



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ARAGÓN

“EL MOTOR ROTATIVO WANKEL: PRINCIPIO, DESARROLLO Y
APLICACIÓN.”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO-ELECTRICISTA

PRESENTA:
DAVID VITE VELASCO

ASESOR:
ING. SERGIO ANGEL LOZANO CARRANZA

MÉXICO 2014



FES Aragón



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatoria.

La presente tesis la dedico con mucho cariño a mis padres, hermanos, a toda la familia Vite Velasco gracias por el apoyo, a mis amigos, compañeros, a toda la gente que conocí en el transcurso de esta etapa de mi vida, a la gente que creyó en mí, a la que no también, para demostrarles que si se puede lograr lo que uno se propone.

Con dedicación especial a Leticia Jiménez que estuvo conmigo en esta última etapa y se convirtió en un motivo más para seguir adelante y lograr mis objetivos.

INDICE

I.- INTRODUCCIÓN.	1
1.1.- HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.	1
1.2.- EL MOTOR TÉRMICO DE COMBUSTIÓN INTERNA.	2
1.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN.	2
1.3.1.- Motor Otto.	2
1.3.2.- Motor Diesel.	2
1.3.3.- Motores de 4 Tiempos.	3
1.3.4.- Motores de 2 Tiempos.	4
1.3.5.- Motores de Pistón Alternativo.	5
1.3.6.- Motores de Pistón Rotativo.	6
1.4.- FELIX WANKEL.	6
II.- TIPOS DE MÁQUINAS DE PISTÓN ROTATIVO.	7
2.1.- MÁQUINAS TIPO A (ESTATOR CON PERFIL EPITROCOIDAL).	8
2.2.- MÁQUINAS TIPO B (ESTATOR CON PERFIL HIPOTROCOIDAL).	9
2.3.- MÁQUINAS TIPO C (ROTOR CON PERFIL EPITROCOIDAL).	9
2.4.- MÁQUINAS TIPO D (ROTOR CON PERFIL HIPOTROCOIDAL).	9
2.5.- EL MOTOR RADMAX.	10
2.6.- LA QUASITURBINA.	11
2.7.- ROUND ENGINE.	12
2.8.- EL MOTOR ROTATIVO ANTONIO SÁNCHEZ.	13
III.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	14
3.1.- DESCRIPCIONES GENERALES DEL MOTOR.	14
3.2.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	17
3.2.1.- 1er Tiempo: Admisión.	17
3.2.2.- 2º Tiempo: Compresión.	18
3.2.3.- 3er Tiempo: Combustión y Expansión.	18
3.2.4.- 4º Tiempo: Escape.	19

IV.-BASES DE DISEÑO DEL MOTOR WANKEL.	21
4.1.-ESTUDIO DEL PERFIL TROCOIDAL.	21
4.1.1.- Cilindrada de los Motores de Pistón Rotativo.	25
4.1.2.- Relación de Compresión.	29
4.1.3.- La Cámara de Combustión y Aspectos Térmicos.	33
4.1.4.- Volumen de las Cámaras.	34
4.1.5.- Par Motor.	35
4.2.- LA DISTRIBUCIÓN EN EL MOTOR WANKEL.	35
4.2.1.- Diagrama de Distribución.	35
V.- DETALLES CONSTRUCTIVOS DEL MOTOR WANKEL.	38
5.1.- CONSTITUCIÓN.	40
5.1.1.- Rotor.	41
5.1.2.- Mecanismo de Sellado.	43
5.1.3.- Estator.	48
5.1.4.- Engranajes de Transmisión.	51
5.1.5.- Cámara de Combustión.	54
VI.- SISTEMAS AUXILIARES DEL MOTOR WANKEL.	55
6.1.- SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.	55
6.1.1.- Refrigeración del Estator.	55
6.1.2.- Refrigeración del Rotor.	56
6.2.- SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.	57
6.3.- SISTEMA DE LUBRICACIÓN.	58
6.4.- SISTEMA DE ENCENDIDO.	59
6.4.1.- Encendido Doble.	59
VII.- APLICACIONES DE LOS MOTORES ROTATIVOS.	61
7.1.- APLICACIONES EN EL SECTOR NAVAL.	61
7.2.- APLICACIONES EN AUTOMÓVILES Y MOTOCICLETAS.	64
7.2.1.- Automóviles Comerciales.	64
7.2.2.- Automóviles de Competición.	65
7.2.3.- Motocicletas.	66
7.3.- APLICACIONES EN EL SECTOR AERONÁUTICO.	68

7.4.- OTRAS APLICACIONES.....	69
7.4.1.- Aplicaciones Potenciales.....	70
7.5.-NUEVAS TECNOLOGIAS	71
7.5.1.- Audi Podría Dar Luz Verde al A1 E-TRON.....	71
7.5.2.- El Biplaza DA36 E-Star2.	73
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA.	76

I.- INTRODUCCIÓN.

1.1.- HISTORIA DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA.

El motor de combustión interna se desarrolla como una evolución de la maquina de vapor. En este motor el trabajo se obtiene por la combustión interna de una mezcla de aire y combustible, a diferencia de la maquina de vapor, que aprovecha la presión del vapor de agua que se produce por una combustión externa.

El primer motor de combustión interna fue construido por el francés Etienne Lenoir en 1863. Es motor fue mejorado notablemente por el alemán Nikolaus Otto que en 1876, invento el primer motor que funcionaba con el ciclo de 4 tiempos. En su honor este motor de explosión se denomina Motor Otto.

En 1878, el escocés Dugald Clerk construye el primer motor de 2 tiempos.

En 1885, Daimler monta sobre un vehículo de 2 ruedas un motor de gasolina de alta velocidad desarrollado por el ingeniero Maybach. Esta es la primera motocicleta del mundo.

En 1886, Karl Benz construye el primer automóvil de 3 ruedas. Ese mismo año Daimler aplica el motor de Maybach sobre un carruaje de 4 ruedas. La historia del automóvil había comenzado.

En 1892, el alemán Rudolf Diesel inventa un motor que funciona con combustible pesado y no necesita sistema de encendido, que se llamará motor Diesel. Cinco años después, en 1897, se construye el primero de estos motores. Sera aplicado en un camión por primera vez en el año de 1923, aunque ya en 1912 se había montado en una locomotora.

En 1904 se fabrica en Barcelona el primer automóvil de la marca la Hispano-Suiza. El cual esta equipado con un motor de 4 cilindros y 20 CV de potencia.

En 1957, el alemán Felix Wankel prueba con éxito un nuevo motor de pistón rotativo que es conocido con el nombre de su inventor, Motor Wankel.

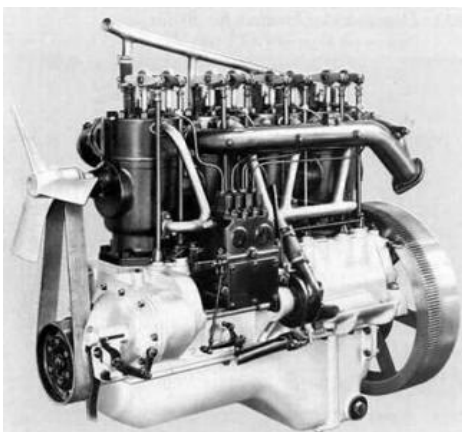


Fig. 1.- *Motor de combustión interna.*

1.2.- EL MOTOR TÉRMICO DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Se denomina así al motor que transforma la energía térmica en energía mecánica mediante la combustión de una mezcla de aire y combustible que se quema interiormente generando un trabajo mecánico.

Los motores térmicos de combustión interna empleados en automoción deben reunir una serie de cualidades:

- Buen rendimiento, transforma en trabajo buena parte de la energía que produce la combustión.
- Bajo consumo con relación a su potencia.
- Gases de escape poco contaminantes.
- Fiabilidad y durabilidad.
- Bajo costo de fabricación y mantenimiento.

1.3.- CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN.

Los motores de combustión interna se pueden clasificar atendiendo a diferentes aspectos:

- Por la forma de iniciar la combustión:
 - Motor encendido por chispa (Otto).
 - Motor encendido por compresión (Diesel).

1.3.1.- Motor Otto.

También llamado motor de explosión a motor de encendido provocado (MEP).

Consumo generalmente una mezcla de aire y gasolina que se prepara en el exterior de la cámara de combustión. La mezcla se inflama por una chispa eléctrica que proporciona un sistema de encendido externo.

Soporta presiones moderadas, por lo que sus componentes son ligeros y pueden alcanzar un alto número de revoluciones.

Consiguen su potencia máxima entre 5,000 y 7,000 revoluciones por minuto (rpm).

Su volumen unitario oscila entre 250 y 500 cm³ por cilindro.

1.3.2.- Motor Diesel.

También llamado motor de encendido por compresión (MEC).

Consumo combustibles pesados como el gasóleo. La mezcla se realiza en el interior de la cámara de combustión, y se inflama al inyectar el combustible sobre el aire calentado por la fuerte compresión.

Las presiones que se producen son muy elevadas y sus componentes han de ser robustos y pesados por lo que el número de revoluciones es limitado.

- Los Diesel rápidos:
Pueden alcanzar las 5,500 rpm.
La cilindrada unitaria esta entre 400 y 600 cm³ por cilindro.
Se emplean en automóviles y vehículos industriales ligeros.
- Los Diesel lentos:
Giran entre 900 y 2,000 rpm.
Tienen un volumen de hasta 2 lts por cilindro.
Se montan en camiones, autobuses, locomotoras, barcos y maquinaria pesada.
- Por le ciclo de trabajo:
-Motores de 4 tiempos.
-Motor de 2 tiempos.

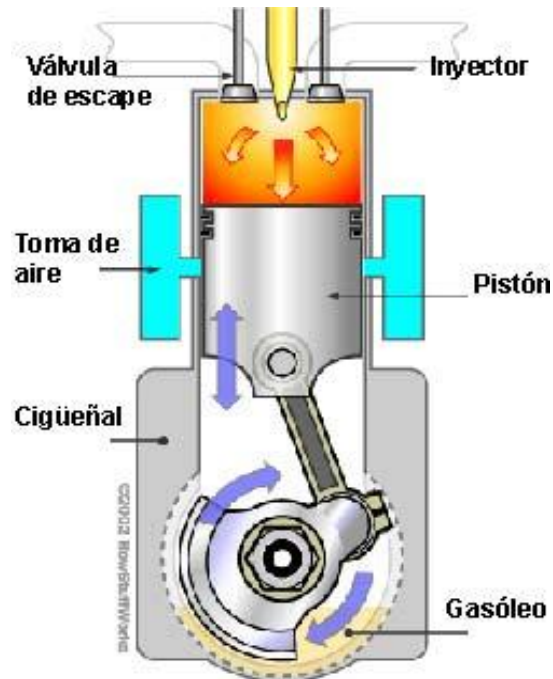


Fig. 2.- Esquema del funcionamiento de un motor Diesel

1.3.3.- Motores de 4 Tiempos.

Puede ser Diesel u Otto.

Su ciclo de trabajo se desarrolla en 4 tiempos: Admisión, Compresión, Explosión y Escape, durante 2 vueltas completas del cigüeñal.

El intercambio de gases es controlado por válvulas que abren y cierran los conductos de admisión y escape.

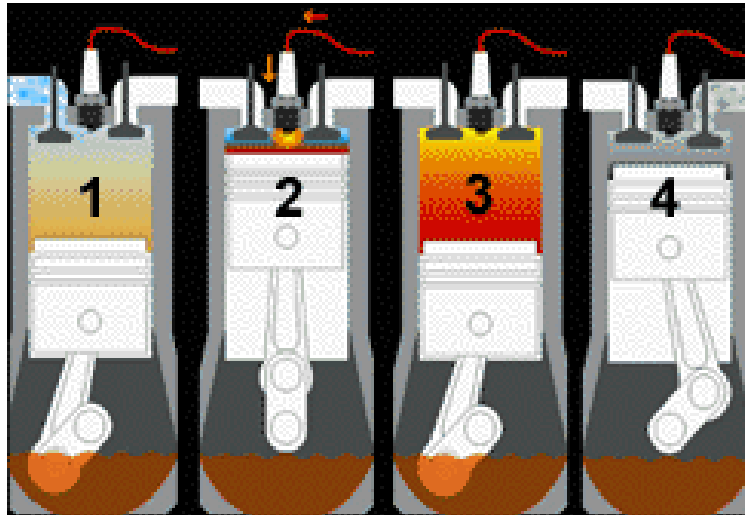


Fig. 3.-Esquema del funcionamiento de un motor de 4 tiempos.

1.3.4.- Motores de 2 Tiempos.

Existen motores de 2 tiempos Otto y Diesel.

En este motor los procesos de Admisión, Compresión, Explosión y Escape de los gases se realizan en 2 carreras del pistón, o sea, en una vuelta de cigüeñal.

El intercambio de los gases se realiza por medio de lumbreras controladas por el pistón en su desplazamiento.

Los motores Otto de 2 tiempos equipan a las motocicletas de pequeña cilindrada, hasta 350 cm³.

Los Diesel de 2 tiempos de grandes cilindradas se usan como propulsión marina y giran entre 80 y 200 rpm.

- Por el movimiento del pistón:
 - Motores de pistón alternativo.
 - Motores de pistón rotativo.

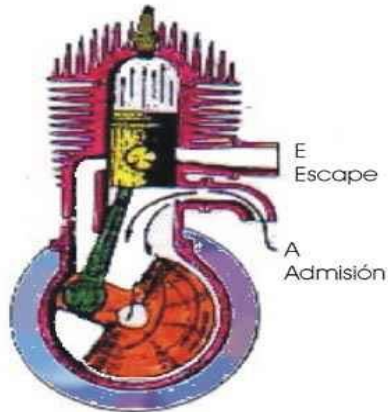


Fig. 4.- Esquema del funcionamiento de un motor de 2 tiempos.

1.3.5.- Motores de Pistón Alternativo.

Estos motores transmiten el trabajo mediante pistones, que se desplazan con un movimiento lineal alternativo, y es transformado en movimiento de rotación mediante un sistema de biela-manivela.

Número de cilindros usados habitualmente:

- Motocicletas de 1 a 4.
- Automóviles de 2 a 6 en línea y de 6 a 8 en V.
- Camiones de 4 a 6 en línea y de 6 a 12 en V.

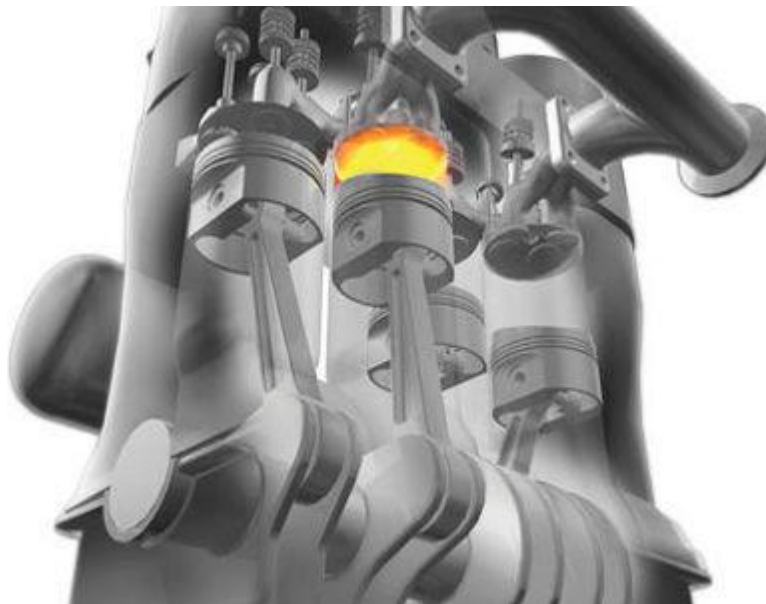


Fig. 5.- Motor de pistones alternativos.

1.3.6.- Motores de Pistón Rotativo.

También conocido como Motor Wankel.

El movimiento rotativo se genera directamente en un pistón de sección triangular que gira dentro de una carcasa formando 3 cámaras.

Funciona siguiendo el ciclo de 4 tiempos de un motor Otto, no posee válvulas ya que la admisión y el escape se realiza por lumbreras.

Su empleo actual en automoción es muy limitado.

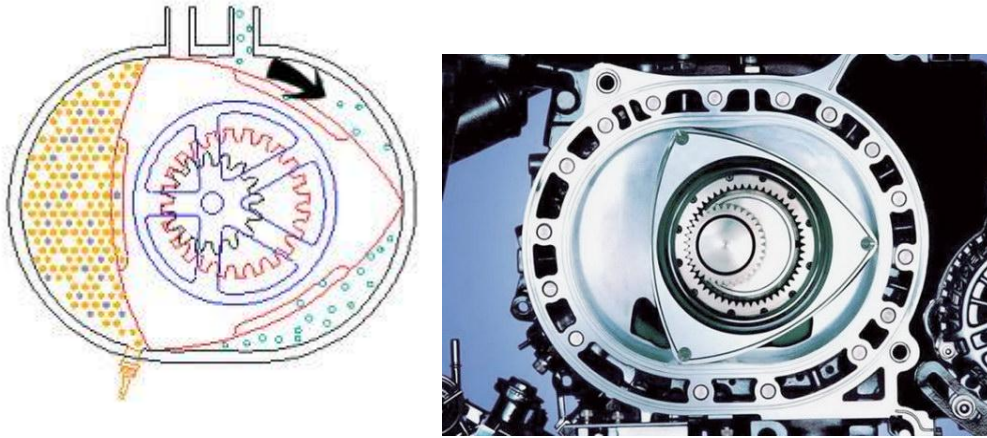


Fig. 6 y 7.- Ambos motores rotativos (Wankel).

1.4.- FELIX WANKEL.

Felix Heinrich Wankel (Lahr, Alemania, 13 de agosto de 1902 – Heidelberg, 9 de octubre de 1988) fue un ingeniero alemán, inventor del motor rotativo Wankel, un diseño de motor a explosión sin cilindros que constituye una significativa mejora sobre los diseños tradicionales, aunque apenas ha sido empleado en la industria automotriz.

Wankel fue un completo autodidacta, y nunca dominó las matemáticas; la idea del motor rotativo la concibió a temprana edad, en el curso de experimentos domésticos para fabricar un motor de combustión interna. Desde 1936 a 1945 trabajó como especialista en el diseño de motores de explosión en el Centro Alemán de investigación Aeronáutico (DVL), diseñó válvulas y portezuelas para los submarinos de la marina alemana. Su trabajo para el ejército lo llevó a prisión tras el fin de la guerra.

En 1951 se incorporó al departamento de desarrollo de NSU, en Lindau. Uno de sus primeros desarrollos en esta compañía fue el de un compresor rotatorio para sobrealimentar las motocicletas que fabricaba NSU. Aplicando la experiencia de este desarrollo completó el diseño del primer motor rotatorio en 1954, que en colaboración con el Dr. Froede se probó por primera vez en 1957, aunque las primeras patentes corresponden a 1960.

Obtuvo una patente para el mismo año; el diseño recibió mejoras por el ingeniero estadounidense Curtiss Wright, y al año siguiente la automotriz japonesa Mazda adquirió una licencia para emplearlo. La serie RX de deportivos de Mazda es la única línea comercial de automóviles que emplea actualmente el motor Wankel, con considerable éxito en rendimiento. En 1969 sus inventos le granjearon a Wankel un doctorado honoris causa de la Universidad Técnica de Múnich. Wankel fundó, en la misma Lindau, su propio centro de investigación donde continuó el desarrollo de aplicaciones de motores rotatorios. Murió en Heidelberg en 1988.



Fig. 8.- *Felix Heinrich Wankel.*

II.- TIPOS DE MÁQUINAS DE PISTÓN ROTATIVO.

Las exhaustivas investigaciones llevadas a cabo durante el largo periodo de desarrollo del motor Wankel han permitido definir las diferentes combinaciones de perfiles trocoidales que pueden asumirse como formas fundamentales de máquinas de pistón rotativo.

Los esquemas representan estas combinaciones para máquinas de pistones rotativos conjugados para máquinas de pistón rotativo planetario.

Esquemáticamente están constituidas por el estator, por el rotor y por el cigüeñal. El estator es la envoltura externa fija, cuyo eje de simetría coincide con el árbol del motor. El rotor es el “pistón planetario” que gira sobre un excéntrico o manivela que forma parte del cigüeñal. El movimiento de giro y traslación del rotor es impuesto por una pareja de engranajes de los cuales uno es solidario con el rotor y el otro con el estator o con otras partes fijas de la máquina.

Se pueden realizar: máquinas que tienen el estator con perfil trocoidal y máquinas que tienen el rotor con perfil trocoidal.

Como las formas que la trocoide puede asumir son múltiples, se considera oportuno distinguir las máquinas de pistón planetario en los 4 tipos siguientes:

- a) Estator con perfil epitrocoidal.
- b) Estator con perfil hipotrocoidal.
- c) Rotor con perfil epitrocoidal.
- d) Rotor con perfil hipotrocoidal.

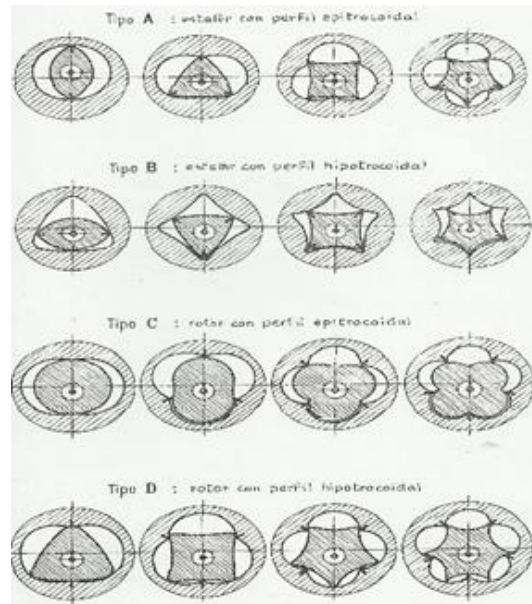


Fig. 9.- *Combinaciones fundamentales de perfiles trocoidales.*

Indicando con ω la velocidad de rotación del cigüeñal ω_R la velocidad de rotación del rotor alrededor del propio eje y con K el número de puntos de contacto entre los perfiles del estator y del rotor, sobre los cuales se disponen los elementos de sellados, se mencionara brevemente cuales son las características geométricas y cinemáticas que diferencian entre sí los 4 tipos de máquinas.

2.1.- MÁQUINAS TIPO A (ESTATOR CON PERFIL EPITROCIDAL).

Rotor del tipo con K vértices sentido en rotación del motor igual al del rotor sobre el eje propio.

El perfil epitrocoidal del estator es generado por la trayectoria discreta porcada vértice del rotor en su movimiento planetario y está constituido por un número $(k-1)$ de arcos.

La envolvente interior del perfil del estator, en su movimiento con respecto al rotor considerado fijo, genera el perfil límite del rotor.

Entre rotor y estator resultan K cámaras de trabajo. La relación entre la velocidad de rotación del cigüeñal y la del rotor es:

$$\omega = K \cdot \omega_R$$

Las relaciones de compresión máximo alcanzable y el ángulo máximo de los vértices del rotor son de izquierda a derecha respectivamente 140:1 con ángulo de inclinación hasta el 19.5°; 15.5:1 e inclinación hasta de 30°; 7.5:1 e inclinación hasta de 41.8°; 6:1 e inclinación de 56.4° (inaceptable).

2.2.- MÁQUINAS TIPO B (ESTATOR CON PERFIL HIPOTROCOIDAL).

Rotor del tipo con K vértices sentido de rotación del cigüeñal contrario al del rotor con respecto al propio eje.

El perfil hipotrocoidal, generado por cada vértice del motor, está constituido por un número $(K+1)$ de arcos. El perfil límite del rotor está definido también aquí por la envolvente interior del perfil del estator: resultan K cámaras de trabajo.

La relación entre las velocidades es:

$$\omega = -K \cdot \omega_R$$

Las relaciones de compresión máximas son demasiado bajas, con la excepción de la configuración con rotor de 4 vértices para la cual puede alcanzarse el valor de 10.4:1, pero el ángulo de inclinación es demasiado alto, alcanzando los 41.6°.

2.3.- MÁQUINAS TIPO C (ROTOR CON PERFIL EPITROCOIDAL).

Estator constituido por K lóbulos hacia el exterior y K vértices hacia el interior sobre los cuales se produce el contacto con el rotor, sentido de rotación del cigüeñal contrario al del rotor sobre el propio eje.

El perfil epitrocoidal del rotor se genera del mismo modo según el cual se genera el perfil del estator en las maquinas tipo A, es decir, por el movimiento de los vértices del estator con respecto al rotor considerado fijo; el perfil comprende un número $(K-1)$ e lóbulos.

El perfil límite del estator es generado por la envolvente exterior del perfil epitrocoidal del rotor.

Entre el rotor y el estator resulta K cámaras de trabajo. La relación entre las velocidades de rotación es:

$$\omega = -(K - 1) \cdot \omega_R$$

Todas las soluciones permiten una relación de compresión mayor de 100:1. Los ángulos de inclinación máximos son iguales a los de los casos A.

2.4.- MÁQUINAS TIPO D (ROTOR CON PERFIL HIPOTROCOIDAL).

Estator siempre constituido por K lóbulos hacia el exterior y K vértices hacia el interior, sentido de rotación del cigüeñal igual al del rotor con respecto a su propio eje.

El perfil hipotrocoidal del rotor se genera como el perfil del estator en el tipo C, o sea, por el movimiento de los vértices del estator con respecto al rotor considerado fijo; el perfil comprende un número de lóbulos $(K+1)$.

El perfil límite del estator es generado por la envolvente exterior del perfil hipotrocoidal del rotor; resultan K cámaras de trabajo. La relación entre las velocidades es:

$$\omega = (k + 1) \cdot \omega_R$$

Las relaciones de compresión que pueden conseguirse son todas demasiado bajas, no superando, en el caso más favorable (rotor de 5 vértices) el valor de 2.3:1 con una inclinación máxima de 41.6°.

2.5.- EL MOTOR RADMAX.

El motor Radmax es un motor rotativo de combustión interna cuya tecnología pertenece a la empresa Reg Technologies Inc. / Regi U.S. Inc., con sede en Richmond, Canadá, la cual tiene la licencia respectiva. La tecnología en la que se basa el motor Radmax es también aplicable a bombas y compresores, además del uso como motor rotativo de tipo Diesel de combustión interna y externa que es la línea principal de investigación de la empresa.

En un motor de combustión interna alternativo de 4 tiempos se desarrolla un tiempo por cada carrera del pistón, lo que conlleva que el ciclo completo requiera dos revoluciones del cigüeñal para completarse.

El motor rotativo Radmax es también un motor de 4 tiempos. Las cámaras de combustión que se forman entre el rotor, las paredes de la cubierta, las paletas y la superficie ondulada del disco-leva varían su volumen mientras las paletas se ven obligadas a avanzar por el camino ondulado que discurre entre los dos discos-levas durante la rotación. Como el rotor tiene 12 paletas el motor es capaz de producir 24 explosiones en cada rotación; doce en la parte superior del rotor y doce en la inferior.

La empresa propietaria de los derechos de explotación asegura que el motor Radmax tiene entre 2 y 3 veces más potencia y pesa la mitad que un motor Wankel de las mismas dimensiones. Simplicidad, potencia y eficacia parecen ser los puntos clave en este tipo de motor.

Reg Technologies Inc. posee la patente mundial sobre la tecnología del motor rotativo RadMax mientras que REGI U.S. Inc. posee los derechos estadounidenses. Reg technologies Inc. ha estado implicada en la investigación y el desarrollo del motor RadMax desde 1987. El objetivo de la Empresa es obtener la licencia para la comercialización del motor y/o participar conjuntamente con otras empresas para desarrollar productos que empleen motores rotativos RadMax.

En abril del año 2007, REGI U.S. Inc. formó una compañía filial en Washington con la intención de conseguir contratos con el ejército estadounidense que permitieran la evolución, prueba y desarrollo de sus motores en prototipos de uso militar.

A fecha de hoy, se ha construido un motor rotativo Radmax de tipo diesel y se está planeando el desarrollo de un generador rotativo para aplicación en vehículos híbridos. Con anterioridad, la empresa ha diseñado y construido una bomba de aire para uso en sistemas de célula de combustible así como una bomba de aire para la regulación lumbar en asientos de automóviles. También se construyó un compresor para unidades de aire acondicionado para una compañía de autobuses.

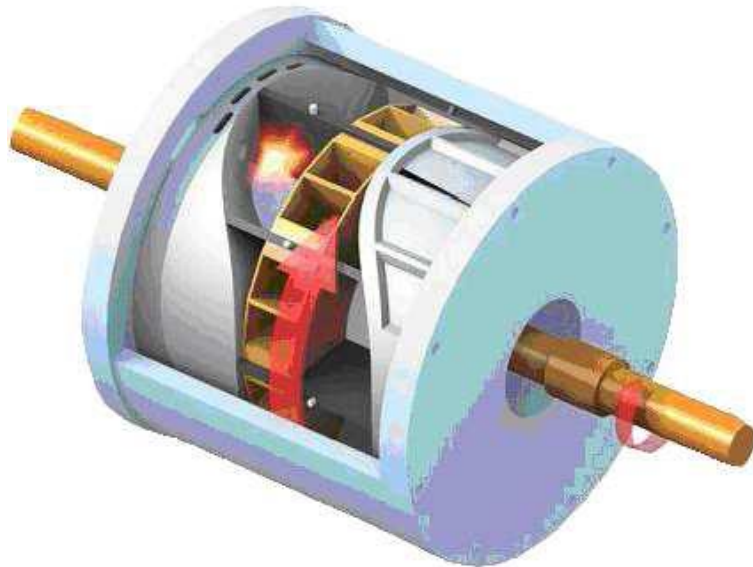


Fig. 10.- Vista interior del motor rotativo Radmax.

2.6.- LA QUASITURBINA

La quasiturbina es un motor rotativo de combustión interna de flujo constante ideado en el año 1993. Como la mayoría de los demás motores rotativos tratados en este trabajo, está aún en desarrollo.

Los inventores de la quasiturbina son Roxan Saint-Hilaire, que es ingeniero eléctrico por la Escuela Politécnica de Montreal, su hermano Ylian Saint-Hilaire, doctorado en informática por la Universidad del Québec en Montreal y el padre, Gilles Saint-Hilaire, que es físico termonuclear, y que básicamente es el inventor del concepto.

La quasiturbina es una mezcla de tres conceptos de motor: se inspira en la turbina, perfecciona el motor de pistón y mejora el concepto Wankel. Es básicamente un motor de fluido continuo en la admisión y el escape ya que mientras un motor de combustión interna alternativo de 4 tiempos realiza las 4 fases del ciclo en 2 rotaciones del cigüeñal, la quasiturbina completa 32 fases en dos rotaciones de su eje (8 ciclos).

Este tipo de motor no se emplea aún en ninguna aplicación real aunque en 2004 se realizó una prueba con un motor tipo quasiturbina instalado en un kart. Actualmente la quasiturbina se encuentra en fase de prototipo.

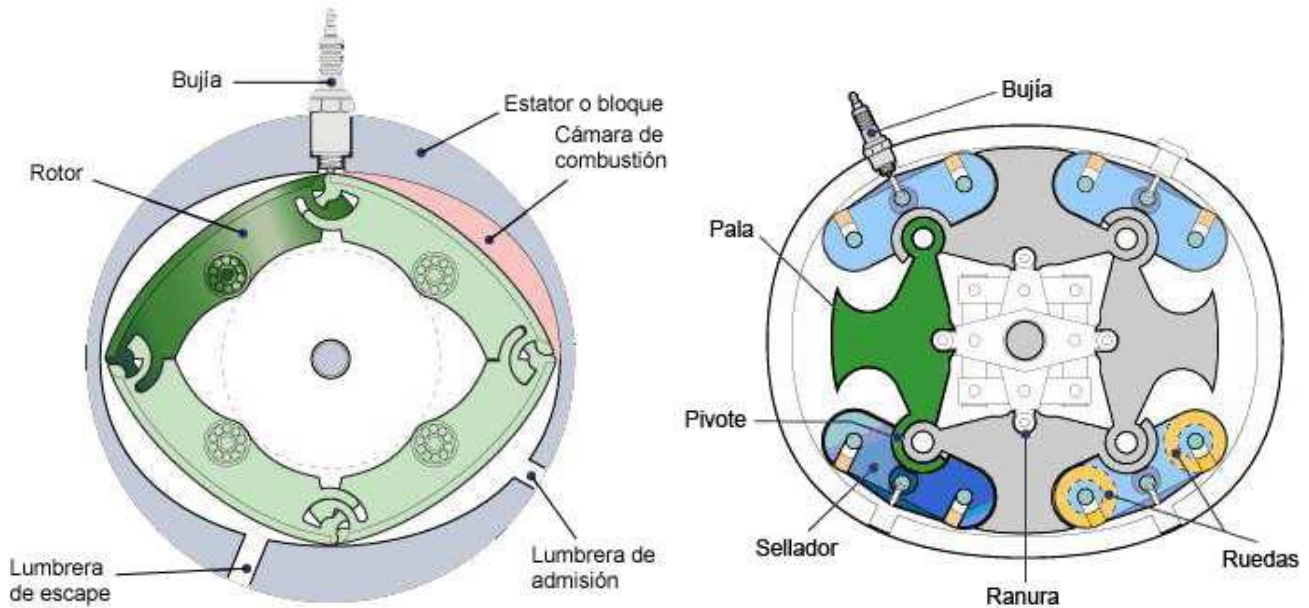


Fig. 11.- Componentes de la Quasiturbina.

2.7.- ROUND ENGINE.

El concepto en el que se basa el motor rotativo Round Engine empezó a tomar forma el año 1995 de las manos de Rudy Pekau, un experto en termodinámica y profesor de la misma en la Technical University of Munich.

Con el objetivo de financiar la investigación, y en última instancia comercializar la tecnología, se fundó una empresa privada llamada VGT Technologies Inc. situada en Calgary, Alberta, Canadá.

En la década pasada VGT Technologies Inc. ha completado varias fases de diseño y desarrollo del motor y ha realizado numerosas pruebas. También se ha llevado a cabo un escrupuloso estudio independiente sobre el funcionamiento del motor toroidal de geometría variable por parte de especialistas en motores de combustión de la Universidad de Calgary.

En 2002, VGT construyó un prototipo de su motor Round Engine. El motor tenía una cilindrada de 625 c.c., y un único pistón, se construyó con el objetivo de comprobar aspectos mecánicos del diseño y averiguar el ratio de compresión más adecuado, así como el par y la potencia que se podrían conseguir. Los resultados que se obtuvieron fueron sumamente alentadores, sobre todo teniendo en cuenta el estado de inmadurez en que aún se encontraba el desarrollo del motor.

Mientras la investigación sigue, la empresa está empezando a comercializar la tecnología Round Engine a través de la venta de licencias a varios fabricantes de motores de combustión, motores hidráulicos, compresores y generadores.

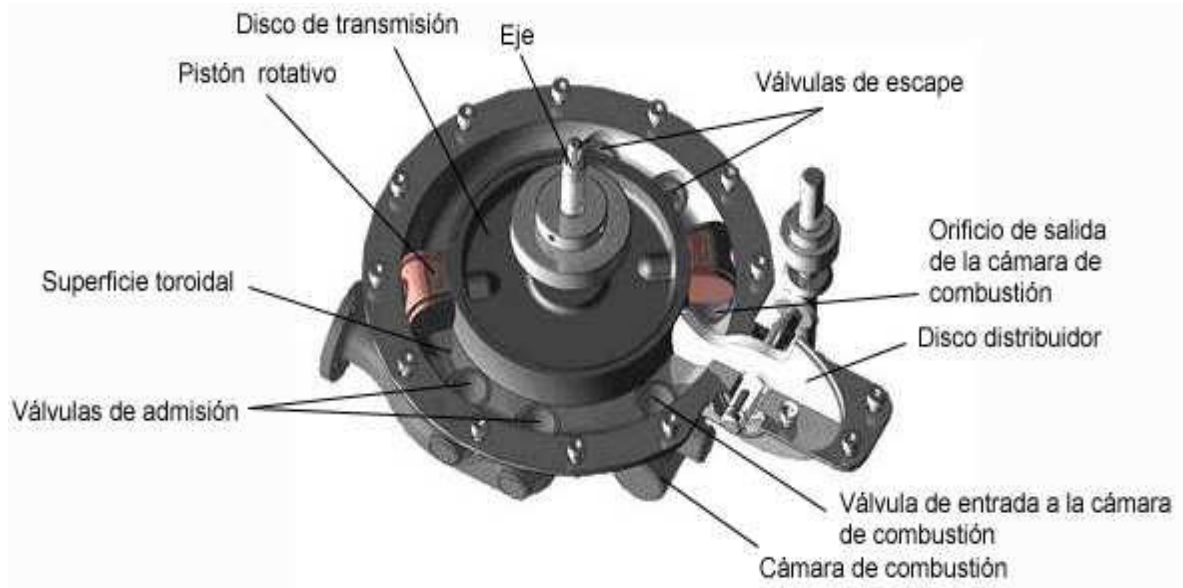


Fig. 12.- Componentes del motor rotativo Round Engine.

2.8.- EL MOTOR ROTATIVO ANTONIO SÁNCHEZ.

Este proyecto de motor rotativo ideado por Antonio Sánchez es una evolución de sus anteriores modelos toroidales (año 1986, y año 1996). Al igual que los anteriores motores, desarrolla el ciclo Otto (cuatro tiempos) y está formado por un estator que encierra los pistones semitoroidales, que giran efectuando movimientos de tijera (tipo de movimiento conocido en inglés como 'scissors action'). Este movimiento se basa en el hecho de que los pares de rotores aceleran y desaceleran continuamente pero siempre giran en un mismo sentido, en este caso en sentido horario. Por lo tanto, los pistones se acercan y se alejan entre ellos a la vez que describen un círculo alrededor del eje. Este movimiento permite que las cavidades que se forman entre los pistones aumenten y disminuyan de volumen facilitando el desarrollo del ciclo de cuatro tiempos.

Las características principales de este motor vienen dadas por la forma semitoroidal de pistones y estator, que permite el uso de segmentos de estanqueidad convencionales (parecidos a los aros o segmentos que emplean los motores de combustión interna alternativos) y por el hecho de que la fundición del estator se hace en una sola pieza, lo que garantiza su estabilidad térmica y mecánica. Para simplificar la explicación del funcionamiento, ya de por sí bastante difícil de plasmar en este caso, esta versión del motor representado en los gráficos que se acompañan está exenta del dispositivo de engrase por lubricante a presión.

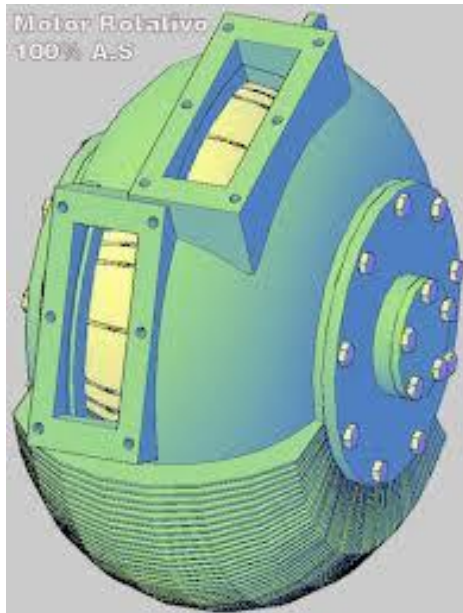


Fig. 13.- Esquema del motor Rotativo Antonio Sánchez.

III.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

3.1.- DESCRIPCIONES GENERALES DEL MOTOR.

Mientras en un motor alternativo se efectúan sucesivamente 4 trabajos diferentes (admisión, compresión, combustión y escape) en el mismo volumen (cilindro), en un motor Wankel se desarrollan los mismos 4 tiempos pero en lugares distintos de la carcasa (también llamada bloque o estator). Concretamente, el estator es una cavidad con una forma que recuerda a un 8, dentro de la cual se encuentra un rotor con forma de prisma triangular de caras convexas que realiza un giro de centro variable. Este rotor comunica su movimiento rotativo a un cigüeñal que se encuentra en su interior, y que gira ya con un centro único. En siguientes apartados se detallará mejor la geometría del estator y del rotor.

Al igual que un motor de pistones, el motor rotativo emplea la presión creada por la combustión de la mezcla aire-combustible para producir trabajo. La diferencia radica en que esta presión está contenida en la cámara formada por una parte del estator y por uno de los lados del rotor triangular, que en este tipo de motores reemplazaría a los pistones siguiendo con la comparación.

El rotor sigue un recorrido en el que mantiene sus 3 vértices en contacto con el estator, delimitando así tres compartimentos separados: las cámaras de trabajo. A medida que el rotor gira dentro de la cámara, cada uno de los 3 volúmenes se expande y contrae alternativamente; es esta expansión-contracción la que succiona la mezcla aire-combustible hacia el motor, comprime la mezcla, extrae su energía al expandirse y realiza el escape.

Por cada vuelta del rotor, el árbol motriz gira tres veces. No hay sistema de distribución, ya que la admisión y escape están controlados por lumbreras del propio bloque sin la interposición de válvulas. Cada una de las tres cámaras de combustión al terminar su vuelta alrededor del árbol motriz hará los cuatro tiempos, y se producirán tres explosiones en un giro completo del rotor.

Para transmitir la fuerza generada por la combustión al cigüeñal el rotor actúa con un brazo de palanca con respecto al cigüeñal. El rotor gira sobre una excéntrica que forma parte del cigüeñal. Mientras el rotor gira alrededor de su propio eje, éste describe un círculo, cuyo radio es igual a la excentricidad de la excéntrica.

El rotor gira en contacto con el cigüeñal mediante un par de ruedas dentadas de las cuales una, con dientes interiores, es concéntrica con el rotor y solidaria a este, y la otra, con dientes exteriores, es concéntrica con el cigüeñal y solidaria con el estator.

La relación entre los números de dientes de las dos ruedas es de 3 a 2, por lo que el rotor hace tres vueltas sobre sí mismo mientras su centro de rotación recorre el círculo completo descrito en una vuelta por el excéntrico del cigüeñal.

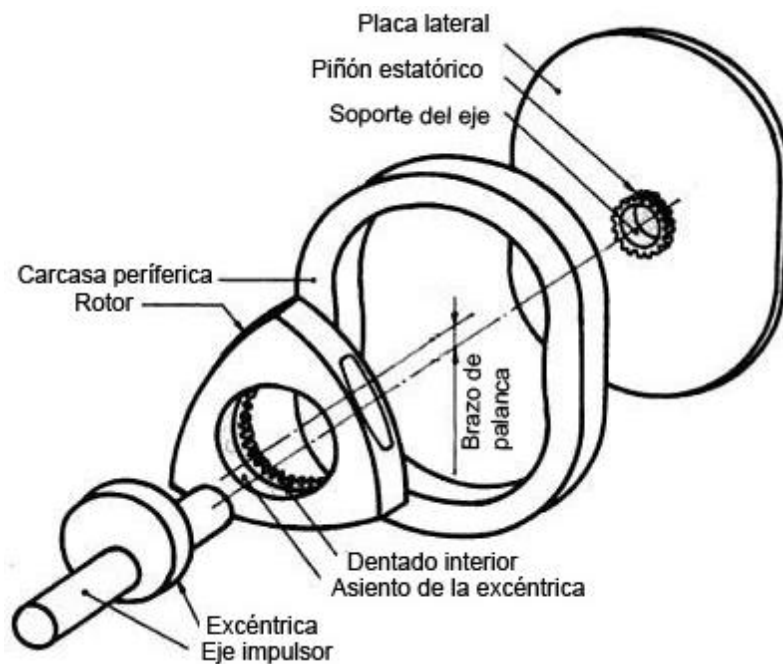


Fig. 14.- Elementos principales del Motor Rotativo Wankel.

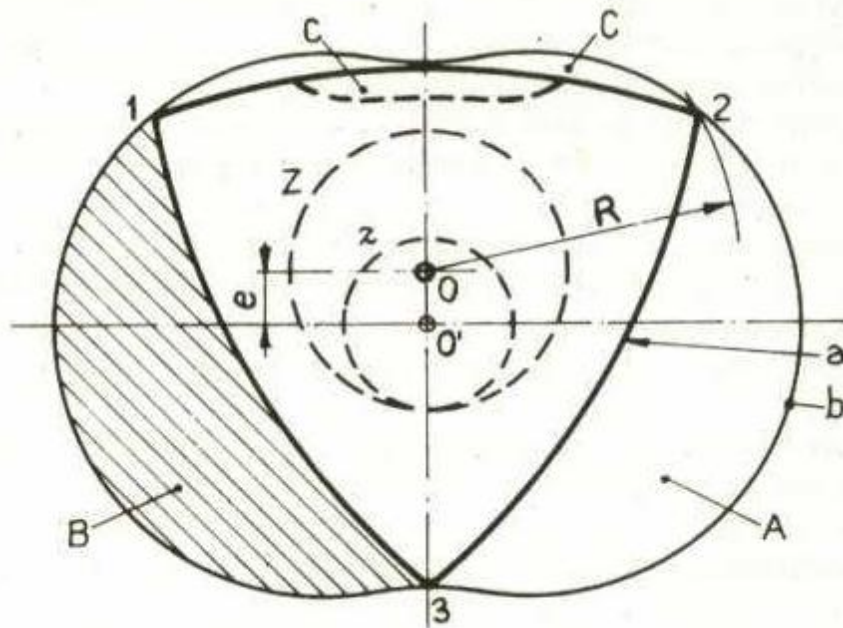


Fig. 15.-

- 1-2-3: Vértices del rotor.
- A) B) C): Cámaras de trabajo.
- R) Radio del rotor.
- a) Lado del rotor.
- b) Superficie de perfil trocoidal.
- c) Cámara de combustión de volumen constante.
- Z) z) Engranajes para la sincronización.
- O) Centro del rotor.
- O') Eje del cigüeñal.
- e) Excentricidad.

El movimiento del rotor es por tanto el resultado de dos rotaciones: la del cigüeñal y la del rotor sobre su propio eje. La relación entre las velocidades angulares de los dos movimientos es tal como para hacer describir a cada uno de los vértices del rotor la curva según la cual se ha trazado el perfil del estator.

Como en los motores de pistón, el momento de giro experimenta un desarrollo variable (aunque periódico) y es necesario implantar un volante de inercia para conseguir una marcha satisfactoriamente uniforme.

El motor Wankel se puede implementar, al igual que los motores alternativos, como motor de encendido provocado o como motor de encendido por compresión, acercándose a los ciclos de referencia Otto y Diesel respectivamente. La implementación más usual ha sido la de motor de encendido provocado.

La implementación del motor Wankel como motor de encendido por compresión se resume en un intento de la empresa Rolls-Royce, en la década de los 70. Básicamente, estaba compuesto por dos

cámaras: una pequeña situada por encima de otra más grande y ambas en el interior de un mismo estator. Con esta construcción se puede alcanzar una relación de compresión de 18:1, con un cociente entre la superficie y el volumen de la cámara de combustión semejante al de un motor alternativo equivalente trabajando también en ciclo Diesel.

La turbulencia del aire fresco requerida para la correcta combustión de la mezcla final, se realiza mediante el estrechamiento que hay entre una cámara y la otra. Al mismo tiempo, este obstáculo genera una depresión en el otro extremo, que propicia un aumento de la velocidad de propagación de la llama, y la salida de los gases quemados.

Dejando de lado el trabajo realizado por la firma británica, nadie más se ha aventurado en el desarrollo de un motor rotativo funcionando según esta tipología de encendido por compresión. Todos los esfuerzos se han centrado en la versión Otto, ya que requiere unas exigencias térmicas menores gracias a una relación de compresión más baja.

3.2.- PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.

A continuación se muestran una serie de imágenes secuencialmente que aclaran cómo se producen los cuatro tiempos en una de las cámaras de combustión del motor Wankel y que ayudarán a profundizar en el funcionamiento del motor.

3.2.1.- 1er Tiempo: Admisión.

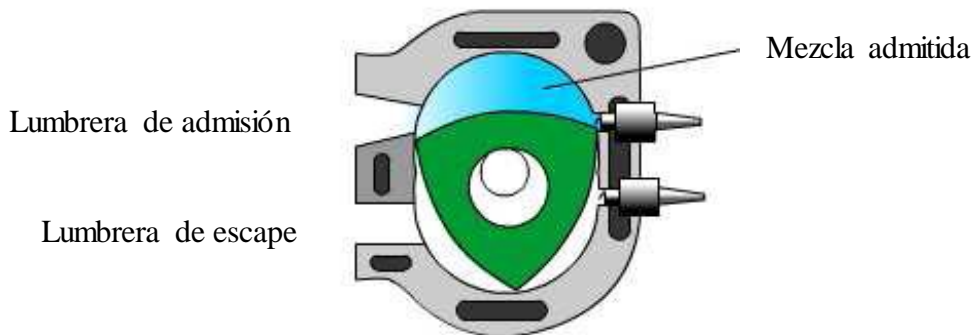


Fig. 16.- Cámara de combustión, en la fase de admisión de gases.

La fase de admisión del ciclo empieza cuando el vértice del rotor descubre la lumbrera de admisión. En este momento el volumen de la cámara de combustión es mínimo. A medida que el rotor avanza, el volumen de la cámara de combustión aumenta absorbiendo la mezcla de aire-combustible. Cuando el otro vértice de la cara del rotor ha pasado por la lumbrera de admisión el volumen contenido queda aislado y empieza la compresión.

3.2.2.- 2º Tiempo: Compresión.

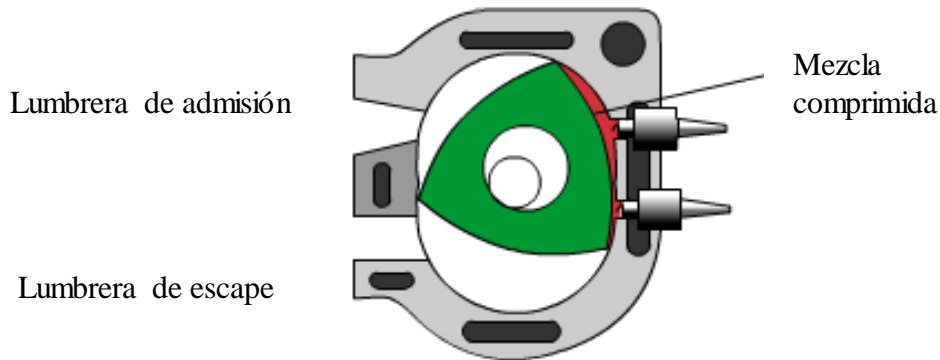


Fig. 17.- Cámara de combustión, en la fase de compresión de gases.

A medida que el rotor continúa su movimiento dentro del bloque, el volumen contenido en la cámara de combustión se hace cada vez más pequeño y la mezcla aire-combustible se comprime. En el momento en que la cara del rotor queda enfrente de las bujías, el volumen de la cámara es mínimo. En este punto se produce el salto de la chispa y la consiguiente combustión de la mezcla.

Ya que en la fase de compresión la cara del rotor se ciñe a la pared del estator, la compresión sería excesiva si no se practicasen unas hendiduras sobre las caras del rotor. Estas hendiduras forman las cámaras de combustión del rotor. No obstante, estas cavidades presentan un inconveniente: se produce una comunicación de los conductos de admisión y escape (semejante al de los motores de dos tiempos alternativos). A pesar de todo, las relaciones de compresión con las que se trabaja habitualmente van desde 8:1 hasta 9,5:1. Para esta última parece obtenerse el consumo mínimo.

3.2.3.- 3er Tiempo: Combustión y Expansión.

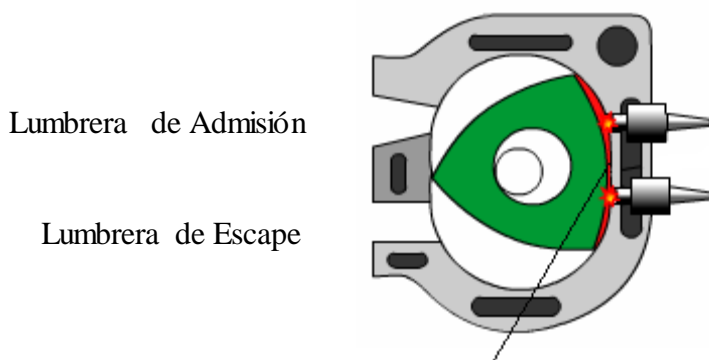
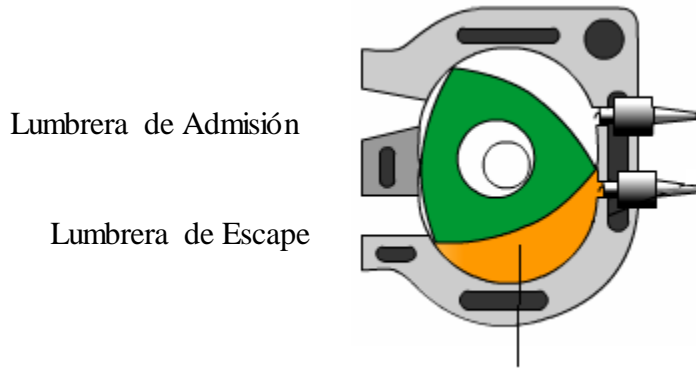


Fig. 18.- Cámara de combustión, en la fase de combustión de gases.



Expansión de Mezcla

Fig. 19.- Cámara de combustión, en la fase de expansión de gases.

La mayoría de los motores rotativos tienen dos bujías. La cámara de combustión es larga, así que la llama se inflamaría demasiado lentamente si hubiera solamente una bujía. Cuando las chispas encienden la mezcla de aire-combustible, la presión aumenta rápidamente, forzando el rotor a moverse en la dirección en la que el volumen del compartimento crece. Los gases de combustión continúan expandiéndose, moviendo el rotor y transformando energía, hasta que el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape.

3.2.4.- 4º Tiempo: Escape.

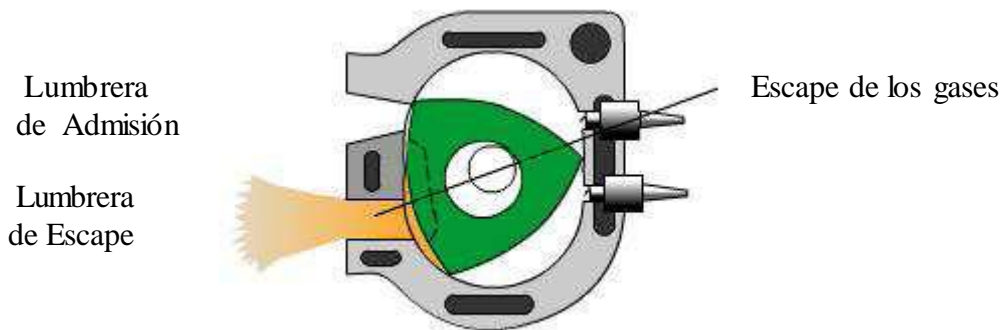


Fig. 20.- Cámara de combustión, en la fase de escape de gases.

Una vez el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape, los gases de la combustión pueden escapar. A medida que el rotor se mueve, el volumen va disminuyendo forzando así la salida de los gases. En el momento en que el volumen del compartimento es mínimo, el vértice del rotor vuelve a descubrir la lumbrera de admisión repitiéndose otra vez el ciclo.

Es en este momento en el que se produce el cortocircuito de gases que ya hemos comentado ya que se produce una comunicación de los conductos de admisión y escape a través de la cámara de combustión labrada en las caras de los rotores (ver figura anterior).

De esta manera se puede ver como cada una de las tres caras del rotor está siempre trabajando en una etapa del ciclo. En una revolución completa del rotor se producen tres combustiones. El eje de salida gira tres veces por cada revolución del rotor o lo que es lo mismo, hay una combustión por cada revolución del eje de salida.

El mismo proceso se ha realizado paralelamente en las otras dos cámaras de combustión. De esta manera se puede ver como cada una de las tres caras del rotor está siempre trabajando en una etapa del ciclo. Todo el ciclo completo de cuatro tiempos se lleva a cabo en una sola vuelta del rotor, que equivale a tres del cigüeñal.

El cigüeñal gira tres veces por cada revolución del rotor, esto quiere decir que el eje del motor gira tres veces más rápido y, por lo tanto, para conseguir la misma cifra de potencia se necesita un tercio del motor que se necesitaría si el rotor y el eje giraran a la misma velocidad.

Los tiempos del ciclo ocurren siempre en el mismo sitio del estator: la admisión, que hasta cierto punto se considera una fase refrigerante por la evaporación de la gasolina que entra pulverizada en el seno de la mezcla fresca, tiene lugar en la parte superior de las figuras vistas así como la fase de compresión. Por el contrario, las fases calientes (explosión y escape) suceden en la parte inferior. La consecuencia directa es que una parte del motor se calienta mucho más que la otra (la diferencia llega a ser entre 150° la parte de admisión y casi 1000° la de escape); esta circunstancia motivará una asimetría en la forma externa del motor por motivos de refrigeración.

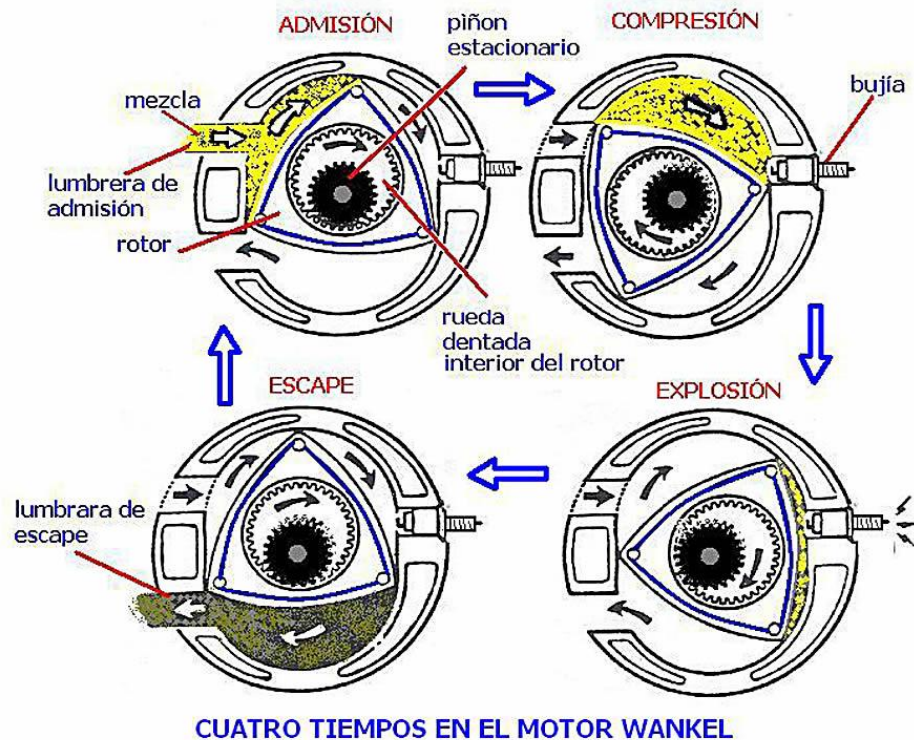


Fig. 21.- Esquema del ciclo de 4 tiempos completo de un motor rotativo Wankel.

IV.-BASES DE DISEÑO DEL MOTOR WANKEL.

4.1.-ESTUDIO DEL PERFIL TROCOIDAL.

Si se quiere realizar el trazado del perfil trocoidal de la cámara del rotor, conviene demostrar que una misma epitrocoide, o bien hipotrocoide, puede ser generada tanto por una circunferencia que rueda exteriormente sobre la circunferencia fija (movimiento epicicloidal), como por una circunferencia que rueda sobre una circunferencia fija en ella contenida (movimiento pericicloidal).

En la figura los 2 casos están representados por los esquemas (a) y (b). Naturalmente los radios de las circunferencias, fija y móvil, son diferentes en ambos casos aunque el punto P genera la misma epitrocoide: puede verse brevemente qué relación existe entre las 2 parejas de radios.

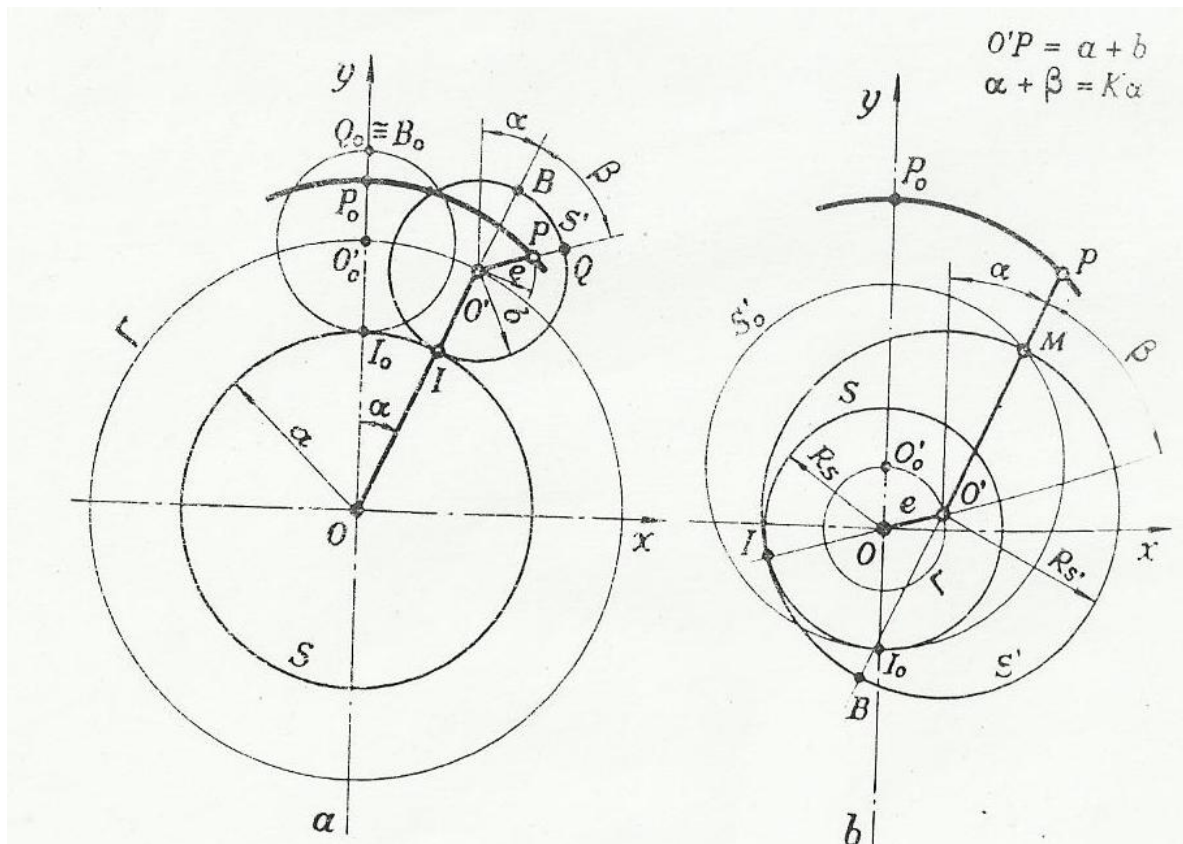


Fig. 22 (a-b).- Generacion de una misma epitrocoide con un movimiento epicicloidal (a) y con un movimiento pericicloidal (b).

Del esquema (a) se obtiene fácilmente las coordenadas del punto P.

$$(1) \quad \begin{aligned} x &= a + b \operatorname{sen} \alpha + e \operatorname{sen}(\alpha + \beta) \\ y &= a + b \operatorname{cos} \alpha + e \operatorname{cos}(\alpha + \beta) \end{aligned}$$

En la condición inicial el punto generador P esta en P_0 y O' se encuentra en O'_0 : la línea $O'_0 P_0$ coincide con el eje y pasa por O, centro de la circunferencia fija S.

El punto de tangencia I entre la circunferencia S y la que rueda S', se llama centro instantáneo de rotación o más brevemente, centro instantáneo. En la posición inicial está indicado por I₀; evidentemente el centro instantáneo se encuentra sobre el eje y.

Supóngase ahora que S' rueda describiendo un ángulo β en sentido horario; el centro instantáneo pasa por I y la línea O I O' forma un ángulo α con el eje y.

Puesto q S' rueda sin deslizar sobre S, el arco BQ es igual al arco I₀ y por lo tanto se tiene la relación:

$$(2) \quad a \cdot \alpha = b \cdot \beta$$

De la cual se obtiene

$$(3) \quad \beta = \frac{a}{b} \cdot \alpha$$

El ángulo (α + β) que aparece en la ecuación (1) vale entonces:

$$(4) \quad \alpha + \beta = 1 + \frac{a}{b} \alpha = K \cdot \alpha$$

Habiendo hecho $1 + \frac{a}{b} = K$

En el caso de la epitrocoide de 2 arcos, se tiene: $\frac{a}{b}$ por lo tanto resulta K=3; mientras OO'rueda en un ángulo α alrededor de O, O'Q rueda en un ángulo 3α alrededor de O'.

Si ahora cambiamos la posición de O' de modo que OO' sea igual a e en dimensiones y orientación, es decir con ángulo α + β con respecto al eje y obtenemos el esquema (b).

Según este esquema el movimiento de la circunferencia generatriz S' es pericicloidal con respecto a la circunferencia fija S, y este es el caso del motor Wankel

El centro O' de la circunferencia móvil S' debe hallarse sobre la circunferencia Γ de radio e y OO' debe formar un ángulo Kα con el eje y, mientras que la recta OP = a + b forman un ángulo α con este eje.

La circunferencia fija S de centro O es tangente en I a S' y debe de tenerse: arco I I₀ igual al arco I B. Llamando R_S y R_{S'} a los respectivos radios de S y S', se tendrá la relación:

$$(5) \quad R_S \cdot K \cdot \alpha = R_{S'} \cdot \beta$$

pero de la (4) resulta β = α · (K - 1), por lo que de la (5) se obtiene:

$$(6) \quad R_S = R_{S'} \cdot \frac{K-1}{K}$$

del esquema (b) se ve que:

$$(7) \quad R_{S'} - R_S = e$$

y por lo tanto, combinando la (6) y la (7) se obtiene:

$$(8) \quad \begin{aligned} R_S &= k - 1 \cdot e \\ R_{S'} &= K \cdot e \end{aligned}$$

que dan el valor de los radios de las circunferencias fija y móvil cuando se asigna el valor de e .

La relación de transmisión del mecanismo vale entonces:

$$(9) \quad \frac{R_S}{R_{S'}} = \frac{K-1}{K}$$

En el caso de la epitrocoide de 2 arcos, con $K=3$, resulta $\frac{R_S}{R_{S'}} = \frac{2}{3}$

Mientras $O O'$ completa 3 vueltas en torno a O , $O'P$, que es solidaria con S' completa una y en el mismo sentido.

El movimiento se materializa en el motor sustituyendo S por un engranaje fijo con dientes exteriores de radio primitivo R_S y S' por un engranaje con dientes interiores de diámetro primitivo $R_{S'}$.

El centro O' del engranaje S' recorre la circunferencia de radio e por medio de la manivela excéntrica e que gira alrededor del eje O del cigüeñal. Articulada en O' y rígidamente unida en M a S' , una barra de longitud $O'P$, siguiendo a S' en su movimiento rototraslatorio, describirá en P una epitrocoide igual a la que se tiene en el caso (a).

El esquema (b), por la más factible posibilidad de aplicación práctica en comparación con el esquema (a), ha sido el elegido de entre los 2 para la realización del motor Wankel.

Indicando ahora la longitud de $O'P$ con R , radio generador de la epitrocoide, las ecuaciones (1), escritas para el esquema (b) del tipo equirrotante, quedan:

$$(10) \quad \begin{aligned} x &= R \operatorname{sen} \alpha + e \operatorname{sen} K\alpha \\ y &= R \operatorname{cos} \alpha + e \operatorname{cos} K\alpha \end{aligned}$$

Como la manivela e gira con una velocidad que es K veces la de R , es obvio que la misma epitrocoide puede ser generada por un número K de vértices puntiformes equidistantes sobre una circunferencia de radio R y centro O' . Por la relación $K = \frac{a}{b} + 1$ vista anteriormente, se tiene que si K es el número de los vértices generadores de la epitrocoide, esta resulta constituida por un número $(k - 1)$ de arcos; además para que no presente puntos dobles, ha de tenerse:

$$(11) \quad R > K \cdot e$$

Las máquinas trocoidales tipo A y B son fácilmente realizables (Fig. 9) son fácilmente realizables cuando se calcule con las relaciones (10) el perfil epitrocoidal para valores dados de e , R y K .

En efecto, es suficiente con determinar grafica o analíticamente el perfil limite generado por la envolvente interior o exterior de la epitrocoide en su movimiento relativo al plano solidario S' .

En el caso del motor Wankel $K = 3$, el número de los lóbulos de la epitrocoide es igual a 2. El perfil limite (Fig. 23a) el rotor de 3 vértices se obtienen como envolvente interior de la epitrocoide de los arcos del estator.

El esquema b de la Fig. 23 se refiere a una máquina que tiene el rotor con perfil epitrocoidal. En ella la envolvente exterior de la epitrocoide constituye el perfil de lóbulos con 3 vértices orientados

hacia el interior del estator. En este caso para realizar el movimiento planetario del rotor epitrocoidal es necesario invertir el mecanismo, es decir, hacer el engranaje con dientes exteriores S solidario con el rotor, el engranaje con dientes interiores S' solidario con el estator, el eje de rotación del cigüeñal coincide con el eje de simetría del estator.

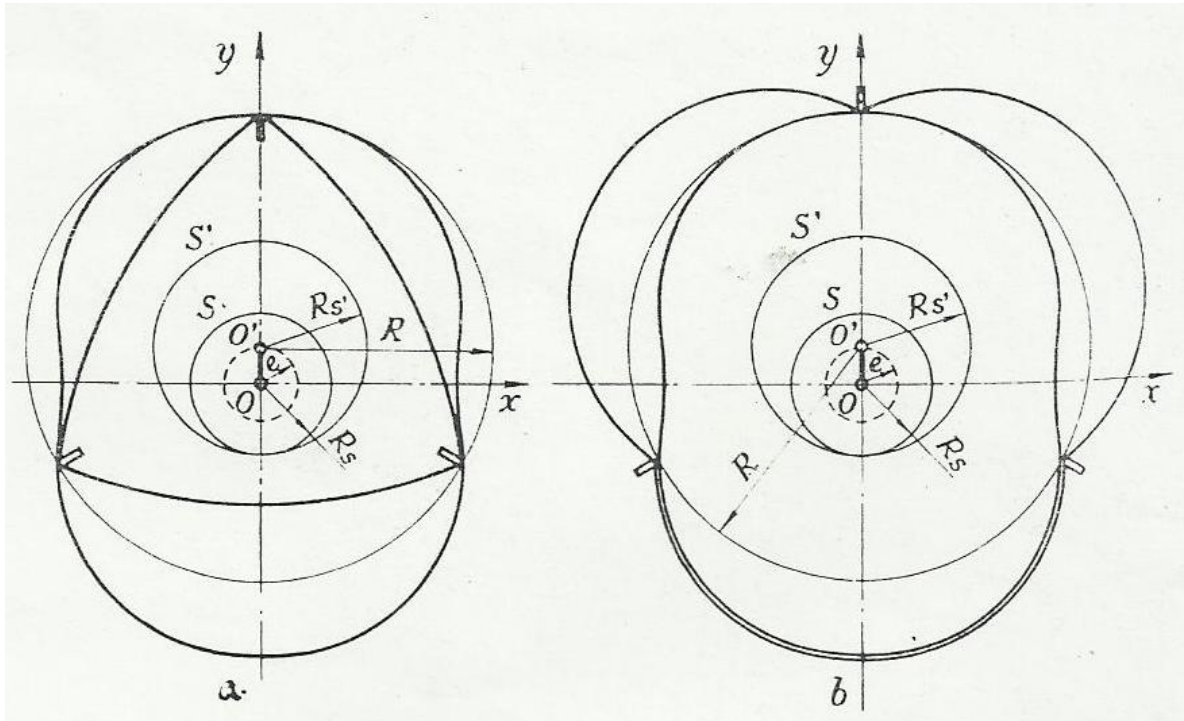


Fig. 23 (a-b).- Perfiles limites generadores por la envolvente interior (a) y exterior (b) de una misma epitrocoide de 2 arcos en su movimiento relativo al plano solidario con S'.

En la figura 24 se muestra el rotor epitrocoidal en una posición genérica con respecto al estator. Como el arco I B tiene que ser igual al arco I I₀, se tiene la relación:

$$R_{S'} \alpha + \beta = R_S \cdot \beta$$

Siendo:

$$\alpha + \beta = K\alpha \qquad \beta = \alpha(K - 1)$$

Resulta:

$$R_{S'} = R_S \frac{K - 1}{K}$$

De la figura resulta que:

$$R_S - R_{S'} = e$$

Por lo que se obtiene:

$$R_S = K \cdot e$$

$$R_{S'} = (K - 1) \cdot e$$

$$\frac{R_s}{R_{s'}} = \frac{K}{K-1}$$

expresiones que resultan invertidas con respecto la (8) y la (9).

El sistema es contrarrotante: mientras el rotor completa una rotación α en sentido horario, el cigüeñal excéntrico completa una rotación $\beta = \alpha(K-1)$ en sentido opuesto con respecto al eje y .

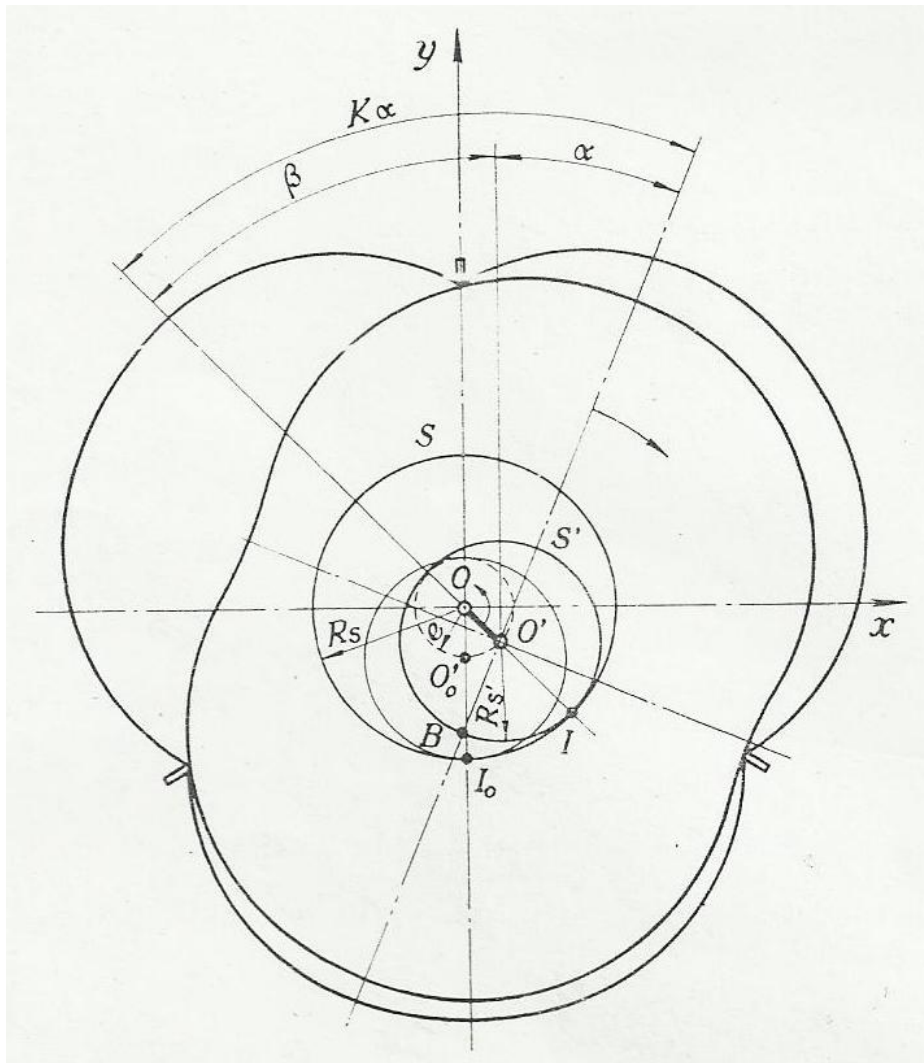


Fig. 24.- Esquema de mecanismo para el caso en que el rotor dotado de movimientos planetario tiene perfil epitrocoidal.

4.1.1.- Cilindrada de los Motores de Pistón Rotativo.

Se ha visto que en el motor Wankel entre el estator y el rotor los vértices limitan 3 cámaras. El volumen de cada cámara varía cíclicamente de un máximo a un mínimo: la diferencia entre estos 2 valores es la cilindrada unitaria.

Para simplificar el cálculo se supone que el rotor tiene los lados rectilíneos (Fig. 25): esto es posible porque la diferencia entre el volumen máximo y el volumen mínimo no cambia al quitar a ambos valores la misma cantidad a comprendida entre el lado rectilíneo y el real curvilíneo (línea de trazos).

Sobre todo convendrá volver a escribir la ecuación (10) en una forma general, y justamente:

$$(12) \quad \begin{aligned} x &= R \operatorname{sen} \alpha \pm e \operatorname{sen} K\alpha \\ y &= R \operatorname{cos} \alpha \pm e \operatorname{cos} K\alpha \end{aligned}$$

teniendo presente que el signo superior vale para maquinas equirrotantes, el signo inferior para maquinas contrarrotantes.

Con referencia a la Fig. 26 (sistema equirrotante), considérense 2 vértices consecutivos del rotor. Corresponde a la posición del primero el ángulo α , a la del segundo por lo tanto el ángulo $\alpha + \frac{2\pi}{K}$.

El área de la superficie achurada encerrada dentro del tramo de perfil de la envolvente comprendido entre los 2 vértices y la cuerda perspectiva vale:

$$13 \quad A = \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{2\pi}{K}} y \cdot dx - \frac{y_1 + y_2}{2} (x_2 - x_1)$$

Teniendo en cuenta las (12) e integrando, se obtiene:

$$A = R^2 \pi \left[\frac{1}{K} \pm \frac{e^2}{R_2} - \operatorname{sen} \frac{\pi}{K} \operatorname{cos} \frac{\pi}{K} + \frac{2eK}{R(K \pm 1)} \operatorname{cos} (K \pm 1)\alpha \pm \frac{\pi}{K} \right]$$

El máximo del área A se obtiene para valores de:

$$\alpha = \frac{\pi}{K \pm 1} m - \frac{\pi}{K} \quad \text{con } m = 0, 2, 4 \dots$$

Y vale

$$14 \quad A_{max} = R^2 \pi \left[\frac{1}{K} \pm \frac{e^2}{R_2} - \operatorname{sen} \frac{\pi}{K} \operatorname{cos} \frac{\pi}{K} - \frac{2eK}{R(K \pm 1)} \right]$$

El mínimo se obtiene para valores de:

$$\alpha = \frac{\pi}{K \pm 1} n - \frac{\pi}{K} \quad \text{con } n = 1, 3, 5 \dots$$

Y vale

$$15 \quad A_{min} = R^2 \pi \left[\frac{1}{K} \pm \frac{e^2}{R_2} - \operatorname{sen} \frac{\pi}{K} \operatorname{cos} \frac{\pi}{K} - \frac{2eK}{R(K \pm 1)} \right]$$

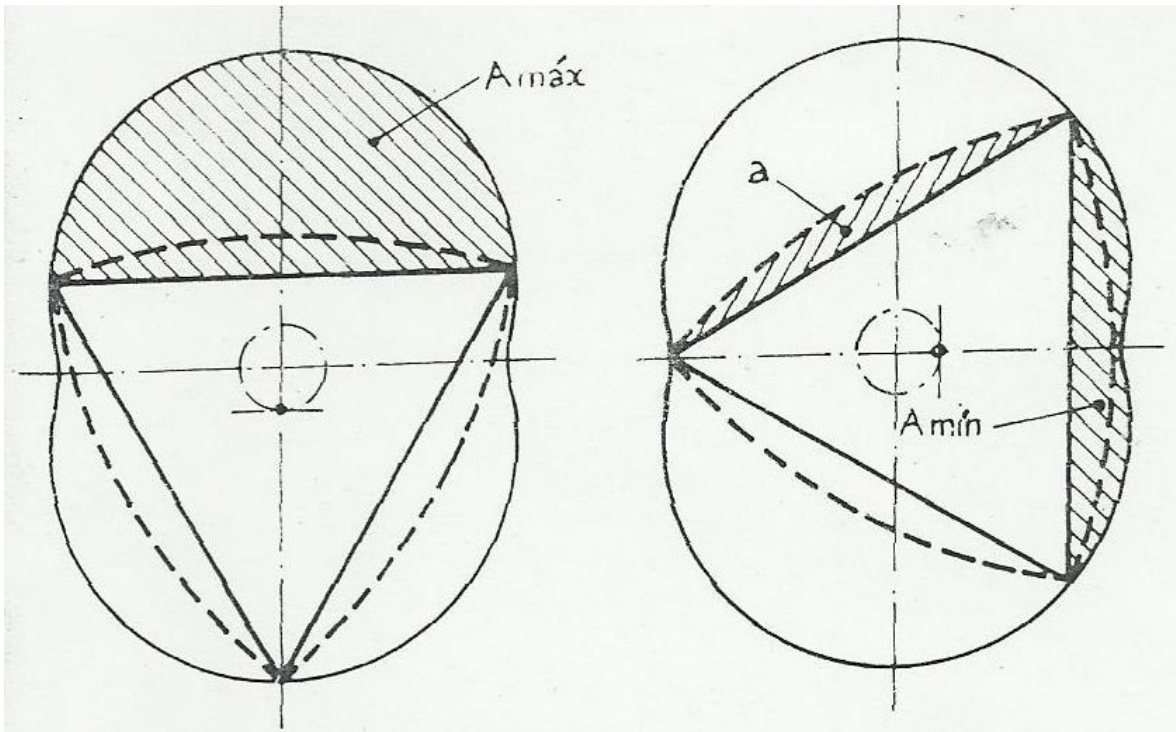


Fig. 25.- *Cilindrada Unitaria* = $A_{max} - A_{min}$.

Dado que la superficie comprendida dentro de la parte del rotor limitada por los 2 vértices y la cuerda correspondiente no varía, indicando con B la profundidad axial de la cámara, la cilindrada unitaria generada por cada lado del rotor resulta:

$$V_C = B(A_{max} - A_{min})$$

Que por la (14) y la (15) resulta

$$16 \quad V_C = B \cdot e \cdot R \frac{4K}{K \pm 1} \operatorname{sen} \frac{\pi}{K}$$

La (16) es válida para maquinas con rotores de vértices y de lóbulos equirrotantes o contrarrotantes.

En el caso del motor Wankel que es una maquina con rotores equirrotantes, siendo $K = 3$, la cilindrada unitaria está dada por:

$$V_C = B \cdot e \cdot R \frac{4 \times 3}{2} \operatorname{sen} 60^\circ = 5.196 B \cdot e \cdot R.$$

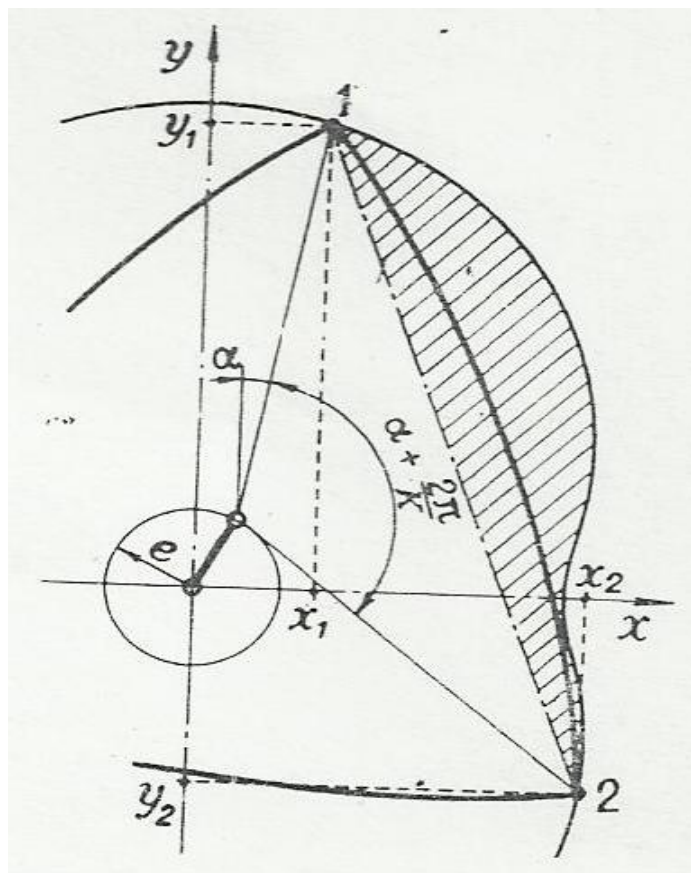


Fig. 26.

Definida la cilindrada unitaria, queda por establecer que cilindrada total debe atribuirse al motor de pistón rotativo en comparación con los motores alternativos. En el caso del motor Wankel, como sabes, el cigüeñal da 3 vueltas mientras el rotor da una completando 3 ciclos, resulta que el ciclo de 4T realizado por el fluido que actúa en el volumen que tiene la cilindrada unitaria V_C se repite con una frecuencia igual al número de vueltas del cigüeñal. Lo mismo sucede para un motor alternativo bicilindrico de 4 T, de cilindrada unitaria igual a la Wankel.

Por lo tanto puede concluirse que un Wankel de 4 T monorrotor de cilindrada unitaria V_C tiene que equipararse a un motor alternativo de 4 T bicilindrico de cilindrada total igual a $2 V_C$.

Es interesante conocer como varia durante el movimiento el volumen de la cámara operativa de un motor Wankel en comparación con la de un motor alternativo. Esto puede hacerse analíticamente o bien gráficamente, llegándose a la conclusión de que el volumen de la cámara de un motor Wankel varía según modalidades iguales a las de un motor alternativo hipotético de igual cilindrada unitaria y biela de longitud infinita que gira a velocidad angular reducida en la razón 2 a 3.

4.1.2.- Relación de Compresión.

La cámara de combustión de un motor Wankel está formada por 2 partes una de volumen constante, practicada en cada lado del rotor, la otra de volumen variable, comprendida entre la superficie del rotor y la de la pared trocoidal que queda frente a ella en la fase de combustión. La parte de volumen constante esta proporcionada de modo para obtener la relación de compresión deseada. Ella tiene también la función de favorecer la propagación de la llama. Debe tenerse presente que la cámara de combustión tiene una forma alargada y delgada, por lo que la relación volumen/superficie es menos favorable que la de las cámaras de los motores alternativos.

No todas las diferentes combinaciones de máquinas de pistones rotativos permiten realizar una relación de compresión de valor adecuado para un motor endotérmico; en el caso del motor Wankel escogiendo para la parte de la cámara de volumen constante un volumen adecuado se consigue la relación de compresión deseada en relación con el destino del motor y con las características de octanaje de la gasolina.

La relación volumétrica de compresión está dada por la razón entre el volumen máximo y el mínimo de la cámara operativa.

Esta razón puede calcularse prescindiendo de la anchura B de la cámara comparando las áreas máxima y mínima ya medidas para obtener la cilindrada unitaria.

$$\varrho = \frac{A_{max}}{A_{min}}$$

Apliquemos las formulas (14) y (15), sabiendo que para el motor Wankel $K=3$. En el caso elemental del rotor con lados rectilíneos, introduciendo el parámetro $\mu = \frac{R}{e}$ se tiene:

$$\varrho = \frac{A_{max}}{A_{min}} = \frac{\pi + \frac{3\sqrt{3}}{2}\mu + \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4}\mu^2}{\pi - \frac{3\sqrt{3}}{2}\mu + \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{4}\mu^2}$$

En la práctica los lados del motor son curvilíneos en arcos de círculo o bien están conformados según el perfil limite generado por la envolvente exterior del perfil trocoidal del rotor. Tanto en uno como en otro caso es necesario restar a los valores calculados para el rotor triangular el área excedente a (Fig. 25).

En el diagrama en el cual se muestra la razón ϱ esta dada en función con la relación μ entre el radio R del rotor y la excentricidad e del árbol. La relación ϱ puede por otra parte calcularse rápidamente por métodos gráficos.

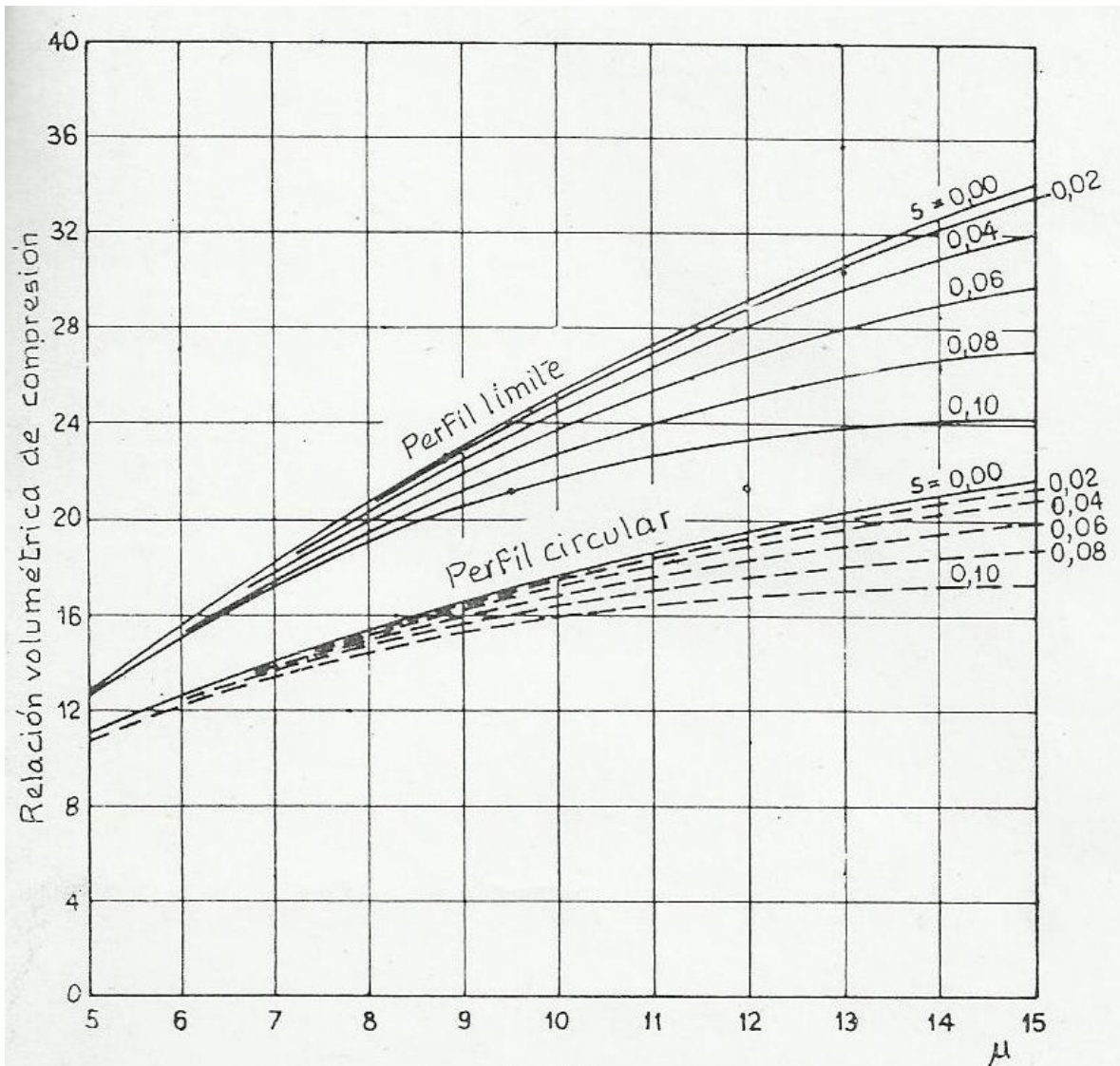


Fig. 27.

Un valor bajo del factor μ , es decir un valor pequeño de R en relación con e , da un valor alto de la relación de compresión. Mientras más bajo sea el factor μ más corto resultara el eje menor de la epitrocoide. Un radio mayor significa un rotor mayor y mayores dimensiones del motor.

En los 2 casos de perfil de arcos de círculo y de perfil límite del rotor se han trazado en el diagrama, las curvas de q para algunos valores del desplazamiento a del perfil real de la carcasa de estator, con respecto al geométrico teórico.

Este desplazamiento o diferencia es necesario por la presencia de los elementos de sellado aplicados a los vértices del motor. Los elementos sellantes tienen un cierto espesor y su parte exterior es redondeada, por lo que el perfil del estator no puede ser el teórico que se ha trazado como si los vértices del rotor fueran puntiformes según la ecuación (10), sino que hay que corregirlo. Esto se consigue a partir de la envolvente del contorno generado, con el movimiento del rotor, por los extremos de los elementos sellantes. Como se ve en la figura.

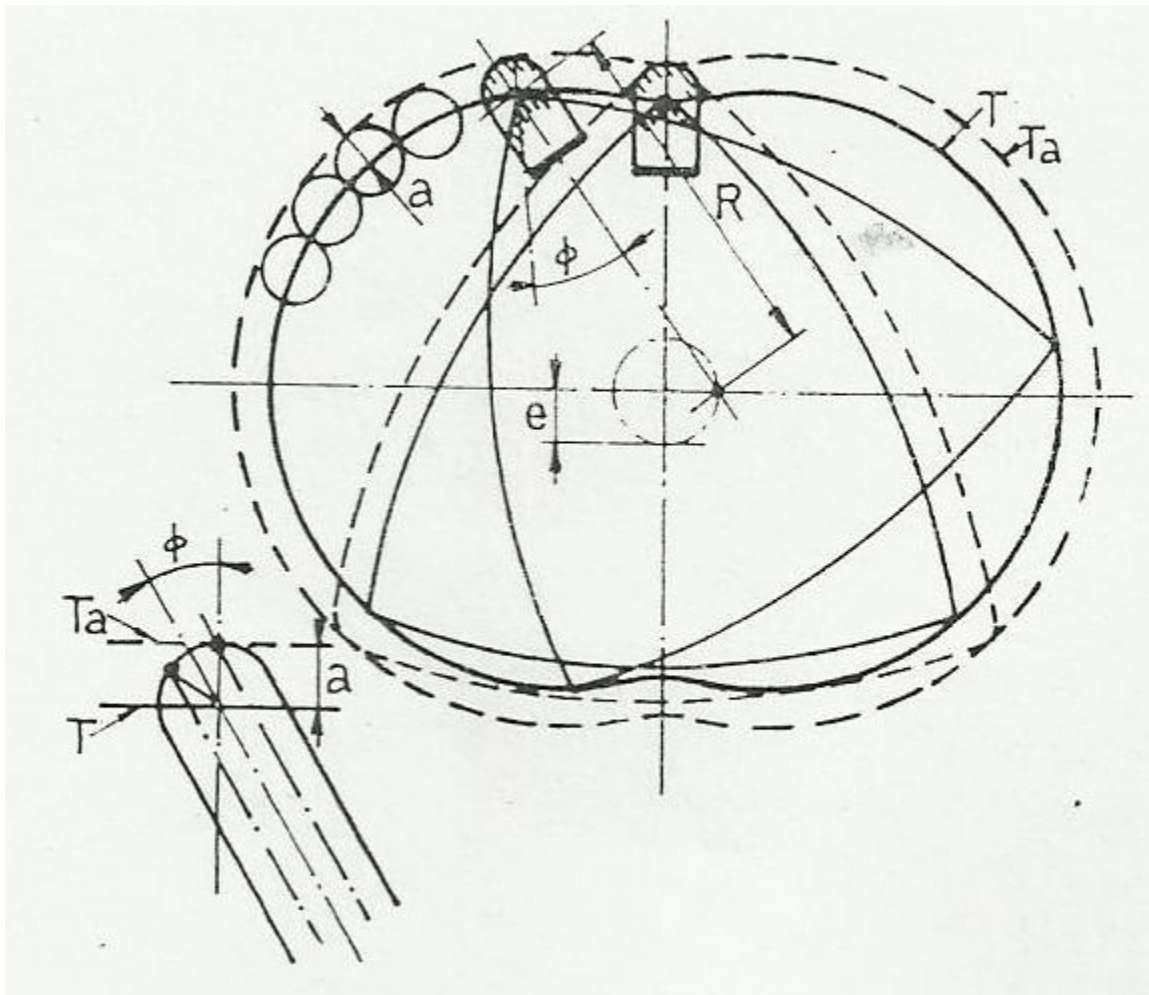


Fig. 28.

Para obtener el perfil correcto basta con trazar a una distancia igual al radio de curvatura del elemento sellante una curva paralela a al epitrocoide correspondiente a un rotor de vértices puntiformes coincidentes con los centros de las curvas que forman los extremos de los elementos sellantes.

Como se deduce del diagrama anterior, el valor del desplazamiento a influye en el valor de la relación de compresión ρ . Otro parámetro que influye en la relación de compresión es el valor que en las diferentes posiciones del rotor asume el ángulo comprendido entre la normal a la epitrocoide y la recta que una el vértice del rotor con su eje. Este ángulo se llama ángulo de oblicuidad o inclinación. El valor máximo que este ángulo asume en las 2 direcciones depende de los valores del radio generador R y de la excentricidad e según la relación:

$$\text{sen } J = K \frac{e}{R}$$

Donde K es el número de los puntos de contacto entre rotor y estator.

En la figura se presenta, en forma de diagramas, las relaciones entre el ángulo de inclinación y la relación de compresión para un motor con epitrocoide de 100 mm medidos según el eje mayor.

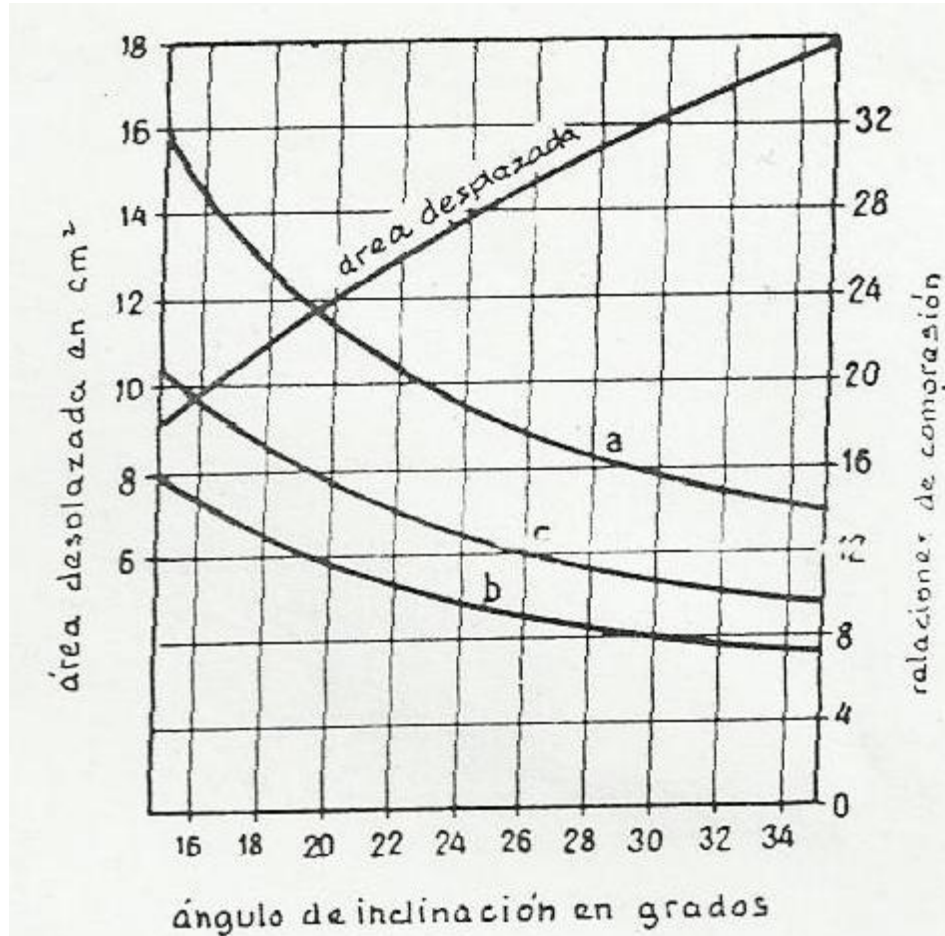


Fig. 29.- Relación entre el ángulo de inclinación, el volumen desplazado (área desplazada) y la relación de compresión.

- a) Curva de la relación de compresión con rotor sin cámara en los lóbulos.
- b) y c) Curvas comparables para rotores con cámara adaptadas respectivamente a los ciclos Otto y Diesel.

Con el aumento del ángulo de inclinación de estrangulación de la unión de los 2 lóbulos de la epitrocoide resulta más acentuada: al mismo tiempo la relación de compresión disminuye. En el diagrama se han trazado las curvas para la máxima relación de compresión teórica y para las relaciones de compresión reales posibles para los ciclos Otto y Diesel.

Las relaciones de compresión reales se obtienen, rebajando el valor teórico mediante la adición de un nicho o hueco en cada cara del rotor. Este nicho permite también que los gases pasen de una a otra cámara del estator cuando el rotor está en la posición correspondiente al punto muerto.

Para el ciclo Otto los nichos tienen un volumen aproximadamente igual al volumen teórico mínimo de la cámara de combustión; para el ciclo Diesel sólo deberán tener aproximadamente la mitad de este volumen.

4.1.3.- La Cámara de Combustión y Aspectos Térmicos.

La forma alargada y delgada no es favorable para una rápida propagación de la llama. El frente de llama tiene una superficie reducida, y además la distancia entre uno y otro extremo de la cámara es grande, por lo que el tiempo necesario para la combustión de toda la carga es en teoría relativamente largo. Pero la forma de la cámara varía durante la combustión y si esta variación es tal como para acentuar turbulencias a la que está sometido el fluido cuando entra al motor como consecuencia de la posición y forma de los conductos de aspiración, la velocidad propia de combustión se superpone a la de traslación de la cámara y al rápido paso del fluido entre uno y otro lóbulo. La velocidad de propagación puede casi triplicarse, si se “juega” con la posición y la forma del hueco practicado en cada uno de los lados del rotor.

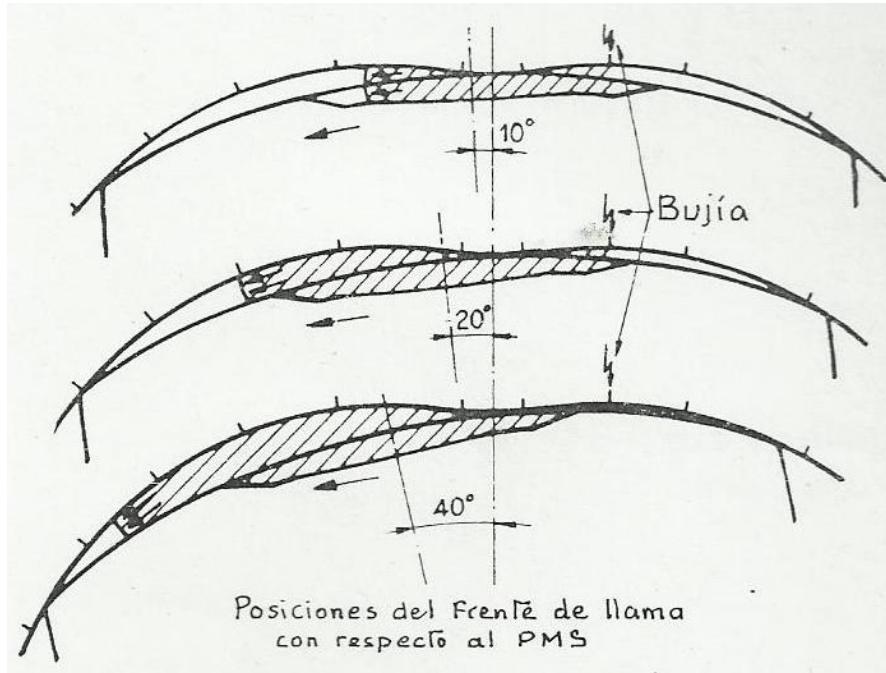


Fig. 30.- Variación de la forma de la cámara de combustión y de la posición del frente de llama.

La posición de la bujía, por estar relacionada con la turbulencia del fluido, influye en el modo en que se propaga la combustión y por lo tanto en la ley de variación de la presión en la cámara.

El diagrama relativo a la p. m. e. varía según que la chispa salte en medio de la cámara, es decir, coincidiendo con el eje menor del estator, o bien antes o después. Para obtener p. m. e. más alta se han adoptado también 2 bujías con avances de encendidos diferentes. Sin embargo, el rendimiento de combustión en el estado actual de desarrollo del motor Wankel es inferior al de los modernos motores alternativos. En efecto, aun siendo el ciclo indicado del Wankel bastante similar al del motor alternativo, la temperatura y la presión máxima son, inferiores. Hay que recordar de hecho que la lentitud de la combustión hace desplazarse el máximo valor de la presión hacia un punto más avanzado de expansión.

Hay que tener también en cuenta el hecho de que la superficie estática expuesta por un lado al calor de la combustión y por el otro al fluido refrigerante es en el Wankel superior en un 20% aproximadamente a la de un motor alternativo de igual cilindrada unitaria y esto contribuye a una mayor pérdida de energía.

El balance térmico del motor Wankel resulta en consecuencia bastante deficitario en razón de la pérdidas provocadas por la condiciones de combustión y de refrigeración debidas a la superficie más bien grande sometida al intercambio térmico y al movimiento del fluido en contacto con la superficie interior del estator.

Otra consideración que merece ser citada por tener considerables consecuencias en el diseño de la carcasa del estator es la de la distribución heterogénea de las temperaturas. Efectivamente, sucede que uno de los lóbulos del perfil trocoidal está sometido principalmente a las temperaturas de admisión y compresión que son bajas, mientras que el otro está sometido principalmente a las temperaturas de combustión, expansión y escape, mucho más altas. Esta situación crea en el estator una tendencia a la deformación, lo que se soluciona con disposiciones especiales de diseño que se refieren al circuito de refrigeración, la forma de la fundición de la carcasa y el sistema de unión de esta con las caras laterales.

4.1.4.- Volumen de las Cámaras.

El volumen máximo de las cámaras o volumen unitario (V_u), se calcula en función de la excentricidad (e) o distancia entre el centro del árbol motriz y el centro del rotor. El radio (R), o distancia entre el centro del rotor y su vértice, y el ancho de la cámara (b).

$$V_u = 3 \cdot \sqrt{3} \cdot R \cdot e \cdot b$$

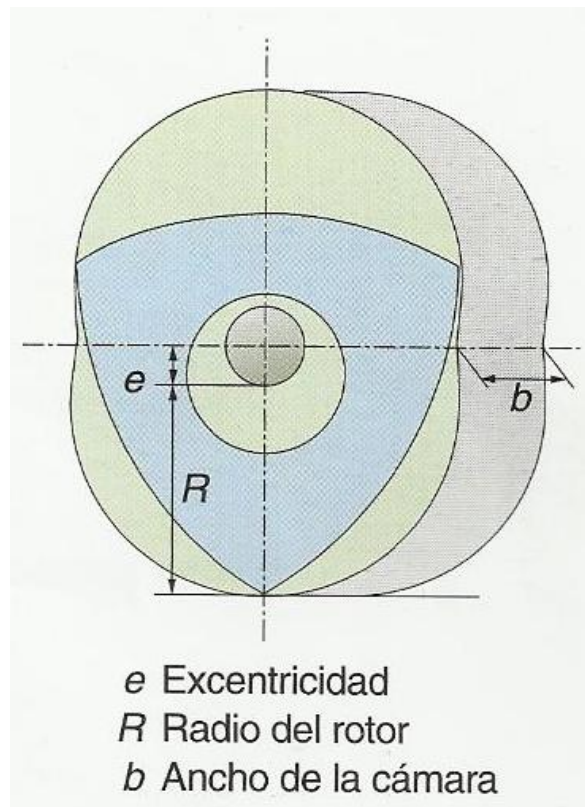


Fig. 31.- Medidas para calcular el volumen de la cámara.

4.1.5.- Par Motor.

El rotor está apoyado en la excéntrica del árbol motriz. La presión de la combustión es ejercida sobre el flanco del rotor y aplicada directamente sobre la excéntrica. La fuerza de la presión (PG) se descompone en 2 direcciones, una hacia el centro del árbol motriz (Pb), y otra en la dirección de giro del rotor (Ft), que supone la fuerza con que es impulsado el rotor. El par motor se determina mediante la siguiente fórmula

$$M = Ft \cdot e$$

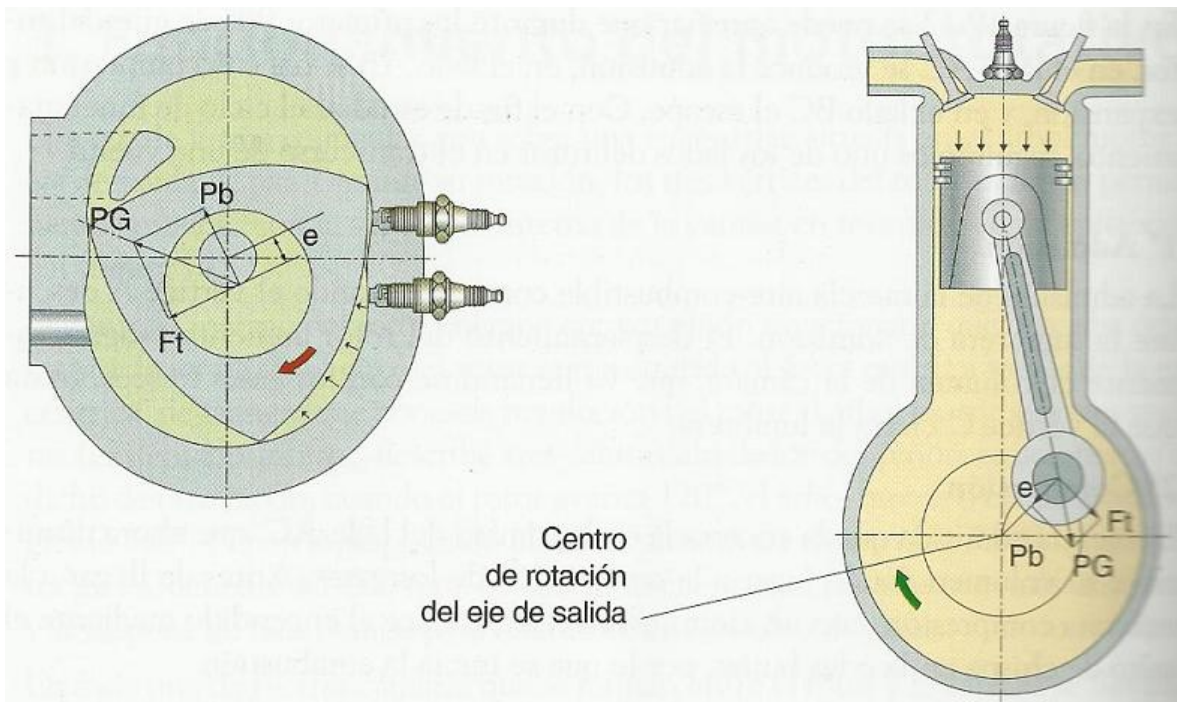


Fig. 32.- El par motor en el árbol motriz y en el cigüeñal.

4.2.- LA DISTRIBUCIÓN EN EL MOTOR WANKEL.

4.2.1.- Diagrama de Distribución.

El diagrama de distribución de la figura representa los ángulos correspondientes a cada uno de los tiempos del ciclo. Los puntos de comienzo y final de la admisión y el escape quedan determinados por la situación de las lumbreras y están marcados por uno de los vértices del rotor cuando gira una vuelta completa.

Durante un determinado ángulo, los procesos de admisión y de escape se están realizando al mismo tiempo. Después de la expansión, el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape y a continuación la de admisión, por lo que permanecen ambas lumbreras abiertas hasta que el siguiente vértice cierra el escape y luego la admisión.

Cuando el rotor se sitúa en la posición de máxima compresión, el volumen de la cámara de combustión es mínimo, este punto corresponde al PMS en el motor de pistón alternativo. El encendido se produce con un avance respecto a este punto.

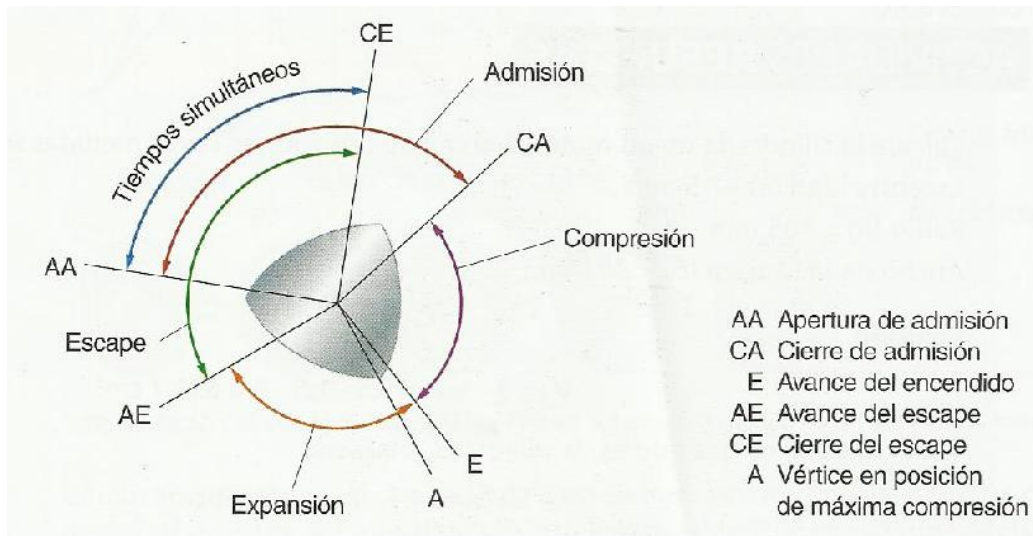


Fig. 33.- Diagrama de distribución.

La distribución del fluido (mezcla proveniente del carburador, o bien aire en el caso en que el combustible sea directamente inyectado a la cámara de combustión) esta regulada por la posición de las lumbreras de admisión y de escape así como por sus dimensiones. Estas lumbreras pueden estar colocadas en la cubierta periférica trocoidal del estator o bien en las placas laterales de la cámara estatorica.

La primera solución es la adoptada por la N. S. U., la segunda por la empresa japonesa Toyo Kogyo y por la americana Curtiss Wright.

Cuando las lumbreras son periféricas, estas son interceptadas por los elementos de sellado dispuestos en los vértices de los rotores según la figura.

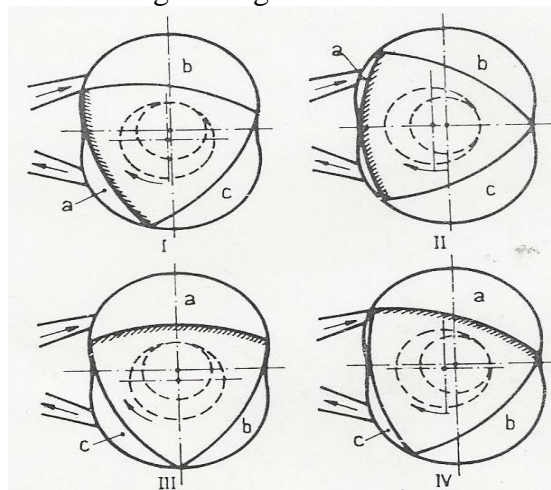


Fig. 34.- Esquema que muestra como se distribuye el fluido en un motor con lumbreras periféricas.

Como puede constatarse fácilmente observando las sucesivas posiciones del lado *a* del rotor de la figura, en la posición I el fluido de alimentación proveniente de la lumbrera de admisión comienza a ser desviado desde la cámara *b* hacia la cámara *a*, y por lo tanto comienza el periodo de traslado entre escape y admisión. En la posición II comienza a predominar la admisión sobre el escape; la admisión prosigue hasta la posición III cuando está por comenzar la restricción y desviación del flujo que termina en la posición IV. Todo esto ha sucedido durante una rotación del árbol de más de 360°.

Como resulta en la figura, en realidad las lumbreras no son cerradas por el rotor durante su movimiento porque cuando los segmentos de sellado situados en los vértices pasan sobre ellas, no interrumpen completamente el flujo del gas, sino que lo restringen desviándolo de una cámara a la otra.

A efecto de la distribución podemos sin embargo hablar siempre de ángulos de apertura y de cierre como en el caso de los motores alternativos. Estos ángulos, siempre referidos al movimiento del cigüeñal, dependen de la posición y de las dimensiones de las lumbreras dispuestas en la superficie trocoidal del estator. Es fácil constatar que entre los ángulos de apertura y los ángulos de traslape existe una interdependencia que ha de tenerse en cuenta cuando se escoge el diagrama de la distribución en relación con el tipo de curva de la p. m. e. que se intenta conseguir. Es importante en contar el justo compromiso entre la amplitud del periodo de apertura de las lumbreras de admisión y la del periodo de traslape para buscar el mejor desarrollo de la curva del par motor.

Cuando las lumbreras son laterales, estas son cerradas y abiertas por las caras laterales del rotor del modo análogo al de los motores alternativos de 2 tipos. Por lo tanto su posición, las dimensiones y la forma pueden ser elegidas de modo de realizar diagramas de la distribución preestablecidos.

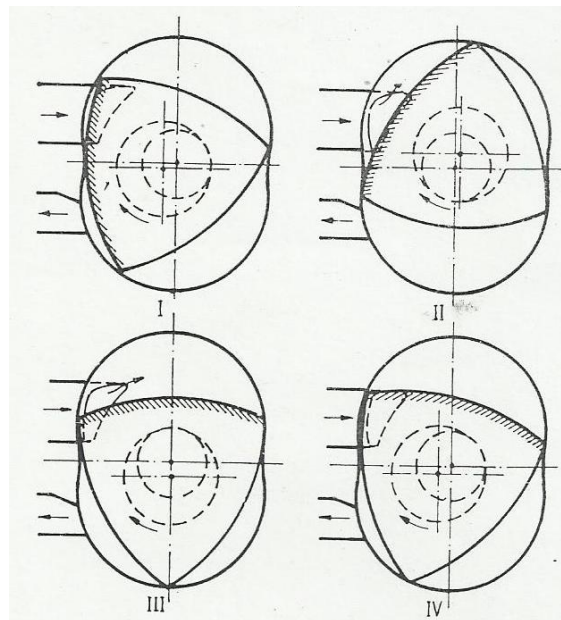


Fig. 35.- Apertura y cierre de la lumbrera de admisión en un motor con lumbreras laterales.

Las dimensiones de los conductos y su forma especialmente favorable permiten. Tanto en uno como en el otro caso, obtener un coeficiente de flujo decididamente mas alto que el de los motores alternativos en los que la presencia de las válvulas es causa de una mayor pérdida de energía por rozamiento.

En la siguiente figura se han trazado los diagramas que demuestran indicativamente como varían las áreas de las lumbreras de admisión y de escape en ambos casos, con lumbreras laterales y con lumbreras periféricas, con referencia a los ángulos de rotación del cigüeñal. En la misma figura se han trazado los diagramas relativos a un motor alternativo típico.

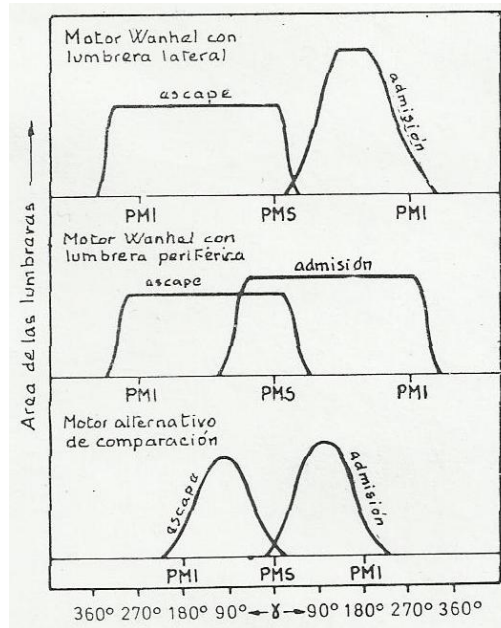


Fig. 36.- Variaciones de las áreas de las lumbreras de admisión y escape.

Resulta evidente que en el motor Wankel el valor medio de las secciones de paso de los gases puede ser notablemente superior al de un motor alternativo comparable.

El motor Wankel con lumbreras periféricas, se tiene una menor velocidad del flujo de admisión y esto tiende a favorecer las altas velocidades de rotación, no las bajas. El motor con lumbreras laterales puede ser regulado a modo de obtener características funcionales comparables a las de los motores alternativos.

Una prerrogativa del motor Wankel es la de poder adoptar lumbreras múltiples. Con carburador de doble cuerpo se pueden adoptar 2 lumbreras laterales o bien 2 lumbreras periféricas o bien una lateral y una periférica. De este modo se pueden hacer intervenir un solo cuerpo para los regímenes bajos y abrir las 2 mariposas para los regímenes elevados.

V.- DETALLES CONSTRUCTIVOS DEL MOTOR WANKEL.

Numerosos problemas de carácter constructivo caracterizan al motor Wankel. Aparte de la construcción del estator y el rotor, ellos están relacionados con el diseño de la cámara de combustión, el encendido, la lubricación, la refrigeración del motor, los engranajes de reacción, la resistencia al desgaste del perfil trocoidal y de las paredes laterales, el consumo de aceite y de combustible, etc.

Las partes principales que componen el motor son simples y de número reducido. El estator, el rotor y el cigüeñal son en efecto de forma menos complicadas que el grupo de cilindros y la culata, el mecanismo biela manivela y el cigüeñal de un motor alternativo que contiene además el sistema de distribución con válvulas.

Sin embargo la construcción del estator ofrece serias dificultades dado que la elaboración de la superficie trocoidal requiere del empleo de máquinas de gran precisión estudiadas expresamente. Además las características de resistencia al desgaste de la superficie requieren de tratamientos especiales.

Para impedir que las diferencias de temperaturas asuman valores tales como para causar deformaciones del perfil se trabaja en el grado de refrigeración de las diferentes zonas dirigiendo oportunamente la corriente de refrigerante y regulando su velocidad.

El cigüeñal es muy sencillo: en caso de que el motor tenga un solo rotor, aquel lleva solo un pasador excéntrico.

En cuanto al equilibrio, el motor Wankel está en una situación privilegiada si se le compara con el motor alternativo. En efecto, el Wankel no tiene masa en movimiento alternativo, sino solamente masas sometidas a fuerzas centrífugas que son, perfectamente equilibrables con la adición de contrapesos. La siguiente figura muestra cómo se instalan los contrapesos en el cigüeñal de un monorrotor y en el de un birrotor.

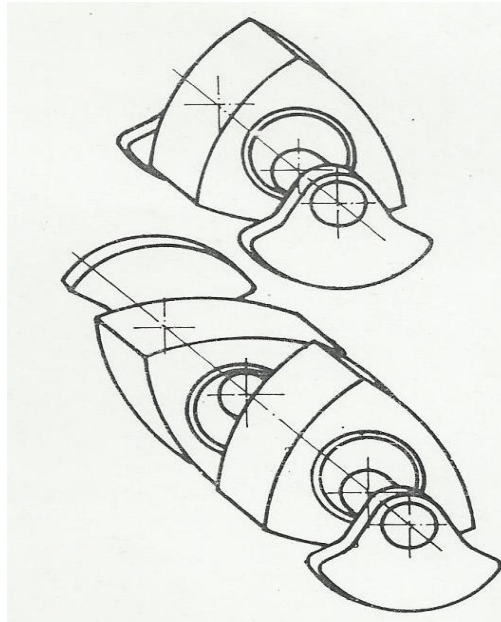


Fig. 37.- Cigüeñales, uno para monorrotor, el otro para birrotor, provistos de contrapesos.

El equilibrio se realiza de manera análoga al equilibrio estático y dinámico de un cigüeñal de motor convencional. Para el monorrotor bastan 2 masas excéntricas que den lugar a una fuerza centrífuga resultante simétrica con la originada por el rotor excéntrico. Para el birrotor, en el cual los rotors están desfasados 180°, solo resulta desequilibrada la cupla debido a las fuerzas centrífugas, por lo que las masas equilibradoras han de ser tales como para generar una cupla igual y contraria, a la que también realiza el equilibrio dinámico.

5.1.- CONSTITUCIÓN.

El motor rotativo tiene una constitución sencilla como puede verse en la figura

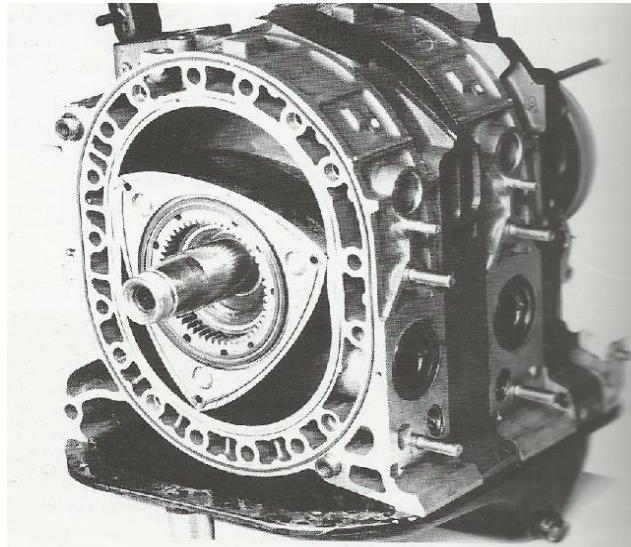


Fig. 38.- Vista interna de un Motor Wankel.

El bloque o carcasa del motor se fabrica en aleación ligera. En su interior se encuentra la camisa, que constituye la superficie de rozamiento con el rotor. Para mejorar su resistencia al desgaste se superpone una capa de material endurecido al cromomolibdeno con un recubrimiento de grafito que aporta cualidades auto lubricantes. La forma interior de la camisa recibe el nombre de curva epitrocoide; esta figura permite que el rotor pueda girar en su interior y mantener sus 3 vértices en permanente contacto con la camisa.

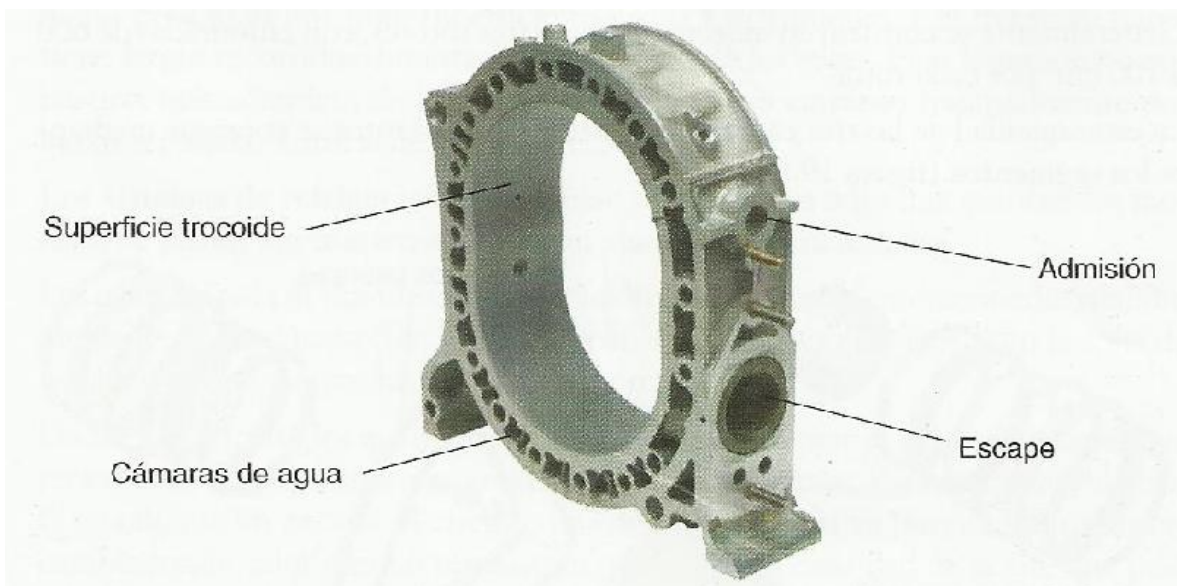


Fig. 39.- Carcasa con forma interior epitrocoide.

Sobre la carcasa, y en sentido radial, van ubicadas las lumbreras de admisión y de escape, a través de las cuales se realiza el intercambio de gases, en algunos casos la lumbrera de admisión se dispone lateralmente.

Las bujías se sitúan en el lado opuesto a las lumbreras. En l periferia se practican las cámaras para el líquido de refrigeración. El bloque queda cerrado por 2 piezas laterales, atornilladas a la carcasa con interposición de una junta.

5.1.1.- Rotor.

El rotor tiene forma de prisma triangular con sus 3 lados ligeramente convexos en cada uno de los lados se practica una cámara de combustión en forma de bañera alargada. Cuenta por tanto, con 3 cámaras de combustión, cuya función es similar a la de un motor de 3 cilindros independientes, ya que en cada uno de los lados se desarrollan los 4 tiempos del ciclo de trabajo en una vuelta del rotor.

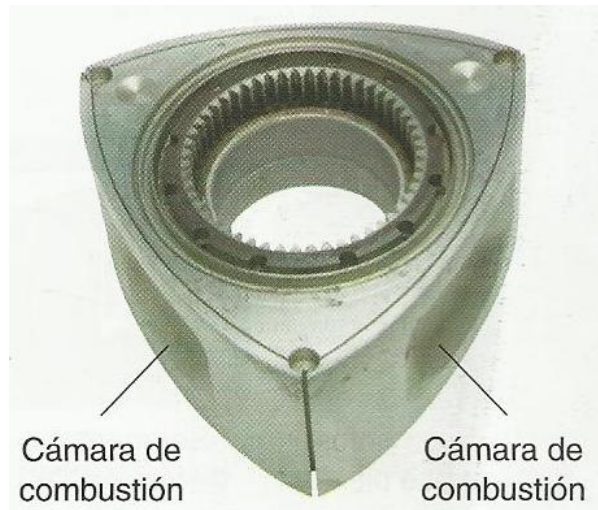


Fig. 40.- *Camara de combustión en el rotor*

El rotor cumple la misma función que el conjunto pistón-biela en el motor alternativo, transmitiendo la presión que ejercen los gases de la combustión directamente al cigüeñal. Al mismo tiempo, el rotor hace el trabajo de las válvulas de admisión y escape en un motor alternativo.

En cada uno de los vértices del rotor se sitúan unos elementos de sellado, así como a lo largo de ambas caras laterales, para evitar que la mezcla de aire-combustible, los gases quemados o el aceite lubricante salgan del espacio en el que están confinados.

El engranaje y el cojinete del rotor están situados en su interior, el contorno del rotor tiene la forma de la envolvente interior del estator. El pequeño espacio libre que existe entre el rotor y el estator se consigue mecanizando el rotor según una epitrocoide algo más pequeña de la que realmente forma el estator.

De cara al rendimiento del motor, interesa que este espacio o juego sea lo más pequeño posible. No obstante, se deben tener en cuenta las deformaciones térmicas y las tolerancias de fabricación, entre otros aspectos. Al final, esta distancia se suele situar en torno a 0.5 mm.



Fig. 41.- Vistas generales del rotor.

Cada uno de los flancos del rotor está rebajado con la finalidad de aumentar el volumen de la cámara de combustión. Tanto la forma como la localización de estas hendiduras influyen notablemente en el rendimiento de la combustión.

El material a emplear en la fabricación del rotor debe cumplir los siguientes requisitos:

- Gran resistencia a la fatiga a altas temperaturas.
- Bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Gran resistencia al desgaste.
- Buenas características de maleabilidad.
- Buenas propiedades para la mecanización.

En general, se usa fundición nodular de grafito esférico (tiene un precio superior a la fundición gris, pero mejora sensiblemente sus propiedades mecánicas y mantiene las demás). Posteriormente, basta acabar de mecanizar los flancos mediante máquinas de control numérico.

No obstante, es un material con una densidad muy elevada y el peso final del rotor es demasiado grande. Por esta razón, se están empezando a utilizar aleaciones de aluminio, al igual que en los pistones de algunos motores alternativos, en especial los de automoción.

De esta forma, un peso menor del rotor implica una reducción de las cargas que actúan sobre el cojinete central y permite conseguir mayores velocidades de giro a la salida (con un desgaste moderado), sin necesidad de emplear un cojinete de altas prestaciones.

Por último, la Fig. 42. muestra el aspecto de un motor Wankel con todas las piezas descritas anteriormente situadas en su sitio, a excepción del estator (para facilitar el entendimiento del conjunto). Gracias a este montaje se puede observar cómo el giro producido al engranar los dientes del piñón fijo al estator y los dientes realizados sobre el perfil del rotor es transmitido al eje del motor. Para ello, se

acopla en el interior del rotor el rodamiento excéntrico, que gira obligado por éste, y al estar rígidamente unido al cigüeñal, consigue el deseado movimiento giratorio de salida.



Fig. 42.- *Conjunto formado por estator, rotor y eje.*

5.1.2.- Mecanismo de Sellado.

Los problemas de sellado son los que han retardado y dificultado de manera importante la puesta a punto del motor Wankel. En efecto, en este la hermeticidad ante los gases de los sellos entre estator y rotor se tiene que conseguir sobre un recorrido rectangular, mientras que en los motores alternativos, entre pistones y cilindros, es circular.

Los ángulos de 90° entre la superficie periférica y las placas laterales del estator constituyen puntos críticos. Durante el desarrollo del motor se intentaron numerosos sistemas.

El mecanismo que asegura la estanqueidad de las cámaras de combustión en el motor rotativo equivale a los aros flexibles que se acoplan a los pistones en el motor alternativo. En este caso, se compone de elementos de sellado dispuestos de tres formas características, diseñadas para asegurar que los gases y los fluidos permanezcan en todo momento en su sitio.

Los segmentos del motor rotativo están sometidos a unas presiones muy elevadas, así como a unas temperaturas de trabajo también bastante altas. Por eso, es muy importante un correcto estudio de su diseño para definir tanto la forma como el material. Al igual que el material, requiere una consideración especial el tratamiento superficial de la pieza con la que los segmentos van a mantener contacto: estator periférico y lateral.

En el motor rotativo, el sistema que asegura la estanqueidad está formado por tres tipos de segmentos:

- Los **segmentos periféricos** son unos patines que aseguran la estanqueidad radial y que evitan la transferencia de gases entre una cámara de combustión y la adyacente.

- Los **segmentos laterales** son unas láminas que aseguran la estanqueidad axial del rotor (equivalentes a los aros de compresión en el motor alternativo).
- Los **pernos de anclaje** (o de guía) son unos elementos que se encargan de mantener unidos los segmentos anteriores.

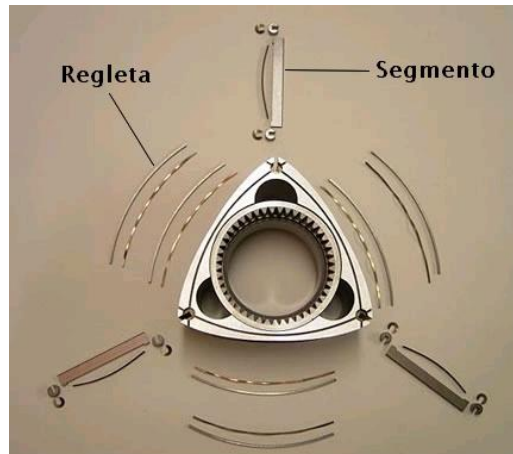


Fig. 43.- Desglose de los segmentos en el rotor.

Para que cada uno de estos tres elementos mantenga en todo momento contacto con la superficie correspondiente, están provistos de unos pequeños muelles en las caras opuestas a las del contacto.

a) Segmentos periféricos.

Hay tres por cada rotor, y se sitúan en los vértices de éste, tienen la parte exterior redondeada y su contacto es lineal con el perfil del estator esto para mantener cada una de las cámaras de combustión completamente hermética respecto a las demás. En las esquinas se montan unos bulones que permiten un pequeño giro para adaptarse a las paredes de la camisa con el ángulo más adecuado. En un extremo del segmento se dispone una pieza axial, que se acuña contra el lateral y ajusta el segmento en todo momento. El ajuste radial mejora con los segmentos de 3 piezas.

Ya que estos segmentos están expuestos a las elevadas presiones y temperaturas de los gases de escape, y son básicos para el correcto deslizamiento del rotor sobre la superficie interior del estator, se debe llevar a cabo un diseño preciso y exhaustivo.

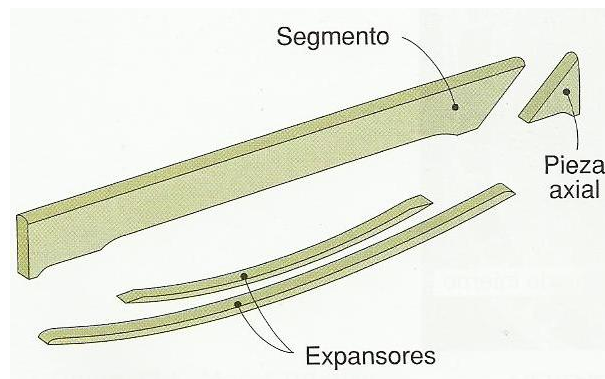


Fig. 44.- Segmentos de estanqueidad de 2 piezas.

Además, en el caso de que se realice una construcción del motor mediante lumbreras periféricas, los segmentos periféricos realizan, al mismo tiempo, las funciones de válvulas de admisión y escape.

Como se muestra en la Fig. 45, el segmento está empujado por dos fuerzas: una es la fuerza que el muelle ejerce sobre el centro de su base y lo mantiene en contacto con la pared interior del estator, y la otra fuerza es la que produce la presión de los gases quemados sobre la cara del segmento opuesta al contacto. El muelle de la base, al mismo tiempo, sirve para corregir posibles errores geométricos derivados del proceso de fabricación.

A medida que el rotor gira, la presión de los gases quemados disminuye y aumenta la de los gases comprimidos en la cámara siguiente. En un momento dado, el gradiente de presiones cambia de sentido y el segmento se desplaza por su alojamiento hasta que pasa a tocar con la otra cara. Así, el segmento se irá moviendo, una y otra vez, según el sentido del gradiente de presiones.

Las fuerzas resultantes varían entonces periódicamente durante cada vuelta y de tal manera que cada paleta tiende, para ciertas posiciones del rotor, a moverse hacia el eje de rotación separándose de la superficie de deslizamiento.

Se puede así producir un continuo golpeteo entre los segmentos sellantes radiales y el estator con peligro de daños de la pista epitrocoidal. Esto puede evitarse adoptando acoplamientos muy precisos y mediante el cromado de las pistas epitrocoidales. El cromado confiere, a la superficie, efectivamente, una gran dureza y un bajo coeficiente de rozamiento.

Anteriormente, se venía utilizando el grafito para los segmentos (por sus altas propiedades lubricantes) deslizándolo sobre una superficie interior del estator, cromada. Posteriormente, se pasó a emplear un segmento de fundición enfriada por chorro de electrones, manteniendo la misma superficie cromada del estator.



Fig. 45.- Funcionamiento del segmento periférico.

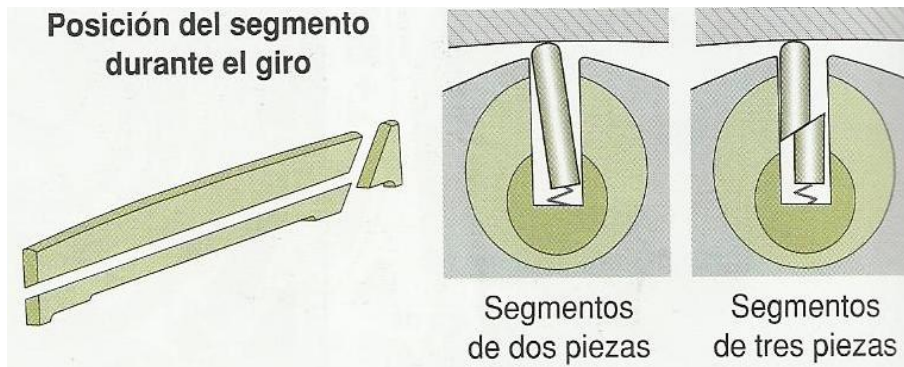


Fig. 46.- Segmento de estanqueidad de 3 piezas.

b) Segmento lateral y perno de anclaje.

También es necesario estanqueizar los laterales del rotor; para ello se instalan 3 regletas en cada uno de sus lados, alojadas en sus correspondientes ranuras y provistas de muelles expansores que aseguran el contacto con las paredes laterales de la carcasa.

Los segmentos son muy delgados y livianos con el fin de reducir al mínimo las fuerzas de inercia tangenciales. Un muelle ondulado interpuesto entre el fondo de la ranura y cada segmento sellante frontal tiende a mantener este constantemente en contacto con la pared lateral del estator para evitar que los gases a alta presión de la cámara de combustión pasen al hueco lateral del rotor (donde están situados los engranajes de transmisión). Suele ser de fundición. La acción de los muelles ha demostrado ser especialmente conveniente durante el funcionamiento del motor a cargas reducidas.

Dentro de ranuras con forma de arco, practicada de vértice a vértice en las paredes laterales del rotor en las proximidades del perfil exterior, se montan otros segmentos sellante forjados en forma de sectores de círculo.

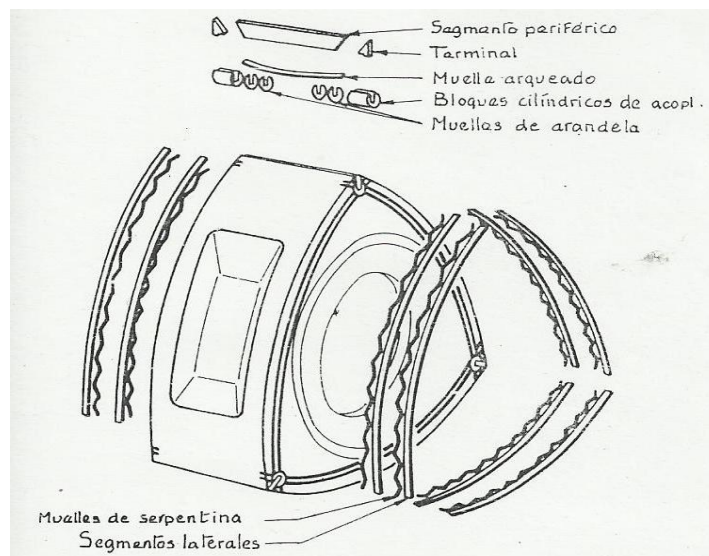


Fig. 47.- Esquema completo de los segmentos de estanqueidad del rotor.

En cada vértice del rotor se hace una ranura en la cual se instala un segmento cilíndrico que lleva una paleta o alabe que tienen la misión de asegurar la hermeticidad radial. El pasador tiene la posibilidad de desplazarse axialmente y su superficie frontal es empujada contra las paredes laterales del estator por la presión de los gases.

En la intersección con el perno de anclaje, hay un pequeño espacio libre de entre 0.05 y 0.15 mm. para absorber las posibles dilataciones de los materiales. Este segmento mantiene la estanqueidad en la unión de los otros dos. Al mismo tiempo, el perno sirve de guía a los segmentos periféricos y laterales en el pequeño desplazamiento que ambos pueden realizar. Para ello, el agujero que alberga el segmento debe tener unas dimensiones muy ajustadas para que se produzca una firme fijación del conjunto (después de las dilataciones térmicas). Con esta disposición, el desgaste por fricción en la cara exterior del segmento es muy importante, y se emplea una fundición de acero con la superficie de contacto cromada. Al igual que el segmento periférico, tanto el lateral como el perno llevan unos muelles alojados en sus respectivas bases con la finalidad de asegurar, en todo momento, una presión de los elementos de sellado contra las paredes del estator y así impedir que los gases se desplacen de una cámara a otra.



Fig. 48.- *Detalle del rotor con elementos sellantes en el vértice del rotor.*



Fig. 49.- *Despiece de los elementos sellantes.*

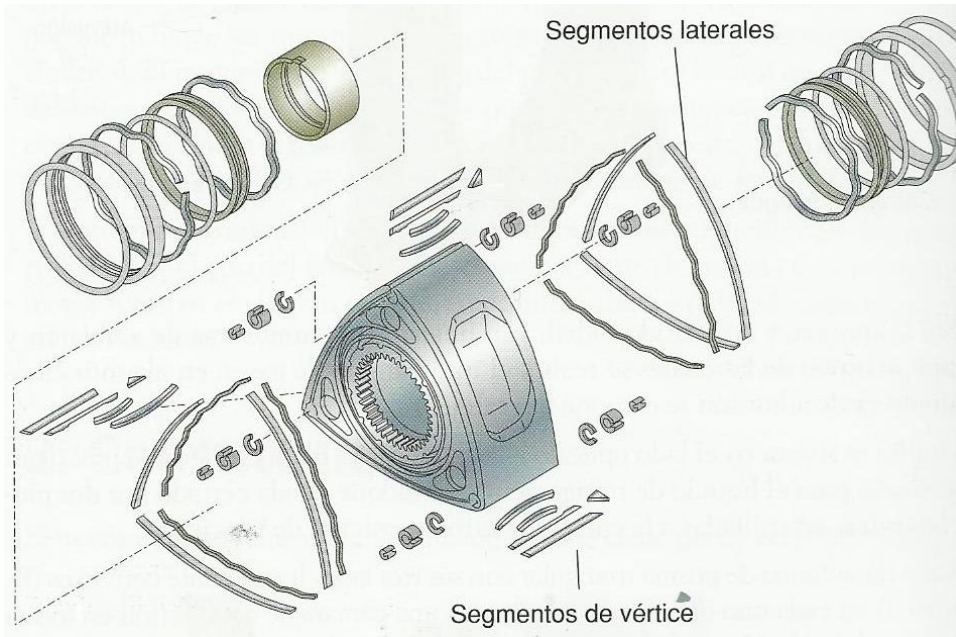


Fig. 50.- *Elementos de estanqueidad.*

5.1.3.- Estator.

El estator del motor rotativo es el equivalente al conjunto formado por el bloque motor y la culata de los motores alternativos. Para un motor de un solo rotor, el estator está formado por tres partes: una, periférica, que envuelve al rotor; y otras dos, laterales, una a cada lado del rotor.

a) Estator periférico.

En el motor rotativo, la cámara de combustión se mueve siguiendo cada una de las fases del ciclo de cuatro tiempos. La zona donde se realiza la admisión de la mezcla se enfría con la entrada de ésta, mientras que la zona de expansión está expuesta a elevadas temperaturas.

Algo parecido sucede con las presiones. La presión ejercida por los segmentos (debido a la fuerza centrífuga) y los gases quemados, desgastan la superficie interior del estator periférico (Fig. 51.) en zonas muy localizadas (relacionadas con los puntos donde se produce la combustión). El estator puede estar sometido a un gradiente importante de presiones y temperaturas (fácilmente se obtienen saltos de 100 °C).

Por lo tanto, las características básicas que debe cumplir el material del estator periférico son:

- Proporcionar la resistencia suficiente para resistir los esfuerzos causados por la combustión.
- Asegurar la mínima diferencia de temperaturas y resistir las tensiones térmicas provocadas por este gradiente, así como asegurar unas buenas condiciones de refrigeración y lubricación.
- Resistir con la mínima deformación posible para asegurar una buena estanqueidad de las cámaras de combustión.

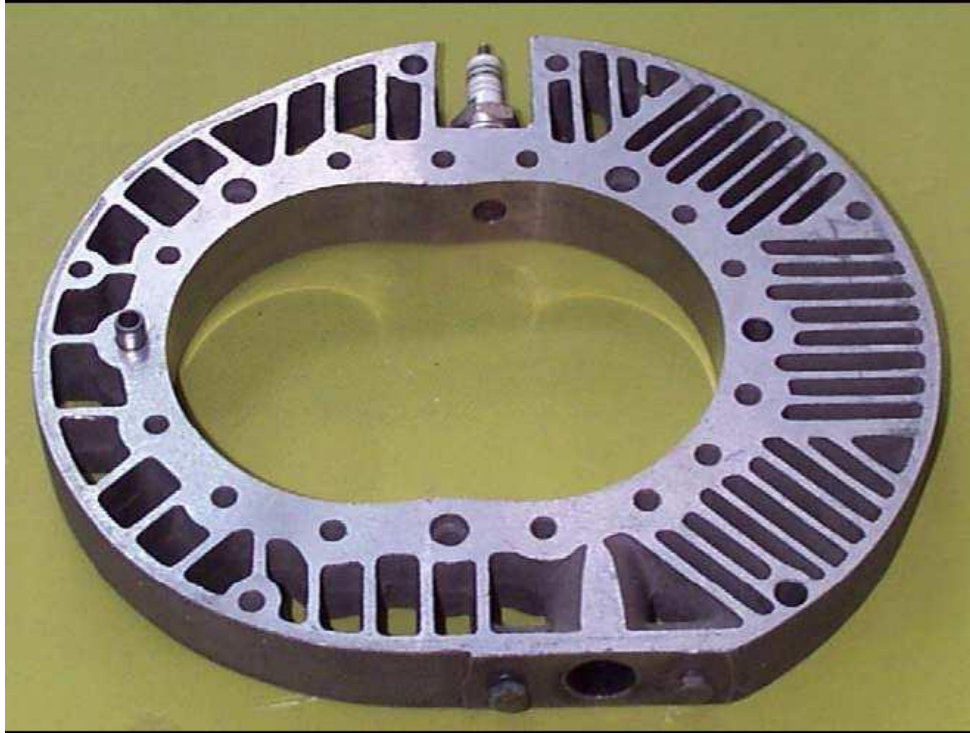


Fig. 51.- *Estator periférico.*

Los segmentos de los vértices del rotor se deslizan por el interior de la superficie del estator periférico. Para reducir el desgaste entre ambas superficies, además de construir un estator según una curva paralela y desplazada respecto a la teórica, se debe conseguir una gran exactitud dimensional, evitando la deformación de los diferentes elementos sometidos a gradientes importantes de temperatura. En general, se utilizan aleaciones de aluminio.

También se podría realizar en fundición, pero la capacidad de evacuación de calor es muy inferior; en el lado negativo, el aluminio posee un coeficiente de dilatación térmica mucho más elevado (casi el doble).

Cuando se utilizan aleaciones de aluminio, se procede a cromar la superficie interior del estator con la finalidad de aumentar su resistencia al desgaste. Concretamente, se recubre el interior del estator con una capa de acero y, posteriormente, se lleva a cabo el cromado de esta superficie. La superficie exterior de la capa de acero tiene una forma de diente de sierra para mejorar la adherencia con la aleación de aluminio (Fig. 52.).

En un principio, el movimiento a alta velocidad de los segmentos de los vértices del rotor propiciaba que se rayara la superficie interior del estator, lo cual afectaba tanto a la durabilidad del motor como a su rendimiento. Finalmente, se hallaron varios tratamientos superficiales que disminuían los efectos del roce entre ambos elementos. Una solución es, como ya se ha explicado, cromar la superficie; aunque también se obtienen buenos resultados niquelándola o empleando aleaciones de molibdeno.

Los agujeros donde se alojan las bujías atraviesan todo el estator hasta llegar a la superficie interior de éste. La superficie que se encuentra alrededor de la bujía alcanza temperaturas realmente elevadas, por lo que debe ser capaz de soportar grandes tensiones térmicas.

Además, en esta zona el aceite de refrigeración se degrada con facilidad. Por eso es imprescindible realizar un estudio a fondo para optimizar tanto el sistema de refrigeración como de lubricación en los alrededores de la bujía.

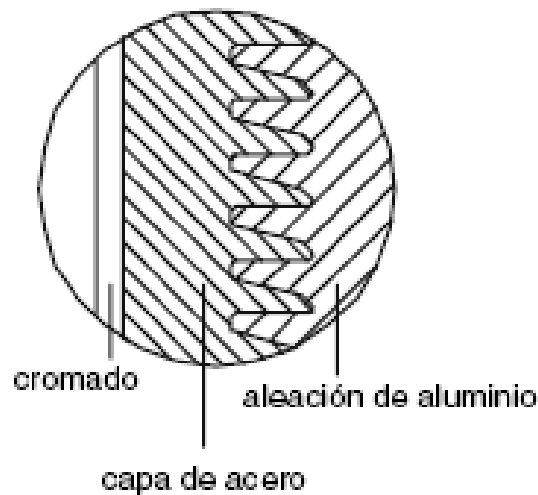


Fig. 52.- Estructura del estator.

b) Estator lateral:

Las caras laterales del estator deben ser muy deslizantes para que los segmentos de las esquinas y de los laterales del rotor puedan mantener un contacto continuado sin producirse un desgaste prematuro. Al igual que la parte periférica del estator, las tapas laterales están sometidas a grandes presiones y temperaturas en algunas zonas y momentos concretos, aunque las condiciones de lubricación son mucho más favorables que antes. No obstante, las tapas laterales del estator son fundamentales para el buen funcionamiento del motor. Por un lado, se encargan de canalizar los sistemas de lubricación y de refrigeración, y por otro, a través de ellas se realiza la admisión y el escape del motor (caso de lumbreras laterales). Debido a las menores exigencias térmicas y mecánicas que se requieren, es más habitual utilizar fundición nodular en la fabricación de las tapas laterales.

No obstante, también se han empleado, al igual que en el rotor y el estator periférico, aleaciones de aluminio, de mejores características y coste más elevado. Para motores de bajas prestaciones, con las tapas laterales de fundición, no es necesario llevar a cabo ningún tipo de tratamiento superficial adicional, si se escoge el material adecuado para los segmentos. Pero si el motor está sometido a cargas más elevadas, la superficie deslizante de la chapa puede ser endurecida por inducción o por nitruración.

Como siempre, las aleaciones de aluminio tienen la ventaja de un peso muy inferior y de una gran capacidad de evacuación de calor. Pero tienen una resistencia al desgaste menor y requieren un

recubrimiento de capas metálicas de aceros especiales como el de la Fig. 52. para mejorar sus características antifricción.



Fig. 53.- *Estator lateral.*

5.1.4.- Engranajes de Transmisión.

Este mecanismo está formado por un piñón (engranaje de dientes exteriores), fijo a la tapa lateral del estator, (Fig. 54.) y otro, de dientes interiores, sólidamente unido al interior del rotor. El primero de ellos, permanece inmóvil (hace la función de círculo de base de la curva) y el otro, al engranar con éste, realiza el movimiento de generación de la epitrocoide, como ya se ha descrito anteriormente.



Fig. 54.- *Vista del piñón fijo situado sobre el estator lateral.*

La relación entre el número de dientes de ambos engranajes es de 2:3. Esta diferencia proporciona una relación de transmisión de 1:3 entre la velocidad del rotor y la del eje de salida. El engranaje fijo está encajado a la tapa lateral del estator y sujetado mediante tornillos de fijación. Además, se le da una forma y grosor adecuados para que el engranaje tenga una rigidez y una resistencia a la fatiga aceptables.

En cuanto al engranaje de dientes interiores, tiene una forma cilíndrica de un espesor muy pequeño y se aloja en el interior del rotor. Al igual que el engranaje fijo, puede fijarse mediante tornillos, aunque es más frecuente emplear unos pequeños muelles que, al mismo tiempo que sujetan el engranaje, absorben parte de las cargas a las que está sometido.

En el diseño de los engranajes, tanto el de dientes exteriores como el de dientes interiores, se emplean engranajes rectos. Éstos, si bien hacen más ruido, son mucho más baratos y transmiten perfectamente el movimiento del rotor al eje y no transmiten ningún esfuerzo axial al rotor.

En la Fig. 55 se muestra el conjunto abierto de estator (el periférico y un lateral) y rotor, y se puede observar dos cosas. En primer lugar, cómo engranan los dientes exteriores del piñón con los dientes interiores del rotor para realizar el movimiento descrito con anterioridad. En segundo lugar, la figura muestra perfectamente que la mezcla fresca entra a la cámara de trabajo a través de un conducto de admisión labrado en el estator lateral (recordemos que las lumbreras de admisión y de escape pueden disponerse también en la superficie de contacto con el estator periférico).



Fig 55.- *Conjunto de estator y rotor.*

En esta otra figura se observa como en el centro del rotor hay un orificio con un dentado interno, que en uno de sus lados engrana con un piñón que permanece fijo en un lateral de la carcasa. Este engranaje sirve de apoyo al rotor para mantener su giro excéntrico dentro de la camisa epitrocoide.

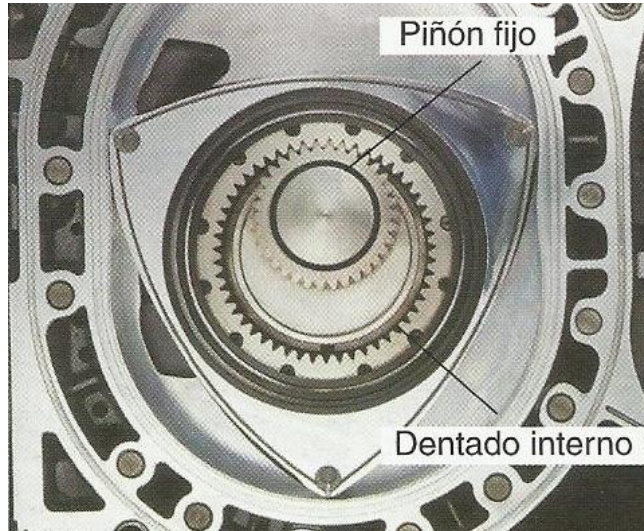


Fig. 56.- *Conjunto rotor y carcasa.*

En el interior del orificio se sitúa el árbol motriz. Apoyado en sus extremos sobre cojinetes en las piezas laterales. Fijado a él se sitúan las excéntricas que encajan en los orificios de los rotores.

La transmisión de fuerzas entre el rotor y el árbol motriz se realiza a través de la excéntrica, sobre la que empuja el rotor al girar, de esta forma el árbol de excéntricas actúa de la misma manera que el cigüeñal en el motor de pistón alternativo.

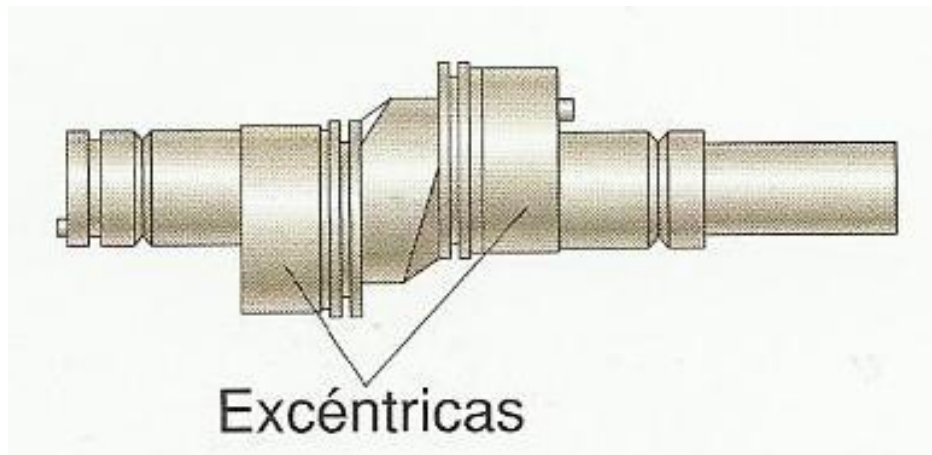


Fig. 57.- *Árbol motriz para doble rotor.*

Generalmente se construyen motores de 2 o 3 rotores, con cilindradas de 600 a 700 cm³ por cada rotor.

5.1.5.- Cámara de Combustión.

Las cámaras de combustión están formadas por un pequeño vaciado en el centro de cada uno de los lados del rotor. El volumen que ocupan es el que se obtiene cuando el rotor se sitúa en posición de máxima compresión.

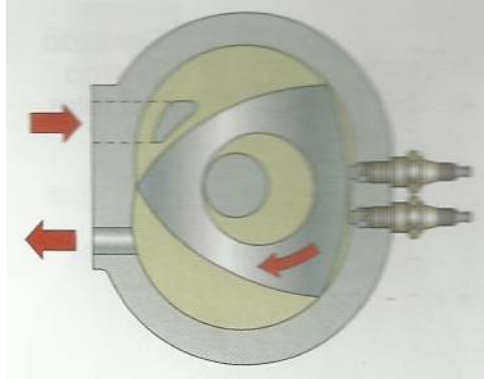


Fig. 58.- Rotor en posición de máxima compresión.

Estas cámaras presentan una gran superficie respecto a su volumen y el frente de llama tiene largos recorridos durante la inflamación de los gases. Para lograr una combustión más completa de la mezcla comprimida se emplean habitualmente 2 bujías separadas entre sí de 15° a 20° .

Los sistemas de refrigeración y engrase son similares a los que montan los motores de pistón alternativo aunque con algunas particularidades.

Las cámaras para el líquido de refrigeración están convenientemente distribuidas alrededor de la carcasa, con un dimensionado mayor en la zona de la cámara donde se produce la combustión.

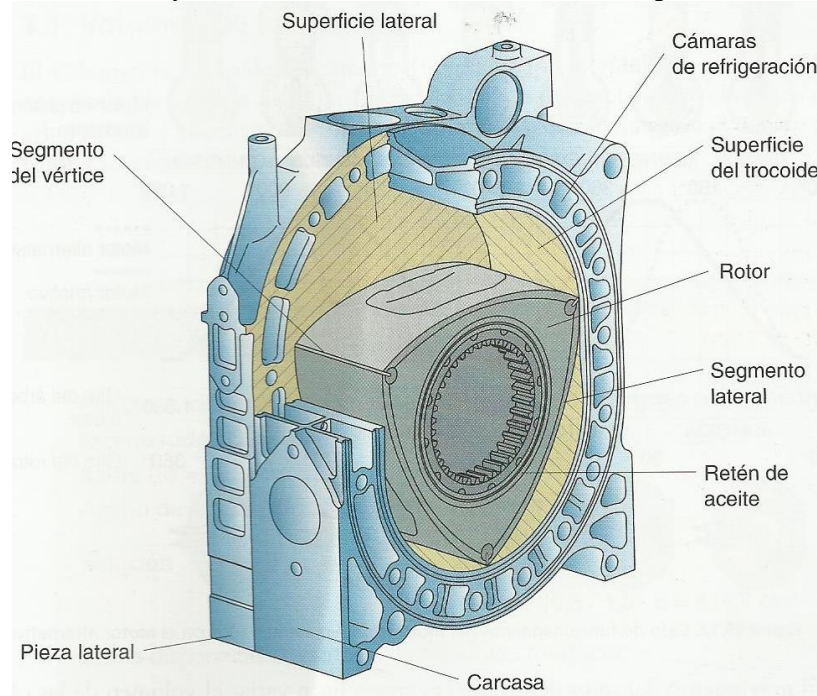


Fig. 59.- Disposición de los elementos del motor rotativo.

Dadas las dificultades que presenta el rotor para evacuar el calor, este tiene que ser enfriado desde el interior a través del aceite de engrase. Para evitar que el aceite se caliente en exceso, el circuito de engrase a presión va provisto de un intercambiador de calor con un termostato que regula la cantidad de aceite que pasa a enfriarse.

La lubricación de los segmentos se realiza añadiendo aceite al combustible mediante un dispositivo que dosifica la cantidad en función a las revoluciones y de la carga del motor. Otro sistema consiste en inyectar desde el rotor de una determinada cantidad de aceite sobre las paredes de la camisa.

En lo referente a las emisiones nocivas nos limitaremos a decir que el Wankel, en comparación con el motor alternativo, tiene emisiones de CO tendientes a ser menores y menores emisiones de NO_x, mientras que tiene mayores emisiones de hidrocarburos. El motor sin embargo se presta a la aplicación de reactores para contener las emisiones de hidrocarburos a valores aceptables.

VI.- SISTEMAS AUXILIARES DEL MOTRO WANKEL.

6.1.- SISTEMA DE REFRIGERACIÓN.

6.1.1.- Refrigeración del Estator

Como ya se ha explicado anteriormente, el estator sufre unos enormes gradientes de temperatura debido al hecho de que cada una de las fases del ciclo de cuatro tiempos se realiza en la misma parte del estator. Por eso hay unas zonas frías (son las que corresponden a la admisión y a la compresión) y otras mucho más calientes (las de la combustión y el escape) que provocan unas tensiones térmicas que deben ser anuladas, en la medida de lo posible, por un sistema de refrigeración adecuado.

La finalidad de dicho sistema es, por lo tanto, la de homogeneizar al máximo la temperatura de todo el estator y así evitar las deformaciones térmicas.

El mismo sistema de refrigeración debe ser capaz de evacuar el calor almacenado en el rotor, el cual forma parte de la cámara de combustión y está en contacto con los gases quemados hasta que salen por la lumbrera de escape.

Para refrigerar el estator se puede hacer circular un refrigerante (se suele utilizar agua) por el interior del bloque motor o emplear una corriente de aire.

a) Refrigeración por agua.

La refrigeración por agua puede llevarse a cabo mediante dos construcciones distintas:

- Sistema de refrigeración por agua con flujo axial. Los conductos realizados en el interior del bloque lo atraviesan de extremo a extremo en la dirección del cigüeñal según ejes paralelos que rodean todo el motor.

- Sistema de refrigeración por agua con flujo tangencial. Cuando el flujo es tangencial, el agua refrigera independientemente secciones transversales del estator. Este sistema es muy utilizado en el caso de motores de más de un rotor, en los que cada estator recibe una refrigeración independiente.



Fig. 60.- Sistema de refrigeración por agua con flujo axial.
Motor con lumbreras en el estator lateral.

b) Refrigeración por aire.

Este sistema es equivalente al empleado en los motores de motocicleta cuando es imprescindible ahorrar espacio y peso, o el utilizado, en contadas ocasiones, en coches deportivos (algunos modelos de Porsche hasta 1997). Consiste en hacer un gran número de aletas disipadoras sobre el estator, con la finalidad de aumentar la superficie de intercambio de calor con el aire exterior.

La refrigeración por aire también puede llevarse a cabo de dos formas: axial y tangencial. Igualmente, el nombre hace referencia a la dirección del flujo de aire al atravesar el estator. De la misma forma que en los motores alternativos, la refrigeración por aire consigue una evacuación de calor muy limitada y se emplea, generalmente, en motores de baja cilindrada y escasas prestaciones.

6.1.2.- Refrigeración del Rotor.

Básicamente, hay dos formas de refrigerar el rotor. Por un lado, cabe la posibilidad de utilizar un aceite lubricante y, por el otro, puede emplearse la propia mezcla fresca, antes de proceder a su combustión.

a) Refrigeración por aceite.

Con este tipo de realización, el aceite es introducido en el interior del rotor a través del eje motor. Una vez dentro, se encuentra sometido a una fuerza centrípeta que tiene un doble efecto. El fluido que está en la parte más alejada del centro de giro es empujado hacia la cara del triángulo curvilíneo que forma el rotor, recorriendo las cavidades practicadas en su interior y realizando el intercambio de calor con las partes más calientes. A medida que el rotor sigue girando, esta misma cara pasa a estar muy próxima al centro de giro; ahora, la fuerza centrípeta impulsa el aceite hacia el interior del rotor, donde

es recogido para ser enfriado en un intercambiador exterior. Como la temperatura del rotor aumenta proporcionalmente con las revoluciones del motor, la bomba que inyecta el aceite en el rotor está sincronizada con el funcionamiento del motor. Así, al ralentí, o incluso a bajo régimen, no es necesario inyectar aceite en el interior del rotor. Esta sincronización se puede conseguir con un mecanismo conectado directamente al cigüeñal y un muelle que supere la fuerza centrífuga hasta un determinado régimen de giro. A partir de este momento, se abrirá de acuerdo con las solicitudes del motor.

Diseñando correctamente este sistema, se puede conseguir que la temperatura en la superficie del rotor se mantenga prácticamente constante (con variaciones máximas inferiores al 10%). Se emplea aceite lubricante para refrigerar en lugar de agua porque, aunque el agua es un medio perfecto para hacer un intercambio de calor dada su elevada capacidad calorífica, el movimiento del rotor provoca que, hoy por hoy, no se pueda asegurar un sellado idóneo. De ahí la necesidad de trabajar con aceite, el cual puede pasar a las cámaras sin perjudicar la evolución del ciclo de combustión.

b) Refrigeración mediante la mezcla fresca.

Es un sistema mucho más limitado y se emplea únicamente en motores de bajas prestaciones y en los que se puede diseñar el conjunto para un rango de revoluciones muy concreto. En este caso se hace pasar la mezcla fresca por el interior del rotor, de forma que capte la mayor cantidad posible de calor procedente de éste y, posteriormente, se introduce la mezcla en la cámara de combustión a través de la lumbrera de admisión.

La refrigeración mediante la mezcla fresca, además de la sencillez constructiva, ya que no requiere ningún intercambiador de calor como en el caso de la refrigeración por aceite, tiene una segunda ventaja, ya que al ser la mezcla la que absorbe el calor, se consigue una mayor vaporización del combustible.

6.2.- SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.

Las lumbreras de admisión y de escape pueden estar situadas de dos formas distintas sobre el estator. No obstante, siempre es el rotor el encargado de permitir el paso del fluido desde el exterior hacia las cámaras y viceversa. La entrada y salida de fluido puede darse a través de la periferia del estator o a través de sus placas laterales.

El motor Wankel fue concebido con lumbreras periféricas, y así es como lo comercializó la empresa N.S.U. Esta disposición implica que los vértices del rotor y, más concretamente, los segmentos periféricos son los encargados de distribuir el fluido dado que las lumbreras siempre están abiertas, y lo que hace el rotor es dirigir la vena de fluido a una u otra cámara en la admisión, o hacia el exterior, en el escape.

Los vértices del rotor deben asegurar, en todo momento, la estanqueidad de las diferentes cámaras durante el ciclo pero, al mismo tiempo, cuando llegan a las lumbreras, los segmentos deben pasar sobre ellas sin ningún tipo de interferencia mecánica. Este doble comportamiento implica una gran complejidad a la hora de conseguir un diseño satisfactorio de los elementos de sellado periféricos.

Posteriormente, tanto la empresa Curtiss-Wright como la Toyo Kogyo (en su deportivo denominado Mazda RX-7), adoptaron un sistema de distribución por lumbreras laterales, donde las caras

del rotor son las encargadas de permitir el intercambio de gases. Esta segunda solución se asemeja a la empleada en los motores alternativos de dos tiempos.

Con ambas soluciones, el intercambio de mezcla y gases se produce con una facilidad muy superior a la que se da en los sistemas de distribución por válvulas, donde la presencia de éstas reduce, de forma considerable, la sección de paso e introduce una pérdida de carga y una disminución de la turbulencia que impide una combustión óptima de la mezcla.

6.3.- SISTEMA DE LUBRICACIÓN.

Con respecto al motor alternativo de cuatro tiempos, el rotativo tiene unas pérdidas por rozamiento notablemente inferiores. Estas diferencias aumentan a medida que se incrementa el régimen de giro del motor. Y no es de extrañar, ya que el motor rotativo no posee piezas con movimiento alternativo, eliminando las grandes inercias que se producen (mayores cuanto más rápido gira el motor).

Aun así, los cojinetes del motor rotativo, siguen estando sometidos a grandes fuerzas de fricción, pero se pueden reducir a base de disminuir las masas con movimiento rotativo y lubricar correctamente todas las superficies que tienen un contacto con movimiento relativo. Para conseguirlo, es recomendable la utilización de materiales más ligeros (aunque igualmente resistentes) y con buenos coeficientes de fricción entre ellos.

Habitualmente, se emplean dos sistemas independientes que permiten llegar a todas las piezas que lo necesitan. Por un lado, se dispone de un mecanismo de lubricación que aporta el aceite necesario a todos los componentes que intervienen en la estanqueidad del rotor (los segmentos, los muelles y demás superficies móviles).

Por el otro lado, se utiliza un sistema de lubricación a presión que se encarga de lubricar el resto de partes móviles del motor, expuestas a fuertes desgastes por el rozamiento continuo al que están sometidas (sobre todo, cojinetes y engranajes de transmisión).

Aunque posible, en muy raras ocasiones se emplea una mezcla de gasolina y aceite para lubricar el rotor, de forma parecida a como se realiza en los motores alternativos de dos tiempos.

a) Lubricación de los elementos de sellado:

Igual que en el sistema de refrigeración, para lubricar los segmentos y demás partes que intervienen en el sellado de las cámaras de combustión, se emplea una bomba que envía un caudal de aceite en función de las condiciones de trabajo (básicamente, la carga del motor y la velocidad de funcionamiento). De esta forma, llega la cantidad justa de aceite y se evita, en la medida de lo posible, una mezcla excesiva de gasolina y aceite. Esto se consigue uniendo, directamente, el acelerador con la leva de control de la bomba de aceite, la cual ajusta la carrera del émbolo de ésta en función de las exigencias del motor. La lubricación de los segmentos aporta una ventaja adicional, ya que, gracias a las características viscosas del aceite, se dificulta el intercambio de gases entre las diferentes cámaras, favoreciendo la acción de los segmentos.

b) Lubricación del eje rotor:

Como ya se ha dicho, para asegurar la correcta lubricación del eje de salida, rodamientos y engranajes, se emplea un sistema a presión, con un intercambiador de calor para enfriar el aceite debido a su doble función refrigeradora para que no pierda sus propiedades de forma prematura. Este intercambiador actúa sólo cuando la temperatura del aceite sobrepasa un cierto valor. El sistema favorece, además, que el motor alcance rápidamente la temperatura adecuada de trabajo y se mantenga, más o menos constante, una vez alcanza la temperatura de funcionamiento.

Pero la necesaria lubricación de estas piezas, sometidas a gran fricción, debe ser controlada, y se debe evitar que el aceite en exceso acceda, a través del espacio que queda entre la cara lateral del rotor y el estator, hacia las cámaras de combustión.

Con la finalidad de evitar estas pérdidas de lubricante, se insertan unos aros muy similares a los empleados en los motores alternativos. Se colocan sobre la cara lateral del rotor, junto al engranaje interior, y van recogiendo todo el aceite sobrante, devolviéndolo de nuevo hacia el sistema de lubricación. Para asegurar un contacto continuo de los aros con la superficie exterior, se colocan unos muelles planos en las ranuras que presionan los segmentos hacia las caras laterales del estator.

6.4.- SISTEMA DE ENCENDIDO.

6.4.1.- Encendido Doble.

En el motor rotativo Wankel, la bujía debe situarse en la cara interior del estator. Es necesario evitar, en todo momento, el contacto entre los electrodos y los segmentos del rotor. Para conseguir esta localización, se hace un agujero que atraviesa todo el estator, donde se fija la bujía mediante roscado. El electrodo debe quedar totalmente enrasado sin sobresalir de la superficie del estator.

La disposición de la bujía tiene una gran influencia en la propagación del frente de llama y, por lo tanto, en el rendimiento de la combustión. Por esta razón, debe estudiarse con detenimiento su ubicación, teniendo muy presente la forma que se le ha dado a la superficie del rotor y que define las características de la cámara de combustión. Como ya se ha explicado, en el momento de la activación de la mezcla la cámara de combustión está dividida en dos subcámaras.

Para obtener un mejor rendimiento de la combustión en un amplio margen de funcionamiento, es muy habitual la utilización de dos bujías, una instalada en el lado retrasado y la otra en el lado avanzado (figura 2.20.).

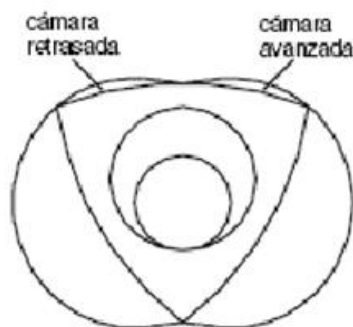


Fig. 61.- División de la cámara de combustión. (Giro en sentido horario).

En principio, el encendido de la mezcla es más favorable para un hueco de la bujía de gran diámetro. No obstante, los elementos de sellado (solamente los periféricos) podrían tener problemas para asegurar la estanqueidad debido a las elevadas diferencias de presión entre las dos cámaras de combustión adyacentes.

Como el gradiente de presiones es más acusado cuando el segmento sobrepasa la primera bujía, se realiza un agujero más pequeño para alojar la primera de ellas (según el sentido de avance del rotor), y otro, de mayor tamaño, donde situar la segunda bujía (en este lugar la presión ya habrá descendido y la diferencia respecto a la de la cámara adyacente será menor).

Los ensayos demuestran que la segunda bujía interviene activamente en la estabilidad de funcionamiento del motor; es decir, la intensidad eléctrica del arco que genera hace variar sustancialmente el rendimiento de la combustión.

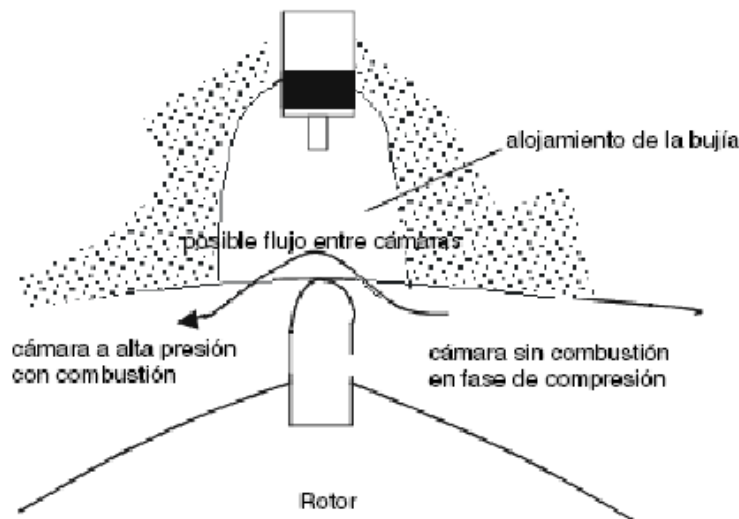


Fig. 62.- Situación de cortocircuito entre cámaras debido al hueco de la bujía.

La utilización de dos bujías, frente al sistema, comúnmente empleado en los motores alternativos de automoción, de una sola bujía (excepción hecha de algunas marcas como Alfa Romeo con su ya clásico sistema *Twin Spark* de doble encendido) se explica por dos motivos:

- La notable disminución del consumo específico de combustible como consecuencia de una combustión de mayor calidad.
- La reducción de la temperatura de los gases de salida como consecuencia de un tiempo menor de combustión y por lo tanto un mayor grado de expansión de los gases.

Pero no todo son ventajas, ya que se debe añadir que, a cambio, hay un importante aumento de las emisiones contaminantes de NOx.

VII.- APLICACIONES DE LOS MOTORES ROTATIVOS.

Como ya se ha comentado, el único motor rotativo que ha tenido una cierta resonancia a nivel de producción comercial ha sido el motor Wankel. Aún así, tanto el desarrollo como las aplicaciones de motores Wankel han sido escasas y actualmente únicamente Mazda comercializa automóviles con motor rotativo Wankel.

Varias empresas se quedaron en el camino. Estas, al igual que Mazda, empezaron a investigar y desarrollar versiones del motor Wankel tras adquirir los derechos de desarrollo en el año 1961. Algunas de estas empresas fueron: Curtiss-Wright (para motores de aviación en Estados Unidos) y Mercedes-Benz y M.A.N., en Alemania.

Aparte de los inconvenientes que presenta el motor Wankel, el propio Dr. Félix Wankel señaló que una razón de peso para la poca extensión comercial de su invento fue la prematura cancelación de los programas de investigación realizados por Mercedes-Benz. Tras el desarrollo de un motor de 4 rotores de 600 cm³ por cámara (4800 cm³ aspirados por cada revolución) destinado al prototipo del automóvil C-111 y las lanchas Zisch, la compañía de Stuttgart decidió no seguir adelante con sus investigaciones. Esto representó un freno para el resto de compañías que se mostraban inicialmente interesadas en los propulsores rotativos, pero que tras el rechazo de Mercedes-Benz consideraron peligroso abrir costosísimos programas de investigación a este respecto.

7.1.- APLICACIONES EN EL SECTOR NAVAL.

Uno de los inconvenientes de los motores Wankel es la poca eficiencia de grandes unidades motoras de este tipo. Ha sido probado que la eficiencia decrece alarmantemente en grandes motores Wankel de más de 3 rotores. Debido a esto, las aplicaciones navales del motor Wankel se limitan al mundo de la náutica de recreo y/o deportiva de pequeña eslora que consecuentemente usa motores de tamaño reducido.

En este sector, el motor Wankel aporta dos grandes ventajas frente al motor de combustión interna alternativo: altas prestaciones a altas revoluciones y gran potencia con pequeña cilindrada.

Consecuentemente, otro de los intereses en que Félix Wankel puso su mirada fue el mundo de la náutica. Inicialmente diseñó algunos botes de remos y con el tiempo llegó a diseñar lanchas tipo hidroala.

El funcionamiento del hidroala se basa en obtener una fuerza que eleve el casco de la nave gracias a la sustentación generada por medio de un perfil hidrodinámico sumergido en el agua. A baja velocidad, el hidroala se comporta, como un barco convencional. A medida que la velocidad aumenta, la presión del agua bajo el ala, unida a la disminución de la presión que se forma sobre la misma genera una fuerza de sustentación opuesta al peso de la nave y una vez alcanzada cierta velocidad es suficiente para elevar completamente el casco sobre el agua. La única parte del barco que permanece sumergida, por supuesto, descontando los perfiles, son las hélices y el timón de dirección. Con el casco elevado sobre el agua, la única resistencia al avance es la que ofrecen los perfiles que lo mantienen elevado, que es mucho menor a la que ofrecería el casco sumergido navegando a la misma velocidad.

Las primeras tentativas se produjeron en los años 1935-1945. Desafortunadamente, el estallido de la segunda guerra mundial retrasó el desarrollo de estos proyectos y Felix Wankel no los retomó hasta el año 1968. Una de sus primeras lanchas fue la Zisch 68 equipada con 2 perfiles hidrodinámicos (uno en proa y otro en popa). La sucedió la Zisch 74 con un par de perfiles independientes en proa y otro par en popa. Ambas lanchas estaban equipadas, como no podía ser de otra manera, de motores rotativos Wankel pero desarrollados por Mercedes-Benz.



Fig. 63.- Lancha Zisch



Fig. 64.- Lancha Tigerhai equipada con un motor Wankel.

Inicialmente estaba equipada con un motor Wankel de 250 CV con el que se realizaron las pruebas en el banco de ensayos. Después se disminuyó la potencia hasta 200 CV.



Fig. 65 y 66.- Lancha Zisch 74. Disponía de Motor Mercedes Benz, M950Ke 409.

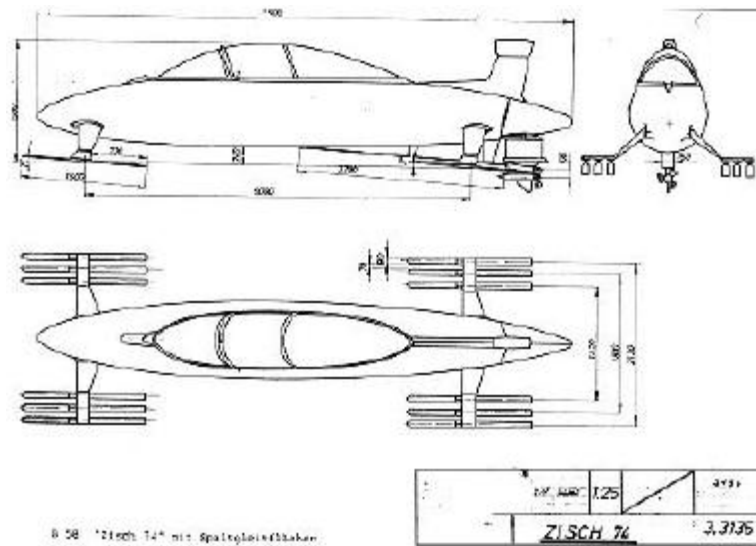


Fig. 67.- Esquema de la Zisch 74. Se aprecian los pares de perfiles hidrodinámicos en proa y popa.

Por otra parte, NSU desarrolló el motor Wankel naval RO135. La cilindrada total del motor era de 995 cm³ y entregaba una potencia de 135CV. Este motor disponía de dos bujías por cámara muy cercanas entre ellas a diferencia de los motores Wankel para automóviles. Como se aprecia en la imagen siguiente el motor es de cola tipo Z:

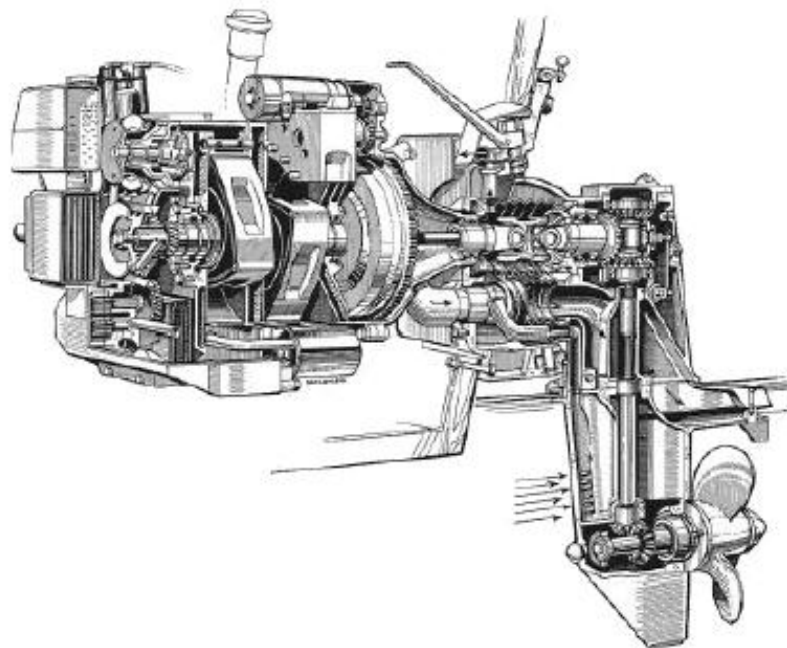


Fig. 68.-. Dibujo de archivo de prensa de NSU del 1971 correspondiente al motor RO135.

El fabricante de motores fueraborda OMC (Johnson, Evinrude) construyó un motor Wankel de 4 rotores bajo la marca Johnson. El motor, cuya refrigeración se hacía con agua, ofrecía una potencia de 280 CV a 8000 rpm. Ganaron todas las carreras en la clase open de esa época.

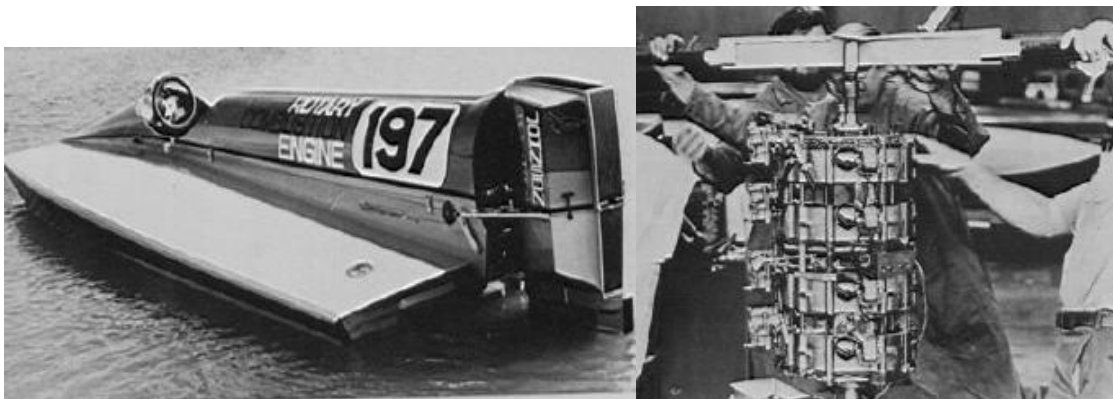


Fig. 69 y 70.- Lancha de competición clase open equipada con motor rotativo Wankel fabricado por Johnson. Mecánicos ajustando piezas del motor.

Actualmente los usos del motor Wankel en el sector naval se han reducido a aplicaciones tales como motos de agua y algunos otros prototipos.

7.2.- APLICACIONES EN AUTOMÓVILES Y MOTOCICLETAS.

7.2.1.- Automóviles Comerciales.

En el capítulo referente al motor Wankel hemos comentado que el único fabricante que emplea este motor en la actualidad es Mazda en su modelo deportivo RX-8 cuyo motor recibe el nombre comercial *Renesis*.

Tal y como decíamos en el principio de este capítulo, Félix Wankel opinaba que la negativa de Mercedes-Benz de seguir apostando por sus programas de desarrollo del motor Wankel fue la causa principal de la poca extensión comercial que el motor ha tenido. Precisamente Mercedes-Benz abandonó los programas después de estar desarrollando un motor de 4800 cm³ destinado al prototipo de coche deportivo C-111.

El C-111 fue el nombre de una serie experimental de automóviles producidos por Mercedes-Benz en los años 60 y 70. La compañía estuvo experimentando con nuevas tecnologías de motores, incluidos los motores Wankel, los motores diesel, y turbocompresores, y utilizó la plataforma básica del C-111 como un banco de pruebas.

Otras características experimentales incluidas eran las puertas de ala de gaviota y un lujoso interior con tapicería de cuero y aire acondicionado. La primera versión del C-111 apareció en 1969,

tenía una carrocería de fibra de vidrio y un motor Wankel de tres rotores con inyección directa de combustible, montado en disposición central trasera, esta primera versión alcanzó los 260 km/h. El segundo C-111 apareció en 1970 y utilizaba un motor de cuatro rotores que producía 370 CV y una velocidad máxima superior a los 300 km/h.

Después, la empresa decidió no utilizar más el motor Wankel para sus experimentos con el tercer C-111. En esta tercera versión del C-111 se puso un motor turbodiésel de 230 CV.



Fig. 71.- Primera versión del C111,
del año 1969



Fig. 72.- Mazda RX-7.

Citroën también realizó su incursión en el mundo del motor rotativo mediante la construcción del Citroën GS Birotor, que estaba equipado con el motor Wankel Comotor 624. Este motor derivaba del NSU 612. Comotor fue una empresa subsidiaria de Citroën y NSU creada el 1967 en Luxemburgo.



Fig. 73.- Citroen GS Birotor.

7.2.2.- Automóviles de Competición.

En el mundo de la competición Mazda ha tenido un éxito considerable en coches con motores de dos, tres y de cuatro rotores. Ciertos corredores privados con coches no de fábrica también han tenido buenos resultados.

En el año 1974, el Sigma MC74 impulsado por un motor Mazda 12A fue el primer motor y el primer equipo de fuera de Europa Occidental o los Estados Unidos en terminar las 24 horas de Le Mans.

En 1991 Mazda ganó las 24 horas de Le Mans y volvió a ser el primer equipo no europeo-occidental ni estadounidense en ganar esta histórica carrera. Este hito fue posible con el motor Wankel 787B.

Al año siguiente se modificó la normativa de la FIA para la carrera de Le Mans para evitar que Mazda compitiera por la ventaja que suponía la ligereza de peso de los motores Wankel respecto a los motores alternativos. Además, el Mazda RX-7 ha ganado más carreras en la clase IMSA que cualquier otro modelo de coche en la historia de la categoría.



Fig. 74.- Mazda IMSA GTU año 1979.



Fig. 75.- Mazda 787B año 1991.

7.2.3.- Motocicletas.

A partir de 1974 hasta 1977 la marca motociclista Hércules produjo un número limitado de motocicletas impulsadas por motores Wankel. Entre ellas destacó la Hércules Wankel 350. Hércules se convirtió en la primera empresa en construir una motocicleta con motor rotativo.



HERCULES W2000 (1974) www.2ri.de

Fig. 75.- Vista de la Hércules Wankel 350.



Fig. 76.- Detalle de su motor.

Más tarde Norton motorcycles fabricó el modelo Norton Commander a principios de los años 1980 basada en la Hércules Wankel 350. Se construyeron dos versiones de esta moto. Una, llamada P52, era un modelo de un solo asiento que se diseñó para ser usada por la policía. Este modelo venía a suceder la Norton Interpol 2 refrigerada por aire. La segunda versión de la Norton Commander, la P53,

era un modelo de doble asiento. Ambas disponían de alforjas rígidas integradas en el carenado de la moto lo cual era una novedad en aquella época.

Por otra parte, Suzuki fabricó la Suzuki RE5 entre 1975 y 1976, la cual también era una motocicleta impulsada por un motor Wankel.



Fig. 77.- Imagen comercial de la Suzuki RE5.

El importador y fabricante de motocicletas Van Veen construyó pequeñas cantidades de un motor birotor Wankel bautizado como OCR-1000 entre 1978 y 1980 el cual derivaba de los motores Wankel construidos por Comotor.



Fig. 78 y 79.- Imagen comercial de la Van Veen OCR 1000 (izquierda) que recibía el mismo nombre que el motor que la impulsaba (derecha).

Pregonado como el futuro del motociclismo, el pequeño motor Wankel ofrecía una potencia impresionante en relación a su tamaño. Sin embargo, problemas de fiabilidad y de falta de recambios, resultaron en un bajo número de ventas.

7.3.- APLICACIONES EN EL SECTOR AERONÁUTICO.

El primer avión con motor rotativo fue un planeador del Ejército de los Estados Unidos en 1968/1969. El motor que incorporaba era un RC2-60 (motor Wankel que ofrecía 185 CV) diseñado por Curtiss-Wright.

Tal y como hemos visto en otras aplicaciones, los motores rotativos ofrecen las mayores ventajas y cualidades en vehículos pequeños o de poco peso. En el sector aeronáutico se encuentran ejemplos de aplicación básicamente en planeadores adaptados para despegar (planeadores que disponen de una hélice retráctil para facilitar el despegue y evitar tener que ser remolcados), pequeñas avionetas, helicópteros, ala deltas con motor y aeromodelismo.

Los motores Wankel también son populares entre los constructores de aviones experimentales de construcción particular. La mayoría emplea motores Mazda 12A y 13B procedentes de automóviles y reconvertidos adecuadamente al nuevo uso. Esta es una alternativa interesante respecto al alto coste de los motores de aviación. El rango de potencias que se emplean en estas aplicaciones va desde los 100 CV hasta los 300 CV aproximadamente. Estas adaptaciones se empezaron a hacer a partir de los años 70.

El 10 de diciembre de 2006 la NTSB (National Transportation Safety Board), agencia independiente del gobierno estadounidense responsable de la investigación de los accidentes aeronáuticos, hizo público su informe anual en el que únicamente se mencionaban 7 incidentes en los que los motores Wankel estaban involucrados y en ninguno de ellos se especificaba que la causa mayor del accidente se debiera a algún fallo de diseño o fallo mecánico en circunstancias normales de funcionamiento.



Fig. 80.- Motor Wankel aplicado en la aviación.



Fig 81.- Motor Wankel Mazda 13B en un helicóptero Scorpio.



Fig. 82.- Motor de aviación ultraligera.



Fig. 83.- Aplicación del motor Wankel en aeromodelismo.

7.4.- OTRAS APLICACIONES.

El motor Wankel más grande jamás construido lo realizó Ingersoll-Rand. Estuvo disponible entre 1975 y 1985 en versión monorotor de 550 CV y en versión birotor de 1100 CV, desplazando 41 litros por rotor con un rotor de aproximadamente un metro de diámetro. El motor derivaba de un diseño Curtiss-Wright anterior, que fracasó debido a que la velocidad fija con la que avanza el frente de llama limita la distancia que puede recorrer la combustión desde el punto donde empieza la ignición durante un tiempo determinado.

La simplicidad del motor Wankel lo hace ideal para el diseño de micromotores. El laboratorio de motores rotativos de MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) de Berkeley, California, está desarrollando un micromotor Wankel de muy reducidas dimensiones que cubica 0,1 cm³. Han empleado el silicio para su construcción. Uno de sus objetivos es también desarrollar un motor rotativo de combustión interna que incorpore imanes en el rotor y sirva en su conjunto como un generador.

Pequeños motores Wankel están siendo encontrados cada vez más en otros papeles, como karts, motos de agua y unidades motoras auxiliares en aviones.



Fig. 85.- Motor Wankel de karting XR 50. Ofrece 48 CV. Su excelente curva de par hace innecesaria la caja de cambios de los karts de alta competición.

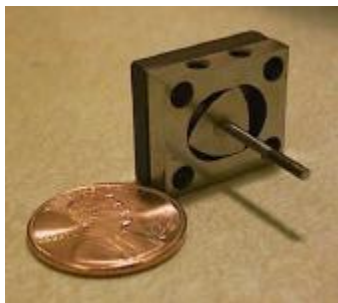


Fig. 86.- Micromotor rotativo aún en fase de investigación.

7.4.1.- Aplicaciones Potenciales.

En este trabajo hemos visto las ventajas y desventajas de los motores rotativos que hemos estudiado. Muchas de estas ventajas las comparten la totalidad de los motores rotativos estudiados ya que son inherentes a la naturaleza de los motores rotativos.

Entre ellas destacan:

- Elevada potencia en comparación con el poco volumen y peso del motor.
- Pocas o casi nulas vibraciones.
- Funcionamiento poco ruidoso.
- Sencillez de diseño.

De la interpretación de estas ventajas se vislumbra un gran potencial de aplicaciones además de las que ya se han comentado en este capítulo. Es evidente que estos motores son ideales para aplicaciones en las que se necesiten pequeños motores en combinación con estas prestaciones tales como motosierras, máquinas cortacésped, maquinaria agrícola, modelismo, etc.

Una aplicación muy atractiva es la referente a la combinación de motor rotativo con un bobinado en el estator e imanes en el rotor de tal manera que la unidad además de ser un motor rotativo de combustión interna funcione como un generador de corriente eléctrica.

7.5.-NUEVAS TECNOLOGIAS

7.5.1.- Audi Podría Dar Luz Verde al A1 E-TRON.



Fig 87.- El A1 E-TRON cargándose de energía eléctrica.

Después de tres años de desarrollo y muchos kilómetros recorridos en forma de pruebas, parece que el anuncio por parte de BMW de lanzar una versión con extensor de autonomía del i3 podría servir como inductor para que Audi de luz verde a su A1 e-Tron.

A pesar de que son simples especulaciones, si sumamos el empuje de la competencia, el descarte de la llegada del Audi A2 y el anuncio de la ampliación del programa de pruebas de este prototipo, nos da como resultado que desde el consejo de Audi podrían estar preparando el terreno para la llegada de este más que interesante modelo que supondría todo un desembarco a nivel mediático para el segmento de los coches eléctricos.



Fig. 88.- *El A1 E-TRON.*

Como recordamos, el Audi A1 e-Tron podría llegar con la principal diferencia respecto al prototipo presentado en 2010 de la sustitución de su motor rotativo Wankel, por un motor de tres cilindros turbo de 1.5 litros, mucho más eficiente que el anterior en una combinación que Audi ha denominado Dual-Mode Hybrid, aunque en este aspecto los técnicos de Audi aseguran que no está decidida cual será la configuración, un motor que estará alojado bajo el maletero y que tendrá que ocupar el menor espacio posible, donde a pesar de lo que se comenta el motor rotativo parece el que mejor se adapta por su tamaño, aunque también gana enteros seguir el ejemplo de BMW optando por el motor de una moto.

Los encargados de mover el coche seguirán siendo un motor eléctrico de 75 kW (103CV) de potencia máxima que está conectado a la tracción y es el encargado de mover directamente el coche en colaboración con el motor de combustión. La energía procederá de un pack de baterías de litio de 12 kWh de capacidad, que le proporciona suficiente energía para recorrer hasta 50 kilómetros en modo exclusivamente eléctrico, momento en el que si no encontramos un punto de recarga, entrará en funcionamiento el motor de gasolina.



Fig. 89.- *Vista interna del A1 E-TRON.*

Ahora sólo queda esperar al anuncio por parte de Audi de la confirmación de la llegada de un modelo que a nuestro parecer es muy completo, con un cuerpo elegante y compacto, y que podría servir para muchos compradores interesados en un coche eléctrico, pero no tengan la total confianza en un modelo puramente eléctrico, y donde los extensores de autonomía servirán para facilitar la llegada de este tipo de clientes.

7.5.2.- El Biplaza DA36 E-Star2.

Hoy en día es usual escuchar el concepto de "autos híbridos", que se refiere a aquellos vehículos que funcionan en parte con electricidad y en parte con combustibles. Pero ahora, esta definición se amplía al mundo de los aviones, gracias a un desarrollo de Siemens.

La empresa de ingeniería alemana, en cooperación con otras compañías, presentó en el Paris Air Show una aeronave propulsada por un sistema híbrido que permite una operación silenciosa y eficiente en términos de consumo de combustible.

Se trata del Biplaza DA36 E-Star2, que sucede al prototipo presentado por la compañía en 2011 y es un paso adelante hacia la aplicación de este sistema, que podrá adaptarse para vuelos comerciales en el futuro.

Además de Siemens, participaron en el proyecto las empresas EADS y Diamond Aircraft. El sistema empleado permite reducir las emisiones de CO2 utilizando un motor eléctrico que entrega 65kw constantes a la hélice.

Para producir la electricidad, el dispositivo utiliza un generador movido por un motor wankel de bajo consumo de combustible, mientras que las baterías proveen a la aeronave con la energía suficiente para el despegue.



Fig. 90.- El Biplaza DA36 E-Star2.

"La capacidad de transporte y la autonomía de esta aeronave hacen que los diseñadores sean muy optimistas respecto al uso comercial de estas tecnologías", aseguró la marca, al tiempo que añadió que el sistema empleado en esta unidad podría ser escalado para ser aplicado a aviones de hasta 100 pasajeros.

Las aerolíneas destinan hoy aproximadamente un tercio de sus gastos operativos a combustibles, y según un informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), la aviación es responsable del 2% de las emisiones de CO₂.

Siemens y sus socios planean adaptar este sistema híbrido de provisión de energía a helicópteros, aeronaves pequeñas y aviones de uso comercial.

CONCLUSIONES

Con referencia al contenido de esta investigación podemos concluir que el Motor Wankel es muy importante, ya que de todos los motores rotativos, es el que comúnmente mas se utiliza en la industria y en la vida cotidiana, por lo que es necesario conocerlo, entender su principio de funcionamiento, los elementos mecánicos que lo conforman y la función que desempeñan cada uno de ellos.

Como ya se menciona el Motor Rotativo Wankel utiliza un menor número de partes móviles en comparación con un motor de pistones alternativos, esto es de gran importancia ya que facilita su construcción y por ende su principio de funcionamiento es fácil de comprender, concluyendo así que su mantenimiento y reparación es igual de sencillo. Sin embargo sabiendo de todos los beneficios que ofrece el Motor Rotativo Wankel hoy en día sigue siendo desconocido para la mayoría de las personas, son pocas las empresas que incorporan este Motor Rotativo en sus diseños, una de ellas es la compañía de automóviles Japonesa MAZDA quien emplea este motor en sus vehículos, gracias a ello ha obtenido una enorme popularidad por su combinación de gran potencia.

El Motor Rotativo Wankel juega un papel importante en el desarrollo de las nuevas tecnologías de motores de combustión interna, ya que ha evolucionado para darnos mayor potencia con una baja emisión de gases contaminantes, esta ultima de mayor importancia en nuestros días. Recientemente este motor se a tomado en cuenta para el desarrollo de nuevas tecnologías, lo que nos indica que aun esta y seguirá estando vigente.

Mi interés por desarrollar este tema surge debido a la necesidad de conocer más acerca del Motor Rotativo Wankel ya que actualmente no se cuenta con mucha información y considero de suma importancia su conocimiento puesto que en algún momento de nuestra vida profesional nos podemos encontrar con este tipo de motor y necesitamos tener las herramientas necesarias para afrontar el reto.

BIBLIOGRAFÍA.

- Motores
Santiago Sanz Acebes
Editorial: Editex S. A.
- Motores Endotérmicos.
Dr. Ing. Dante Giacosa
Ediciones OMEGA S. A.
14ª Edición.
- Direcciones Electrónicas Consultadas:
 - <http://www.drifting.es/2007/406/el-motor-rotativo/>
 - <http://www.youtube.com/watch?v=W8itvIN1kQE>
 - <http://www.youtube.com/watch?v=vjHX11xqNa4>
 - <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/13320309/motores-rotativos.html>
 - <http://www.velocidadmaxima.com/forum/showthread.php?t=73445>
 - <https://sites.google.com/site/mvwankel/historia-y-evolucion-1>
 - <http://roteng.tripod.com/rsp.html>
 - <http://www.rotaryeng.net/>
 - <http://www.mazdatrrix.com/>
 - <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p7.html>
 - <http://www.animatedengines.com/>