Los motores rotativos Wankel, pasado, presente y futuro

Wankel rotary engines, past, present and future

Jesús Casanova y José María López
INSIA - UPM

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/9305

1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Se llaman "motores de combustión interna" a los que se basan en generar potencia mecánica a partir de la energía liberada en una reacción de combustión de un combustible en su cámara de combustión, y se les añade el adjetivo "alternativos" para decir que funcionan con un movimiento de ida y vuelta. Pero lo que está implícito, de alguna manera, es que utilizan un émbolo que comprime y expande un gas. Se entiende que en un motor convencional esto se hace con un émbolo cilíndrico (pistón) dotado de un movimiento lineal de vaivén en el interior de un cilindro recto, que es trasformado en movimiento de rotación por el mecanismo biela / manivela.

Pero ya en el año 1923, Wallinder y Skoog propusieron la teoría de un motor rotativo basado en una hipotrocoide y en 1938 Sensaud de Lavour propuso la estructura de 4 tiempos que ahora conocemos, llegando hasta 1958 en que el Dr. Félix Wankel, trabajando para la firma de automóviles NSU demostró la durabilidad de un motor accionado por un pistón de tres lóbulos animado de un movimiento más o menos de rotación en el interior una peritrocoide, que pasará a llamarse con su apellido y comenzaría en 1964 su aplicación a automóviles NSU como el Spider, posteriormente el Ro80 y también motores industriales y marinos.

En 1967, en Japón, Toyo Kogyo Co, Ltd., firma precursora de Mazda, adquirió licencias NSU para motores rotativos e inició la comercialización del deportivo Cosmo Sport, al que luego siguieron otros como el XR2. Empresas del sector aeronáutico como Curtiss-Wright, Rolls-Royce y la NASA han flirteado con este tipo de motores, pero en el sector del automóvil lo hicieron casi todos los fabricantes de los años 1960 – 1970, destacando Citroën, Ford, General Motors o incluso Daimler-Benz que llegó realizar el prototipo C-111 que nunca puso en producción.

El motor Wankel de un cilindro refrigerado por agua se llegó montar en motos DKW y Hércules, y también con dos rotores en Yamaha, Sukuki y Norton, con escaso éxito por su baja durabilidad, aunque aún se pueden ver algunas funcionando en reuniones de motor clásicas.



Fig. 1: El coche Ro80 de NSU

2. DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO

Esta idea del motor Wankel se basa en una figura geométrica denominada "peritrocoide", tipo de las denominadas figuras trocoidales, que son la trayectoria generada por un punto invariablemente unido a un circulo generatriz que gira sobre otro denominado directriz al que es siempre tangente por el interior o por el exterior. El caso del motor Wankel, la forma se genera siguiendo un procedimiento geométrico como el esquematizado en la figura 2.

La forma interior del estator es la trayectoria del punto P de un brazo fijo en la circunferencia giratoria B de radio q, cuando gira en la periferia externa de la circunferencia A de radio p. El cociente q / (q - p) se denomina m y su valor puede ser 2, 3, 4, ... siendo el 3 el que han usado siempre los motores Wankel, lo que da lugar a una superficie interna con dos lóbulos y un émbolo con tres caras como se ve en la figura 3 de un motor Mazda.

Otro índice que configura geométricamente la trocoide es la constante K = R / e, similar a la relación biela / manivela en el mecanismo de los motores convencionales pero que determina otros parámetros como la velocidad relativa de los segmentos con la camisa, la relación de compresión o las dimensiones externas del motor.

En el motor real, el émbolo de tres caras, se mueve y gira obligado por una corona interna que rota alrededor de un piñón fijo al bloque. El movimiento de rotación del émbolo acciona un mecanismo biela / manivela interior que produce tres rotaciones de la manivela o cigüeñal por cada rotación del embolo en la trocoide.

Cada rotación del émbolo induce en la cámara que queda entre sus paredes laterales y las caras interna de la trocoide, un

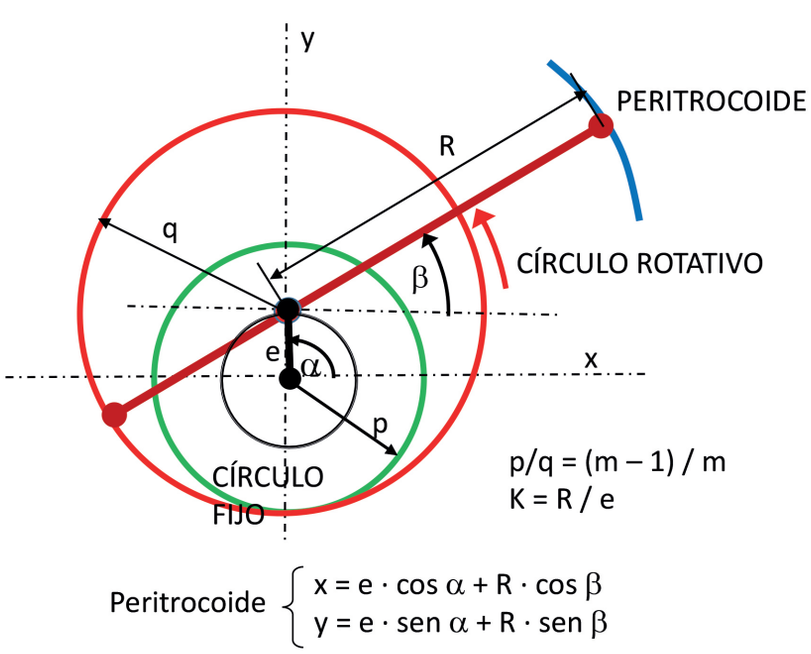


Fig. 2: Esquema de la construcción de la peritrocoide del estator de un motor Wankel

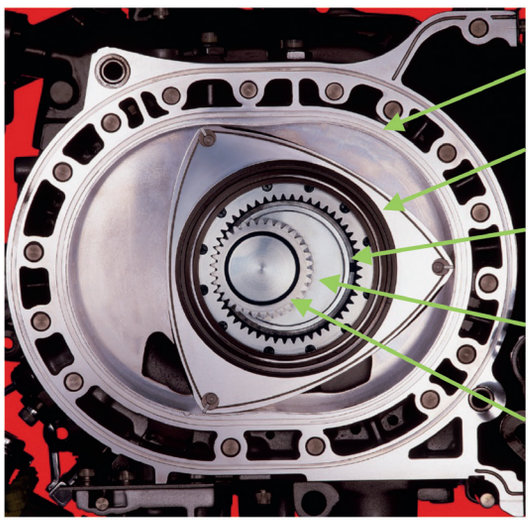


Fig. 3: Motor Wankel de Mazda

proceso termodinámico de cuatro etapas: admisión, compresión, expansión y escape, como lo haría un pistón en el interior de un cilindro en un motor de 4 tiempos convencional cada dos revoluciones del cigüeñal.

Con ello cada rotación del émbolo produce tres ciclos completos, es decir empuja a la manivela del cigüeñal tres veces. Normalmente esta manivela del cigüeñal es más bien una excéntrica que es accionada por el émbolo rotativo en la fase de expansión. Es evidente que, aunque desde un punto de vista termodinámico se mantiene el ciclo convencional de cuatro tiempos, las diferencias de esta manera de gestionar la relación entre fases del ciclo y el movimiento del émbolo triangular aportan diferencias favorables y desfavorables entre uno y otro.

3. VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL MOTOR ROTATIVO

Una de las ventajas principales es que cada giro del cigüeñal recibe una carrera de trabajo como si fuera un motor de dos tiempos, pero con una secuencia de fases, desde el punto de vista fluidodinámico, de 4 tiempos con carreras de admisión y escape totalmente independientes (no simultáneas). Adicionalmente esta manera de hacer las cosas da lugar a que el volumen de gases que queda en el interior del motor al final del escape sea casi nulo, lo que redunda en menos residuales al ciclo siguiente y menos calentamiento de los gases admitidos. Pero también menos EGR interno para reducir la formación de óxido de nitrógeno (NO) durante la combustión.

El hecho de que el empuje de la combustión sobre el cigüeñal sea como en un motor de 2 tiempos, uno cada revolución, permite esperar una mayor potencia específica para un régimen de giro similar.

Otra de las ventajas más ensalzadas de un motor Wankel es que el émbolo sigue esencialmente un movimiento rotativo, pero con un descentramiento que produce ciertas fuerzas de inercia rotativas tanto del pistón como de la manivela del cigüeñal y algunas alternativas como la oscilación del émbolo, lo que da lugar a menores vibraciones.

Pero en todo caso, durante la carrera de expansión el émbolo empuja el cigüeñal y la carcasa externa es empujada de manera intermitente en sentido contrario por la fuerza de los gases tres veces por cada giro del émbolo. Esta disposición geométrica de las fuerzas de inercia en conjugación con las de los gases da lugar a menos vibraciones en los soportes del motor que un motor convencional, si bien no son nulas; lo cual es una ventaja en aplicaciones en automoción y en pequeños aviones. Es también destacable el menor número de piezas que un motor convencional de la misma potencia.

Pero los inconvenientes para hacer esto son muy importantes, y han llevado a la casi desaparición de este tipo de motor en el sector de automoción. El motor Wankel vivió su momento de gloria cuando el gran reto de los motores de propulsión de vehículos era aumentar su potencia específica, entendida como potencia por unidad de peso del motor. Pero éste ya no es el reto más importante en la mayor parte de los motores del futuro a excepción de algunas aplicaciones muy específicas como motores de potencia auxiliar (APU) en aviones, aviones no tripulados o generadores de electricidad de emergencia o para vehículos eléctricos de autonomía extendida. Los principales inconvenientes del motor Wankel, que algunos solo pueden ser resueltos con soluciones bastante costosas, se comentan seguidamente.

El coste de la mecanización de la trocoide es mayor que la de un cilindro convencional, y en caso de desgaste excesivo sería muy difícil "rectificarlo". La estanqueidad es otra propiedad difícil de resolver en las generatrices del émbolo, donde un solo segmento longitudinal sometido además a un movimiento secundario oscilatorio, debe separar cámaras que tienen diferencias de presiones de más de 30 bar cuando una está en combustión y la adyacente ya en escape. También resulta complicado resolver la estanqueidad en la parte lateral del émbolo que fuga gases hacia otras cámaras y hacia el cárter. Solo segmentos muy sofisticados con materiales avanzados pueden resolver en parte el problema, aunque es normal aceptar una menor estanquidad que los motores convencionales del pistón cilíndrico.

La cámara de combustión, que corresponde con el volumen que queda entre cilindro y trocoide, tiene una geometría muy poco adecuada para buen rendimiento. Si es motor de encendido provocado o se pueden usar dos bujías o estratificar la mezcla, pero si es motor diésel habría que ir a precámara. En este último caso, además la relación de compresión está limitada por razones geométricas y algunas propuestas, como la Rolls-Royce de los años 1970, se basaron en usar dos rotores: uno más grande de baja presión y otro más pequeño de alta presión.

Una solución que han tratado de desarrollar de distinta forma firmas como Toyota, Toyo Kogyo o Curtiss-Wright es la estratificación de la mezcla con sistemas que aseguren la mezcla alrededor de la bujía, aunque en otras partes de la cámara no haya mezcla o sea muy pobre. El problema está en la emisión de hidrocarburos no quemados (HC) y partículas de pequeño tamaño. La solución de Curtiss-Wright se basaba en un chorro de combustible inyectado en la cámara en la parte del ciclo en la que el volumen es pequeño, que es encendido por una bujía o por autoinflamación. En los últimos años algunas patentes han tratado de resolver este sistema de combustión "por dardo" en el que una inyección de combustible a alta presión es encendido por una chispa situada en el lateral de dicho chorro. Este permite que el motor pueda consumir gasolina, gasóleo o, incluso, queroseno con la bomba de inyección adecuada.

Esta forma poco apropiada de la cámara de combustión, unido a que el motor debe lubricar por aceite perdido, hace que las emisiones de HC y de partículas sean difíciles de controlar, y en parte importante ha sido la razón del abandono de este motor por parte de fabricantes como Mazda.

Otro conveniente importante es la lubricación que necesita aceite mezclado con el combustible, y solo aceites de excelente calidad, materiales y acabados superficiales muy sofisticados podrían resolver el problema. La solución a este problema no es obvia y los primeros motores Wankel del NSU Ro80 lo sufrieron de forma tan acusada que era normal cambiar el motor varias veces en la vida del vehículo, y condujo definitivamente a la desaparición de la marca NSU y su dilución en Audi. Otros fabricantes como Citroën que pusieron muchas esperanzas en este motor, por ejemplo, el modelo GS se diseñó para un Wankel birrotor y llegaron a sacar 200 ejemplares de preserie, pero abandonaron a tiempo instalando un motor de cuatro cilindros opuestos refrigerado por aire que era esencialmente la unión de dos motores del modelo 2CV colocados uno detrás de otro.

Decía un calendario humorístico en 1974 que "el sexto motor en su Ro80 no debería influirle decisivamente hacia el motor de pistón. Por favor siga delante y compre el sexto motor; o bien espere a la turbina de gas".

La refrigeración es otro de los importantes retos a resolver pues no se puede hacer circular de manera sencilla el refrigerante por el interior del cilindro que está rodeado por el gas, el cual en la fase de combustión llega a tener más de 2000 ºC tres veces por vuelta. La trasferencia de calor a las paredes de la trocoide y del émbolo es muy significativa por este hecho y porque la cámara de combustión tiene mayor relación superficie/volumen que una cámara hemisférica de un motor convencional.

Y por si no había ya problemas, hay que decir que el control de la entrada de aire o mezcla de admisión así como la salida de los gases de escape, solo puede ser controlada por lumbreras talladas en la pared de la trocoide o en las caras laterales, pero no por válvulas de "seta". Esto dificulta adaptar sistemas de distribución variable con cambios adaptativos de momentos de apertura y cierre de las válvulas dependiendo de las condiciones operativas del motor. Y también el ruido de escape y admisión se ve incrementado frente los de un motor de cuatro tiempos con válvulas, con valores similares a un motor de dos tiempos.

4. PRESENTE Y ¿FUTURO?

Actualmente varias firmas como Wankel Supertech, Wankel AG o AIE, ofertan motores Wankel para aplicaciones aeronáuticas como motores de pequeños aviones, helicópteros o para Unidades de Potencia Auxiliares (Auxiliary Power Units = APUs). Ofrecen amplios rangos de potencias que consiguen haciendo el motor de mayor o menor número de rotores. Y todos ofrecen la solución multicombustible, muy adecuada para este tipo de aplicaciones, sobre todo en el ámbito militar. La figura 4 muestra un motor de este tipo.

Pero en el sector de automoción el futuro del motor Wankel es poco halagüeño. A las dificultades de durabilidad y bajo coste, se unen los problemas de refrigeración y lubricación, Pero lo que es más determinante en la actualidad es el impacto ambiental por las emisiones contaminantes, sobre todo de HC y de partículas en caso de mezclas estratificada y por aceite perdido. Las soluciones con postratamiento de gases son posibles, pero encarecen demasiado el producto. El fabricante Mazda, adalid durante muchos años del motor Wankel en vehículos deportivos, dejó su producción hace unos años, pero pone sus esperanzas en la adecuación de este motor para quemar hidrógeno. La total separación de escape y admisión reduce el problema clásico del backfire con este combustible, y el hecho de que toda la cámara es barrida por los segmentos de estanqueidad, hace que haya pocos depósitos internos que favorezcan la inflamación prematura del hidrógeno.

Por último, cabe destacar los trabajos que se realizaron a principios de la década de 2010 entre la firma austriaca AVL, líder en desarrollo de motores de combustión interna, y el fabricante Audi para desarrollar un generador de electricidad de muy alta potencia específica con un Wankel de un rotor para coches eléctricos de "autonomía extendida", en concreto para el Audi E-Tron. Este generador de unos 15 kW actuaría principalmente para recarga de baterías, pero no para tracción. La ventaja del Wankel en esta aplicación es que su régimen de giro es bastante constante y su periodo de utilización pequeño, por lo que las emisiones en gramos por kilómetro son menos significativas que si el motor fuera para propulsión.

En resumen, el motor Wankel presenta ventajas importantes frente a uno de pistones convencional, pero las desventajas, sobre todo en coste y emisiones, han puesto serias dudas sobre su futuro. Si se acepta que para desbancar a algo que funciona se debe proponer algo que supere a lo anterior en número suficiente de ventajas, el motor Wankel no es actualmente el futuro para la automoción convencional. Solo en aplicaciones muy específicas como generadores de vehículos eléctricos o aplicaciones aeronáuticas en pequeños aviones o APUs pueden sus ventajas superar a sus inconvenientes, y es donde actualmente se investiga.

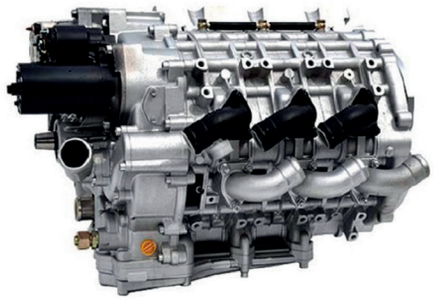


Fig. 4: Motor Wankel de tres rotores de Wankel Supertec multicombustible con potencia hasta 200 kW

REFERENCIAS

- Faith, N. "The Wankel Engine. The story of the revolutionary rotary engine". Ed. George lle & Unwin LTD 1976.
- Yamamoto, K. "Rotary Engine". Editado por Toyo Kogyo 1981.
- Meng, P. R., Hady, W. F. y Barrows, R. F. "An overview of the NASA Rotary Engine Research Program" nASA Technlcal Memorandum 83699. 1984.
- Evans, R. L. "Automotive Engine Alternatives". Plenum Press 1986.
- Hege, J. B. The Wankel Rotary Engine: A History Editorial McFarland 2007.
- Sherman, D. "How Audi Hybrids Could Keep the Wankel Rotary Alive" Car abd Driver, Agosto 2011. http://www.caranddriver.com/features/how-audi-hybrids-could-keep-the-wankel-rotary-alive-feature
- Sans, T. y Sifferliger, B. "AVL Rotary Engine Extended" FUEREX @ E-Mobility Session. Graz, 2013.
- Harrigan, K. "Rotary Engine Reimagined". Engineering 360. 27/02/2017. Publicado en" http://insights.globalspec.com/article/4286/rotary-engines reimagined?id=0&email=%7Bemail%7D&md=170308&mh=a74c09&Vol=Vol10Issue3&Pub=70&LinkId=1848827&keyword=link%5F1848827&frmtrk=newsletter&cid=nl
- http://www.wankelsupertec.de/engine.html