre el interior y el exterior del aparato, sin que la expansión del vapor juegue papel alguno. Fue Laval el que, ideando la tobera divergente, cuya teoría sería dada posteriormente, permitió al vapor expansionarse antes de recoger su energía cinética, aumentándose así ésta. Parsons llegó a otra solución del mismo problema, haciendo que el vapor se expansionase a la vez que avanzaba a través de la turbina. Según esto, la turbina de Laval había de ser una turbina sencilla de acción y la de Parsons una turbina múltiple de reacción.

Con todo, y ser importantísima la invención de la turbina de vapor, ella no representa en todo caso más que un perfeccionamiento en la manera de utilizar la fuerza expansiva de éste; mientras que la invención de Watt revolucionó profundamente la industria, y sin ella la gran industria moderna hubiera venido con muchos años de retraso. No ha de verse, sin embargo, en esta circunstancia de mero orden de aparición de ambas máquinas, un demérito de la turbina, que si se admite que ésta representa un perfeccionamiento del motor de vapor, la ley perenne del progreso exigía precisamente que este orden cronológico se cumpliera.

Pero, en realidad, ¿es la turbina de vapor un motor más perfecto que la máquina de pistón? Veámoslo, analizando, siquiera sea ligeramente, su constitución y funcionamiento, tanto térmica como mecánicamente.

Sabido es que el ciclo teórico que la turbina realiza es el mismo que el de la máquina alternativa, o sea el ciclo de Rankine. El ciclo real, cuya área mide el trabajo indicado, tiene diferente forma en otro tipo de motor. En la turbina la expansión puede ser completa, así como no existiendo espacio muerto, ni por consiguiente compresión, la línea representativa del escape es una recta continua de presión constante. La ley de expansión es sensiblemente la misma para ambas máquinas. En la turbina no existen tampoco los avances a la admisión y al escape. Según esto, el ciclo real de la turbina en cuanto a su forma se aproxima más al teórico de Rankine que el de la máquina de vapor. Por otra parte, las pérdidas de calor por transmisión al exterior y las debidas a la acción de las paredes son de menor importancia en las turbinas, ya que en estas el vapor marcha constantemente en el mismo sentido, y no existen los cambios de temperatura de las paredes, que en las máquinas de émbolo determinan fenómenos alternativos de condensación y reevaporación del vapor, y la consiguiente pérdida de trabajo.

Sin embargo, aunque por su forma el ciclo real sea más aproximado al ciclo de Rankine, experiencias directas han demostrado que el rendimiento térmico relativo, o sea la relación entre el área del ciclo real y la del teórico, es mayor

en las máquinas de émbolo que en las turbinas, y en éstas mayor en las de reacción que en las de acción. Ello es debido a varias causas: a la gran velocidad con que el vapor circula por la turbina; pues, aunque se trata de un fluido ligero, los rozamientos, choques y cambios bruscos de dirección determinan pérdidas de trabajo importantes, que acumulándose bajo la forma de calor en el vapor, se traducen en una elevación de la curva de expansión por encima de la adiabática, aumentándose la pérdida de calor en el escape. Estas pérdidas son menores en las turbinas de reacción que en las de acción, pero, en cambio, en aquellas tienen lugar fugas en las juntas o espacios de separación entre el distribuidor y rueda móvil. Otra pérdida en las turbinas es la debida a la velocidad, bastante considerable, con la cual el fluido abandona la rueda móvil y marcha al condensador, que equivale a una pérdida de carga entre ambos. Todas las pérdidas enumeradas son mayores que las propias y exclusivas de las máquinas de pistón y determinan el menor valor del rendimiento térmico relativo de las turbinas

Para aumentar éste se ha recurrido al empleo del vapor recalentado y a forzar la condensación mediante el empleo de condensadores perfeccionados.

Si ya el vapor recalentado ofrece ventajas de consideración en las máquinas alternativas, mayores las presenta aún en las turbinas.

Ellas son debidas a su menor densidad, y a la ausencia de gotas líquidas, que siempre acompañan al vapor saturado, propiedades que disminuyen considerablemente las pérdidas por choque y rozamiento del vapor en los conductos, y las debidas al movimiento del rotor rozando en la masa de aquél. Por otra parte, los inconvenientes del vapor recalentado referentes a la dificultad de la lubricación y a la necesidad de mantener sensiblemente constante el grado de recalentamiento, no existen en las turbinas, a causa de que el vapor no está en contacto con los órganos que han de lubricarse. Se admite, según resultados de diversas experiencias, que la economía de vapor obtenida es de un 1 por 100 por cada cinco a ocho grados de recalentamiento, según el tipo de turbina.

Las ventajas de la condensación son también mayores en las turbinas que en las máquinas alternativas, por el hecho de permitir aquellas la expansión completa, con lo que aumenta el área útil del diagrama en mayor proporción que en éstas. No obstante, si se aumenta excesivamente la admisión, puede ocurrir que la expansión no sea completa, anulándose en parte los beneficios de la condensación. Por todo ello, las turbinas han introducido el uso de condensadores perfeccionado como el vacuum de Parsons y la bomba Westinghouse-Leblanc.

En resumen, térmicamente puede decirse que la turbina de vapor es inferior a la máquina de pistón. La superioridad de aquella reside en su constitución mecánica, derivada de modo principal, aunque no único, del hecho de obtenerse en ella el movimiento de rotación directamente sin necesidad del mecanismo de biela y manivela. Como consecuencia resulta un mayor valor del rendimiento orgánico, que puede compensar las pérdidas térmicas, y en definitiva hacer más pequeño el consumo de vapor por caballo-hora efectivo que en la máquina de pistón. Sin embargo, experiencias directas han demostrado que esta compensación y este menor consumo sólo tienen lugar para potencias superiores a 1000 ó 1500 caballos, según los tipos. Para potencias inferiores la máquina de vapor es más económica, y esta circunstancia limita bastante el empleo de las turbinas. Nótese que la pérdida por rozamiento de la rueda móvil con la masa de fluido motor en que está envuelta es más bien de carácter mecánico que térmico, y la mayor parte de los autores así la consideran, incluyéndola en el estudio del rendimiento orgánico. Stodola ha encontrado que el trabajo resistente opuesto por el fluido ambiente a la rotación de un disco crece, de modo aproximado, proporcionalmente al cubo del número de vueltas, a la superficie del disco y a la densidad del fluido. Se comprende, por tanto, la importancia de esta pérdida en las turbinas, habida cuenta de su gran velocidad de rotación, y el considerable beneficio que reporta el empleo del vapor recalentado.

El par motor de la turbina es constante, y como consecuencia más regular el movimiento de rotación del árbol. El

volante es, por tanto, innecesario, y la ausencia de trepidaciones, que en las máquinas de émbolo se producen por efecto de las variaciones periódicas del par motor, y de las fuerzas de inercia de las piezas con movimiento alternativo, permite una mayor sencillez en las fundiciones y es también de gran importancia en sus aplicaciones a la marina.

En relación con la regulación hay que señalar un inconveniente de las turbinas de vapor. Generalmente cada turbina tiene una velocidad de máximo rendimiento, y para velocidades que se aparten mucho de ésta el rendimiento de la turbina deja bastante que desear, por modificarse las condiciones en que el fluido motor trabaja. Esta falta de elasticidad para plegarse a potencias variables es preciso tenerla en cuenta en las aplicaciones de las turbinas.

Su par motor es bastante débil si se le compara con el de las máquinas de pistón, y se comprende que así sea sin más que recordar que siendo la potencia el producto del par por la velocidad de rotación, el gran valor de ésta determina la pequeñez de aquél.

Reseñadas a grandes rasgos las propiedades más importantes de las turbinas de vapor, ellas han de guiar al técnico cuando trate de buscar a este motor aplicación adecuada. Por lo ya dicho se comprende, que si la turbina de vapor ha venido a competir con la máquina de émbolo, debe aún recorrer mucho camino en su perfeccionamiento para suplantarla en la totalidad de sus aplicaciones. Sin embargo, apenas aparecida ya hizo innecesarios los esfuerzos de los ingenieros, encaminados a la construcción de tipos de máquinas de vapor de gran velocidad, destinadas al acoplamiento directo con las generatrices eléctricas. La turbina de vapor ha resuelto ventajosamente este problema.

En términos generales, la consideración principal, aunque no única, que el técnico ha de tener en cuenta al elegir un tipo de motor, es la del rendimiento total de conjunto de la instalación, o sea máquina motriz y máquina operatriz combinadas, y el mayor rendimiento se conseguirá si se busca un motor cuyas propiedades estén más en armonía con aquellas de la máquina operatriz que ha de conducir. Se compren-

de fácilmente, que sería ilógico emplear una turbina de vapor, cuya velocidad de rotación es considerable y regular, y su par motor pequeño, para mover un taller mecánico, por ejemplo, en el que la velocidad es pequeña, las variaciones del par resistente bastante frecuentes y el par de arranque necesario de alguna consideración. En cambio, todas aquellas máquinas operatrices de gran velocidad, par resistente constante en cada vuelta y variable proporcionalmente a la velocidad, lo que, además, determina como consecuencia un par de arranque pequeño, se prestan perfectamente a ser conducidas por las turbinas de vapor.

En estas condiciones se encuentran las máquinas dinamo-eléctricas, los ventiladores y bombas rotativas y las hélices propulsoras de los buques, en cuyas aplicaciones la turbina ha encontrado un desarrollo más considerable.

En su aplicación a la propulsión de los buques no han dejado, sin embargo, de presentarse dificultades de importancia. En primer lugar, la irreversibilidad de las turbinas imposibilitaba las maniobras de fondeo en los puertos, dificultad que fue solventada, bien con el empleo de una máquina alternativa, bien con el de otra turbina de menor potencia, llamada en términos marinos turbina de cía, la cual gira en sentido contrario de la principal, y va montada en la mayor parte de las instalaciones en el mismo cuerpo de ésta.

Otra dificultad hubo que vencer, sobre todo en los buques de guerra, debida a la pequeña elasticidad de potencia de las turbinas, ya señalada anteriormente. Si, como es lógico, la velocidad de máximo rendimiento de la turbina coincide con la de marcha normal del buque, su rendimiento será deficientísimo a velocidad reducida, e igualmente descenderá el rendimiento de la hélice. Al principio se resolvió esta dificultad creando un estrangulamiento del vapor a su entrada en la turbina. Parsons dio otra solución fundada en el empleo de una turbina, que llamó de crucero, especialmente proyectada para la marcha lenta, y accionando hélices independientes. Ordinariamente estas turbinas funcionan en combinación con las turbinas principales de baja presión, y hacen

el oficio de reductoras de la presión del vapor, pero aprovechando la energía de éste.

Los primeros ensayos de aplicación de las turbinas de vapor a la marina no fueron ciertamente alentadores; un consumo elevado de vapor, y por tanto, un rendimiento deplorable, resumen los resultados obtenidos. Estudiadas las causas determinantes de este fracaso, no tardó en averiguarse que eran en esencia debidas a una falta de coincidencia en los valores de la velocidad de máximo rendimiento de la turbina y la de la hélice. Sabido es, que la velocidad de rendimiento máximo de las hélices es relativamente pequeña, y si a partir de este valor la velocidad crece el rendimiento disminuye, hasta que llega un momento en que se produce el fenómeno llamado por Froude cavitación. Este fenómeno es un efecto de la fuerza centrífuga, y cuando se produce todo el trabajo comunicado a la hélice se emplea en mantener el agua fuera del espacio comprendido en el interior del sólido de revolución engendrado por ella en su movimiento: la acción propulsora es, por tanto, nula.

Hubo, pues, necesidad de solventar esta dificultad y la solución se encontró, de un lado, en la subdivisión de la turbina, fraccionando la expansión del vapor en varias turbinas, llamadas de alta, media y baja presión, accionando cada una de ellas un árbol porta-hélice; y de otro, en la modificación del diámetro, paso, y en general de las características de las hélices, así como en la multiplicidad de éstas, en relación su número con el número y disposición de las turbinas. Ello equivale a reducir el valor de la velocidad de rendimiento de la turbina; al mismo tiempo que aumenta el correspondiente a la hélice hasta hacerlos coincidentes. De todas suertes, la distancia que hubo necesidad de franquear para conseguir este resultado es de alguna consideración, y ello explica el que las turbinas den un mejor resultado en las naves de gran tonelaje y gran velocidad, velocidad que el Profesor Rateau, inventor de un tipo de turbina, fija en veinte nudos como mínimo. En buques de escaso tonelaje y poca velocidad será difícil que la turbina pueda competir con la máquina de vapor. Bien es verdad, que en estos casos puede emplearse

el motor de combustión interna. El ya citado Mr. Rateau preconiza como solución más económica el empleo combinado de máquinas alternativas y turbinas. Esta solución, poco airosa en verdad para las últimas, está justificada en el hecho cierto de que éstas, al contrario de las máquinas de pistón, son más aptas para utilizar el vapor a baja presión. Así pueden emplearse máquinas de expansión múltiple que reciben el vapor directamente de la caldera y turbinas que funcionan con el vapor de escape de aquéllas. Aceptando esta solución, que económicamente es también aconsejable en otras aplicaciones, se consigue a la vez resolver el problema de la marcha lenta y el de la inversión de marcha.

Se emplean también, buscando la mejor asociación de la turbina y de la hélice, reductores de velocidad, que pueden ser de tres tipos, mecánicos, hidráulicos y eléctricos. Sin entrar ahora en su enumeración y descripción, se comprende que complican la instalación, aumentando las probabilidades de averías e interrupciones en el funcionamiento. Tienen, si embargo, en su favor la posibilidad de obtener con los mismos elementos y fácilmente la marcha hacia otras y la marcha lenta.

Como curiosidad expongo los datos de las turbinas del Lusitania, cuyo hundimiento por el torpedo de un submarino durante la última contienda mundial tanta impresión produjo. Montaba este buque, de 38.000 toneladas de desplazamiento, cuatro turbinas de vapor, correspondientes a otras tantas hélices de propulsión, desarrollando en conjunto una potencia de 72.000 caballos de vapor, y permitiendo obtener una velocidad de veinticinco nudos. La parte giratoria de cada turbina pesaba 130 toneladas.

Se deduce fácilmente de todo lo dicho, que la turbina de vapor representa un progreso de importancia en la historia de las máquinas motrices; aventaja a las máquinas de pistón en muchos de sus aspectos, y es, por tanto, uno de sus competidores; mas no es de presumir llegue a reemplazarla en la totalidad de sus aplicaciones. No obstante, allí donde la turbina de vapor no es apropiada, puede encontrarse la máquina de pistón con su otro enemigo, el motor de com-

bustión interna. Mas, como dice Belluzzo, ilustre turbinista italiano: "Si las turbinas de vapor por un lado, y los motores de gas por otro han sucedido a la máquina de émbolo, las turbinas de gas reconciliarán en el museo industrial en un mañana próximo, a los potentes enemigos de nuestro tiempo". ¿Será aventurado este pronóstico? Probablemente; al menos en lo que se refiere al dominio absoluto y exclusivo de la turbina de gas sobre el resto de los motores térmicos. No porque aquélla, aun en período de ensayo, no llegue a su completo desarrollo, que más pronto o más tarde entrará en el campo activo de la industria; sino porque los modos de acción del agente motor por presión y por fuerza viva presentan cada uno sus modalidades propias, que imprimen al motor propiedades distintas, y ambos modos son necesarios, según la índole de las aplicaciones a que el motor se destina.

EL MOTOR DE EXPLOSIÓN

En 1877 el ingeniero alemán Otto, a quien podría llamarse el Watt del motor de gas, creó el primer motor de explosión verdaderamente industrial. Funcionaba con gas del alumbrado, obedeciendo al ciclo de cuatro tiempos que el francés Beau de Rochas ideara quince años antes. Naturalmente, que la idea de utilizar como fuerza motriz la energía puesta en juego en la explosión de una mezcla detonante era muy antigua. Ya en 1678 el abate Hautefeuille trató de aplicar la pólvora con este objeto, y en el mismo sentido trabajaron más tarde Huyghens y Denis Papin. También Felipe Lebon, inventor del gas del alumbrado, intentó aplicar éste como agente motor. Quizá, sin su muerte trágica (Lebon murió asesinado en 1804) el motor de explosión hubiera venido a la vida de la industria medio siglo antes.

El mismo Otto, en colaboración con su compatriota Langen, expuso en París en el año 1867 un motor atmosférico de su invención. Y antes que él, en 1860, el francés Lenoir ideó el motor de explosión sin compresión, y con inflamación por

chispa eléctrica, que fue pronto abandonado porque su gran consumo, de unos 3000 litros de gas por caballo y hora, le impedía competir con la máquina de vapor, considerablemente perfeccionada a la sazón. Sin embargo, el motor de Lenoir, aunque sensiblemente menos perfecto que el de Otto, marca el comienzo del período de creación del motor de combustión interna, cuyo desarrollo y perfeccionamiento no había ya de interrumpirse. Otra gloria que a Lenoir corresponde es la idea de aplicar la chispa eléctrica como medio de producir la explosión, idea que, abandonada por los inventores que le sucedieron, había de imponerse definitivamente más tarde.

En definitiva, Beau de Rochas, que ideó el ciclo, y Otto, que lo realizó prácticamente en un motor, fueron los verdaderos creadores del motor de explosión de cuatro tiempos. Este fue experimentando perfeccionamientos sucesivos, referentes principalmente a los dispositivos de distribución, regulación y encendido, hasta llegar a su estado presente, en el que existen tantos tipos como infinidad de casas se dedican a su construcción buscando adaptarle por sus detalles a la variedad inmensa de sus aplicaciones, y a la naturaleza y propiedades diversas del agente motor que desee emplearse.

Había que librar al motor de explosión de la tiranía del gas del alumbrado, que obligaba a establecerlo únicamente en las grandes poblaciones. Con este objeto se idearon entonces los gasógenos productores de gas pobre, habiéndose creado una infinidad de tipos, de los que uno de los primeros de aplicación práctica fue el tan conocido gasógeno de inyección de Dowson. Y en este punto sería imperdonable olvido no mencionar el hecho de que el Profesor del Seminario de Barcelona don Jaime Arbós inventó el primer gasógeno de aspiración. Utilizaba para la producción del gas pobre carbón de leña, y estaba ya construido con arreglo a los principios de los gasógenos actuales: el calor desarrollado en la reacción se aprovechaba para vaporizar el agua, y este vapor se conducía luego a la cámara del gasógeno a través de la parrilla.

Por otra parte, los gasógenos permiten utilizar combustibles que no encuentran uso adecuado en los hogares de las calderas.

Más tarde, en 1894, las sociedades Cockerill y Deutz intentaron con éxito utilizar el gas de los altos hornos, que a la hora presente, y merced a la perfecta depuración de los polvos que le acompañan, han conseguido que los motores que emplean estos gases hayan suplantado, por su economía, a la máquina de vapor en los centros siderúrgicos.

Y finalmente fueron creados los motores que habían de utilizar como combustible el petróleo y las esencias de él derivadas, así como también el alcohol, el benzol, etc., librando asimismo al motor de su dependencia del gasógeno. Fue así posible el desarrollo inmenso que actualmente han logrado el automovilismo y la aviación, así como las múltiples aplicaciones de estos motores a la agricultura y a otras pequeñas industrias enclavadas fuera del radio de las grandes poblaciones, o allí donde no llega la acción de una central hidroeléctrica.

Poco tiempo después del motor de cuatro tiempos aparecía el motor de dos tiempos, que, sin embargo, quedó retrasado en su desarrollo, aunque a la hora actual va ganando el terreno perdido y tiene entablada lucha con su rival. La ventaja de su mayor regularidad incita a los constructores a trabajar con ahinco, y se han construído tipos que funcionan con éxito; pero todavía no ha conseguido arrancar su predominio al motor de cuatro tiempos, que se defiende por su mayor sencillez, compensándose en parte su menor regularidad mediante el acoplamiento de los cilindros, y en algunos motores fijos construyéndolos de doble efecto.

Conviene citar aquí, antes de terminar esta breve reseña histórica del desarrollo del motor de combustión interna, la aparición del motor Diesel, hecho que tuvo lugar en el año de 1897, si bien las ideas fundamentales que presidieron su construcción fueron expuestas por su autor en una memoria publicada cuatro años antes. Pero, es tan interesante este motor y ha conseguido en poco tiempo una extensión tan

considerable en el campo de sus aplicaciones, que vale la pena dedicarle párrafo aparte.

Térmicamente considerado el motor de explosión es superior a la máquina de vapor. La razón de esta superioridad radica en último término en el hecho de tener lugar la combustión en el interior mismo del cilindro, lo que permite un aprovechamiento más completo del calor en ella producido. Pero es más científico comparar entre sí los ciclos que ambos motores realizan. El de la máquina de vapor ya fue examinado oportunamente. En cuanto al del motor de explosión échase de ver en seguida en su favor la mayor diferencia de las temperaturas extremas entre las cuales evoluciona el fluido motor, por lo que el rendimiento térmico de la máquina perfecta que realizase el ciclo de Carnot sería más elevado; pero en compensación su ciclo real se aparta de aquel más que el del motor de vapor, no sólo por la misma naturaleza y sucesión de las transformaciones que componen el ciclo teórico de Beau de Rochas, sino también por la imposibilidad de realizar exactamente este ciclo, como imposible le es también a la máquina de vapor plegarse en su funcionamiento con precisión matemática a las transformaciones que definen el ciclo de Rankine.

Por otra parte, el ciclo teórico de Beau de Rochas presupone ya la existencia de la expansión incompleta, y por consiguiente una pérdida importante de trabajo, que algunos constructores, como Charon, Letombe, Atkinson y otros, han tratado de evitar, pero sin que las soluciones propuestas sean enteramente satisfactorias. Las compresiones elevadas aminoran esta pérdida, pero no obstante, fuera de desear algún perfeccionamiento en este sentido del motor de explosión, en el que aún caben progresos en el orden térmico, ya que éstos sólo son posibles en aquellos tipos de motor en los que la diferencia entre las temperaturas extremas del ciclo sea grande, o lo que es lo mismo, en los que el rendimiento térmico de Carnot alcance un valor elevado. El problema queda entonces reducido a buscar un motor en el que su rendimiento genérico, según expresión de Witz, o sea la relación entre su rendimiento térmico de su ciclo real

y el de la máquina perfecta de Carnot correspondiente tenga el valor más elevado posible. Este es el caso del motor de explosión, contrariamente al de la máquina de vapor, de la que puede decirse ha logrado ya la máxima perfección de que es capaz.

De todas suertes la superioridad térmica del motor de explosión sobre la máquina de vapor es incuestionable. Si la superioridad mecánica fuese también una realidad, hace tiempo que la lucha entablada entre ambos tipos de motores se habría decidido con toda probabilidad en favor del primero, quedando en todo caso la máquina de vapor en muy contadas aplicaciones.

Desde luego el motor de explosión tiene un rendimiento mecánico inferior en un 5 o en un 15 por 100 al de la máquina de vapor, variando esta diferencia con el número de cilindros acoplados y con el tipo de motor, según sea este de simple o doble efecto, y de dos o de cuatro tiempos.

Pero las desventajas más importantes del motor de explosión estriban en su menor regularidad y en su menor elasticidad para plegarse a variaciones de carga más acá o más allá de su valor normal.

El primer defecto, mayor en el motor de cuatro tiempos que en el de dos, se ha subsanado con el acoplamiento de los cilindros y con el empleo del doble efecto; pero ello es a costa de una mayor complicación del mecanismo y de la construcción. Se comprende, por tanto, que los constructores tiendan a crear un motor de dos tiempos, que si a la vez se consiguiera combinarlo con el doble efecto, daría una regularidad casi comparable con la de la máquina de vapor, cuyo ciclo se desarrolla, como se sabe, en dos carreras. Pero el motor de dos tiempos presenta en general una mayor complicación, y da un rendimiento térmico más deficiente, a causa principalmente de que no todas las operaciones del ciclo se realizan en el mismo cilindro, sino que parte de ellas tienen lugar en la bomba de impulsión de la mezcla explosiva. Por otra parte, la introducción y expulsión de los gases se verifican en un tiempo muy corto, y es muy difícil graduar la velocidad de entrada de la mezcla

fresca y la de salida de los gases quemados; a fin de evitar, o que parte de aquella se pierda en el escape, o que éstos, no siendo expulsados completamente, disminuyan el poder explosivo. En uno u otro caso el calor sería más imperfectamente aprovechado que en el motor de cuatro tiempos.

No obstante, el motor de dos tiempos se va abriendo paso, incluso en el campo de los motores ligeros y de gran velocidad, en los que las dificultades de su realización práctica se acrecientan; pero en cambio, a sus demás ventajas hay que sumar la que resulta de duplicarse el número de explosiones en un tiempo determinado, con lo que su potencia, aunque no en la misma proporción, aumenta considerablemente a igualdad de volumen del cilindro; lo que más concretamente quiere decir que su potencia másica es mayor, propiedad importantísima en automovilismo y aviación.

Una de las propiedades más buscadas en todo motor es la referente a su elasticidad de potencia, o sea la facultad de plegarse sin detrimento del rendimiento total a variaciones de carga, y la de permitir sobrecargas accidentales. Esta propiedad depende esencialmente del procedimiento de regulación empleado, el cual, naturalmente, ha de estar en armonía con la naturaleza del agente motor y con la forma mecánica peculiar con que éste actúe. En términos generales, si el procedimiento de regulación y la forma de acción del agente motor son tales que el consumo de éste es sensiblemente proporcional a la potencia desarrollada, su rendimiento variará poco con la carga, y si además es susceptible de admitir accidentalmente una cantidad de agente superior a la correspondiente a su potencia máxima normal, aun cuando en estas condiciones el funcionamiento no sea económico, la elasticidad de potencia será satisfactoria. Es claro, que aún no se ha logrado, y difícil es que se logre, realizar un motor que satisfaga con exactitud matemática estas condiciones. Independientemente del modo de acción del agente motor a ello se opone la influencia de las resistencias pasivas de los mecanismos; las que permaneciendo sensiblemente constantes a pesar de las variaciones de la carga, hacen variar a la par que ésta el valor del rendimiento orgánico.

Pues bien; el motor de explosión tiene una elasticidad de potencia poco satisfactoria, y los mejores constructores no garantizan sobrecargas superiores a un cinco por ciento de la potencia máxima normal. La razón de ello estriba, como ya se ha dicho, en los sistemas de regulación. El sistema por *todo o nada* es el más económico, pero tiene el inconveniente de no permitir las sobrecargas, pues si para conseguir estas se consintiese la supresión de alguna explosión cuando el motor desarrolla su potencia máxima normal, la regularidad resultaría perjudicada, sobre todo para potencias inferiores. Los restantes sistemas de regulación, regulación *cualitativa y cuantitativa* y regulación *mixta*, si bien más convenientes para la regularidad, modifican la forma del diagrama al variar la carga con la consiguiente variación del rendimiento térmico.

En los motores de automóvil y de aviación, que deben girar a velocidades diferentes, ha de considerarse también la elasticidad de potencia bajo otro concepto distinto del anterior. Aquí la elasticidad de potencia ha de considerarse en relación con el número de vueltas del árbol, y así como en el concepto en que antes se consideraba implicaba la constancia del rendimiento total del motor para distintos valores de la potencia, en este otro concepto implica la constancia de la potencia en relación con las variaciones de la velocidad, al menos entre ciertos límites de esta. Es claro, que ambos conceptos o modos de considerar la elasticidad de un motor no se excluyen mutuamente.

Si el par motor fuera constante e independiente del número de revoluciones, como atendiendo únicamente al funcionamiento teórico habría de ser, la potencia aumentaría en proporción exacta con la velocidad. Mas las imperfecciones del ciclo se hacen más sensibles cuando la velocidad aumenta, y como consecuencia el rendimiento y el par motor disminuyen a la vez, aunque no en igual medida. La potencia, que para velocidades pequeñas es una función lineal del número de vueltas, crecerá menos rápidamente hasta que para un valor particular de este número aquella alcanza su valor máximo, más allá del cual empieza a disminuir. En

las proximidades de este valor máximo la potencia permanece sensiblemente constante. Cuanto más distantes sean los límites de velocidad entre los cuales esta condición se cumpla, mayor será la elasticidad del motor, bajo este segundo concepto en que ahora se estudia.

En definitiva, si para velocidades pequeñas la potencia crece proporcionalmente, y el par motor tiene el mayor valor posible, y para determinados valores del número de vueltas aquella conserva un valor constante, el motor podrá pasar de una marcha lenta a otra más rápida, sin sacudidas bruscas y en un tiempo muy corto, y bastará modificar su marcha para conseguir el cambio de velocidad del vehículo.

El motor de explosión no cumple con estas condiciones de modo enteramente satisfactorio, y por ello ha sido preciso en automovilismo recurrir al mecanismo, ingenioso sí, pero complicado, del cambio de velocidades, que la máquina de vapor haría innecesario. Hé aquí una de las razones que justifican las tentativas, aún no abandonadas, para realizar un automóvil con máquina de vapor, la que pretende así reaccionar contra su rival, aún en aquel terreno en que parece haber éste afianzado su dominio de modo absoluto.

Todos los esfuerzos de los constructores tienden, por tanto, a conseguir en la medida de lo posible la constancia del par motor, haciéndolo independiente del número de revoluciones del árbol. Para ello han de buscar los medios de eliminar las causas que determinan su variación, y con este objeto será conveniente calcular ampliamente la sección de los conductos y válvulas de distribución, graduando convenientemente los momentos de apertura y cierre de éstas, con lo que se conseguirá obtener un rendimiento volumétrico de la carrera de aspiración de valor elevado al contrarrestar por estos medios el efecto retardador debido a la inercia de la masa aspirada y a su mayor dilatación como consecuencia del calentamiento del cilindro, efectos ambos que aumentan con la velocidad y número de explosiones del motor. Al mismo tiempo se conseguirá una disminución de la contrapresión durante la carrera de escape. Buscando la constancia del par motor será preciso también graduar el avance a la inflama-

ción, que habrá de ser tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad.

Por estos medios se logrará una menor variación del par motor, y por consiguiente una mayor elasticidad de potencia. De todas suertes, el rendimiento orgánico disminuirá como consecuencia de la mayor velocidad y del aumento de las fuerzas de inercia de las piezas con movimiento alternativo, que pueden originar choques y vibraciones en el motor, aumentándose así las pérdidas por resistencias pasivas. La refrigeración del cilindro y su buena lubricación toman, como se comprende, una importancia capital, siendo conveniente a este objeto refrigerar también el aceite de engrase.

En general las dificultades de construcción aumentan a medida que el motor ha de girar a una mayor velocidad, obligando al empleo de materiales de la mejor calidad, que consientan reducir las dimensiones y peso de los órganos del motor sin perjuicio de su resistencia, y buscando disposiciones adecuadas a fin de lograr los mejores rendimientos térmico y mecánico. Nació entonces la idea de reemplazar los sistemas de distribución por válvulas por otros con obturadores deslizantes unidos desmodómicamente al árbol motor, y de los que existen una infinidad de tipos, entre los que merecen citarse la distribución por manguitos deslizantes concéntricos con el pistón del motor Knight, la distribución por llave única (que recuerda las llaves Corliss) del motor Henriod, y otros con manguitos o válvulas giratorias, correderas cilíndricas, etc.

Con estas distribuciones se consigue un mayor rendimiento volumétrico de la carrera de aspiración, y como consecuencia un aumento de potencia. Se emplean de preferencia en los motores destinados al automovilismo por permitir una gran velocidad de rotación, condición favorable para lograr un valor elevado de la potencia másica. En los motores de aviación se conserva, sin embargo, la distribución por válvulas, dispuestas en algunos tipos de estos motores, la de aspiración y la de escape, concéntricamente.

El motor de explosión ha conseguido últimamente un desarrollo considerable, y tiene aplicaciones propias y carac-

terísticas en las que ningún otro tipo de motor podrá, al menos por ahora, reemplazarle. Sin embargo, y a pesar de su mejor rendimiento térmico, aún puede competir económicamente con él en muchos casos la máquina de vapor. Y ello, aun prescindiendo de su menor elasticidad de potencia y de su funcionamiento menos seguro y regular. Es claro, que todavía caben perfeccionamientos en el motor de combustión interna, mas quizá éstos se orienten de preferencia hacia el tipo de combustión, especialmente hacia el motor Diesel.

EL MOTOR DIESEL

El ingeniero Mr. Rodolfo Diesel expuso por primera vez en una memoria publicada en 1893 las ideas fundamentales en que había de basarse el funcionamiento del motor que lleva su nombre. Tan racionales parecieron estas ideas, que importantes casas constructoras se impusieron seguidamente la tarea de crear un motor que fuera, por así decirlo, el instrumento mecánico que realizase prácticamente los principios imaginados por Diesel. Después de varias tentativas, que dieron como resultado la aparición de dos motores de ensayo, el primero en el mismo año de 1893, y el segundo en el de 1895, el motor de este tipo, realmente práctico, fue construído cuatro años después de haber publicado Diesel su primera memoria. Este motor presentaba ya los mismos órganos esenciales que se encuentran en los motores actuales, y con él se realizaron múltiples ensayos con resultado favorable. El motor Diesel ya estaba creado, faltando únicamente sucesivos perfeccionamientos de detalle que le hicieran entrar en el dominio pleno de la industria, y así en el año siguiente de 1896 apareció un nuevo motor, que ha servido de tipo a todos los actuales de cuatro tiempos.

A dos se reducían en esencia los objetivos que Diesel se proponía conseguir con su motor. De un lado, pretendía utilizar un combustible cualquiera, ya sólido, líquido o gaseoso, y de otro, quería que el funcionamiento del motor se ajustase al ciclo de Carnot, con mayor aproximación que el

resto de los motores conocidos. Al mismo tiempo había de lograrse una diferencia considerable entre las temperaturas extremas del ciclo, al objeto de aumentar aún más el valor del rendimiento térmico. Se comprende fácilmente que ambos objetivos excluyen el funcionamiento por explosión; y en efecto, de una parte, el empleo de un combustible sólido o líquido dificulta prácticamente, si no hace imposible, sin previo cambio de estado, la formación de la mezcla explosiva, y de otra parte, la necesidad de obtener la transformación isotérmica superior del ciclo de Carnot, y caracterizada ésta, además, por un valor elevado de su temperatura, exigía una combustión no instantánea y una compresión anterior grandísima. Es, por otra parte, evidente que esta gran compresión previa no puede tener lugar sobre la mezcla explosiva ya formada sin correr el peligro cierto de alcanzar la temperatura de su inflamación espontánea antes de que aquella hubiese terminado. Para evitar esta eventualidad, y poder elevar la compresión, ya Banki, en su motor de explosión, inyectaba, al mismo tiempo que la mezcla explosiva era aspirada, una cierta cantidad de agua finamente dividida. Mas Diesel llegó a una solución más sencilla y racional comprimiendo aisladamente el elemento comburente, e inyectando seguidamente en la masa de aquél el combustible. En definitiva, el ciclo del motor Diesel es de combustión, a pesar de que el rendimiento térmico de este ciclo es genéricamente inferior al del ciclo de explosión; más esta desventaja resulta compensada, y aun con exceso, por el gran desnivel térmico del ciclo Diesel, conseguido precisamente por el hecho de la compresión aislada del comburente. A la vez, es claro, que la compresión elevada permite prescindir de los dispositivos de inflamación. Diesel se proponía alcanzar la presión formidable de 250 atmósferas métricas, pero dificultades prácticas de construcción, y la necesidad de reforzar las dimensiones de los órganos del motor, que anulaban parte de las ventajas que hubiera de proporcionar una compresión tan elevada, limitaron ésta a la necesaria para obtener una presión final de 32 a 35 atmósferas métricas, valor muy superior al logrado en los motores de explosión.

Para decir verdad, el motor Diesel no llegó a realizar exactamente los propósitos de su inventor. Su ciclo teórico se aparta bastante del ciclo de Carnot. Y en efecto, supongamos, en un motor Diesel de cuatro tiempos, el pistón en su punto muerto superior al finalizar la carrera correspondiente al segundo tiempo; la cámara de compresión se encuentra llena del aire comburente a una presión de unos 35 kgs. por centímetro, y en este momento comienza la inyección del combustible, el cual se inflama espontáneamente a medida de su introducción en forma de lluvia continuada finamente dividida. Si pudiera graduarse el gasto del chorro de combustible en relación con la velocidad del pistón, de tal suerte, que las calorías desarrolladas en la combustión fueran consumidas a medida de su producción por el trabajo recogido sobre el émbolo, la temperatura permanecería constante, y esta primera fase del funcionamiento del motor vendría traducida por una transformación isotérmica. Terminada la inyección del combustible, sigue la expansión, que será adiabática si se prescinde de tener en cuenta, en este análisis teórico, la acción de las paredes. A este tercer tiempo sigue la carrera de expulsión de los humos, y luego la carrera de aspiración del aire del ciclo siguiente. Comienza seguidamente la carrera de compresión, que teóricamente sería una transformación adiabática. Asimilando el conjunto del tercer tiempo de un ciclo y el segundo del siguiente a un ciclo cerrado, lo cual sólo puede hacerse por una abstracción puramente teórica, resalta claramente del análisis anterior, que al ciclo teórico del motor Diesel le falta la compresión isotérmica anterior a la adiabática para ser exactamente el ciclo de Carnot. Grandes dificultades de construcción y de disposición de los mecanismos y elementos necesarios habían de vencerse para ver realizada esta compresión isotérmica. Se prescindió de ella, máxime teniendo en cuenta que la presión final quedó, como ya se ha dicho, muy por debajo del valor que Diesel, en los fundamentos teóricos de su motor había propuesto. Es claro, que las diferencias entre ambos ciclos se acentúan, si se atiende a las modificaciones que el ciclo teórico experimenta como consecuencia de la acción de las pa-

redes, de la expansión incompleta, y en general, de las imperfecciones inevitables de los mecanismos y dispositivos que han de realizar las funciones que la teoría previene.

De igual manera, el otro objetivo tampoco pudo ser logrado. Las experiencias realizadas empleando combustibles gaseosos y sólidos, como el carbón en estado pulverento, no han dado resultado. Se comprenden fácilmente las dificultades que han de presentarse al tratar de buscar un dispositivo práctico, que permita la introducción, en chorro continuo, de un combustible gaseoso en el interior de un medio cobuyente fuertemente comprimido. El combustible había de ser inyectado a una presión superior a la del medio, presión que sobrepasa a la de su inflamación espontánea. Los peligros del manejo del combustible gaseoso en estas condiciones son evidentes. Los combustibles sólidos queman más difícilmente, y los residuos que deja la combustión agarrotan los pistones e imposibilitan el funcionamiento del motor. En cambio, los combustibles líquidos se prestan perfectamente a su empleo en el motor Diesel, siempre que su viscosidad no sea excesiva. Precisamente, una de las ventajas de este motor es la de permitir quemar, con ventaja para su funcionamiento, multitud de combustibles líquidos de bajo precio, sin más preparación previa que la de un simple filtrado, y que además, no encontrarían utilización directa en los motores de explosión, o no serían en absoluto aplicables a éstos. Tales son, los aceites naturales de petróleo o naftas, los aceites de esquistos, los alquitranes derivados de la destilación de las hullas, etc. En cambio, las esencias ligeras derivadas del petróleo son de empleo peligroso. De un modo general, en la composición química de los combustibles debe predominar el hidrógeno sobre el carbono, y su potencia calorífica inferior debe pasar de 9500 calorías.

De todas suertes, aun no habiéndose satisfecho los propósitos de un inventor, el motor Diesel representa un adelanto considerable en el progreso de los motores térmicos. Considerado térmicamente es el motor más perfecto, y su rendimiento orgánico, a pesar del gran número de órganos auxiliares, como las bombas del petróleo, los compresores

del aire de inyección de aquél, es comparable al de la máquina de vapor, que también precisa de la bomba de aire, la de alimentación, etc. Por todo ello, el rendimiento térmico efectivo del motor Diesel es el más elevado que se conoce, y puede estimarse, en términos generales, en un 35 por ciento. Es claro, que el rendimiento varía según que el motor sea de marcha lenta, de 70 a 150 revoluciones por minuto, o de marcha rápida, y de cuatro o de dos tiempos. De un modo general, puede decirse, que el rendimiento resulta favorecido cuando el ciclo se realiza más lentamente, y es superior en el motor de cuatro tiempos que en el de dos. Respecto al estudio comparativo entre estos dos tipos de motores es, esencialmente, análogo al que fue hecho al tratar del motor de explosión.

En comparación con el motor de explosión el motor Diesel presenta una mayor regularidad y elasticidad de potencia, por cuanto puede graduarse esta más fácilmente, haciendo variar la duración de la carrera de inyección o la presión de ésta, y por consiguiente, el gasto de combustible es más exactamente proporcional a la potencia desarrollada. El mayor valor de la ordenada media de su diagrama permite reducir las dimensiones del cilindro en igualdad de potencia. Su seguridad de funcionamiento y la facilidad de su puesta en marcha, son mayores, en general, que para el motor de explosión.

No es de extrañar, pues, que el motor Diesel haya rápidamente extendido el campo de sus aplicaciones, y tenga ante sí un magnífico porvenir. Tal vez, estemos asistiendo al comienzo de un período de transformación en la producción de fuerza motriz térmica, quedando el motor de vapor, y más concretamente la turbina, para las instalaciones de gran potencia, y el motor Diesel para aquellas de potencia media, yendo desde unas centenas de caballos hasta tres mil o cuatro mil.

Entre sus aplicaciones más interesantes deben citarse, su empleo indicadísimo, en las centrales termo-eléctricas de reserva o socorro, y su utilización como motor de propulsión en la navegación, tanto superficial como submarina. Desde

luego, para esta última es el tipo de motor más indicado. Su ligero emplazamiento, y menos peso, así como el más fácil almacenamiento del combustible en relación con las instalaciones de motor de vapor, aumentan el radio de acción del navío, condición de importancia grandísima en los transportes marítimos, y más especialmente en la marina de guerra. Su funcionamiento, en cambio, es menos seguro que el de la máquina de vapor.

Si la organización actual de la navegación mundial permitiera repostarse de petróleo con igual seguridad que de carbón, por existir bases de aprovisionamiento convenientemente espaciadas, seguramente sería aún mayor la extensión alcanzada por esta aplicación del motor Diesel. Sin embargo, ya parece vislumbrarse para lo porvenir el cumplimiento de este deseo, y ya se ve, cómo la importancia cada vez mayor del petróleo, ha hecho que las naciones que marchan a la vanguardia del progreso vengan preocupándose de la resolución de este problema, si bien influyen más en él consideraciones de orden militar y egoísta, que las otras más nobles y provechosas de la paz y del común progreso. Y la codicia individual en complicidad estrecha con la ambición imperialista de las naciones poderosas, disfrazada con la hipócrita disculpa de una previsora defensa de los intereses y libertad nacionales, han puesto su mano grosera en el problema, dificultando seguramente una solución de justicia, y sacrificando el interés común del progreso humano a sus pretendidas conveniencias. Mas es de esperar, que la solución, justa o no, logrará alcanzarse, que es triste sino el de la mísera condición humana, el de necesitar del egoísmo, individual o colectivo, como acicate propulsor del progreso.

También en los transportes terrestres se ha intentado aplicar el motor Diesel. La casa Sulzer construyó una locomotora Diesel, pero, aun cuando los ensayos de esta primera tentativa fueron alentadores, y es de presumir, que, continuados, se hubieran logrado nuevos perfeccionamientos; no es de esperar se intente siquiera, nuevamente su aplicación en este campo, más bien reservado en lo futuro al pleno dominio de la tracción eléctrica.

A todos pido disculpa por la poca amenidad, no del tema elegido, sino de la manera con que mi incapacidad lo ha desarrollado. Hubiera querido disponer, aunque sólo hubiese sido en esta ocasión, de frase galana e imaginación viva, que os hubieran hecho agradable o cuando menos llevadero este momento, que si para mí lo es de inmensa honra y gran satisfacción, no quisiera verlas empañadas con la pesadumbre de haberos molestado.

Y termino, reiterando mi gratitud y ofrecimientos a la Academia de Ciencias de Zaragoza, y mi saludo cordial y afectuoso a todos y cada uno de sus dignísimos miembros.

HE DICHO