



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO
EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS**

Milton Antonio López Aguilar

Asesorado por el Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza

Guatemala, febrero de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO
EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

MILTON ANTONIO LÓPEZ AGUILAR

ASESORADO POR EL ING. GILBERTO ENRIQUE MORALES BAIZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

GUATEMALA, FEBRERO DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
EXAMINADOR	Ing. Carlos Snell Chicol Morales
EXAMINADOR	Ing. Herbert Samuel Figueroa Avendaño
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 19 de marzo de 2021.



Milton Antonio López Aguilar

Guatemala, 17 de noviembre de 2022

Ingeniero
Gilberto Enrique Morales Baiza
Director de Escuela de Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Morales:

Por este medio hago constar que he revisado el trabajo de graduación del estudiante **Milton Antonio López Aguilar** con registro académico **201700545** y CUI **3580706430101**,: **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS**, y estando satisfecho con lo presentado por el estudiante como trabajo final, lo doy por aprobado para que el estudiante pueda proseguir con los tramites respectivos.

En base de lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación, sin otro particular,

Atentamente,

Gilberto Enrique Morales Baiza
INGENIERO MECANICO
COLEGIADO No. 5.190



Ingeniero Gilberto Enrique Morales Baiza



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.EIM.076.2022

El Coordinador del Área Complementaria de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS** desarrollado por el estudiante: **Milton Antonio López Aguilar** con Registro Académico **201700545** y CUI **3580706430101** recomienda su aprobación.

“Id y Enseñad a Todos”



Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
Coordinador Área Complementaria
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, noviembre de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

LNG.DIRECTOR.056.EIM.2023

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de área y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES WANKEL COMO EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS**, presentado por: **Milton Antonio López Aguilar**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”

Ing. Gilberto Enrique Morales Baiza
Director
Escuela de Ingeniería Mecánica

Guatemala, marzo de 2023



LNG.DECANATO.OI.281.2023

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado **ESTUDIO TÉCNICO PARA LA UTILIZACIÓN DE MOTORES MANUEL COMO EXTENSORES DE AUTONOMÍA EN VEHÍCULOS HÍBRIDOS**, presentado por **Milton Antonio López Aguilar**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada

Decana



Guatemala, marzo de 2023

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Padre celestial por haberme guiado, dándome perseverancia y el entendimiento necesario para lograr esta meta.
- Mis padres** Douglas López y Zaira Aguilar, con un justo agradecimiento por todos sus esfuerzos, sacrificios y consejos.
- Mis hermanos** Josué y Jesús López, por darme su apoyo y motivación para poder seguir en la Universidad.
- Amigos** A todos mis compañeros que conocí en el recorrido por cada uno de mis semestres en la carrera, con mucho cariño y respeto, gracias por esos consejos, ayudas y desveladas que me sirvieron y aportaban siempre algo positivo a lo largo de mi carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por abrirme las puertas para poder forjar mi futuro.
Facultad de Ingeniería	Por ser una de las mejores facultades.
Mis amigos de la Facultad	Ángel Pérez y Cesar Gómez, por ese apoyo incondicional y consejos a lo largo de la carrera. A la memoria de mi gran amigo Leonardo Piox quien estuvo apoyándome siempre en cada etapa de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
JUSTIFICACIÓN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCION	XXI
1. EXPERIENCIAS DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ EN EL RENDIMIENTO DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y VEHÍCULOS CON MOTORES WANKEL	1
1.1. Experiencias empíricas de motores para vehículos híbridos.....	1
1.2. Experiencias empíricas de motores rotativos	8
1.2.1. Historia de los motores Wankel	8
1.2.2. Rotativo KKM.....	10
1.2.3. Rotativo 13B	12
1.2.4. Modelo Lucre	13
1.2.5. Rotativos con turbo.....	13
1.2.5.1. Cosmo Re-Turbo	14
1.2.5.2. RX7 Savanna.....	14
1.2.5.3. Eunos Cosmo	14
1.3. Primeros fabricantes de vehículos híbridos	15
1.4. Principales vehículos híbridos y eléctricos en el mercado.....	19
2. MOTOR WANKEL Y VEHÍCULOS HÍBRIDOS.....	33
2.1. Motores Wankel.....	33

2.1.1.	Descripción general del motor	33
2.1.1.1.	Ciclo termodinámico del motor Wankel.....	37
2.1.1.2.	Geometría del estator	40
2.1.1.3.	Geometría del rotor.....	42
2.1.2.	Partes principales	43
2.1.2.1.	Estator	44
2.1.2.2.	Rotor.....	51
2.1.2.3.	Cigüeñal excéntrico o Árbol motriz	54
2.1.2.4.	Engranajes de transmisión	54
2.1.3.	Funcionamiento	56
2.1.4.	Procesos y sistemas del motor	61
2.1.4.1.	Características de la combustión	61
2.1.4.2.	Equilibrado del motor	63
2.1.4.3.	Sistema de refrigeración.....	64
2.1.4.4.	Refrigeración del estator.....	64
2.1.4.5.	Refrigeración del rotor	69
2.1.4.6.	Sistema de Lubricación	72
2.1.4.7.	Sistema de distribución.....	78
2.1.4.8.	Encendido doble	79
2.1.4.9.	Mecanismos de sellado	82
2.1.5.	Ventajas y desventajas	88
2.1.5.1.	Principales ventajas.....	88
2.1.5.2.	Principales desventajas	89
2.2.	Motores de vehículos híbridos.....	91
2.2.1.	Tipos de vehículos híbridos	91
2.2.1.1.	Vehículos híbridos recargables de baterías.....	92
2.2.1.2.	Vehículos híbridos enchufables	92

2.2.1.3.	Vehículos híbridos de autonomía extendida	95
2.2.2.	Componentes principales	96
2.2.2.1.	Baterías	96
2.2.2.2.	Controladores	98
2.2.2.3.	Convertidores	98
2.2.2.4.	Puerto de carga	99
2.2.2.5.	Inversores	100
2.2.2.6.	Transformadores	100
2.2.2.7.	Motor eléctrico	101
2.2.3.	Funcionamiento	102
2.2.4.	Tipos de estructura y sistemas	105
2.2.4.1.	Híbridos en serie.....	106
2.2.4.2.	Híbridos en paralelo.....	107
2.2.4.3.	Híbridos combinados	108
2.2.4.4.	Sistema de baterías recargables	108
2.2.4.5.	Sistema de frenos regenerativos	112
2.2.5.	Ventajas y desventajas frente a los convencionales	114
2.2.5.1.	Principales ventajas.....	116
2.2.5.2.	Principales desventajas	119
3.	GRADO DE DESEMPEÑO DEL MOTOR WANKEL COMO EXTENSOR DEL VEHÍCULO HÍBRIDO.....	121
3.1.	Ubicación del motor Wankel	121
3.2.	Objetivo principal de utilizar el motor Wankel	122
3.3.	Beneficios esperados al incorporar el motor Wankel.....	123
3.4.	Realizar una comparación de autonomía utilizando el motor Wankel.....	125

4.	TABLA DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MOTOR WANKEL EN UN VEHÍCULO HÍBRIDO	129
4.1.	Análisis de datos e información obtenida	129
4.2.	Elaboración de tabla de resultados de autonomía.....	133
4.3.	Factibilidad e inconvenientes de incorporar el motor Wankel como extensor de autonomía	143
	CONCLUSIONES	149
	RECOMENDACIONES	153
	BIBLIOGRAFÍA.....	155

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	La Jamais Contente	2
2.	Motor rotativo L10A	11
3.	Motor rotativo 13B	12
4.	Motor 13B REW	14
5.	Motor rotativo 20B REW	15
6.	Lohner-Porsche	18
7.	Tesla S	20
8.	BMW i3	22
9.	Nissan Leaf	23
10.	Hyundai Kona	24
11.	Motor Wankel	34
12.	Motor Wankel como motor de encendido por compresión	35
13.	Motor Wankel de Rolls Royce encendido por compresión	36
14.	Transformaciones de un sistema termodinámico	38
15.	Diagrama termodinámico P-V y T-S motor Wankel	40
16.	Generación del perfil epitrocoidal	41
17.	Perfil del rotor a partir de curvas trocoides	43
18.	Partes del motor wankel	44
19.	Estató	45
20.	Estató periférico	47
21.	Superficies del estató periférico	49
22.	Estató lateral	50
23.	Rotor	52

24.	Partes principales del rotor.....	53
25.	Cigüeñal excéntrico.....	54
26.	Partes del cigüeñal excéntrico	55
27.	Engranajes de transmisión.....	56
28.	Tiempo de admisión motor Wankel.....	57
29.	Tiempo de compresión y expansión motor wankel	59
30.	Tiempo de escape motor Wankel.....	60
31.	Ciclo de trabajo motor Wankel	61
32.	División de la cámara de combustión.....	62
33.	Equilibrio del motor de un rotor y dos rotores.....	63
34.	Refrigeración por agua con flujo axial	66
35.	Refrigeración por agua con flujo tangencial	67
36.	Refrigeración por aire con flujo axial	68
37.	Refrigeración por aire con flujo tangencial	69
38.	Refrigeración por aceite del rotor	71
39.	Refrigeración mediante la mezcla fresca	72
40.	Sistema de lubricación motor Wankel	74
41.	Conductos para el lubricante.....	75
42.	Lubricación del rotor.....	76
43.	Movimiento del sello de aceite del rotor	77
44.	Sistema de distribución motor wankel	79
45.	Encendido de la mezcla	81
46.	Sistema de encendido doble motor Wankel	82
47.	Segmentos del Rotor.....	83
48.	Segmento periférico	85
49.	Segmentos laterales.....	86
50.	Pernos de anclaje	87
51.	Vehículos híbridos enchufables	95
52.	Vehículo hibrido de autonomía extendida	96

53.	Batería de ion-litio	97
54.	Puertos de carga vehículos híbridos	100
55.	Inversores de vehículos híbridos.....	101
56.	Componentes principales vehículo híbrido.....	102
57.	Esquema de funcionamiento.....	103
58.	Híbridos en serie	106
59.	Híbridos en paralelo	107
60.	Híbrido combinado	108
61.	Partes de las baterías de vehículos híbridos.....	110
62.	Supercapacitores	112
63.	Componentes de los frenos regenerativos.....	113
64.	Frenos regenerativos de disco	114
65.	Plataforma electrificada MAZDA	121
66.	Diagrama del motor Wankel como extensor de autonomía.....	122
67.	Esquema técnico de vehículos híbridos con autonomía extendida....	124
68.	Gráfico batería Nominal vs. Real	137
69.	Gráfico autonomía.....	141
70.	Motor rotativo a hidrógeno	147
71.	Pila de combustible de hidrógeno	148

TABLAS

I.	Vehículos eléctricos más competitivos del mercado	26
II.	Batería nominal vs Batería Real.....	136
III.	Cifras de Potencia. Corriente Alterna vs Corriente Continua	139
IV.	Autonomía.....	140
V.	Precio de Vehículos	143

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
EPA	Agencia de Protección del Medio Ambiente
Amp	Amperios
NiMh	Baterías recargables de Níquel metálico
EVC	Compañía de vehículos eléctricos
CCCR	Corriente de arranque en frío de batería
EUA	Estados Unidos de América
Kmpg	Kilómetros recorridas por galón de combustible
Km/h	Kilómetros por hora
Lb	Libras
psi	Libra sobre pulgada cuadrada
m	Metros
M.C.I	Motor de Combustión Interna
N	Newton
Hp	Potencia en caballos de fuerza
rpm	Revoluciones por minuto
ABS	Sistema de frenos antibloqueo
N*m	Torque en Newton por metro
AWD	Tracción en todas las ruedas (<i>All Wheel Drive</i>)
CVT	Transmisión continuamente variable
Km/h	Velocidad en Kilómetros recorridos en una hora
V	Voltio

GLOSARIO

Aceite sintético	Aceites que utilizan elementos lubricantes obtenidos de forma sintética en un proceso industrial.
Adiabático	Es una propiedad térmica que designa a aquellos procesos en los cuales no hay ganancia ni pérdida de Calor.
Aerodinámica	Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los gases sobre los cuerpos estacionados y el comportamiento de los cuerpos que se mueven en el aire
Árbol de levas	Eje rotatorio que mueve una o más levas y se destina a distribuir movimientos que deben estar sincronizados.
Batería	Es un medio de almacenaje de energía eléctrica, esta se almacena en forma de energía química.
Batería Recargable	Es una batería que por su diseño especial le permite utilizar totalmente su energía y luego recargarse para utilizarse nuevamente.

Biela	Pieza de una máquina que sirve para transformar el movimiento rectilíneo en movimiento de rotación, o viceversa.
Bloque de cilindros	Elemento formado por una sola pieza, obtenido por fusión, en el interior del cual se alojan los cilindros.
Cámara de combustión	Pieza hueca de un motor donde se mezcla y se quema el combustible a alta presión.
Celda de Baterías	Son básicamente baterías pequeñas que se unen para conformar un paquete de almacenaje de energía más grande.
Cigüeñal	Pieza del motor del automóvil y otras máquinas que consiste en un eje con varios codos, en cada uno de los cuales se ajusta una biela, y está destinada a transformar el movimiento rectilíneo de los pistones en rotativo, o viceversa.
Cilindrada	Es la suma de los volúmenes unitarios de cada cilindro de un motor, se suele indicar en centímetros cúbicos o litros. Esto sería el área circular de un cilindro por la carrera del pistón y por el número de cilindros. También es conocida como desplazamiento.
Diesel	Combustible que es mezcla de hidrocarburos, volátiles e inflamables y se obtienen por el refinamiento del petróleo crudo. Debido a que su producción requiere

menor refinamiento tiene un menor precio que la gasolina.

Electroimán	Barra de hierro dulce que se imanta artificialmente por la acción de una corriente eléctrica que pasa por un hilo conductor arrollado a la barra.
Embrague	Sistema que permite controlar el acoplamiento mecánico entre el motor y la caja de cambios. El embrague permite que se puedan insertar las diferentes marchas o interrumpir la transmisión entre el motor y las ruedas.
Empírico	Que está basado en la experiencia y en la observación de los hechos.
Energía mecánica	Es la capacidad de un cuerpo de generar movimiento y de realizar un trabajo mecánico.
Gases de combustión	Aire que sale de un escape después de la combustión en la cámara donde se ventila. Puede incluir óxido de nitrógeno, óxido de carbono, vapor de agua, óxido sulfúrico, partículas y muchos otros contaminantes químicos.
Gasolina	Combustible inflamable que es una mezcla de hidrocarburos líquidos, volátiles e inflamables obtenidos de la destilación del petróleo crudo.

Híbrido	Denominación que reciben los automóviles que pueden funcionar con dos tipos diferentes de motor o propulsión.
Hidráulico	Que funciona o es movido por la acción del agua o de otro líquido.
Inyección	Se trata de un sistema mecánico que no requiere la gestión de una centralita, pues prepara la mezcla de aire-combustible en la propia admisión.
Mezcla homogénea	Es la combinación de 2 o más elementos o sustancias, que pueden presentarse en cualquier estado de la materia, indistinguibles dentro de la solución.
Motor	Máquina que transforma una forma de energía en movimiento.
Motor diésel	Motor de combustión interna de alta compresión que funciona con aceites pesados o con gasóleo.
Motor eléctrico	Motor que transforma en movimiento la energía eléctrica.
Motor híbrido	Combina al menos un motor eléctrico con un motor a gasolina para mover el auto, y su sistema recupera energía a través del frenado regenerativo.

Petróleo	Líquido natural oleaginoso e inflamable, que se compone por una mezcla de hidrocarburos, que se extrae de lechos geológicos continentales y marítimos y tiene múltiples aplicaciones químicas e industriales.
Pistón	Pieza del cilindro de un motor que se mueve hacia arriba o hacia abajo impulsando un fluido o bien recibiendo el impulso de él.
Potencia	Cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo.
Relación de compresión	Es aquella que compara la capacidad del interior del cilindro cuando el pistón va del punto muerto superior al inferior.
Rendimiento	Fruto o utilidad de una cosa en relación con lo que cuesta, con lo que gasta o con lo que en ello se ha invertido.
Termodinámica	Parte de la física que estudia la acción mecánica del calor y las restantes formas de energía.

JUSTIFICACIÓN

En el mercado automotriz se ha ido evolucionando con el objetivo de tener motores más limpios y amigables con el medio ambiente por esta razón se ha visto un incremento considerable en la utilización de vehículos híbridos ya que no solo nos proporcionan muy baja contaminación sino también se tiene un considerable menor consumo de combustible por lo que cada día salen actualizaciones e innovaciones de tecnología con el objetivo de conseguir una autonomía más grande.

Por lo tanto con base en estos aspectos se realizara un estudio para determinar la factibilidad de utilizar un pequeño motor Wankel o rotativo acoplado al tren de tracción únicamente como generador de energía para cargar la batería de los vehículos híbridos enchufables y así proporcionar una mayor autonomía en estos vehículos, obteniendo más kilómetros y horas de viaje solamente con pasar a repostar gasolina y sin la necesidad de detenernos por más tiempo para enchufarlo y realizar una próxima carga.

OBJETIVOS

General

Realizar un estudio técnico para la utilización de motores rotativos Wankel como extensores de autonomía en vehículos híbridos.

Específicos

1. Describir las experiencias de la industria automotriz en el rendimiento de vehículos híbridos y vehículos con motores Wankel.
2. Recabar información del motor Wankel y de vehículos híbridos.
3. Evaluar qué grado de funcionalidad y de buen desempeño tiene el motor Wankel como extensor de vehículo híbrido.
4. Tabular los resultados de la evaluación del grado de funcionalidad del motor Wankel en un vehículo híbrido.

INTRODUCCIÓN

Existen factores que afectan al medio ambiente y una de las principales es el efecto invernadero y el calentamiento global, estos problemas son causados en gran parte por los gases contaminantes emitidos por los motores de combustión. Por lo que en los últimos años se ha visto un interés muy amplio en la reducción de estos gases por los automóviles, y gracias a ello surgen los vehículos híbridos y vehículos eléctricos enchufables los cuales serán el auge de los próximos años debido a que su principal ventaja sobre los automóviles con motores de combustión se encuentra la no emisión de gases contaminantes ya que trabajan en base a motores eléctricos y utilizan baterías para almacenar energía y así proporcionar mayor eficiencia antes de una próxima carga.

En el caso de los vehículos híbridos no enchufables utilizan motores de combustión interna, pero en menor proporción, para dar mayor movimiento o potencia a las ruedas y en algunos casos se combinan con el motor eléctrico para mandar energía a las ruedas, también existen los que utilizan un motor de combustión pequeño únicamente como generadores para cargar las baterías y así brindar mayor autonomía y eficiencia a la energía generada por el motor eléctrico debido a que en este caso el motor eléctrico es el único encargado de dar movimiento a las ruedas.

Por lo tanto, para efectos del trabajo de investigación nos enfocaremos en la utilización de motores Wankel como generador de energía para cargar la batería y así brindar mayor autonomía en los vehículos híbridos enchufables.

1. EXPERIENCIAS DE LA INDUSTRIA AUTOMOTRIZ EN EL RENDIMIENTO DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y VEHÍCULOS CON MOTORES WANKEL

1.1. Experiencias empíricas de motores para vehículos híbridos

A finales del siglo XIX, los primeros vehículos motorizados usaban motores eléctricos. A su vez, otra nueva tecnología se enfrentaba a este propósito, el motor térmico.

En el año 1815 Josef Bozek (1782-1835), construyó un auto con motor propulsado con aceite. En el año 1838, Robert Davidson construyó una locomotora eléctrica que alcanzó 6 km/h. Entre los años 1832 y 1839 Robert Anderson inventó el primer auto propulsado por células eléctricas no recargables.

Mientras que, en el año 1859, Gastón Planté diseñaba las primeras baterías de plomo y ácido en Bélgica, no fue hasta el año 1881 cuando el francés Charles Jeantaud construyó el Tilbury, el que probablemente sea el primer coche eléctrico alimentado con baterías. Sin embargo, tras recorrer sus primeros cien metros acabó consumido por las llamas.

Al inicio del siglo XX, los vehículos eléctricos eran considerados una seria alternativa para el transporte urbano. El vehículo eléctrico era relativamente confiable y partía de forma instantánea, mientras que su competencia en combustión interna era poco confiable, emitía gases, y requería el accionamiento de una manivela para su arranque. El otro competidor principal, el motor de vapor, poseía una eficiencia térmica relativamente baja.

Aparte de los modelos construidos a petición de ricos empresarios y fabricados de forma individual, el verdadero debut de los coches eléctricos fue en las flotas de taxis en Inglaterra con los conocidos Taxi-Cab, para extenderse posteriormente a Francia y Estados Unidos. En el año 1899 el piloto belga Camille Jenatzy conseguía romper un récord de velocidad con su bólido eléctrico La Jamais Contente (La que nunca está satisfecha), al superar los 100 km/h.

El vehículo eléctrico no tardaría en enfrentarse a sus limitaciones tecnológicas: prestaciones limitadas, poca autonomía y tiempos de carga demasiado largos. La energía específica del combustible de un MCI, depende del combustible, pero es del orden de 32 000 kJ/kg, mientras que la energía contenida en una batería de plomo-ácido es aproximadamente 108 kJ/kg. Considerando la eficiencia del MCI, la caja de cambios y la transmisión típicamente 20 %, se observa que la energía útil que puede ser obtenida del combustible es 6 480 kJ/kg. Con una eficiencia del motor eléctrico del 90 % sólo 97 kJ/kg de energía útil –en el eje del motor– puede ser obtenida de la batería de plomo-ácido. Por lo tanto, el combustible líquido tiene una capacidad de almacenaje muy superior al de las baterías. Un coche eléctrico corriente no pasaba de los 20 km/h y tenía una autonomía limitada a 50 km.

Figura 1. **La Jamais Contente**



Fuente: *Eventos Motor*. www.eventosmotor.com/blog-premium/la-jamais-contente-electrico-record-velocidad-1899/ Consulta: 2 de noviembre de 2020.

Motivados por ese repentino éxito del MCI los fabricantes de coches eléctricos empezaron a cerrar sus fábricas o se pasaron directamente a la producción de motores térmicos.

Aunque el coche eléctrico se mantuvo a la sombra del coche con motor térmico durante buena parte del siglo XX, su desarrollo permaneció activo y se le seguía tratando como una alternativa fiable cuyo potencial no se había desarrollado al máximo.

El primer reflote de la investigación de las tecnologías eléctricas llegó en la década de 1920 en Francia, donde se había construido una importante red de abastecimiento eléctrico y las autoridades buscaban la forma de minimizar su dependencia del petróleo. Mientras que los tranvías, la red subterránea del metro y los trolebuses revolucionaban el transporte público, se empezó a replantear la estrategia de convertir los coches de la época en coches eléctricos.

Varios fabricantes de primer orden estuvieron experimentando con prototipos eléctricos: Renault con Renault Juvaquatre, Peugeot con el Peugeot 202 y Mildé-Krieger con el La Licorne. Durante la ocupación de Francia se vivió la aparición de los primeros utilitarios eléctricos, en particular los construidos por Jean-Pierre Faure. Sin embargo, los problemas de suministro de ciertos materiales necesarios para la construcción de las baterías, como el cobre o el plomo y el decreto del año 1942 que prohibía la electrificación de vehículos llevaron de nuevo al traste las investigaciones y el desarrollo del coche eléctrico.

Un poco más tarde, durante la época dorada de Francia (1944-1975), los coches para particulares se convirtieron en un producto de consumo masivo. El progreso de la industria del automóvil tuvo un gran auge en la sociedad, todo volvía a ser posible, incluso el coche eléctrico. Todo el proceso de fabricación

genera millones de empleos en todo el mundo y mueve miles de millones de dólares, generando lucro a las empresas multinacionales encargadas de su fabricación y distribución. La energía nuclear y las células de combustible devolvieron la esperanza a los investigadores e inspiraron prototipos tan futuristas como el Simca Fulgur o el Ford Nucleon.

La urbanización de ciudades favoreciendo el uso del coche particular y los primeros atascos llevaron a reconsiderar el modelo de desarrollo del automóvil. Los fabricantes volvieron a investigar las virtudes de la energía eléctrica, que siempre había sido reconocida por sus cualidades en un entorno urbano. Renault desarrolló en el año 1959, en Estados Unidos, un Renault Dauphine eléctrico al que llamó Henney Kilowatt, esta misma iniciativa se desarrolló en Italia donde Fiat construyó un prototipo eléctrico basado en el Fiat 1100.

Debido a los problemas que empezaron a aparecer por el alto consumo de combustible de los MCI, fue necesario buscar un nuevo combustible más sostenible. Los principales problemas derivados del consumo de gasolina son el consumo masivo de petróleo y sus problemas derivados.

En el año 1973, esta tendencia se aceleró notablemente con la primera crisis del petróleo despertando en la conciencia colectiva el riesgo de dependencia del petróleo. La necesidad de buscar soluciones alternativas se convirtió en una prioridad en los Estados Unidos. Alrededor del mundo se crearon organizaciones como la Electric Vehicle Council en Estados Unidos, la Tokyo Electric Power Co. en Japón, The Electricity Council en Inglaterra y la Rheinisch Westfälische Elektrizitätswerk en Alemania. En Francia, la distribuidora eléctrica Électricité de France empezó a trabajar con PSA y Renault con el fin de crear condiciones favorables para el desarrollo del coche eléctrico, principalmente en una red de punto de recarga.

En el año 1974, la compañía americana Sebring-Vanguard empezó la producción en serie del primer coche eléctrico producido en masa, el CitiCar, un pequeño utilitario del que se produjeron unas 2 000 unidades hasta el año 1977. En el año 1980, Peugeot y Renault contaban con dos modelos con variante eléctrica, el Peugeot 205 y el Renault Express, equipados con baterías de níquel-hierro, con una autonomía que rondaba los 140 kilómetros y una velocidad máxima de 100 km/h. Toyota apostó por las baterías de zinc-bromo para su prototipo Toyota EV-30 mientras que Mercedes-Benz experimentaba con baterías de sal fundida y baterías de sulfuro de sodio.

En el año 1995, esta nueva dinámica llevó a la alianza Peugeot-Citroën a desarrollar un proyecto a gran escala con la producción y venta de dos modelos 100 % eléctricos, el Peugeot 106 y el Citroën Saxo. Desafortunadamente, no tuvieron éxito alguno, ya que sólo se vendieron 10 000 unidades hasta el año 2002, una cifra muy por debajo de las previsiones, cifradas en un millón de unidades. Durante el mismo periodo, Renault construyó varias unidades del Renault Clio y varios centenares de la Renault Kangoo con motor eléctrico. Ninguno de estos modelos tuvo éxito comercial.

En los Estados Unidos el coche eléctrico también experimentó un tremendo fracaso cuando General Motors abandonó el desarrollo del GM EV1, que se suponía que debería haber revolucionado el mercado americano.

En la década de 1990 apareció un nuevo tipo de motorización: la tecnología híbrida, una combinación de motor térmico con un motor eléctrico. En el año 1998, Toyota lanzó la primera generación del Toyota Prius, un modelo que se mantiene todavía como un referente y como un ejemplo de éxito comercial.

En el año 2010, y tras muchos años de desarrollo, General Motors lanzó su contraataque con la comercialización del Chevrolet Volt un coche eléctrico de rango extendido. Poco a poco, el mercado se ha ido abriendo a las fuentes de energía alternativa.

A principios de la primera década del siglo XXI las baterías disponibles para los coches eléctricos seguían dependiendo del níquel o el plomo, con las baterías de NiCd (níquel-cadmio) y NiMH (níquel-hidruro metálico) como únicas opciones. El problema es que estas baterías no tenían la potencia suficiente para dar una buena autonomía a los coches de producción en masa. Por esto, los fabricantes no tenían otra opción que generar la energía a bordo del vehículo a través de pilas de combustible de hidrógeno.

A pesar de las dificultades para almacenar el hidrógeno a bordo del vehículo, se ha conseguido alcanzar los 500 km de autonomía conservando intacto el espacio interior del coche.

Por otra parte, durante las dos últimas décadas se ha avanzado considerablemente en el desarrollo de las células de membrana intercambiadora de protones, pero la producción en masa de este tipo de vehículos se ha ido retrasando. Las soluciones tecnológicas todavía no han alcanzado un grado óptimo de maduración, los costes de producción siguen siendo altos y las infraestructuras para la distribución del hidrógeno están todavía en estado embrionario. Otra gran innovación tecnológica impulsará el desarrollo del coche 100 % eléctrico: las baterías de litio. Esta tecnología, importada de la electrónica de consumo portátil, hizo su primera aparición en el mundo del automóvil en el año 1996 en el prototipo Nissan Prairie Joy. Estas nuevas baterías son más estables y por consiguiente más seguras. No tienen efecto memoria y han

conseguido estirar la autonomía del coche eléctrico en un rango que va desde los 150 hasta los 300 km dependiendo del modelo.

El desarrollo de estas baterías ha dado un nuevo potencial a los coches 100 % eléctricos y alimentados por baterías, lo que ha llevado a la creación de nuevos prototipos y pruebas a pequeña escala mientras los fabricantes empiezan a imitarse unos a otros. La empresa Tesla Motors causó sensación en el año 2005 con su deportivo Tesla Roadster, equipado con baterías de ion-litio, convirtiendo el coche eléctrico en algo con lo que soñar. Los primeros coches de producción equipados con baterías de ion-litio en llegar al mercado, en el año 2010, fueron el Think City, el Citroën C-Zero y el Peugeot ion, además del Nissan Leaf, elegido Coche del Año en Europa el año 2011.

La alianza Nissan-Renault, ha invertido cuatro mil millones de euros en su proyecto de desarrollo del coche eléctrico lanzando en el año 2012 cuatro modelos eléctricos de Renault: el Renault Fluence Z.E., Renault Kangoo Express Z.E., el cuadriciclo eléctrico Renault Twizy y el Renault ZOE.

Actualmente, la capacidad de suministro de las empresas productoras de componentes y la competencia entre los fabricantes llegan a niveles nunca vistos y las apuestas a favor del coche eléctrico están muy por encima de como nunca han estado.

Es posible el momento del coche eléctrico haya llegado por fin.

1.2. Experiencias empíricas de motores rotativos

Se recopiló la experiencia adquirida por los fabricantes de motores rotativos y se determinó que incluso con su tamaño pequeño se pueden conseguir grandes potencias.

1.2.1. Historia de los motores Wankel

El motor aparece gracias a su inventor Félix Wankel, el cual a la edad de 17 años tuvo un revelador sueño, en donde él conducía un vehículo propulsado a través de una turbina y varios cilindros; a pesar de que Félix Wankel no tenía conocimientos sobre motores de combustión interna, él se dejó llevar por su intuición y se puso el firme propósito de construir un motor rotativo de combustión interna que cumpla los cuatro ciclos; Admisión, Compresión, Trabajo y Escape.

En 1924, cuando Félix Wankel tenía 22 años estableció un laboratorio en el cual llevaba a cabo la investigación y el desarrollo del motor rotativo; dichas investigaciones eran sustentadas y apoyadas por el Ministerio de Aviación y Corporaciones civiles alemanas ya que las mismas creían que una vez probado este motor iba a dar un gran giro en el crecimiento del desarrollo industrial alemán.

Después de varios años Wankel estableció un Instituto Técnico para el estudio de la Ingeniería, pero seguía de la mano con sus investigaciones del motor rotativo en su laboratorio. Una de las empresas manufactureras de motocicletas más reconocidas de la época NSU mostró gran interés en el concepto del motor rotativo y después de realizar una sociedad con su inventor Félix Wankel, concentraron sus esfuerzos en el desarrollo de un nuevo bloque para el mismo.

Sin embargo, antes de ello, NSU completó el desarrollo del compresor rotativo y lo aplicó al uso de un súper-cargador de tipo Wankel. Con este súper-cargador, un motor NSU estableció una nueva marca en velocidad para la categoría de 50 c.c. En el 1957, Wankel y NSU completaron el prototipo del motor rotativo tipo DKM que combinaba un bloque cilíndrico con un rotor triangular en su interior. Con ello, se dio al mundo el nacimiento del motor rotativo.

El DKM probó que el motor rotativo no era solamente un sueño. Pero su estructura, sin embargo, era complicada debido a que el bloque trocoide rotaba también lo que convertía el rotor en un poco impráctico al momento de utilizarlo. Un motor más práctico tipo KKM, se completó un año después.

En 1958 se desarrolló el prototipo del motor KKM cuyo bloque trocoide era fijo y era refrigerado por aceite, un sistema un poco complejo.

El presidente de Mazda, Tsuneji Matsuda vio en el motor rotativo un gran potencial y por este motivo comenzó a realizar negociaciones con NSU las cuales se consolidaron en 1961. En Mazda se organizó un comité de estudio y lograron obtener planos y un prototipo de un motor mono rotor de 400cc, el mismo que tenía varios inconvenientes como el excesivo desgaste producido por el bloque del motor.

En 1961 Mazda hizo su propio motor rotativo y evaluaba el desempeño de dicho motor con uno de la NSU, pero los dos presentaban el inconveniente del excesivo desgaste ocasionado por las marcas de rozamiento, lo cual lo volvían no apto para la comercialización.

En 1963 Mazda formó un departamento especializado en el estudio del Motor Rotativo, el cual fue dirigido por Kenichi Yamamoto y 47 ingenieros más,

especializados en diseño, pruebas y análisis de materiales, los mismo que tenían el objetivo de resolver los problemas más críticos del motor para poderlo producir o comercializar en masa; el bloque del motor presentaba marcas causadas por el rozamiento excesivo de los tres sellos del vórtice ya que causaban elevada fatiga y abrasión del material por lo que diseñaron unos sellos cruzados que solucionaban este tipo de problema, aunque estos sellos no fueron utilizados para la comercialización en masa, ayudaron a terminar pruebas exhaustivas de 300 horas a altas revoluciones del motor y además sirvieron de guía para las investigaciones posteriores.

Otro de los inconvenientes del motor rotativo Wankel era la emanación de humo blanco causado por el consumo de aceite, Mazda con la colaboración de dos empresas japonesas crearon un aceite especial que daban solución al sellado inadecuado del motor.

1.2.2. Rotativo KKM

A inicios de 1960 Mazda diseñó tres clases de motores rotativos:

- Dos rotores
- Tres rotores
- Cuatro rotores

El modelo duorotor fue diseñado ya que el modelo mono rotor estructurado por NSU tenía grandes fluctuaciones de torque ya que a altas revoluciones giraba de manera ideal, pero a bajas revoluciones producía mucha vibración y bajaba su torque.

El primer motor rotativo de dos rotores diseñado por Mazda fue el L8A; el cual tenía 399cc y fue utilizado en el prototipo deportivo L402A, el cual fue el originario del Cosmo Sport e inmediatamente se hicieron las pruebas respectivas.

En 1964 se diseñó otro motor duorotor de pruebas, el 3820 cuya cámara tenía 491cc que pronto se tradujo en el L10A, el cual pasó las pruebas para la producción en masa; Mazda viendo el desempeño de estos motores invirtió en importaciones de maquinaria para la manufactura de motores multirrotativos como el de dos, tres y cuatro rotores; los mismos que fueron equipados en el auto deportivo Mazda R16A y de inmediato comenzaron las pruebas de funcionamiento en la pista Miyoshi.

Figura 2. **Motor rotativo L10A**



Fuente: *Motores rotativos*. www.taringa.net/+autos_motos/motores-rotativo_13lfhd. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

Para el 30 de mayo de 1967 Mazda lanza al mercado el primer vehículo con motor rotativo, el Cosmo Sport equipado con un motor 10A de 441cc que posee sellos de carbono, un carburador de 4 cuerpos que mantenía la estabilidad en

todas las condiciones de manejo y velocidad y cada rotor poseía una bujía las cuales daban equilibrio al vehículo en todas las condiciones climáticas y de carretera, este vehículo fue bien recibido en el medio automovilístico por su diseño y desempeño.

1.2.3. Rotativo 13B

El motor duorotor 13B fue lanzado al mercado en 1973 con una cámara de 672cc y diseñado para reducir emisiones ya que poseía catalizadores de última tecnología.

Este motor poseía un mercado muy pequeño ya que fue pensado para vehículos deportivos, pero gracias a sus prestaciones se empezaron a implementar en coupés y sedanes en donde su mercado se expandió debido a los fanáticos automovilistas.

Figura 3. **Motor rotativo 13B**



Fuente: *Motor rotativo 13B Mazda RX7*. autos.hendyla.com/motor-13b-rotativo-mazda-rx7-24280.html. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

En 1979 Mazda empezó a vender estos vehículos a Estados Unidos cuando ellos estaban adoptando la ley Muskie de emisiones vehiculares, la cual era muy estricta; pero Mazda desde 1966 se preocupó por ese aspecto y ya había empezado investigaciones de tecnología en catalizadores eficientes para la reducción y control de emisiones, los mismos que fueron adaptados en las producciones de sus vehículos un año antes de realizar el trato o exportación con Norteamérica.

1.2.4. Modelo Lucre

Este vehículo de la segunda generación de Lucre fue lanzado al mercado en 1973 junto con el motor rotativo 13B; en esta época algunos países estaban pasando por crisis políticas ya que usaban el petróleo como arma para la exportación de este, por lo cual la industria automovilística se dedicaba a la reducción del consumo de combustible de sus motores.

Mazda en esa época lanzó el proyecto fénix, que en su primera etapa de investigación debió lograr un 20 % de ahorro en el consumo de combustible, pero se sobrepasaron las expectativas consiguiendo así el 40 %; con estos resultados Mazda lanzó al mercado el deportivo RX7 en 1978 con un sistema catalítico especialmente para motores rotativos que colaboraba con la reducción del consumo y demostró a los fanáticos que el motor Wankel había sido construido para quedarse en el mercado.

1.2.5. Rotativos con turbo

Se investigó el uso de turbocargadores en los vehículos equipados con motores rotativos y se logró conocer varios modelos a lo largo de la historia de estas inusuales máquinas térmicas.

1.2.5.1. Cosmo Re-Turbo

El primer rotativo que implementó turbo fue el Cosmo re-turbo, lanzado en 1982, diseñado con un sistema de escape que abastecía las necesidades del turbo cargador e implementaron en este motor la inyección electrónica, con lo que se convirtió en el modelo comercial más rápido del mercado.

1.2.5.2. RX7 Savanna

Este rotativo perteneciente a la familia 13B REW, fue construido en 1985 y diseñado con la finalidad de mejorar las prestaciones y desempeño en la conducción por lo que se implementó en su ensamblaje doble sistema de turbo.

Figura 4. **Motor 13B REW**



Fuente: *Prototipo del motor Mazda RX7.* www.pinterest.com/pin/205969382946349897/.

Consulta: 2 de noviembre de 2020.

1.2.5.3. Eunos Cosmo

En 1999 se lanzó al mercado este motor trirotor 20B REW, el cual en comparación a potencia era similar a un motor alternativo de 8 cilindros y podía

llegar a alcanzar las prestaciones de un motor alternativo de 12 cilindros; en pruebas de automovilismo este nuevo concepto de motor probó ser suficientemente poderoso.

Los motores rotativos de biturbo que fueron implementados en el Eunos Cosmo y el RX7 sabana fueron diseñados con tecnología especial, la cual nos permite usar los dos sistemas de turbo en secuencia; el primer sistema es activado a bajas revoluciones y el segundo se compromete cuando el vehículo ha alcanzado grandes velocidades; este tipo de tecnología se traduce en mayor potencia para el motor y menor resistencia en el sistema de escape, lo que nos brinda mayores prestaciones.

Figura 5. **Motor rotativo 20B REW**



Fuente: *Motor rotativo tipo 20B REW*. rotarypowercrew.wordpress.com/2012/08/15/20b-rew-rotary-engine/. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

1.3. Primeros fabricantes de vehículos híbridos

Cuando empezó el siglo XX el ser humano ya conocía el automóvil, y por entonces, los motores eléctricos y de vapor eran los reyes de las carreteras,

frente a los torpes e ineficientes motores de combustión interna de gasolina o bencina. Los eléctricos eran silenciosos y económicos, gozaban de buena aceptación.

Sin embargo, tenían un gran problema, la tecnología de las baterías eléctricas estaba en pañales, la autonomía era muy reducida, tiempos de recarga lentos y se añadía mucho peso al conjunto, había que buscar una forma de eliminar esta desventaja y de ahí nacieron los coches híbridos.

En 1895 un periodista francés dijo que la combinación de petróleo y electricidad daría muchas sorpresas en el futuro. Es más, Nikolas August Otto, uno de los padres del automóvil, llegó a decir: el motor eléctrico es un genial invento que seguramente un día complementará al motor de gasolina.

La invención de la batería recargable consiguió eliminar el problema de las primeras pilas, que al agotarse eran inútiles. Hacia finales de siglo los motores eléctricos movían turismos, transportes urbanos y también camiones. Fue en 1890 cuando W.H. Patton tuvo la idea de hacer un tranvía con propulsión híbrida en serie, con un motor de gas y eléctricos.

En 1896 los británicos H. J. Dowsing y L. Epstein patentaron ideas sobre hibridación en paralelo, que posteriormente fueron utilizadas en Estados Unidos para mover vehículos grandes, como camiones o autobuses. Dowsing llegó a montar en un Arnold una dinamo que o bien arrancaba el motor de gasolina, propulsaba o bien recargaba baterías, tal vez fue el primer híbrido de la historia.

El español Emilio de la Cuadra fundó en 1898 una empresa, Compañía General Española de Coches Automóviles E. de la Cuadra Sociedad en Comandita, para fabricar vehículos junto a los suizo Carlos Vellino y Marc Charles

Birkigt Anen. En 1899 la gama inicial de cuatro modelos constaba de un carruaje biplaza, una camioneta, un camión y un autobús, todos eléctricos.

Opcionalmente podían tener un motor de gasolina unido a un generador que se encargaba de recargar las baterías constantemente. Los acumuladores eléctricos dieron problemas y no tuvo éxito su presentación comercial.

Los hermanos belgas Henri Pieper y Nicolás Pieper construyeron en 1899 su Voiturette, con un motor de gasolina unido a uno eléctrico bajo el asiento. A velocidad de crucero el motor eléctrico generaba electricidad para las baterías, para luego dar potencia extra al subir pendientes o acelerar. Se dedicaron a su comercialización hasta vender la empresa a Henry Pescatore.

Mientras tanto, en Estados Unidos la Batton Motor Vehicle Corp preparó un camión híbrido que utilizaba la patente de L. Epstein, pero poco más se sabe de este modelo. En 1900 fue presentado el primer autobús híbrido, en el mismo país, por la empresa Fischer.

También en 1899 un empleado de Jacob Lohner & Co hace su primer diseño de un coche híbrido, con motor eléctrico y de gasolina. Su nombre era Ferdinand Porsche y tenía 24 años. Su diseño consistía en un motor de gasolina que giraba a velocidad constante, alimentando una dinamo, para cargar unas baterías eléctricas. Además, el arranque del motor de gasolina se hacía mediante la misma dinamo.

La energía eléctrica se utilizaba para mover motores eléctricos en el eje delantero metidos dentro de las ruedas, el excedente se almacenaba. Es considerado el primer coche híbrido de producción del mundo y el primer vehículo

de tracción delantera. Tenía 64 km de autonomía sólo con baterías. El Lohner-Porsche también se conoce como *Semper Vivus* (siempre vivo).

No había conexión mecánica entre el motor térmico y las ruedas, así que no necesitaba transmisión o embrague, su rendimiento era impresionante: 83 %. Se mostró por primera vez el 14 de abril de 1900 en la Exposición Mundial de París, sorprendiendo gratamente a los entusiastas del automóvil. Se fabricaron 300 unidades del Lohner-Porsche y catapultó como ingeniero a Porsche.

Figura 6. **Lohner-Porsche**



Fuente: KIERSE Matías. *120 años del Lohner Porsche*. www.secret-classics.com/en/120-years-of-lohner-porsche/. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

Hubo una versión de carreras e incluso una 4×4 en 1903. Es decir, el primer coche con tracción total fue un híbrido. Aunque la tecnología de estos vehículos era fiable no podía competir en costes con los coches de gasolina, los Lohner-Porsche se dejaron de fabricar en 1906.

La patente fue vendida posteriormente a Emil Jellinek-Mercedes, que trabajó posteriormente en el híbrido *Mercedes Electrique Mixte*, comercializado por Daimler-Motoren-Gesellschaft. Si seguimos por otro camino de la historia, llegaríamos a la Mercedes-Benz actual y al grupo Daimler.

1.4. Principales vehículos híbridos y eléctricos en el mercado

En la actualidad chinos, japoneses, coreanos y alemanes se encuentran en la carrera para hacerse entre los primeros puestos de la fabricación del vehículo eléctrico y está en su punto álgido y lo que prima es el nivel de competitividad de cada marca.

Aunque hoy en día el liderazgo lo tiene el fabricante estadounidense Tesla, es el único de este país que está en el ranking. El resto de las posiciones se las rifan los asiáticos y dos alemanes, BMW y Volkswagen.

La viabilidad comercial de los vehículos eléctricos, tanto en términos de precio como de infraestructura de carga, ha seguido creciendo a ritmo constante hasta ahora, y quien ofrezca un modelo con las mejores prestaciones y a un precio ajustado ganará la partida.

Por el momento, estos son los fabricantes líderes actuales del mercado. Son los diez primeros que están preparándose para la nueva era de la movilidad eléctrica.

- Tesla

Es el líder indiscutible en fabricación y desarrollo de vehículos eléctricos. Ha marcado los hitos para la movilidad eléctrica desde su primera apertura en

2003. Actualmente, la compañía representa el 12 % de todas las ventas de vehículos eléctricos enchufables del mundo, generando unos ingresos en 2018 de casi 20 millones de euros.

Tesla también es el más competitivo, entre otras razones, porque es parte del movimiento de código abierto, lo que significa que cualquier avance que Tesla haga para la industria de los vehículos eléctricos estará abierto a empresas competidoras. Elon Musk, CEO y fundador de Tesla, dijo que seguía el ejemplo de Nils Bohlin, quien inventó el cinturón de seguridad de tres puntos en 1955 y decidió que era demasiado importante para no compartirlo. El Modelo 3 de la firma está disfrutando de un éxito desenfrenado en EE. UU., al convertirse en el dominante en el mercado de automóviles premium y alcanzar la puntuación de seguridad más alta jamás entregada por la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en Carreteras de EE. UU.

Figura 7. **Tesla S**



Fuente: *El nuevo Tesla Model S*. <https://carbuzz.com/news/all-new-tesla-model-s-could-look-like-this/>. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

- **BYD**

Build Your Dreams (BYD) Auto es una filial de la corporación multinacional china, BYD Co Ltd, con sede en Xi'an, China. La compañía generó 16 700

millones de euros en 2018. Fue fundada en 2003 cuando la empresa matriz de BYD Auto compró Tshinchuan Automobile en 2002.

En septiembre de 2016, la compañía se convirtió en el tercer mayor fabricante de vehículos eléctricos enchufables y en el mismo año comenzó la producción de vehículos eléctricos puros para su uso en Pekín.

- BAIC

BAIC Motor es una empresa estatal china. La compañía lleva fabricando SUV, vehículos comerciales, agrícolas y militares bajo el paraguas del Grupo BAIC desde 2010. También ha trabajado con la tecnología de Nissan y Mercedes para desarrollar su línea actual de vehículos.

BAIC generó 17 300 millones de euros durante 2018 y ha invertido 2 500 millones en el desarrollo de vehículos eléctricos inteligentes y conectados para el futuro cercano bajo una nueva marca: BEIJING.

- BMW

BMW i es una filial de BMW fundada en 2011 después de que el fabricante de automóviles anunciara el desarrollo de sus series i3 e i8 en 2009. A partir de noviembre de 2016, BMW i ha lanzado cuatro modelos que comparten tecnología con la línea automotriz de BMW para garantizar la fiabilidad y la continuidad del fabricante del vehículo.

Dos años después de llegar a los mercados en 2016, el i3 se convirtió en el tercer vehículo totalmente eléctrico más vendido del mundo. También se ha fabricado con un 85 % de material reciclables, y aproximadamente 27 botellas

de plástico usadas se destinan a la construcción de asientos y ciertas partes de las puertas.

Figura 8. **BMW i3**



Fuente: *BMW i3 2020*. www.motortrend.com/cars/bmw/i3/2020/?galleryimageid=motortrend-2248544. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

- **NISSAN**

El japonés Nissan se ha coronado como el fabricante que lanzó el primer vehículo eléctrico producido en masa y dirigido a familias que buscan ser más responsables con el medio ambiente: el Nissan Leaf. Ha utilizado todos los sistemas de los modelos tradicionales, así como una estética tradicional para su serie eléctrica, pero a la vez, ha combinado este enfoque con la tecnología de batería de última generación para ofrecer a su modelo Leaf E + una capacidad de autonomía mucho mayor.

El Nissan Leaf original ha sido el vehículo eléctrico más vendido en todo el mundo hasta hace poco, con ventas que alcanzaron un máximo histórico de 87 000 unidades en 2018.

Figura 9. **Nissan Leaf**



Fuente: *El Nissan Leaf e +*. www.motorpasion.com/nissan/nissan-leaf-e-version-prestacional-compacto-electrico-esta-a-venta-espana-40-860-euros. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

- **WOLKSWAGEN**

El fabricante de automóviles alemán que creó el Escarabajo (VW Beetle) ha producido una variante eléctrica de otro de sus modelos más exitosos, el VW Golf. En 2016, la compañía anunció su intención de expandir su línea de vehículos a 30 modelos eléctricos para satisfacer la demanda esperada que iban a traer las nuevas regulaciones en ciudades y países y los incentivos financieros que se iban a lanzar. Volkswagen desarrolla su tecnología de batería en el Centro de Excelencia para Celdas de Batería en Salzgitter, Alemania, con un equipo de 300 científicos.

El e-Golf ha sido elogiado como un eléctrico de nivel de entrada fuerte ya que su diseño y utilidad se han basado en vehículos más tradicionales, lo que lo convierte en un pequeño salto para pasar a los nuevos modelos, según la revista

Carmagazine. La familiaridad, por supuesto, será esencial para que los vehículos eléctricos tengan un impacto diverso entre generaciones y mercados.

- **HYUNDAI**

El Kona EV actualmente tiene una lista de espera de más de 30 000 clientes, y la creciente demanda ha puesto a Hyundai bajo presión para invertir en una mayor producción de baterías y adquisición de recursos.

El vehículo es un SUV diseñado en torno a una apariencia robusta y espacio suficiente para ser utilizado como un vehículo familiar. El sitio web de Hyundai ofrece una amplia gama de extras opcionales para personalizar el vehículo según los requisitos del usuario.

Figura 10. **Hyundai Kona**



Fuente: *Hyundai Kona 2017*. www.autobild.es/coches/hyundai/kona/kona-5-2017/16-t-gdi-177cv-awd-dct-tecno/ficha-tecnica. Consulta: 2 de noviembre de 2020.

- KIA

Kia, fundada en 1944 y con sede en Seúl, se convirtió en el segundo mayor fabricante de automóviles en Corea del Sur en 2015. Fue comprada por Hyundai en 1998, cuando se hizo con el control del 51 % en participaciones de la compañía. Sin embargo, hoy Hyundai Motor Co posee una participación del 33,88 % valorada en más de 5 400 millones de euros, pero Kia es una subsidiaria de su compañía matriz en común, Hyundai Motor Group. A su vez, Kia posee más de 20 participaciones minoritarias en las filiales de Hyundai.

En el espacio de la movilidad eléctrica, la compañía suministra vehículos asequibles pero robustos a escala global. Su Kia Soul EV, un gemelo de su contraparte no eléctrica, el Focus Electric, tiene una batería capaz de viajar 160 kilómetros como un vehículo urbano relativamente compacto.

- MITSUBISHI

Mitsubishi es una multinacional japonesa fundada en 1970. En 2009, comenzó a vender el i-MiEV un año antes de lo previsto. Inicialmente, el fabricante de automóviles había planeado comercializarlo bajo el sistema de *leasing* antes de su lanzamiento en 2010. Desde entonces, la compañía ha anunciado su intención de incorporar cinco modelos eléctricos más a su rango y planea reducir el precio promedio de sus vehículos a alrededor de los 19 000 euros.

El Mitsubishi i-MiEV incluye una MiEV Power Box que permite que el vehículo alimente dispositivos domésticos en caso de emergencia, un ejemplo de la manera en que los vehículos eléctricos en general se consideran baterías temporalmente potenciales para su uso en la red eléctrica.

- CHERY

Chery es un fabricante de automóviles chino que compite con otras marcas estatales más grandes del país. La compañía ha pronosticado ventas de 20 000 unidades en 2020 a medida que crece la demanda. En 2012, Jaguar Land Rover formó una empresa conjunta con Chery para producir vehículos Jaguar y Land Rover para el mercado chino. Chery produjo su primer EV en 2009, el Chery S18.

El último modelo de su crossover, el Tiggo E, tendrá capacidades de conducción automatizadas, así como un volante interactivo que se puede plegar para convertirse en un controlador de juego mientras el vehículo está en modo de conducción automática.

Tabla I. **Vehículos eléctricos más competitivos del mercado**

Modelo	Autonomía (km)	Precio (euros)
Model S	595	95 000
BYD yuan EV535	412	14 800
BAIC EU5 R600	416	17 585
BMW i3	310	40 000
Nissan Leaf	270	32 000
Volkswagen e-Golf	128	30 000
Hyundai Kona EV	450	20 517
Kia Soul EV	450	43 000
Mitsubishi i-MiEV	100	21 000
Chery Tiggo E	400	13 300

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

El año 2019 ha sido clave para la consolidación de los vehículos híbridos, en 2020 todo apunta a que se masificarán sus ventas. Por el momento estos son los líderes en el mercado de los mejores vehículos híbridos, sin enchufe, a lo largo de 2020.

- Ford Mondeo Híbrido

Por tamaño y prestaciones la versión híbrida del Ford Mondeo no cuenta con un rival directo en el mercado. Su propulsor gasolina-eléctrico de 187 CV, aparejado a una caja de cambios automática, de seis velocidades, combina unos consumos muy ajustados es de los pocos híbridos que en carretera consigue igualar el gasto de carburante de un diésel similar con un rendimiento notable.

- Hyundai Kona Híbrido

Tras la incorporación de la variante híbrida, el Hyundai Kona es el único todo camino del mercado que emplea versiones gasolina, diésel, eléctrica e híbrida.

En lo que a la mecánica respecta, el Hyundai Kona está por un motor atmosférico de gasolina de 1,6 litros de cilindrada, con 105 CV de potencia y 147 Nm de par máximo. Asociado a esta mecánica hay un motor eléctrico de 43,5 CV y 170 Nm de par máximo. En total desarrolla una potencia conjunta de 141 CV y 265 Nm de par motor.

Sin duda, este Hyundai es uno de los SUV híbridos más recomendables del momento.

- Honda CR-V Híbrido

Desde el punto de vista técnico, este Honda recurre a la tecnología i-MMD, siglas de Intelligent Multi-Mode Drive, que consta de cuatro partes esenciales: un motor de gasolina de 2,0 litros, un propulsor eléctrico, un generador; y una batería de iones de litio, con una capacidad aproximada de 1 kWh.

Este sistema consta con tres modos de funcionamiento: 100 % eléctrico, híbrido y sólo con el motor de combustión. El primero puede seleccionarse mediante un botón, siempre y cuando la carga de la batería sea suficiente. En fases de exigencia media, o bien cuando no hay energía suficiente en la batería, entra en acción el modo híbrido, que utiliza el motor térmico para generar electricidad; no obstante, en cuanto se sale a carretera, lo normal es que sea el propulsor térmico el que mueva las ruedas por sí solo.

- Kia Niro HEV

El motor térmico es un 1,6 de 105 CV; mientras que el eléctrico puede mover el coche por sí solo y ayuda al primero en momentos de alta aceleración, sumando juntos 141 CV de potencia máxima. El cambio es automático de doble embrague de seis velocidades.

- Renault Clio E-Tech

A principios de 2020 la firma del rombo ha presentado el Renault Clio E-Tech, una versión híbrida del utilitario francés dotada de una mecánica híbrida compuesta por un motor de gasolina, de 1,6 litros, combinado con dos motores eléctricos: uno que ejerce como motor de arranque y, el otro, acoplado en una

innovadora caja de cambios, sin embrague, cuyo desarrollo viene de la experiencia de la marca gala en la Fórmula 1.

Todo ello se completa con una batería de 1,2 kWh de capacidad que permite al Clio E-Tech recorrer hasta el 80 % del tiempo en modo eléctrico, a una velocidad de entre 70-75 km/h. La potencia total del conjunto es de 140 CV.

- Toyota CH-R

El Toyota C-HR se ha convertido en todo un éxito de ventas desde su lanzamiento. Su espectacular diseño y la ecológica mecánica híbrida con etiqueta ECO han conquistado a numerosos compradores. Además, se acaba de presentar una versión mejorada a nivel estético o de equipamiento, y que también suma un motor más potente.

Precisamente, la gama mecánica del Toyota C-HR 2020 mantiene la versión 1,8 híbrido de 122 CV y añade la más potente 2,0 híbrido de 184 CV. Cabe destacar que este todo camino está desarrollado sobre la plataforma TNGA, al igual que el compacto Corolla, equipa una suspensión trasera multibrazo y tracción a las ruedas delanteras.

- Lexus UX

Lexus sigue apostando por los SUV de diseño atrevido, como el NX y, en menor medida, el lujoso RX. Y lo decimos porque su primer todo camino compacto, el Lexus UX, también destaca en este aspecto, aunque no brilla por espacio para los pasajeros ni para su equipaje el maletero es de 320 litros en los 4x2 y disminuye a 283 litros en las versiones 4x4.

Este modelo se ofrece con una mecánica híbrida de 184 CV y la transmisión automática por engranajes planetarios. Sobresale por su bajo consumo de combustible desde 5,3 litros/100 km, especialmente en uso urbano, y se beneficia de la etiqueta ECO. Otras cualidades del UX son el confort de marcha y un buen comportamiento dinámico, gracias a la plataforma GA-C y la suspensión trasera multibrazo de serie.

- Subaru Forester

Este Subaru es un todo camino de tamaño medio sólo está a la venta en España con un sistema de propulsión híbrido compuesto por un bloque gasolina de 150 CV y otro eléctrico de 17 CV. El de gasolina es atmosférico, tiene disposición bóxer e inyección directa, mientras que el eléctrico está integrado en el sistema de transmisión de variador continuo *Lineartonic*, y está alimentado de una batería de iones de litio de 0,6 kWh que se ubica en el maletero. La tracción es siempre permanente en las cuatro ruedas.

Gracias a la inclusión del bloque eléctrico y de sus baterías, la nueva generación del Forester, que mantiene las mismas medidas 4,63 m de largo; 1,82 m de anchura y 1,73 m de altura que la generación anterior, puede circular a un máximo de 40 km/h utilizando únicamente el motor eléctrico.

- Toyota Prius

El popular modelo híbrido recibe una actualización que le permite estrenar faros delanteros y traseros, en ambos casos con tecnología led. Los paragolpes también se han actualizado.

Pero el principal cambio llega en su parte técnica, ya que, por primera vez en su historia, el Prius puede contar con tracción total. Se trata de un sistema eléctrico inteligente denominado All Wheel Drive-Intelligence que cuenta con un motor eléctrico adicional de 5,3 kW de potencia. La tracción total se activa al arrancar hasta 10 km/h, o cuando el vehículo percibe condiciones de baja adherencia entre 10 y 70 km/h.

2. MOTOR WANKEL Y VEHÍCULOS HÍBRIDOS

2.1. Motores Wankel

Se recopiló toda la información relacionada al motor Wankel con el objetivo de familiarizarnos con su composición y funcionamiento en la industria automotriz.

2.1.1. Descripción general del motor

Mientras en un motor alternativo se efectúan sucesivamente cuatro trabajos diferentes (admisión, compresión, combustión y escape) en el mismo cilindro, en un motor Wankel se desarrollan los mismos cuatro tiempos, pero en lugares distintos de la carcasa (bloque o estator). Concretamente, el estator es una cavidad con una forma que recuerda a un ocho, 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.

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 tres 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 tres 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 expansionar 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.

Figura 11. **Motor Wankel**



Fuente: *Partes del motor Wankel*. www.actualidadmotor.com/ventajas-y-desventajas-del-motor-wankel/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

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 tres a dos, 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.

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.

Figura 12. **Motor Wankel como motor de encendido por compresión**



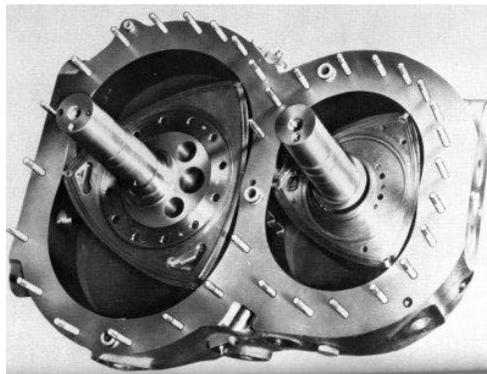
Fuente: *Motor Wankel Diesel del Rolls Royce R6.*

www.pinterest.com/pin/468867011176027862/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

Como en los motores de pistón, el momento de giro experimenta un desarrollo variable 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.

Figura 13. **Motor Wankel de Rolls Royce encendido por compresión**



Fuente: *Carcasa Rolls Royce rotativo*. www.rx8club.com/general-automotive-49/rolls-royce-wankel-rotary-diesel-266645/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

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.

2.1.1.1. Ciclo termodinámico del motor Wankel

La termodinámica es una ciencia que estudia los procesos de transformación de trabajo en calor y viceversa, estableciendo en primer lugar las equivalencias entre trabajo y calor, y determina en qué condiciones podemos obtener trabajo a partir de energía térmica.

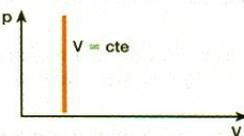
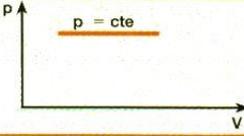
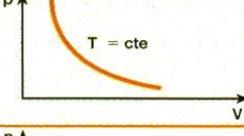
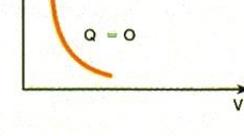
El motor Wankel es un motor térmico capaz de transformar el calor en energía mecánica. El calor necesario para conseguir que funcione la máquina térmica generalmente proviene de la combustión de un combustible, este calor es absorbido por un fluido que, al expandirse, pone en movimiento las distintas piezas de la máquina.

El rendimiento de una máquina térmica es el cociente entre la energía mecánica producida y el calor tomado del foco caliente. Las máquinas térmicas tienen rendimientos muy bajos, ya que tan sólo una pequeña parte del calor producido se puede transformar en trabajo, y el resto se utiliza en calentar el fluido que pone en movimiento a la máquina, en vencer el rozamiento de las piezas que la componen o simplemente se disipa al ambiente en forma de calor.

No se puede efectuar trabajo sin absorber calor de una fuente que se encuentre a mayor temperatura y sin ceder calor al exterior que estará a menor temperatura. Para que el motor térmico pueda realizar un trabajo neto, se necesita que trabaje en dos focos de calor un foco caliente del cual extraemos calor Q_1 o Q_c y de un foco frío al que cedemos calor Q_2 o Q_f cuya diferencia nos da como resultado el trabajo realizado.

Las transformaciones de un sistema termodinámico desde su estado inicial a uno final pueden tener lugar en distintas formas que se representan en los diagramas de presión y volumen descritos a continuación.

Figura 14. **Transformaciones de un sistema termodinámico**

Transformación	Representación gráfica	Ecuación
Isocora ($V = \text{cte}$)		$p = k T$ (Segunda ley de Gay-Lussac)
Isobara ($p = \text{cte}$)		$V = k T$ (Primera ley de Gay-Lussac)
Isoterma ($T = \text{cte}$)		$p V = \text{cte}$ (Ley de Boyle-Mariotte)
Adiabática ($Q = 0$)		$p V^\gamma = \text{cte}$ (Ecuación de Poisson)

Fuente: *Nociones de termodinámica*. sites.google.com/site/federubiotecindbachillerato/home/2o-bachillerato/mquinas/cuestiones-iniciales-de-termodinamica. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

A continuación, se describe cómo se realiza el ciclo de trabajo del motor Wankel en un diagrama termodinámico P-V.

- Admisión Isobara

Donde la aspiración de mezcla es a presión constante o trabaja a presión atmosférica durante el proceso de admisión, los puntos entre los que se identifican son: 0, 1, 6, 5.

- Compresión Adiabática

El fluido interno no intercambia calor con el medio exterior, por lo que, la transformación es considerada a calor constante, el trabajo en el diagrama es entre los puntos 1-2-5-6-1.

- Transformación Isocora

Al saltar la chispa de la bujía se inflama rápidamente la mezcla aire-combustible comprimida hasta P2, lo que produce una cantidad de calor Q1, al ser tan rápida la transformación el rotor no ha girado y el volumen de la cámara permanece constante.

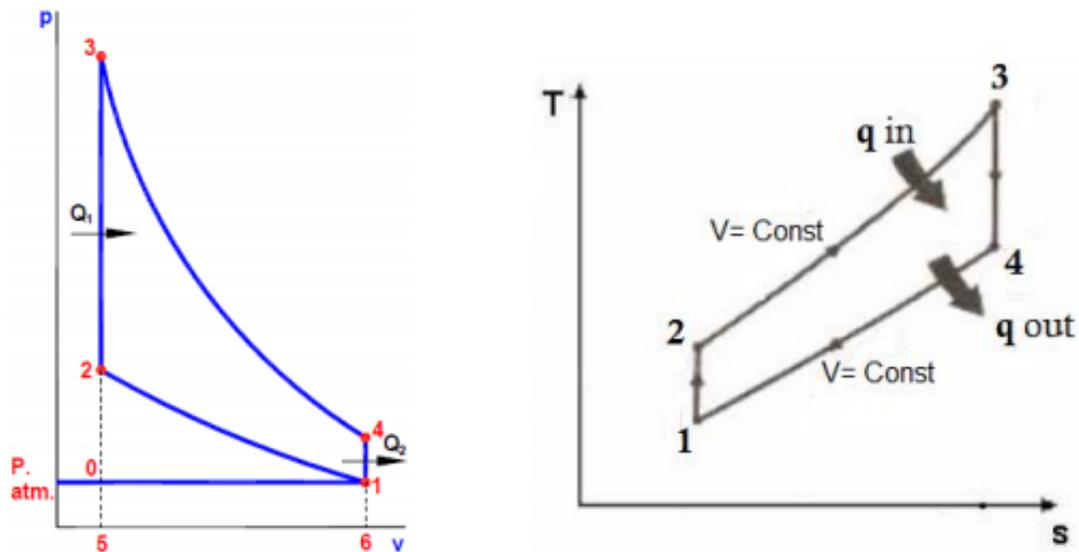
- Expansión Adiabática

A la vez, se produce un trabajo adiabático, debido a la rapidez con que gira el rotor y los gases quemados no tienen tiempo para intercambiar calor con el exterior, es decir, sufren una transformación a calor constante.

- Escape Isocora

Al descubrirse rápidamente la lumbrera de escape, se expulsan los gases quemados luego de la combustión sin dificultad, y a la vez, existe una pérdida de calor Q_2 , con lo cual, se considera que es a volumen constante. De esta manera, el calor que no se ha convertido en trabajo es cedido a la atmósfera.

Figura 15. Diagrama termodinámico P-V y T-S motor Wankel



Fuente: *Motor Wankel nacimiento*. mecanicaparatodosblog.wordpress.com/2018/10/25/motor-wankel-nacimiento-evolucion-rx9/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

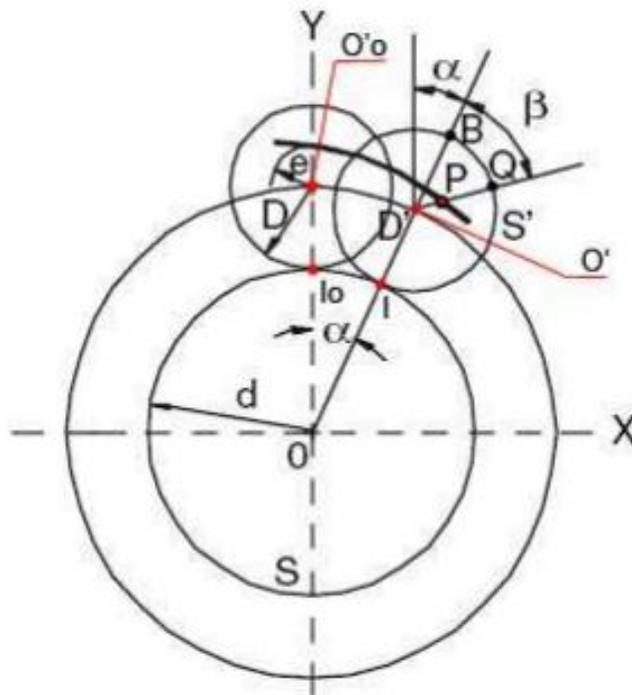
2.1.1.2. Geometría del estator

El modelo matemático de función trocoide se usa para definir el perfil de la superficie del estator del motor Wankel. Una trocoide es una variación de la función conocida como cicloide, dicha función es la curva generada por un punto cualquiera del perímetro de una circunferencia generatriz que rueda, sin deslizar,

sobre el perímetro de una circunferencia base, si dicho punto no se encuentra integrado en el perímetro de la generatriz la función será trocoide. La generatriz puede rodar en el interior, caso conocido como hipocicloide e hipotrocoide para cada caso, o en la exterior epicicloide e epitrocoide.

La gran innovación del motor Wankel consistió en conseguir una forma geométrica del bloque motor o estator que permitiera al pistón realizar un movimiento rotativo generando un volumen variable de igual forma que un motor alternativo clásico.

Figura 16. **Generación del perfil epitrocoidal**



Fuente: *Dimensiones básicas*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/dimensiones-basicas>.

Consulta: 4 de noviembre de 2020.

La curva que define la forma del estator del motor Wankel se denomina epitrocoide. Como se observa en la figura siguiente, para generar un perfil epitrocoidal, se debe hacer rodar sin deslizar un círculo S' (o circunferencia generatriz) de diámetro D , sobre un círculo base S de diámetro d , con $d > D$; y siendo el punto P , el que genera la curva deseada, un punto situado en el interior de la circunferencia generatriz.

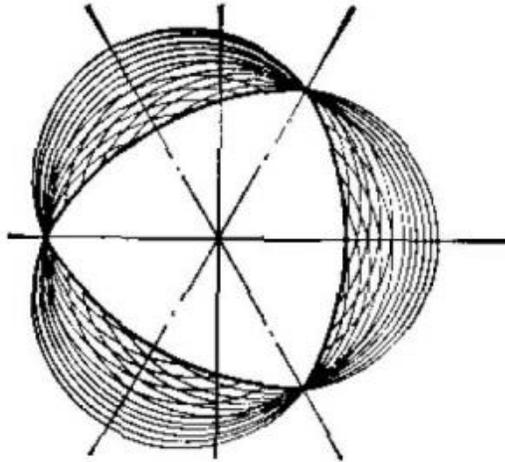
Para la generación de perfiles epitrocoidales se puede tomar un punto cualquiera del interior del círculo, con la única restricción de que la razón entre los diámetros de la circunferencia fija y de la móvil sea un número entero. De esta forma, se asegura que la curva se cerrará tras una vuelta completa de la circunferencia generatriz sobre el círculo base.

Este mismo cociente, también indica el número de lóbulos de la epitrocoide. El motor Wankel está formado por un estator de dos lóbulos y un rotor de tres vértices, lo que implica que el cociente entre diámetros $d/D=2$.

2.1.1.3. Geometría del rotor

La geometría del rotor se genera mediante el uso de curvas envolventes. Una envolvente es una curva tangente en cada punto a una familia de curvas determinada.

Figura 17. **Perfil del rotor a partir de curvas trocoides**



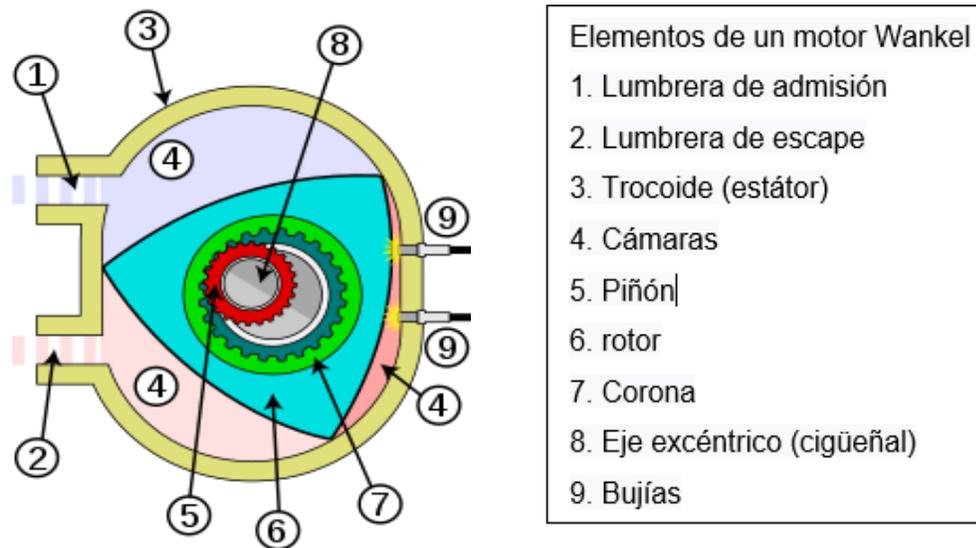
Fuente: *Envolvente interna peritrocoide*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/dimensiones-basicas>. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

2.1.2. Partes principales

El motor rotativo Wankel difiere del motor alternativo ya que no posee pistones y cilindros; sin embargo, está constituido por una carcasa que tiene forma geométrica epitrocoide, en la cual se encuentra a su alrededor las cámaras para la refrigeración mediante agua y tiene tallados los orificios para las bujías o el inyector de combustible.

Dentro de esta carcasa se mueve el rotor que tiene forma de triángulo equilátero curvilíneo que gira excéntricamente manteniendo sus vértices contacto en todo momento con la carcasa y para obtener una excelente hermeticidad posee el rotor unos patines. A demás posee en su interior una corona dentada que se conecta directamente con un piñón del árbol.

Figura 18. **Partes del motor Wankel**



Fuente: *Diagrama de partes motor Wankel*. <https://como-funciona.co/un-motor-wankel-o-rotativo/Consulta: 4 de noviembre de 2020>.

El motor Wankel posee una constitución sencilla al igual que un motor de dos tiempos, además es ligero y compacto ya que posee un menor número de piezas mecánicas en movimiento las mismas que nos ayudan a obtener una mayor velocidad de giro ya que no interviene la inercia de las masas oscilantes que se producen en el motor alternativo.

A continuación, se detallará cada una de las partes o elementos mecánicos que conforman al motor Wankel:

2.1.2.1. Estator

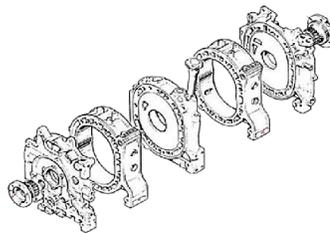
El estator del motor rotativo coloquialmente llamado carcasa es equivalente al conjunto de bloque y culata de un motor alternativo.

Para un motor de un solo rotor, el estator está formado por dos partes:

- Estator Periférico
- Estator Lateral

El periférico, que envuelve al rotor; y las otras dos, laterales, una a cada lado del rotor.

Figura 19. **Estator**



Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

- Estator Periférico

Tiene forma epitrocoide en su camisa o cara interior; aquí se encuentran ubicadas las lumbreras de admisión y escape al igual que los orificios para las bujías y los conductos para el paso de refrigerante.

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.

El estator está sometido a grandes variaciones de presión y temperatura ya que fácilmente se logran saltos de 100 grados centígrados producto de los cuatro tiempos del motor y la presión por motivo de los gases quemados y la fricción producida por los segmentos debido a la fuerza centrífuga; con esto se consigue un desgaste en lugares focalizados de la superficie interior del estator.

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.

Figura 20. **Estator periférico**



Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

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.

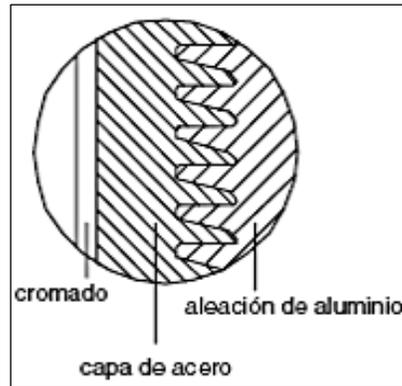
Cuando se utilizan aleaciones de aluminio, se procede a cromar la superficie interior del estator con la finalidad de aumentar su resistencia al desgaste. Concretamente, se recubre el interior del estator con una capa de acero y, posteriormente, se lleva a cabo el cromado de esta superficie. La superficie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

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.

Figura 21. **Superficies del estator periférico**



Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

- **Estator Lateral**

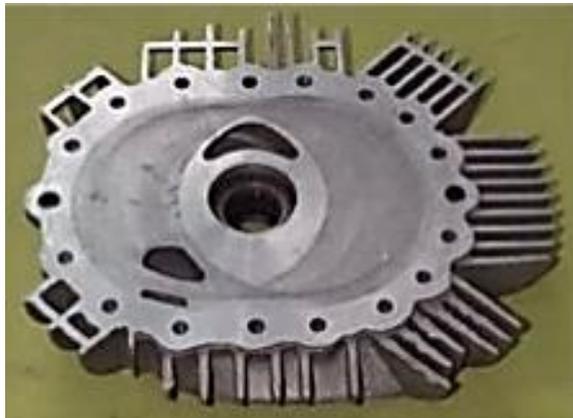
Las caras laterales del estator deben ser muy deslizantes para que los segmentos de las esquinas y de los laterales del rotor puedan mantener un contacto continuado sin producirse un desgaste prematuro. Al igual que la parte periférica del estator, las tapas laterales están sometidas a grandes presiones 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 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 para mejorar sus características antifricción.

Figura 22. **Estator lateral**



Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

2.1.2.2. 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 su interior posee un espacio hueco ya que aloja su engranaje y cojinete, los cuales engranan con un piñón del árbol motor para transmitir el movimiento de giro.

Su forma es triangular de lados iguales ligeramente convexos; el rotor es mecanizado con la forma epitrocoide un poco más pequeña que la del estator; con eso se consigue los pequeños espacios entre estos dos.

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

En cada uno de los tres lados del rotor se ha rebajado en el centro el material del mismo ya que ahí se forma y se da más volumen a la cámara de combustión por lo que podemos mencionar que estos motores rotativos funcionan con 3 cilindros independientes ya que cada uno de estos realiza un ciclo de trabajo completo en cada revolución del motor; estas hendiduras influyen notablemente en el rendimiento de combustión.

Figura 23. **Rotor**



Fuente: *Motor rotativo y motor reciprocante*. www.pruebaderuta.com/motor-rotativo-y-motor-reciprocante.php. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

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.

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 empleado 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 esferoidal así sea su 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.

Figura 24. **Partes principales del rotor**



Fuente: *Construcción básica motor Wankel*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/yoediver>.

Consulta: 5 de noviembre de 2020.

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.

2.1.2.3. Cigüeñal excéntrico o Árbol motriz

Su función es la transmisión de fuerzas con el rotor, la cual se realiza mediante las excéntricas que posee el árbol motriz, el número de excéntricas va de acuerdo con el número de rotores y sobre estas van montadas los rodamientos o cojinetes que son el apoyo para los mismos. El árbol motriz se encuentra apoyado en sus extremos por rodamientos sobre las piezas laterales estáticas.

Figura 25. **Cigüeñal excéntrico**

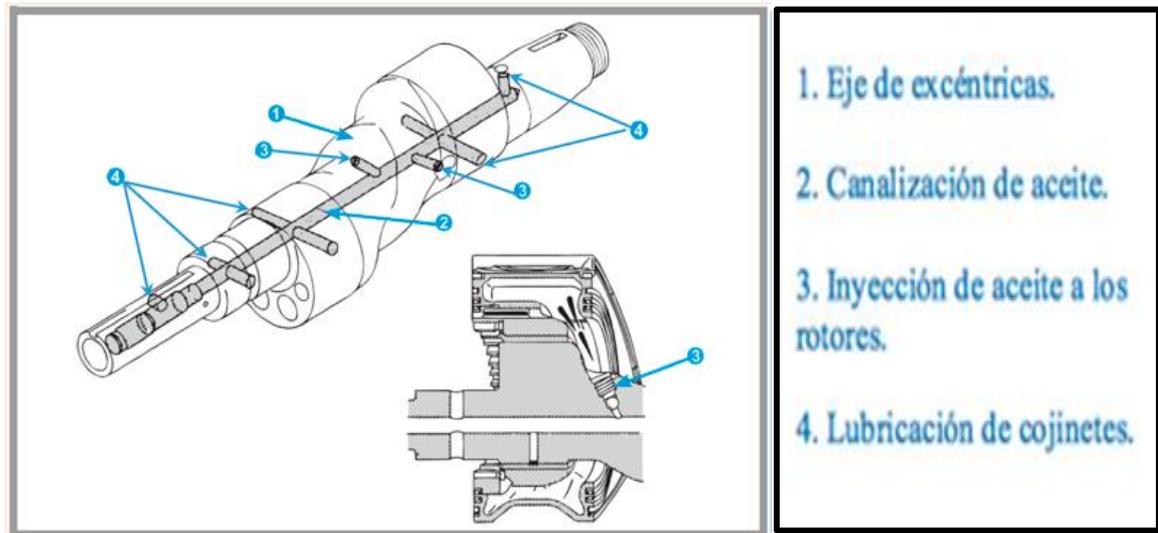


Fuente: *Técnica el motor Wankel*. <https://super97.wordpress.com/2009/12/22/tecnica-el-motor-wankel/>. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

2.1.2.4. Engranajes de transmisión

Este mecanismo está formado por un engranaje de dientes exteriores, fijo a la tapa lateral del estator, y otro, de dientes interiores, sólidamente unido al interior del rotor. El primero de ellos, permanece inmóvil mientras el otro, al engranar con éste, realiza el movimiento de generación de la epitrocoide.

Figura 26. Partes del cigüeñal excéntrico



Fuente: *El sistema de refrigeración del motor rotativo.*

www.renesisessentialparts.com/es/noticias/el-sistema-de-lubricacion-del-motor-rotativo-renesis-del-mazda-rx-8.htm. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

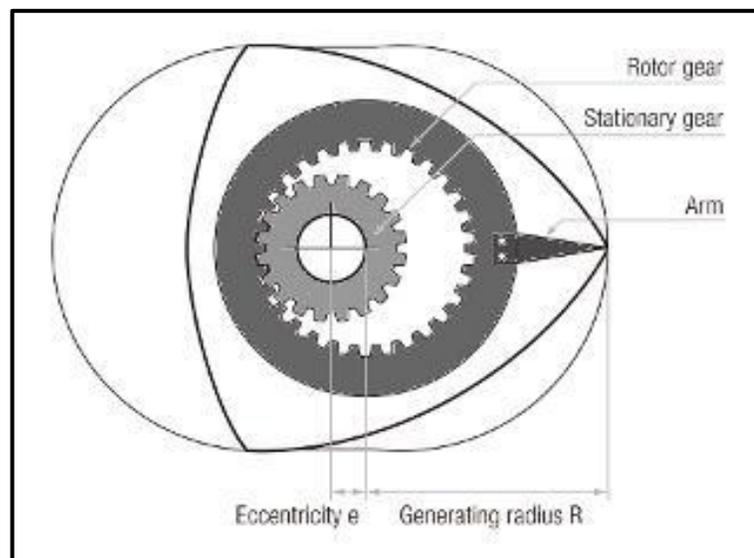
El engranaje fijo está encajado a la tapa lateral del estator y sujetado mediante tornillos de fijación. Además, se le da una forma y grosor adecuados para que el engranaje tenga una rigidez y una resistencia a la fatiga aceptables.

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.

La relación entre el número de dientes de ambos engranajes es de 2 a 3. Esta diferencia proporciona una relación de transmisión de 1 a 3 entre la velocidad del rotor y la del eje de salida.

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.

Figura 27. **Engranajes de transmisión**



Fuente: *Estructura y principios de funcionamiento motor Wankel*. www.e-auto.com.mx/enuw/index.php/101-boletines-tecnicos/motor-gasolina/2222-motor-wankel-estructura-y-principios-de-funcionamiento. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

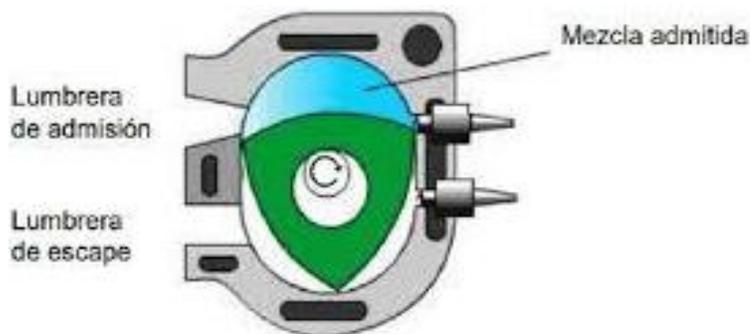
2.1.3. **Funcionamiento**

A continuación, se aclaran cómo se producen los cuatro tiempos en una de las cámaras de combustión del motor Wankel y que ayudarán a entender su funcionamiento y a apreciar los distintos elementos que intervienen.

En un motor Otto, el mismo volumen del cilindro se realiza sucesivamente en cuatro diferentes tiempos. El motor Wankel desarrolla los cuatro tiempos en lugares distintos de la carcasa, es como tener un cilindro para cada uno de los tiempos con el rotor girando continuamente.

El tiempo de admisión 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 aspirando la mezcla estequiometria de aire-combustible. Cuando el otro vértice ha pasado por la lumbrera de admisión el volumen contenido queda aislado y empieza la compresión.

Figura 28. **Tiempo de admisión motor Wankel**



Fuente: *Funcionamiento motor Wankel*. www.mundodelmotor.net/motor-wankel/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

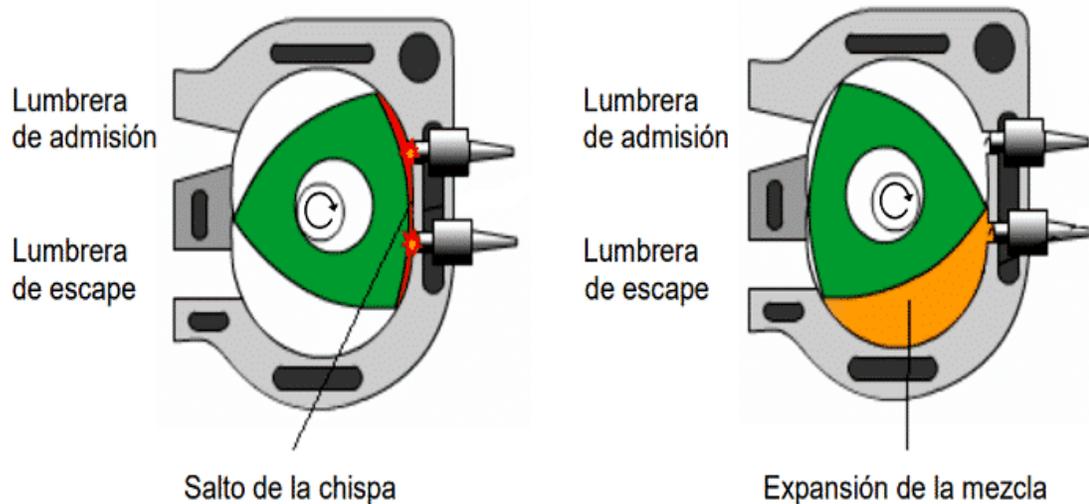
A medida que el rotor continúa su movimiento dentro de la carcasa, el volumen contenido en la cámara de combustión se hace cada vez más pequeño y la mezcla aire-combustible se comprime. En el momento en que la cara del rotor queda enfrente de las bujías, el volumen de la cámara es mínimo y llega al punto máximo de compresión.

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 a 1 hasta 9,5 a 1. Para esta última parece obtenerse el consumo mínimo.

En este punto se produce el salto de la chispa y la consiguiente combustión de la mezcla. Los motores rotativos poseen dos bujías, las que llevan por nombre, *Trailing side*, que entrega una chispa retrasada inflamando la mezcla y *Leading Side*, que emite una chispa adelantada. Esto se debe a que la cámara de combustión es larga y es difícil quemar toda la mezcla con una sola bujía, además este es el único tiempo en el que se generan: fuerza, trabajo y movimiento del motor.

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 compartimiento crece. Los gases de combustión continúan expandiéndose, moviendo el rotor y transformando energía, hasta que el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape.

Figura 29. **Tiempo de compresión y expansión motor Wankel**



Fuente: *Funcionamiento motor Wankel*. www.mundodelmotor.net/motor-wankel/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

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 compartimiento 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.

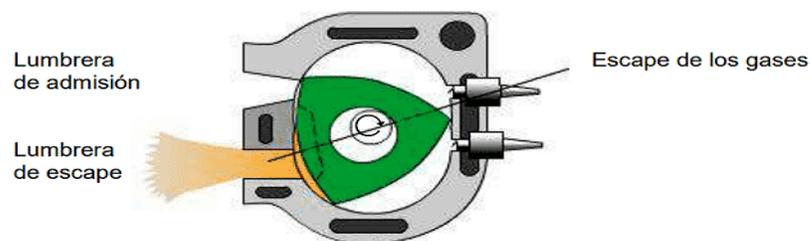
El mismo proceso se ha realizado paralelamente en las otras dos cámaras de combustión. De esta manera se puede ver cómo cada una de las tres caras del rotor está siempre trabajando en una etapa del ciclo. Todo el ciclo completo

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 par 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.

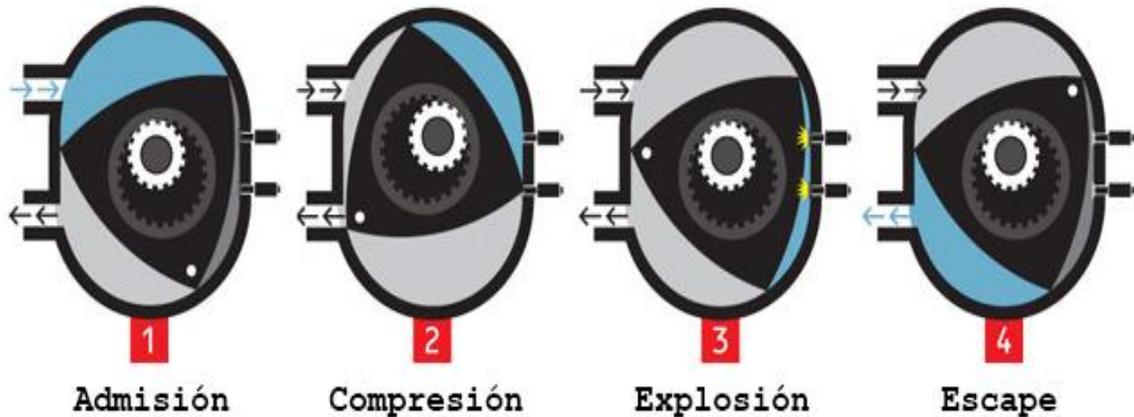
La consecuencia directa es que una parte del motor se calienta mucho más que la otra (la diferencia llega a ser entre 150° la parte de admisión y casi $1\ 000^{\circ}$ la de escape); esta circunstancia motivará una asimetría en la forma externa del motor por motivos de refrigeración.

Figura 30. **Tiempo de escape motor Wankel**



Fuente: *Funcionamiento motor Wankel*. www.mundodelmotor.net/motor-wankel/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

Figura 31. **Ciclo de trabajo motor Wankel**



Fuente: *Motor Wankel, historia y funcionamiento*. estudioautomotriz.com/tipos-de-motores-de-combustion-interna/. Consulta: 4 de noviembre de 2020.

2.1.4. Procesos y sistemas del motor

Como en toda máquina utilizada para producir trabajo, los motores rotativos cuentan con sistemas que los ayudan a realizar un desempeño óptimo y efectivo durante su funcionamiento los cuales se desarrollaron con el objetivo de conocer más sobre ellos.

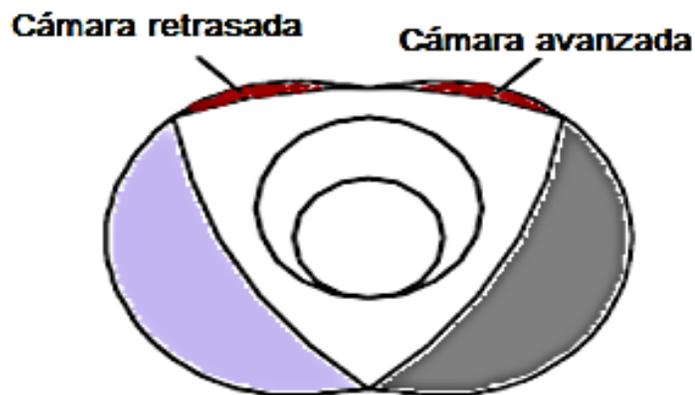
2.1.4.1. Características de la combustión

En el motor Wankel, la cámara de combustión se encuentra dividida en dos cuando llega al punto de máxima compresión. Poco después, en el lado más avanzado respecto del sentido de rotación empieza un aumento de volumen, mientras continúa la compresión en el lado más retrasado de la misma. Esta situación provoca un desplazamiento turbulento de la mezcla que hará aumentar la velocidad de propagación de la llama.

Por el contrario, la forma alargada y delgada de la cámara de combustión, y el elevado cociente entre la superficie y volumen de ésta, no favorecen una rápida propagación de la llama. Estos factores enfrentados compiten entre ellos para proporcionar una velocidad de propagación intermedia.

Por su parte, el diseñador puede intentar, mediante la variación de la forma y la localización de los diferentes elementos fijar el valor de esta velocidad cuanto más convenga.

Figura 32. **División de la cámara de combustión**



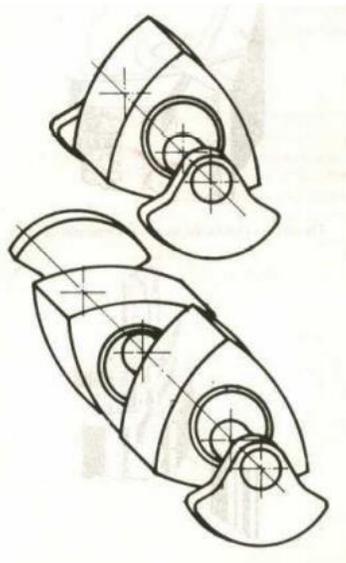
Fuente: *Diseño de la cámara de combustión*. www.mundodelmotor.net/motor-wankel/. Consulta: 5 de noviembre de 2020.

Cuando empieza la combustión, la cámara más adelantada atrae, por diferencia de presiones, el frente de llama. Al mismo tiempo, la cámara retrasada cada vez es más alargada, y la llama tiende a apagarse en su interior, lo cual frena la propagación del frente. Para prevenir esta situación es frecuente utilizar el sistema de encendido doble y que consigue disminuir el tiempo de combustión.

2.1.4.2. Equilibrado del motor

Cuando se trata de equilibrar un único rotor, hay que emplear dos contrapesos uno en la parte delantera y otro en la trasera del eje que giren excéntricos de forma que creen unas fuerzas totales opuestas a las proporcionadas por el rotor.

Figura 33. **Equilibrio del motor de un rotor y dos rotores**



Fuente: *Elementos del motor Wankel*. www.mundodelmotor.net/motor-wankel/. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Por lo general cuando se ensambla un motor rotativo de dos rotores, estos van desfasados 180° entre sí para anular cargas. De esta manera, se genera un par simétrico entre los dos, y luego de acuerdo con el peso que posean se le aumentará un contrapeso con el fin de equilibrar cargas, igual que en los motores de Otto se debe controlar la inercia. De esta manera, se mantiene un equilibrio dinámico y las vibraciones se reducen.

Igualmente se pueden equilibrar motores rotativos con un número mayor de rotores. El cálculo para el equilibrado de un motor rotativo se realiza igual que en uno alternativo. Es decir, primero se plantea el equilibrio estático y, posteriormente, el equilibrio dinámico.

2.1.4.3. Sistema de refrigeración

El objetivo del sistema de refrigeración es mantener al motor en la temperatura de funcionamiento más eficiente, eliminando el calor excesivo provocado por su funcionamiento y combustión, de esta manera evitamos la dilatación excesiva de ciertas partes del motor.

Esto se debe lograr con máxima rapidez y se debe mantener en todas las velocidades y circunstancias de funcionamiento.

El sistema de enfriamiento en este tipo de motores lo vamos a dividir en dos partes:

Refrigeración del estator y refrigeración del rotor.

2.1.4.4. Refrigeración del estator

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 y otras mucho más calientes que provocan unas tensiones térmicas que deben ser anuladas, en la medida de lo posible, por un sistema de refrigeración adecuado.

Por lo tanto, la finalidad de dicho sistema es:

- Homogeneizar al máximo la temperatura de todo el estator y así evitar las deformaciones térmicas.
- 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.

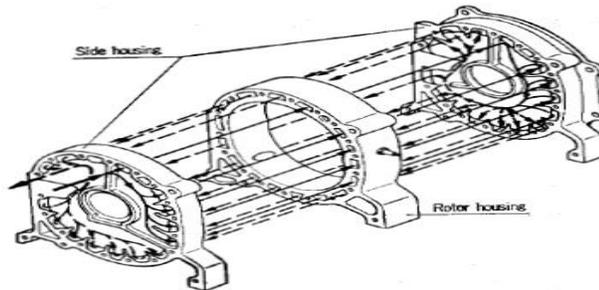
Para refrigerar el estator se puede hacer circular agua o un refrigerante en el interior del bloque motor o emplear una corriente de aire.

- 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.

Figura 34. **Refrigeración por agua con flujo axial**

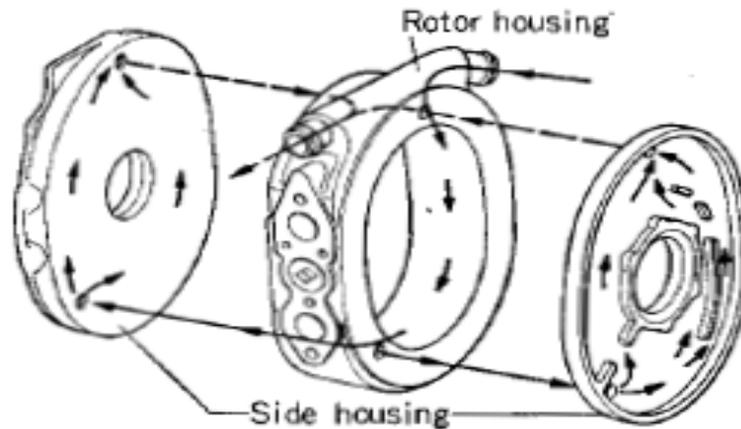


Fuente: *Sistema de refrigeración para la carcasa.*

<https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

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. La manufactura de estas carcasas es difícil ya que los agujeros o ductos se encuentran muy unidos.

Figura 35. **Refrigeración por agua con flujo tangencial**



Fuente: *Sistema de refrigeración para la carcasa.*

<https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

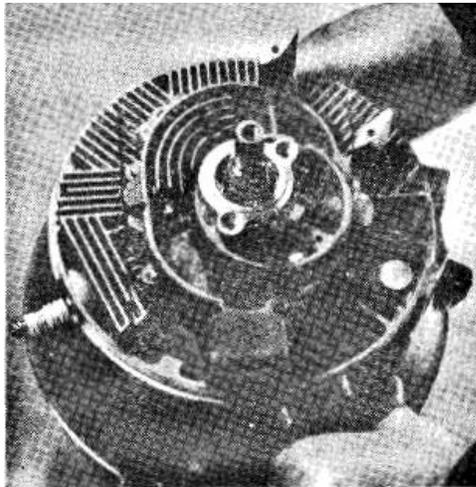
Se logra uniformidad de temperatura en la pared de la carcasa ya que cerca del agujero de la bujía donde hay mayor concentración de calor se ubican aletas y nervaduras que aumentan el área de contacto y la velocidad del refrigerante lo cual incrementa la eficiencia de enfriamiento; mientras que en regiones de baja temperatura como es cerca de la lumbrera de admisión se calienta el área por refrigerante de mayor temperatura consiguiendo también el precalentamiento de la mezcla incrementando la vaporización y atomización de la misma.

- 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.

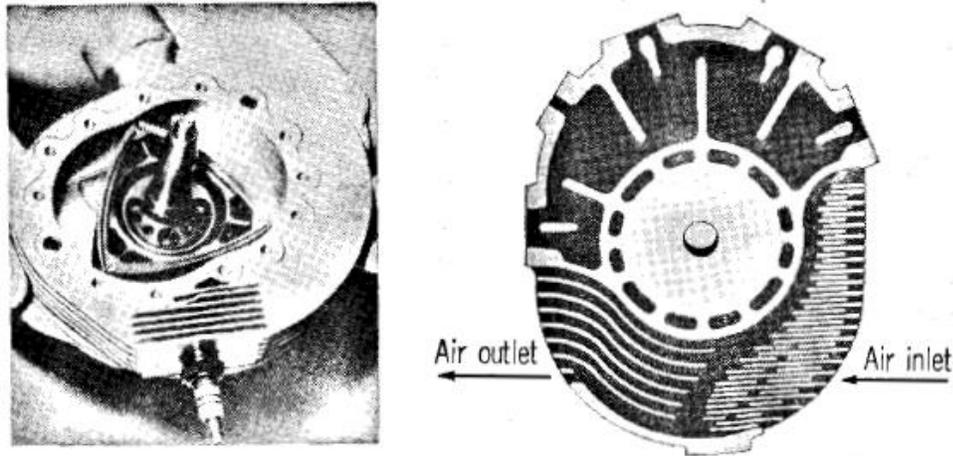
Figura 36. **Refrigeración por aire con flujo axial**



Fuente: *Método de refrigeración por aire*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>.

Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Figura 37. **Refrigeración por aire con flujo tangencial**



Fuente: *Método de refrigeración por aire*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>.

Consulta: 6 de noviembre de 2020.

2.1.4.5. Refrigeración del rotor

Se refrigera el rotor en busca de mayor durabilidad de los sellos y para evitar el autoencendido en el motor, conservando una temperatura apropiada que nos ayude a lograr una alta eficiencia térmica.

El agua a pesar de ser un medio de refrigeración de alta eficiencia no puede ser utilizada para la refrigeración del rotor por sus dificultades en el mecanismo de sellado y su movimiento planetario; por lo tanto, existen dos mecanismos viables: el primero refrigera por medio de aceite lubricante y el segundo utiliza la mezcla aire combustible antes que entre a la cámara de combustión.

Es imprescindible refrigerarlo con el propósito de evitar combustiones antes de tiempo o autoinflamaciones.

- Refrigeración por aceite:

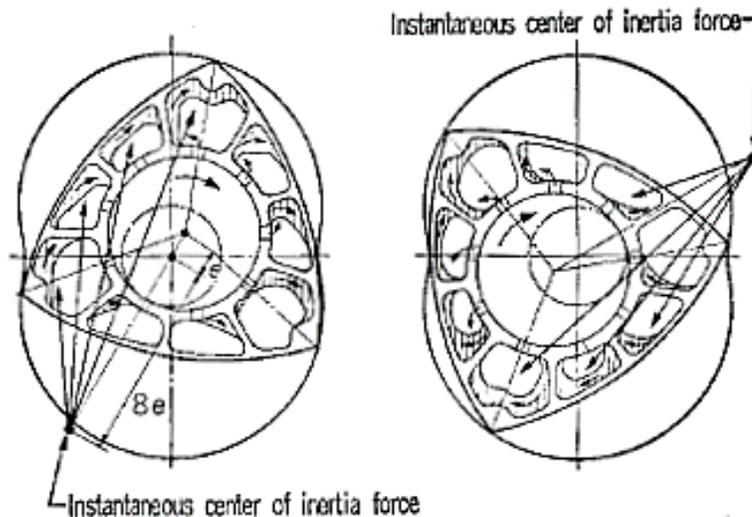
El rotor posee ductos por los que ingresa y circula a través de los rotores, tomando el calor y disminuyendo su gradiente de temperatura, posteriormente sale y pasa por un intercambiador de calor que reduce la temperatura del aceite a circular.

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.

La temperatura aumenta al aumentar las revoluciones del motor; por lo tanto, en ralentí no es necesario inyectar aceite. Esto se consigue con un mecanismo de válvula conectado al cigüeñal por medio de un muelle. A bajas revoluciones los ductos de inyección de lubricante se cierran por la fuerza que ejerce el resorte; a medida que aumentan las revoluciones la fuerza centrífuga y la presión de aceite aplicado sobre la bola abrirán los conductos para la inyección de este.

Figura 38. **Refrigeración por aceite del rotor**



Fuente: *Sistema de refrigeración para el rotor.*

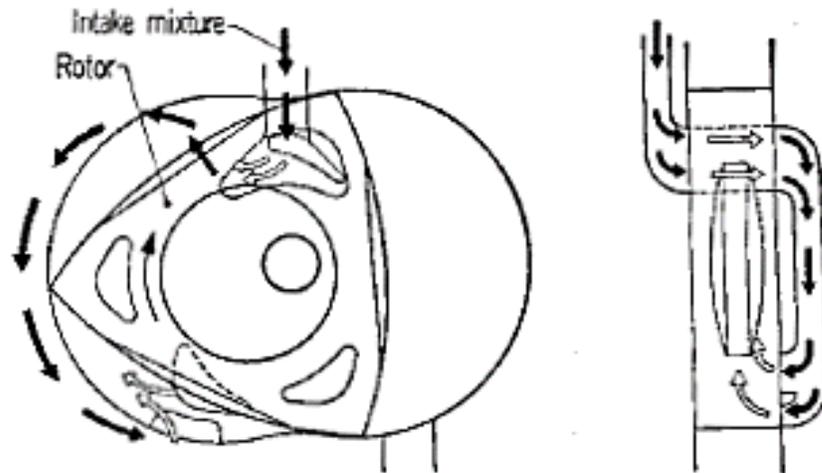
<https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Se podría conseguir una temperatura casi constante en el rotor siempre y cuando haya una excelente sincronización en el sistema de refrigeración con variaciones aproximadas del 10 %.

- Refrigeración mediante la mezcla fresca

Este tipo de sistema de refrigeración es utilizado en motores de bajas prestaciones; aquí la mezcla aire-combustible pasa al interior del rotor captando la mayor cantidad posible de calor desde la carcasa lateral, a través de un agujero ubicado en la cara lateral del mismo y posteriormente se introduce en la cámara de combustión siendo succionada por la lumbrera de admisión obligando de esta manera a que la mezcla realice todo este recorrido. Una de las ventajas de este tipo de refrigeración además de su sencillez constructiva es que, al captar el calor, se aprovecha la vaporización y atomización del combustible.

Figura 39. **Refrigeración mediante la mezcla fresca**



Fuente: *Sistema de refrigeración para el rotor.*

<https://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Una desventaja es que se requiere de un pasaje de admisión mucho más largo para los gases frescos lo cual nos acarrea el problema de disminución de potencia de salida ya que hay incremento de resistencia en la succión.

2.1.4.6. 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.

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 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 las partes móviles del motor, expuestas a fuertes desgastes por el rozamiento continuo al que están sometidas, sobre todo, cojinetes y engranajes de transmisión.

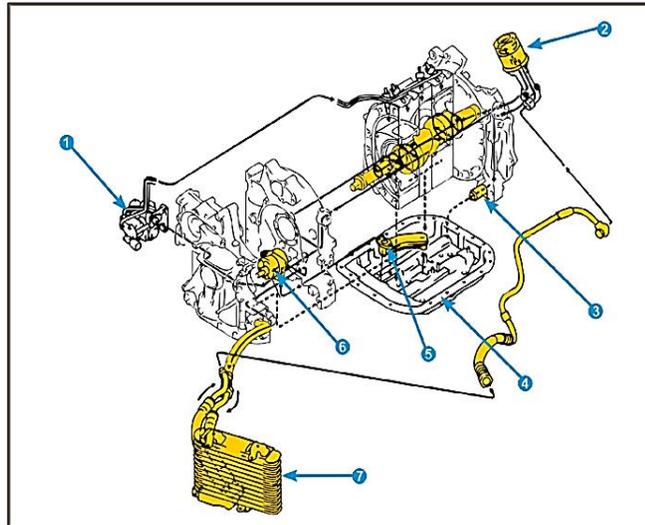
Aunque posible, en muy raras ocasiones se emplea una mezcla de gasolina y aceite para lubricar el rotor, de forma parecida a como se realiza en los motores alternativos de dos tiempos.

Para la lubricación se utiliza una bomba que impulsa el lubricante a presión, llegando a todas las partes móviles del motor, al igual que otros motores, posee un cárter de aceite, desde el cual la bomba impulsa lubricante por medio de los ductos de lubricación que poseen las carcasas.

Se utilizan dos sistemas independientes de aceite:

- El sistema principal lleva aceite a presión a todos los elementos móviles del motor.
- El sistema secundario lleva aceite hasta los segmentos de sellado, por medio de la bomba dosificadora de aceite.

Figura 40. Sistema de lubricación motor Wankel



Fuente: *Circuito de lubricación general motor Wankel.*

<https://www.renesisessentialparts.com/es/noticias/el-sistema-de-lubricacion-del-motor-rotativo-renesis-del-mazda-rx-8.htm>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

- Lubricación de elementos móviles:

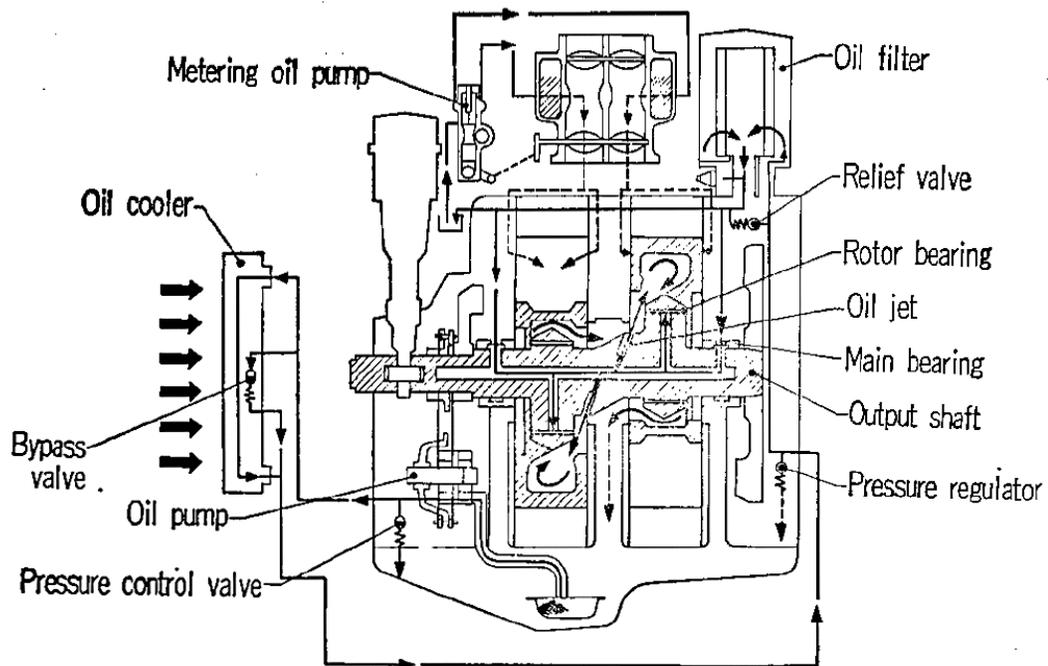
Como ya se ha dicho, para asegurar la correcta lubricación del eje de salida, rodamientos y engranajes, se emplea un sistema a presión, con un intercambiador de calor para enfriar el aceite debido a su doble función refrigeradora para que no pierda sus propiedades de forma prematura. Este intercambiador 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.

Figura 41. **Conductos para el lubricante**

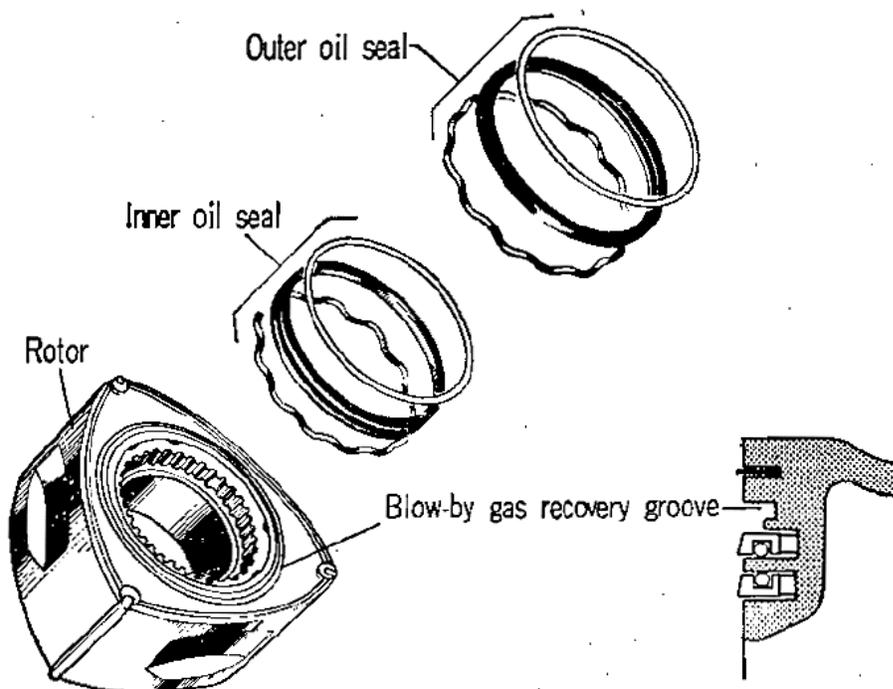


Fuente: *Lubricación del cigüeñal motor Wankel*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

- Anillos de lubricación del rotor:

Son una especie de segmentos dispuestos en los costados del rotor, que mantienen la estanqueidad radial entre sus lados. Los anillos evitan pérdidas de aceite en un trabajo conjunto con cauchos retenedores, que restringen el paso de aceite hacia los costados del rotor con la finalidad de mantener la estanqueidad, que es la primordial en una máquina térmica. Los anillos se alojan en una cavidad del rotor y se encuentran sobre el engranaje interno del mismo.

Figura 42. **Lubricación del rotor**

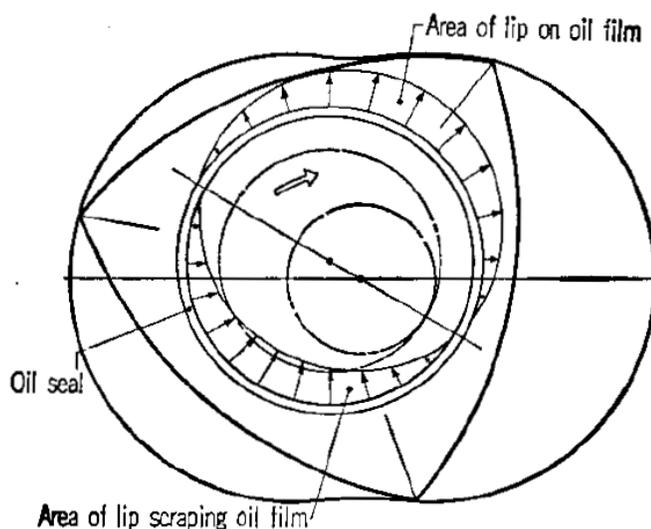


Fuente: *Sello del aceite motor Wankel*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

- 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, 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.

Figura 43. **Movimiento del sello de aceite del rotor**



Fuente: *Sello del aceite motor Wankel*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

2.1.4.7. 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.

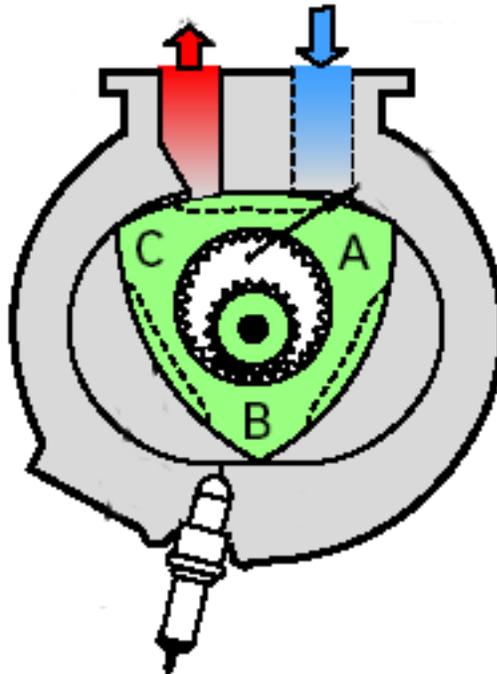
Los vértices del rotor deben asegurar, en todo momento, la estanqueidad de las diferentes cámaras durante el ciclo, pero, al mismo tiempo, cuando llegan a las lumbreras, los segmentos deben pasar sobre ellas sin ningún tipo de interferencia mecánica. Este doble comportamiento implica una gran complejidad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

Posteriormente, tanto la empresa Curtiss-Wright como la Toyo Kogyo, 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.

Figura 44. **Sistema de distribución motor wankel**



Fuente: *Sistema de distribución*. tips4alls.blogspot.com/2007/12/el-motor-rotativo. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

2.1.4.8. 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.

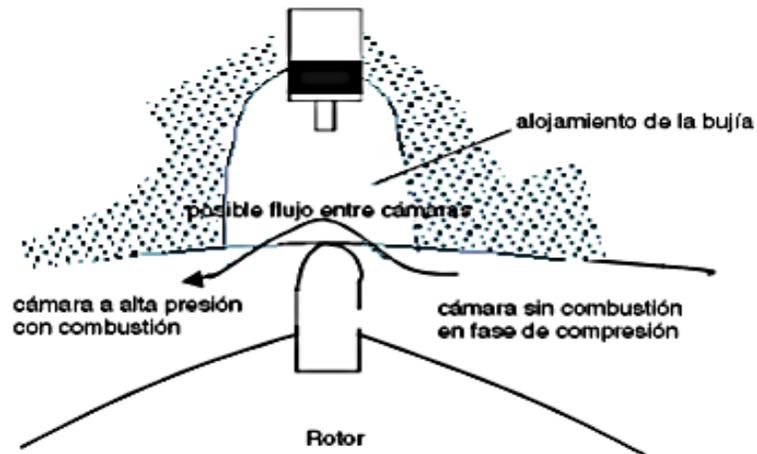
Para obtener un mejor rendimiento de la combustión en un amplio margen de funcionamiento, es muy habitual la utilización de dos bujías, una instalada en el lado retrasado y la otra en el lado avanzado. Se encuentran en el lado opuesto de las lumbreras de admisión-escape.

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 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.

Figura 45. Encendido de la mezcla



Fuente: *Motor rotativo cámara de mezcla*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/encendido/>.

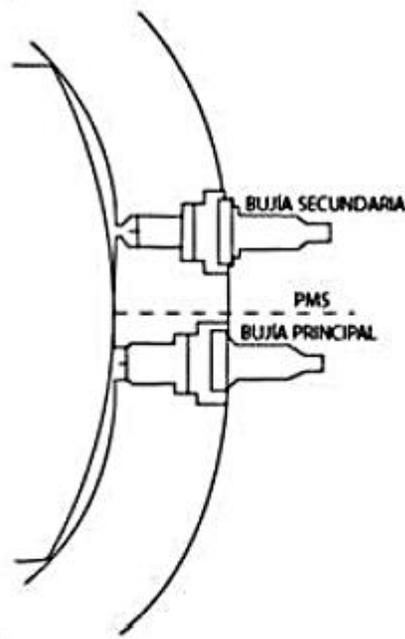
Consulta: 6 de noviembre de 2020.

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.

Figura 46. **Sistema de encendido doble motor Wankel**



Fuente: *Doble bujía en el motor Wankel*. <https://sites.google.com/site/mvwankel/encendido/>.

Consulta: 6 de noviembre de 2020.

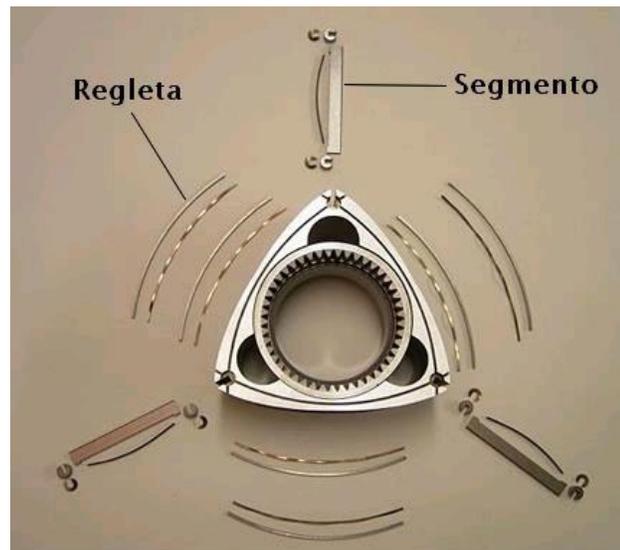
2.1.4.9. Mecanismos de sellado

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.

Figura 47. **Segmentos del Rotor**



Fuente: *Partes del rotor Wankel*. <https://super97.wordpress.com/2009/12/22/tecnica-el-motor-wankel/partes-rotor-wankel3/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

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.

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.

- Segmentos periféricos:

Hay tres por cada rotor, y se sitúan en los vértices de éste para mantener cada una de las cámaras de combustión completamente hermética respecto a las demás.

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.

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.

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.

Figura 48. **Segmento periférico**



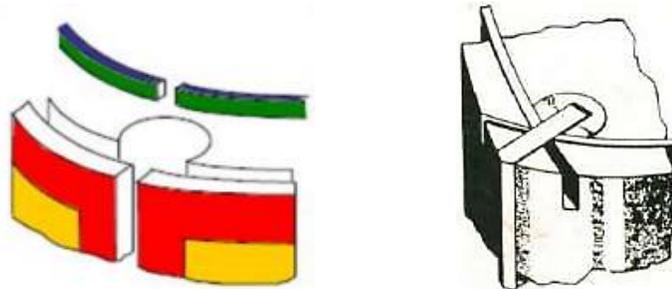
Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. <https://www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Como el segmento se desliza sobre el estator, manteniendo el contacto en todo momento, la durabilidad de ambos elementos está íntimamente ligada con los materiales y los tratamientos superficiales que se emplean en la fabricación de cada uno de ellos. Anteriormente, se venía utilizando el grafito para los segmentos (por sus altas propiedades lubricantes) deslizando 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.

- Segmento lateral y perno de anclaje:

El segmento lateral, que suele ser de fundición, como el periférico, se coloca a lo largo de la cara lateral del rotor 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.

Figura 49. **Segmentos laterales**



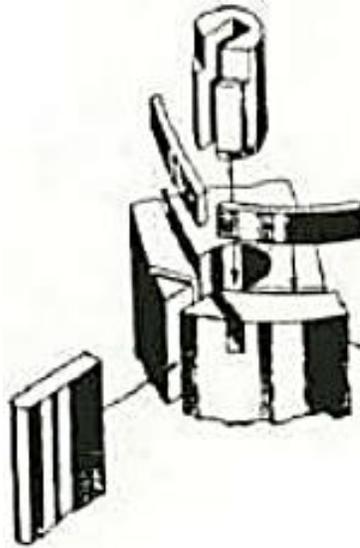
Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. <https://www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

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.

Figura 50. **Pernos de anclaje**



Fuente: *Proyecto ofimática motor Wankel*. <https://www.slideshare.net/0984511/proyecto-ofimatica-motor-wankel-2>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

- Pernos de anclaje.

También conocidos como tacos; se encuentran situados en las esquinas del rotor y sirven como base para los patines y regletas; al igual que los elementos descritos anteriormente poseen unos muelles en sus bases que proveen la estanqueidad del sistema, mantienen fijos tanto a los sellos radiales y a los sellos axiales o segmentos laterales, también poseen cimbras que le dan una cierta

elasticidad, para mantener presionados los elementos de sellado contra la superficie de la epitrocoide y las tapas laterales.

2.1.5. Ventajas y desventajas

Los motores rotativos tienen algunas características distintas que los diferencian de otros motores. Por ejemplo, los motores de pistones cuentan con un sistema de compresión y de encendido, en cambio, un motor rotativo no funciona así y lleva a cabo estas tareas en una sola rotación. Por lo tanto, es necesario enlistar sus principales ventajas y desventajas.

2.1.5.1. Principales ventajas

- Menos piezas móviles que un motor de combustión interna alternativo (40 % menos de piezas), y, por tanto, mayor fiabilidad.
- Obtención de un par motor casi constante ya que se producen los cuatro tiempos del ciclo simultáneamente dentro del estator.
- Ausencia de válvulas de admisión y de escape. Esto conlleva evitar las dificultades que plantean las distribuciones de los motores de cuatro tiempos: árboles de levas, empujadores, balancines, muelles, entre otros.
- Mecanismo totalmente rotativo. Con dos contrapesos debidamente dimensionados y dispuestos en el eje se puede equilibrar estática y dinámicamente el motor. Esto le confiere una mayor suavidad de funcionamiento frente a los motores alternativos.

- Menor velocidad de rotación. Dado que los rotores giran a $1/3$ de la velocidad del eje, las piezas principales del motor se mueven más lentamente que las de un motor convencional, aumentando la fiabilidad.
- Menos vibraciones. Al no haber bielas, ni volante de inercia, ni recorrido de los pistones, las inercias son menores.
- Las relaciones potencia/peso y potencia/volumen son muy elevadas, de hecho, son las más elevadas de todos los motores rotativos.

2.1.5.2. Principales desventajas

- Resulta muy difícil aislar cada una de las tres secciones del cilindro en rotación, que deben ser estancas unas respecto a las otras para un buen funcionamiento. Como consecuencia, se hace necesaria la sustitución de los segmentos cada seis-siete años.
- Durante unos cuantos grados de giro del cigüeñal los conductos de admisión y de escape están comunicados a través de la cámara de combustión que, en ese momento, se encuentra finalizando su fase de escape y comenzando la de admisión del siguiente ciclo. Este fenómeno se conoce como cortocircuito y es bastante perjudicial puesto que empeora el rendimiento y aumenta las emisiones de hidrocarburos inquemados.
- Excesivo ruido debido a los engranajes de transmisión.

- Geometría alargada de la cámara de combustión. Conlleva un tiempo excesivo de combustión ya que el espacio que ha de recorrer la llama es bastante largo y angosto. Esta forma provoca un alto consumo de combustible debido a la baja eficiencia termodinámica.
- Mantenimiento costoso y motor comercial poco extendido. Las reparaciones más complicadas sólo pueden realizarse en la casa de fábrica pues el conocimiento de este tipo de motores no es habitual por parte de talleres de mecánica general.
- La sincronización de los distintos elementos debe ser muy buena para evitar que la explosión de la mezcla se inicie antes de que el pistón rotativo se encuentre en la posición adecuada. Si esto ocurre, la ignición empujará en sentido contrario al deseado, pudiendo dañar el motor.
- Distribución heterogénea de temperaturas. Las diferentes fases del ciclo ocurren siempre en los mismos lugares del estator; la admisión y compresión (fases frías) ocurren en la parte superior, mientras que la explosión y el escape (fases calientes), ocurren en la parte inferior. Esto implica que un lado del motor alcance temperaturas de 150 ° C y el otro supere los 1000 ° C, lo que provoca una tendencia a la deformación en el estator. Esta deformación puede desembocar en fugas que empeoran aún más el fenómeno de la delicada estanqueidad.
- Poca eficiencia en grandes unidades motoras.
- Alto consumo de aceite lubricante. Debido al mal sellado, parte del aceite llega a mezclarse con el combustible y se quema con él, con el

consiguiente aumento en el consumo de aceite y en las emisiones contaminantes producidas.

2.2. Motores de vehículos híbridos

Los motores utilizados en vehículos híbridos son motores donde se combinan dos fuentes de energía diferentes para propulsar el vehículo; la energía térmica de un motor de combustión interna y la energía eléctrica producida por un motor eléctrico.

Además, cuentan con baterías de recarga de alto voltaje, generalmente de ion-litio, donde se almacena la energía eléctrica generada por el sistema, las cuales proporcionan energía al motor eléctrico para propulsar el vehículo, o alimentar el moto-generador que permite volver arrancar el vehículo.

2.2.1. Tipos de vehículos híbridos

Se conoce como vehículo híbrido aquel que cuenta con un motor de combustión interna y con uno o más motores eléctricos que, en conjunto, generan la energía para impulsar el vehículo. El funcionamiento del vehículo híbrido entra en conjunto con el sistema conocido como *start-stop*, que se encarga de encender y apagar el motor de combustión interna cuando es necesario; por ejemplo, cuando únicamente se usa el motor eléctrico, el sistema apaga el de combustión interna, pero cuando se requiere que trabajen en conjunto en trayectos más largos, inmediatamente lo enciende. Existen rangos de velocidades para el funcionamiento de los dos motores: en trayectos cortos y a velocidades bajas, únicamente trabaja el motor eléctrico, y en trayectos largos y velocidades altas, entran en conjunto los dos motores.

2.2.1.1. Vehículos híbridos recargables de baterías.

Estos vehículos son conocidos también como vehículos eléctricos a batería o BEV (*Battery Electric Vehicle*). Estos vehículos se mueven únicamente gracias a la intervención de uno o varios motores eléctricos alimentados por una batería, que puede ser recargada en la red.

La mayoría de los modelos incorporan un sistema de recuperación de energía de la frenada y las deceleraciones. Mediante la electrónica de potencia del motor este puede convertirse en un generador de corriente capaz de introducir energía en la batería.

Estos vehículos no tienen ningún tipo de emisiones a la atmósfera de forma local. Sus únicas emisiones, en todo caso, provendrían de las que se producen a la hora de generar la electricidad con la que se cargan sus baterías que están directamente implicadas con la combinación energética de cada zona. En cualquier caso, un propietario de un vehículo eléctrico siempre puede contratar con su compañía suministradora de energía cien por cien renovable.

Otra de sus ventajas es la casi total ausencia de ruidos a bajas velocidades y el confort de la conducción. El motor entrega todo el par desde cero no siendo necesaria una caja de cambios intermedia.

2.2.1.2. Vehículos híbridos enchufables

Los híbridos enchufables o PHEV (*plug-in hybrid electric vehicle*) cuentan con un motor de combustión, normalmente de gasolina, acompañado por un motor eléctrico. Ambos motores son capaces de mover el coche por sí mismos y también de forma combinada.

Para alimentar el motor eléctrico este tipo de vehículos cuenta con una batería, en general de pequeño tamaño que suele tener una autonomía no superior a los 50 kilómetros en recorridos urbanos. Esta batería tiene la posibilidad de cargarse a través de la red eléctrica por lo que, en caso de contar con un punto de carga vinculado en el hogar, lo que es recomendable, puede utilizarse como un vehículo totalmente eléctrico para distancias cortas.

Habitualmente, el conductor puede seleccionar el modo de funcionamiento para obligar a que el coche se mueva únicamente con el motor eléctrico, con el de combustión o combinando los dos, en modo automático, en función de los requerimientos del terreno y de la velocidad. El motor de combustión también tiene la posibilidad de cargar la batería.

Al tener la posibilidad de moverse únicamente con electricidad este tipo de vehículos cuentan con las mismas ventajas que los coches eléctricos en el centro de las ciudades en lo que se refiere a accesos y aparcamiento.

En definitiva, el híbrido enchufable, gracias a sus dos posibilidades de tracción vía motor de combustión o motor eléctrico y a unas baterías con mayor capacidad que un híbrido, permite beneficiarse de todas las ventajas de un coche eléctrico sin renunciar a la autonomía del motor térmico.

Ventajas:

- Autonomía eléctrica cada mañana
- Autonomía total sin compromisos gracias al combustible
- Aporte de la potencia eléctrica en momentos de máxima aceleración
- Posibilidad de viajar sin necesidad de programar
- Se libran del impuesto de matriculación

- Etiqueta 0 emisiones de la DGT
- Beneficios de los eléctricos en las grandes ciudades
- Coches grandes con consumos muy bajos en trayectos diarios
- Conducción silenciosa por la ciudad en modo eléctrico
- Bajas emisiones en recorridos cortos

Desventajas:

- Necesidad de un punto de recarga en casa para aprovechar sus prestaciones
- Complicaciones del coche eléctrico en cuanto a puntos de recarga
- Tecnología complicada y pesada que no encaja en coches pequeños
- Tecnología cara que no encaja en coches accesibles
- Maletero comprometido para hacer sitio a las baterías
- Peso del vehículo
- En viajes largos consume como una gasolina
- Vida útil de las baterías
- Incertidumbre sobre la depreciación
- Mantenimiento doble, de coche térmico (motor) y de eléctrico (baterías)

Figura 51. **Vehículos híbridos enchufables**



Fuente: *Tipos de vehículos eléctricos*. <https://www.autobild.es/practicos/tipos-coche-electrico-estos-son-modelos-puedes-encontrar-497109>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

2.2.1.3. Vehículos híbridos de autonomía extendida

Los vehículos eléctricos de autonomía extendida o EREV, (*extended-range electric vehicles*) cuentan con una mecánica compuesta también por un motor de combustión de gasolina y otro o varios eléctricos. La diferencia con los anteriores es que el motor de combustión no mueve en ningún caso las ruedas del coche. Funciona como un generador eléctrico que recarga una batería, que, a su vez, alimenta el motor eléctrico que se encarga de mover las ruedas. Además, esta batería tiene la posibilidad de conectarse a la red para ser recargada.

Cuando la batería tiene suficiente carga el motor de gasolina se encuentra parado y el vehículo se mueve sin emisiones. Cuando la batería requiere energía se pone en marcha el motor de combustión para recargarla y mover el motor eléctrico. Son vehículos tecnológicamente complejos por lo que los modelos en el mercado que la utilizan este sistema son escasos. Su autonomía eléctrica, la disponible antes de que tenga que arrancar el motor de combustión, suele ser mayor que la de los híbridos enchufables, puesto que su batería es mayor, pero menor que la de los eléctricos puros.

Figura 52. **Vehículo híbrido de autonomía extendida**



Fuente: *Tipos de vehículos eléctricos*. <https://www.autobild.es/practicos/tipos-coche-electrico-estos-son-modelos-puedes-encontrar-497109>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

2.2.2. Componentes principales

A continuación, se explican las funcionalidades y características de los principales componentes que constituyen los motores de vehículos híbridos, en los cuales el motor eléctrico es el motor principal del vehículo y se encarga de transmitir el movimiento a las ruedas motrices.

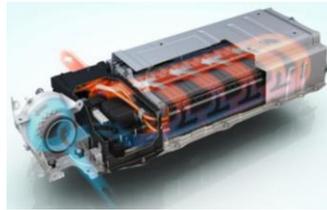
2.2.2.1. Baterías

Una batería es el depósito donde se puede almacenar la energía del coche, de forma similar a un depósito de combustible en los vehículos con MCI. Las baterías almacenan la energía en forma de corriente continua mientras que el cargador exterior puede alimentar la energía como corriente continua (DC) o corriente alterna (AC).

Las baterías determinan la potencia del motor, su autonomía y el diseño del vehículo debido a sus dimensiones, peso, y características. El principal problema

es su localización dentro del vehículo. Su rendimiento se ve muy afectado por la temperatura, y empeoran especialmente con el frío.

Figura 53. **Batería de ion-litio**



Fuente: *Baterías de vehículos híbridos y eléctricos.*

<https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/03/14/baterias-de-coches-electricos-e-hibridos-hoy-estado-de-la-tecnologia-del-automovil/>. Consulta: 6 de noviembre de 2020.

Una batería se compone de dos o más celdas eléctricas conectadas una junto a la otra las cuales convierten energía química en energía eléctrica. Las celdas se componen de electrodos positivos y negativos sumergidos en un electrolito. Es la reacción química entre los electrodos y el electrolito la que genera la electricidad DC. En el caso de una batería secundaria o una serie de baterías recargables la reacción química puede revertirse mediante la inversión de la corriente y regresar a un estado de carga. La batería compuesta de 'plomo' es la de tipo tradicional, pero hay otros tipos que se están volviendo muy utilizados en los vehículos híbridos modernos. El sistema de almacenamiento de energía eléctrica más común hoy en día entre estos vehículos es la batería de litio-ion.

Actualmente, hay muchos tipos de baterías usadas por los aparatos eléctricos. Todas ellas son recargables, pero ninguna tiene una vida infinita y con el tiempo se degradan. Este factor, junto con la capacidad de almacenamiento que tienen, es uno de los principales inconvenientes que poseen en la actualidad.

Por lo tanto, se tiene una vida limitada de esta medida en ciclos de carga-descarga. Cada carga-descarga se considera un ciclo. El voltaje de la batería es independiente de la reacción química y del número de celdas que contiene la batería. Por lo tanto, es posible comparar los diferentes tipos de baterías en base a las especificaciones como pueden ser la energía específica, la potencia específica y la densidad energética.

La energía específica es la cantidad de energía eléctrica que se puede almacenar en cada kilogramo de masa. Por otro lado, la energía específica, medida en Wh/kg o el kJ/kg es solo orientativa, ya que la energía en una batería varía con los diferentes factores ya sea temperatura como el porcentaje de descarga.

La potencia específica se define como la cantidad de potencia obtenida por cada kilogramo de masa usada (W/kg). Algunas baterías tienen una buena energía específica, pero una baja potencia específica, lo que significa que pueden almacenar mucha energía, pero que la transmiten lentamente.

2.2.2.2. Controladores

Son los encargados de comprobar el correcto funcionamiento por eficiencia y seguridad regulando la energía que recibe o recarga el motor.

2.2.2.3. Convertidores

Al igual que los vehículos de combustión, estos disponen de una batería de 12V para alimentar de energía eléctrica a aquellos componentes auxiliares del vehículo, por lo que para disminuir la tensión es necesario un conversor HVDC-

LVDC (*High Voltage Direct Current*, corriente continua de alta tensión) – (*Low Voltage Direct Current*, corriente continua de baja tensión).

2.2.2.4. Puerto de carga

Toma de conexión por la que el coche eléctrico se conecta con a la estación de carga. puede haber una toma específica para carga rápida.

En la actualidad existen diferentes modos de recarga de las baterías:

- Sustitución de las baterías agotadas por otras completamente recargadas.
- Recargas de las baterías agotadas mediante conexión a la toma red eléctrica.

Dependiendo del tipo de conexión a red que se utilice la recarga puede ser lenta pudiendo completarse hasta el 100 % de la capacidad de la batería y requiriéndose un tiempo estimado de 4 a 8 horas; o recargas rápidas completándose hasta el 80 % de su capacidad necesitándose un tiempo estimado de 15 a 30 minutos.

- Recargas mediante el sistema de carga Magma.

La novedad de este sistema está en la forma en que se suministra la energía al vehículo. Se hace a través de una paleta que se conecta a un dispositivo que hay en el maletero. Entre ambos se crea un campo magnético que se transforma en energía eléctrica.

Figura 54. **Puertos de carga vehículos híbridos**



Fuente: *Puntos de recarga de vehículos eléctricos*. <https://www.bbva.com/es/cuantos-puntos-de-recarga-de-vehiculos-electricos-hay-en-espana/>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

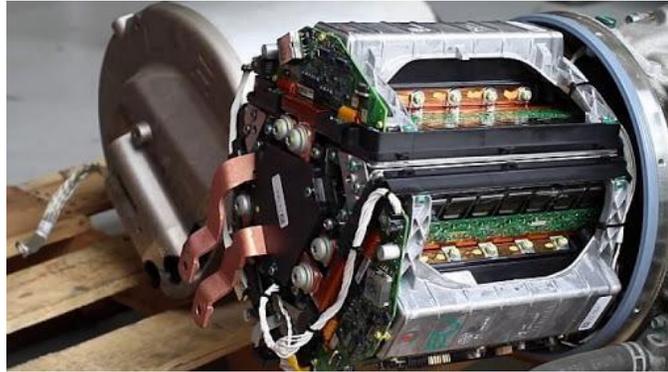
2.2.2.5. Inversores

Los motores de este tipo de vehículos son en su gran mayoría máquinas eléctricas de corriente alterna. Por esta razón, los vehículos disponen de un inversor que permite transformar la corriente continua en corriente alterna.

2.2.2.6. Transformadores

Son los encargados de convertir la electricidad de una toma casera o de un punto de recarga rápido en valores de tensión y amperaje válidos para el sistema de recarga. No solo recargan las baterías, sino que también son los encargados de atender a la refrigeración para evitar riesgos de explosión o derrames.

Figura 55. **Inversores de vehículos híbridos**



Fuente: *Inversores de vehículos híbridos y eléctricos*. <http://cise.com/portal/notas-tecnicas/item/917-especialidad-inversores-de-h%C3%ADbridos-y-el%C3%A9ctricos-online.html>.

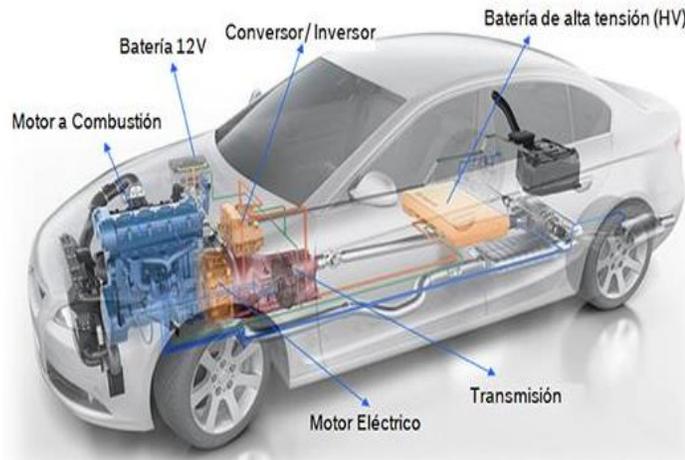
Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.2.7. Motor eléctrico

Puede tener uno o varios, dependiendo del diseño y prestaciones que se quieran conseguir. Esta parte también es la encargada de recuperar energía gracias a sus funciones como inversor. Dadas sus características, a diferencia de los motores de combustión interna, desarrolla un par máximo y desde 0 rpm y potencia constante a partir de medio régimen y hasta su límite de giro.

Funcionan a pleno rendimiento sin necesidad de variar su temperatura disponemos de todas las prestaciones del motor, desde el primer instante en frío. Esto hace posible que en la misma marcha se pueda arrancar desde parado y circular a la máxima velocidad.

Figura 56. **Componentes principales vehículo híbrido**



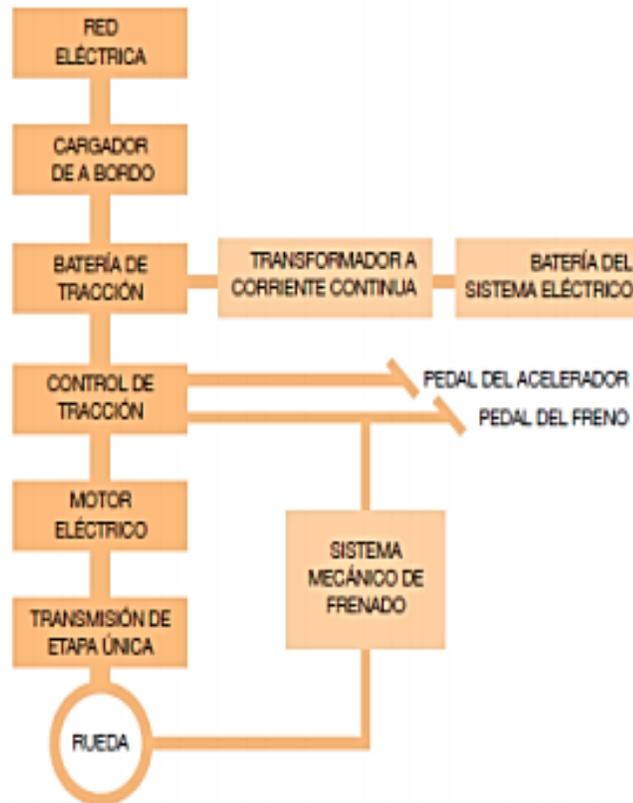
Fuente: *Vehículos híbridos o eléctricos*. <https://talleractual.com/tecnica/electronica-y-electricidad/2802-vehiculos-hibridos-o-electricos-parte-3>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.3. **Funcionamiento**

Los VE poseen una arquitectura de construcción y funcionamiento más sencilla que los vehículos con motores de combustión interna, aunque la conducción es similar en ambos.

El vehículo está compuesto básicamente por el conjunto de baterías, que ocupan un espacio importante, el motor o motores eléctricos, que se alimentan de la energía entregada por las baterías y los controladores. El conjunto de baterías normalmente es recargado enchufándolas directamente a la red eléctrica o por la energía que reciben de los frenos regenerativos a través de la fricción que se ocasiona a la hora de frenar. Los controladores regulan la potencia suministrada en cada momento hacia el motor eléctrico según la demanda requerida.

Figura 57. Esquema de funcionamiento



Fuente: *Formación vehículos híbridos II*. <http://www.fbelectronica.com/Formacion-1/Curso-hibridos-II.htm>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

Hay que tener en cuenta ciertos parámetros de los motores eléctricos como su curva de par, que, a diferencia de los motores de combustión interna, esta es plana con un rendimiento excelente sobre todo a bajas revoluciones. Por otro lado, son motores con una capacidad de giro de hasta 20 000 rpm.

Rendimiento del motor eléctrico : El rendimiento de un motor eléctrico es la medida de la capacidad que tiene el motor para convertir la energía eléctrica en energía mecánica. En el proceso de conversión se presentan pérdidas:

Pérdidas eléctricas: son proporcionales al cuadrado de la corriente que circula por las bobinas y se incrementan rápidamente con la carga del motor. Aparecen como consecuencia de la resistencia eléctrica de los bobinados del estator y de las barras conductoras del rotor.

Pérdidas magnéticas: se producen en los núcleos de chapa magnética del estator y del rotor, debidas al ciclo de histéresis y a las corrientes de Foucault. Dependen básicamente de la frecuencia y de la inducción, por lo que prácticamente son independientes del índice de carga.

Pérdidas mecánicas: son debidas a la fricción entre rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y otros elementos rotativos del motor. Dependen de la velocidad, por lo que en el motor de inducción alimentado desde la red se consideran prácticamente constantes.

Pérdidas adicionales en carga: estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se supone que varían con el cuadrado del par de salida. La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja influyendo, entre otros, el diseño del devanado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras, la relación entre el número de ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones de superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

2.2.4. Tipos de estructura y sistemas

Se puede combinar las dos fuentes de poder que se encuentran en un híbrido de diferentes maneras o estructuras esto resulta en variados sistemas y vehículos, cada fabricante tiene su forma de aproximar el reto de un vehículo híbrido. Se puede clasificar a los vehículos híbridos en dos grandes grupos:

- Híbrido en Serie
- Híbrido en Paralelo

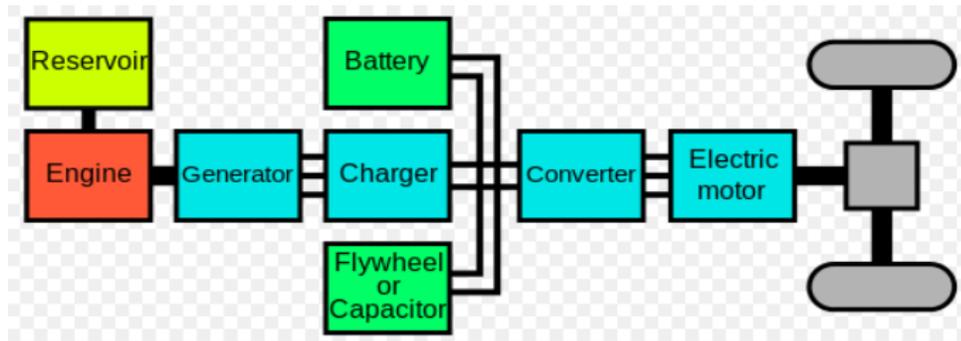
También se puede clasificar a los vehículos híbridos en otros subgrupos de acuerdo con que tan híbridos son, es decir basándose en la capacidad de un vehículo en poder funcionar con ambas fuentes de impulso de manera independiente en un momento dado, de acuerdo con esto los vehículos híbridos se subclasifican así:

- Híbrido total: puede impulsarse solo con el motor eléctrico sin necesidad del impulso del motor híbrido.
- Híbrido por Asistencia Alta: utiliza un motor de combustión interna muy pequeño y eficiente, además de un motor eléctrico para asistir con fuerza extra; no se puede impulsar solo con el motor eléctrico.
- Híbrido Básico: este es un sistema híbrido a secas pues normalmente utiliza solo un motor de arranque sobredimensionado que asiste al motor de gasolina en los momentos y circunstancias en las que este consume más gasolina.

2.2.4.1. Híbridos en serie

Se conoce en serie porque tiene su sistema eléctrico en serie, tiene un motor de combustión interna pequeño y eficiente con una transmisión de la forma tradicional que tiene nuestros vehículos, pero que además cuenta con un generador eléctrico que se encuentra conectado al motor de gasolina, este sistema impulsa el tren delantero o trasero, además tiene uno o varios motores eléctricos para impulsar las llantas del tren restante. El uso de varios motores eléctricos en lugar de uno permite, un mejor aprovechamiento del espacio y también un mejor control de la tracción y estabilidad. En un híbrido en serie el motor de gasolina mueve un generador y este, puede cargar las baterías o accionar el motor eléctrico que mueve la transmisión. Por lo tanto, el motor de gasolina nunca mueve directamente el vehículo.

Figura 58. Híbridos en serie



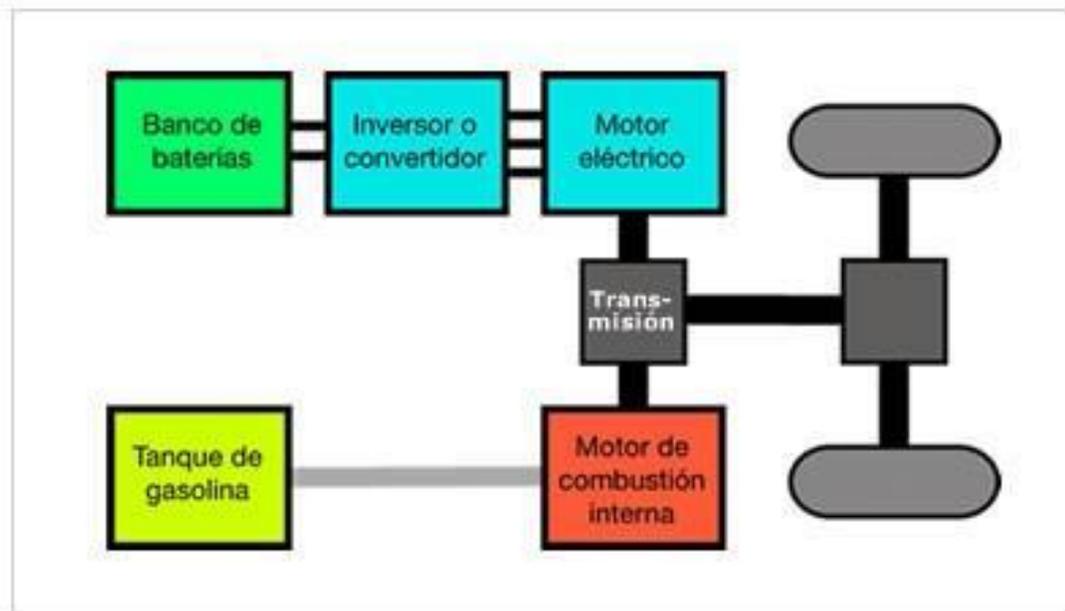
Fuente: *Clasificación de vehículos híbridos*. <http://www.blogmecanicos.com/2016/11/vehiculos-hibridos-clasificacion-parte.html>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.4.2. Híbridos en paralelo

Este sistema híbrido se conoce así debido a que los ejes del motor de combustión interna, el generador y el motor eléctrico se encuentran en paralelo y unidos en un solo mecanismo, normalmente en el tren delantero. Habitualmente ambos motores están unidos a la transmisión y está a las ruedas.

Este sistema también tiene un tanque de combustible que provee de gasolina a un motor de gasolina, pero también tiene un juego de baterías que proporciona energía a un motor eléctrico. El motor eléctrico y el de gasolina pueden accionar la transmisión al mismo tiempo y esta a su vez mover las ruedas.

Figura 59. Híbridos en paralelo



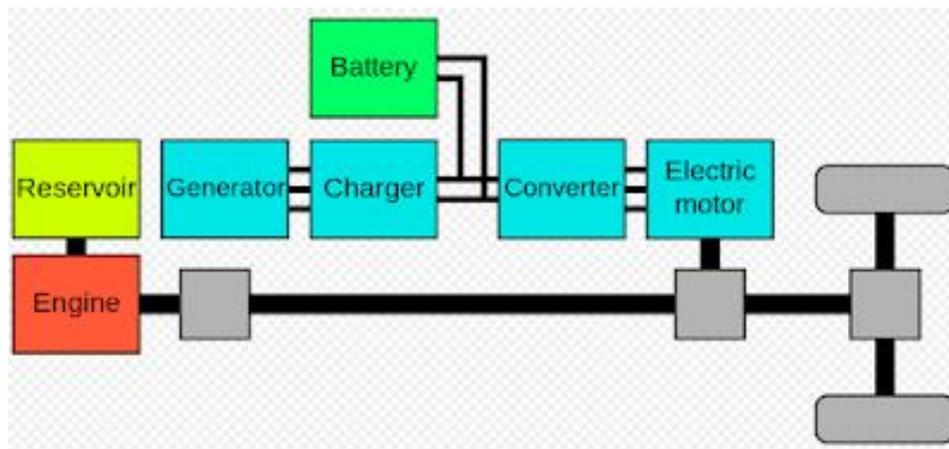
Fuente: *Clasificación de vehículos híbridos*. <http://www.blogmecanicos.com/2016/11/vehiculos-hibridos-clasificacion-parte.html/>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.4.3. Híbridos combinados

Complementa los dos sistemas anteriores (serie y paralelo), el motor eléctrico funciona en solitario a baja velocidad, mientras que a alta velocidad, el motor térmico y el eléctrico trabajan a la vez.

La diferencia respecto a los otros es que dispone de otro generador independiente, responsable de generar electricidad para cargar la batería y alimentar al motor eléctrico si es necesario.

Figura 60. Híbrido combinado



Fuente: *Clasificación de vehículos híbridos*. <http://www.blogmecanicos.com/2016/11/vehiculos-hibridos-clasificacion-parte.html/>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.4.4. Sistema de baterías recargables

Las baterías de los vehículos híbridos y convencionales son ambas recargables pero la diferencia radica en la construcción interna y que tanta energía pueden almacenar. La batería de ácido de plomo encontrada en un

vehículo convencional continua, siendo necesaria para el arranque de los vehículos híbridos, pero no provee suficiente energía para impulsar el motor eléctrico.

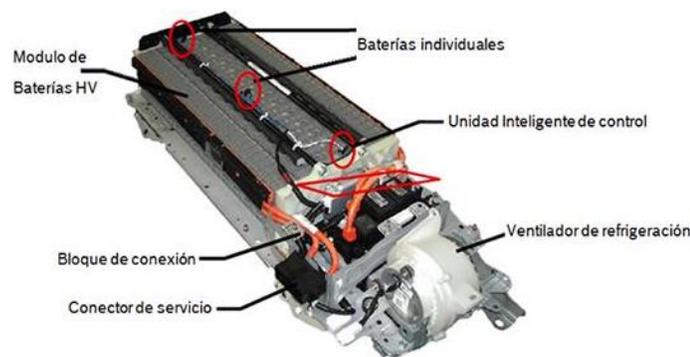
En el invierno cuando el aceite se hace más espeso y las partes del motor están más pegadas se requiere de más corriente para hacer que el motor gire y lograr arrancarlo. Algunos motores requieren de una corriente de 600 amperios para hacer girar el motor. Es por esa razón que debería de importar la corriente en frío de esta (cold cranking current rating) CCCR por sus siglas en inglés. Estas baterías están diseñadas para dar una subida en la corriente por un corto intervalo de tiempo. De otra forma, la batería solo se necesitará para asistir accesorios como el radio, iluminación, sistemas de seguridad y otros accesorios mientras el motor no esté encendido. Cuando el motor está en funcionamiento, el alternador da la energía necesaria para las demandas del vehículo, también se encarga de recargar la batería a su energía total para el siguiente arranque. La batería está diseñada para estar lista en cualquier momento para liberar toda su carga si es necesario. Utilizar esta batería hasta que se descarga limitará su habilidad de almacenar energía en el futuro por lo cual solo se descarga hasta una carga mínima determinada.

Un vehículo híbrido utiliza una batería de ácido y plomo común para los mismos propósitos que se utiliza en un vehículo convencional, pero un vehículo híbrido también tiene una batería recargable, que está diseñada y construida de una forma diferente, tiene lo que se conoce como una batería de ciclo profundo. La construcción interna de la batería le permite ser descargada y recargada una y otra vez, es muy similar a la batería utilizada en vehículos eléctricos como el ev1 de General Motors o un carrito de golf. La diferencia es que, los vehículos eléctricos necesitan una gran batería ya que la electricidad es su único combustible y debe tener una buena autonomía. Estas baterías son muy grandes

y pesadas. Por ejemplo, el paquete de baterías del Pickup Ranger de Ford construido en 1990 pesaba 1 600 lb, estas baterías poseían una gran cantidad de energía, la mayoría de estos paquetes de baterías son una serie de baterías más pequeñas conectadas unas con otras en una forma que proporciona más voltaje.

Los vehículos híbridos usan una mezcla de las baterías comunes con las encontradas en un vehículo eléctrico. La batería de los híbridos se ha desarrollado mucho, desde los vehículos eléctricos comerciales. Hoy en día, las baterías de hidruro de níquel metálico están siendo utilizado para las baterías de los híbridos en lugar de las baterías de ácido de plomo para reducir el peso y proporcionar más energía, el tamaño de las baterías no es tan grande como el de las baterías de un vehículo eléctrico. En vehículos como el Toyota Prius, la batería tiene un voltaje de unos 300 voltios o más y su potencia, no se mide en amperios sino en kilowatt-amp-hora.

Figura 61. **Partes de las baterías de vehículos híbridos**



Fuente: *Baterías de alto voltaje*. <https://talleractual.com/tecnica/electronica-y-electricidad/2802-vehiculos>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

- Baterías de Litio

El reciente desarrollo de tecnología móvil como celulares, computadoras portátiles y otros ha sido posible gracias a la invención de baterías de iones de litio. Ahora se está adaptando esta tecnología para poder ser utilizada en los vehículos de forma adecuada y eficiente. La diferencia podría ser híbridos mucho más livianos con mejor desempeño y a un precio más bajo.

El desarrollo de avanzadas baterías de Litio podría cambiar la industria automotriz como se conoce. Para comprender los cambios, muchas compañías incluyendo; Subaru, Nissan y Mitsubishi, han hecho vehículos prototipo que utilizan baterías de litio. Toyota se convirtió en el primer fabricante en utilizar baterías de litio en un vehículo de producción cuando colocó baterías de litio en su VITS CVT4, un vehículo solo disponible en Japón. El paquete de baterías del Vitz energizaba las luces, calefacción, aire acondicionado y radio cuando el auto estaba alto permitiendo que el motor de gasolina se apagara.

- Supercapacitores

Una de las ventajas de un tren de potencia híbrido es la habilidad de recuperar energía de las ruedas, mientras este se está deteniendo almacena y reutiliza esa energía cuando el vehículo lo necesita para acelerar de nuevo. Existen muchas formas de lograr esto, cada una tiene sus desventajas y ventajas. Dependiendo del tipo de sistema, la energía puede ser recuperada en forma de electricidad o en forma neumática o hidráulica.

Figura 62. **Supercapacitores**



Fuente: *Supercondensadores la próxima evolución de los vehículos híbridos.*
<http://cocheseco.com/supercondensadores-la-proxima-evolucion-de-los-coches-hibridos/>.
Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.4.5. Sistema de frenos regenerativos

El sistema de frenado regenerativo recupera y convierte la energía que se pierde en una desaceleración o al frenar y la acumula para asistir al motor cuando sea necesario. En la deceleración, el motor eléctrico actúa como generador. Convierte energía cinética en eléctrica que se utiliza para recargar el módulo de baterías de alta tensión produciendo una fuerza de freno regenerativa.

El conductor produce la fuerza de frenada hidráulica con el pedal de freno y es posible convertir una parte de esa inercia en energía eléctrica almacenable en las baterías. Es capaz de contribuir al movimiento del vehículo en un momento posterior.

Para que un vehículo transforme su energía cinética en energía eléctrica almacenable y reutilizable, es necesario conectar un generador eléctrico al tren de rodaje y disponer de baterías para guardar esa energía. Finalmente, para que

pueda reutilizarse y volver a mover el vehículo, es necesario disponer de un motor eléctrico. Este sistema es particularmente efectivo en recobrar energía cuando se circula por ciudad, donde se producen aceleraciones y deceleraciones frecuentes. Las pérdidas por rozamiento en la transmisión son mínimas. El movimiento de las ruedas se transmite a través del diferencial y los engranajes intermedios al motor eléctrico que se convierte en este caso en generador. El sistema de frenado regenerativo consigue recuperar un 65 % de la energía eléctrica que carga las baterías. El aprovechamiento de energía que se puede lograr en estas circunstancias no es completo, y tiene sus propias pérdidas por calor, pero el coche frena tantas veces que permite a un híbrido apagar su motor en cada detención y ponerse en movimiento en modo eléctrico en cada arranque. Los híbridos y eléctricos mantienen la frenada térmica por razones de seguridad. Los discos permanecen, aunque con un uso mucho menor que en un vehículo convencional.

Figura 63. **Componentes de los frenos regenerativos**



Fuente: *El freno regenerativo*. <https://www.excelenciasdelmotor.com/autos/el-freno-regenerativo>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

Figura 64. **Frenos regenerativos de disco**



Fuente: *Funcionamiento del frenado regenerativo*. <https://smallcarsonly.org/frenado-regenerativo-como-funciona-vale-la-pena/>. Consulta: 7 de noviembre de 2020.

2.2.5. Ventajas y desventajas frente a los convencionales

El coche híbrido se asemeja hasta en un 90 % al vehículo convencional. Se pueden apreciar pequeñas diferencias, ya sea en el entorno electrónico o la interfaz que comunica e informa de vehículo a conductor; en diferencias de espacio en el maletero, dado que el híbrido necesita llevar baterías adicionales. La mayoría de las ventajas que se pueden apreciar, se centran en el aspecto técnico.

La principal ventaja es la reducción de la emisión de gases contaminantes y una mejor eficacia en el consumo de combustible fósil. En lugares donde habitualmente se registra una alta contaminación acústica como son las ciudades, este proporciona una notable disminución. El motor del coche híbrido es mucho más silencioso que el convencional y posee un motor eléctrico funcionando muy frecuentemente a velocidades bajas.

El coche híbrido presenta una mayor autonomía que los coches eléctricos simples y tiene una recarga mucho más rápida, en cuanto a funcionamiento. Su motor es más eficiente y elástico que el convencional, así como de respuesta más rápida. El coche híbrido puede funcionar para recorridos cortos sólo con el motor eléctrico, por ejemplo, en la ciudad, que es donde se produce el mayor gasto de combustible.

Un aspecto que ha generado mucha controversia de este vehículo es el aspecto económico. Es la principal y más habitual contra que se presenta actualmente y es nada menos que el precio de inversión inicial. En el mercado se puede encontrar una amplia gama de precios y marcas automovilísticas, si se ciñe a la media, el vehículo híbrido está siempre por encima, dado la tecnología aplicada y los diferentes elementos que incorpora y que le diferencian de un vehículo convencional. Este motivo es el que inicialmente influye al cliente por la elección más sencilla y habitual.

Existen algunos ahorros potenciales de la física del vehículo, a su vez más técnicos como la no necesidad de caja de cambios ni motor de arranque, entre otros.

Cada vez más marcas se lanzan a la aventura de la hibridez y se espera que dicho sector continúe creciendo en los próximos años con la llegada de nuevos HEVs.

Otro punto que destacar son las ayudas para su adquisición o beneficios fiscales en algunos países. En México, por ejemplo, en el impuesto de la renta tasa al 0 %. Existen descuentos en los seguros por la mayor eficiencia y menores roturas, así como por un menor número de accidentes de los coches híbridos.

En todos estos aspectos también existen sus contras. El coche híbrido cuenta con mayor dificultad a la hora de reparar alguna avería o hacerle una revisión. Este vehículo ecológico cuenta entre sus componentes con bastante cantidad de materiales escasos en la naturaleza u obtenibles sólo a través de procesos químicos, como el neodimio y el lantano. El vehículo híbrido pesa más que uno convencional debido al peso del motor eléctrico y de las baterías. Pese a que es más eficiente en el uso de la energía también gasta más por el peso extra. Las baterías que utiliza este vehículo ecológico son tóxicas.

El vehículo híbrido no es la solución final, ni mucho menos la mejor en cuanto a contaminación, como lo es por ejemplo un vehículo eléctrico. Lo es más que un convencional ya que no sólo el uso de los combustibles fósiles es menor, sino que su eficiencia en su aprovechamiento ronda al 44 % de mejoría.

En conclusión, actualmente el vehículo híbrido, se presenta como la alternativa más viable en cuanto a sostenibilidad respecto a las infraestructuras de las que se disponen en la mayor parte del mundo dado su grado de dependencia.

2.2.5.1. Principales ventajas

- Rendimiento superior al de un vehículo convencional
- Mayor autonomía que cualquier otro tipo de vehículo
- Reducción de la emisión de gases contaminantes
- Contaminación acústica nula en velocidades bajas

Potencia: como ya se ha discutido la ventaja de un vehículo híbrido es que utiliza el motor de gasolina solo cuando lo necesita, además este motor está diseñado para funcionar a altas velocidades, en tráfico lento que es cuando el

motor de gasolina utiliza más gasolina; un vehículo híbrido utiliza su motor eléctrico. La Curva Ideal de Potencia es aquella en la que la potencia aumenta de forma gradual a medida que aumentan las revoluciones del motor. Un detalle que hay que notar es que, si bien hay unos motores más eficientes que otros, en la mayoría de los casos entre más potencia dan más combustible consumen.

Torque: en los vehículos híbridos los motores eléctricos proporcionan una curva de torque estable y por esto dan su torque máximo prácticamente a toda velocidad; esto permite que al diseñar el tren de potencia se le pueda proporcionar torque al vehículo para satisfacer las necesidades del diseño, puede ser para un mínimo consumo de combustible o para un mejor desempeño deportivo. Todo esto es controlado por el sistema de control de la transmisión que se coordina con el controlador del M.C.I.

Eficiencia: la eficiencia de un vehículo se puede definir como la cantidad de energía que es convertida en trabajo útil, a pesar de todos los avances hechos durante el siglo pasado, la eficiencia de los motores de combustión interna sigue siendo muy baja, pero lo que más influye en el consumo de combustible, es el conductor y el tráfico. Normalmente, en las ciudades los vehículos viajan en una marcha baja y se mantienen en ralentí por largos periodos de tiempo. Además, un motor de combustión interna tiende a consumir más gasolina mientras alcanza la temperatura operacional para la que fue diseñado.

El vehículo híbrido no ha hecho de los motores de gasolina una maquina más eficiente termodinámicamente, sólo se vale de una serie de controladores electrónicos y dispositivos para intercambiar de fuentes de impulso, para usar cada una en el momento en que son más eficientes. Un motor eléctrico utiliza la energía de manera más eficiente que un motor de gasolina o un motor diésel y al utilizarlo de manera adecuada en combinación con los anteriores puede disminuir

significativamente el consumo de combustible, pero el motor de combustión interna de un vehículo híbrido no es más eficiente termodinámicamente que el de un vehículo convencional, pero el tren de potencia en conjunto si mejora de manera mensurable la eficiencia total.

Consumo de combustible: si hay una cualidad sobresaliente del vehículo híbrido es el bajo consumo de combustible, inclusive los vehículos híbridos cuyo motor eléctrico se activa para proporcionar un desempeño más deportivo consumen menos que sus iguales convencionales.

Emisiones: se ha demostrado que los vehículos híbridos hacen un mejor uso del combustible y es por esa misma razón, estos vehículos tienen unas emisiones de gases más limpias.

El consumo de combustible es directamente proporcional a la cantidad de emisiones de gases, es por esta razón que, estos vehículos son considerados por varias agencias que controlan las emisiones como vehículos de 58 virtualmente cero emisiones. Así, que otra de las grandes ventajas de los vehículos híbridos es que producen menos emisiones de gases nocivos que los vehículos convencionales, de hecho, esta es una de las principales razones por las que están siendo comprados.

Costo y mantenimiento: una de las razones principales por las que muchos están comprando vehículos híbridos es por su carácter ecológico y ahorro de combustible, la mayoría de los que compran estos vehículos son personas con muchos recursos económicos, es esto debido a que los vehículos híbridos son muy costosos en comparación a un vehículo convencional de función y desempeño similar. De hecho, hace poco se hizo un estudio que demostró que

los vehículos híbridos actuales no justifican su alto costo en cuanto a ahorro de gasolina.

Obviamente, los vehículos híbridos actuales son muy costosos por el hecho de que no se fabrican masivamente como los otros vehículos, además incorporan tecnología nueva, la cual también, es muy costosa. En lo que se refiere a mantenimiento del motor de combustión interna es igual al de un vehículo normal, la única diferencia es que utiliza un lubricante sintético muy delgado 0W-20 o 5W-20, esto es porque se han reducido mucho las tolerancias para permitir el uso de un aceite muy delgado y disminuir aún más el consumo de combustible.

2.2.5.2. Principales desventajas

- El problema básico es la portabilidad de la energía eléctrica
- Coste de adquisición y mantenimiento mayor
- Aun usando motor eléctrico, sigue emitiendo gases contaminantes
- Mayor complejidad interna
- Peso del vehículo elevado

3. GRADO DE DESEMPEÑO DEL MOTOR WANKEL COMO EXTENSOR DEL VEHÍCULO HÍBRIDO

3.1. Ubicación del motor Wankel

Los detalles más seguros prácticamente nos especifican que el motor rotativo utilizado proporcionara electricidad a las baterías que serán las encargadas de alimentar al motor eléctrico ya sea de 4 x 2 o de 4 x 4 pudiendo ser de igual manera 1 o 2 motores eléctricos.

Figura 65. **Plataforma electrificada MAZDA**



Fuente: *Híbridos y eléctricos*. <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/actualidad/mazda-montara-motor-rotativo-coches-hibridos-enchufables>. Consulta: 7 de noviembre de 2021.

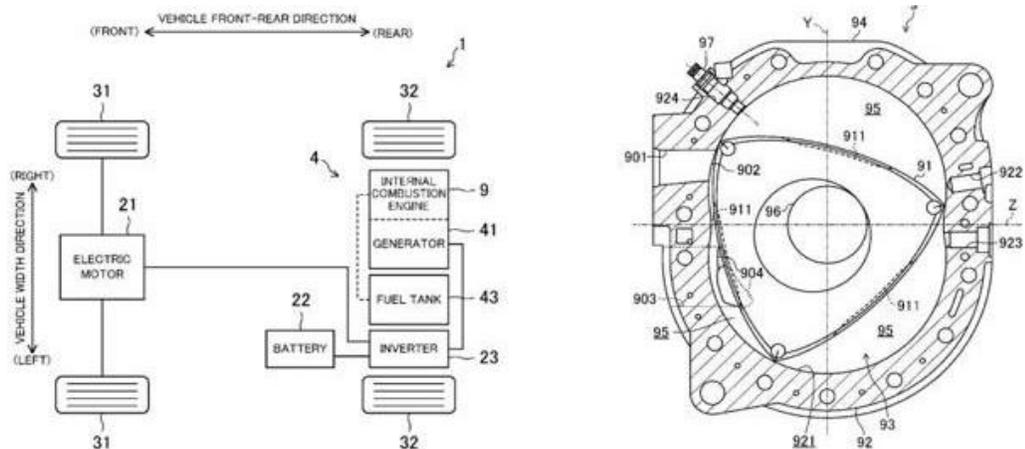
El motor será acompañado de una batería, pero el vehículo se moverá únicamente con el motor eléctrico.

Gracias a que el motor rotativo es excelente trabajando a régimen constante y como generador de electricidad al acompañarle de una batería la cual será encargada de alimentar el motor o los motores eléctricos utilizados para mover el vehículo.

3.2. Objetivo principal de utilizar el motor Wankel

Básicamente sería un sistema que permita sacar el máximo partido a un motor compacto y ligero, que teóricamente es la combinación perfecta para un extensor de autonomía.

Figura 66. Diagrama del motor Wankel como extensor de autonomía



Fuente: *Motor rotativo como extensor de autonomía en vehículos híbridos.*

<https://forococheselectricos.com/2017/04/mazda-coche-electrico-motor-rotativo-extensor-autonomia.html>. Consulta: 16 de noviembre de 2021.

La razón principal para utilizar este tipo de motor básicamente es una cuestión de espacio y peso, ya que los motores Wankel ocupan menos espacio y son más ligeros que un motor convencional. Esta característica nos proporciona

un sinnúmero de ventajas de cara a una configuración EREV (eléctrico con extensor de autonomía), pues combinar un motor de combustión interna con un motor eléctrico y sus baterías suele involucrar un mayor espacio y un elevado peso.

3.3. Beneficios esperados al incorporar el motor Wankel

Básicamente como el motor Wankel no será utilizado como el encargado de impulsar el automóvil sino como un motor-generator que nos brinde un aumento de autonomía en vehículos híbridos, esto debido a que el motor rotativo es muy ineficiente en cuanto a rango de revoluciones se refiere, sin embargo, si se utiliza a revoluciones constantes, el motor Wankel es el ideal.

La principal aceptación del motor Wankel es que, funcionando a revoluciones constantes, precisamente alrededor de 2 000 rpm, es donde encontramos el punto máximo de eficiencia del motor y además nos beneficiamos debido a que trabajando a esas condiciones se contienen las emisiones dañinas y se logra poder seguir utilizando el motor.

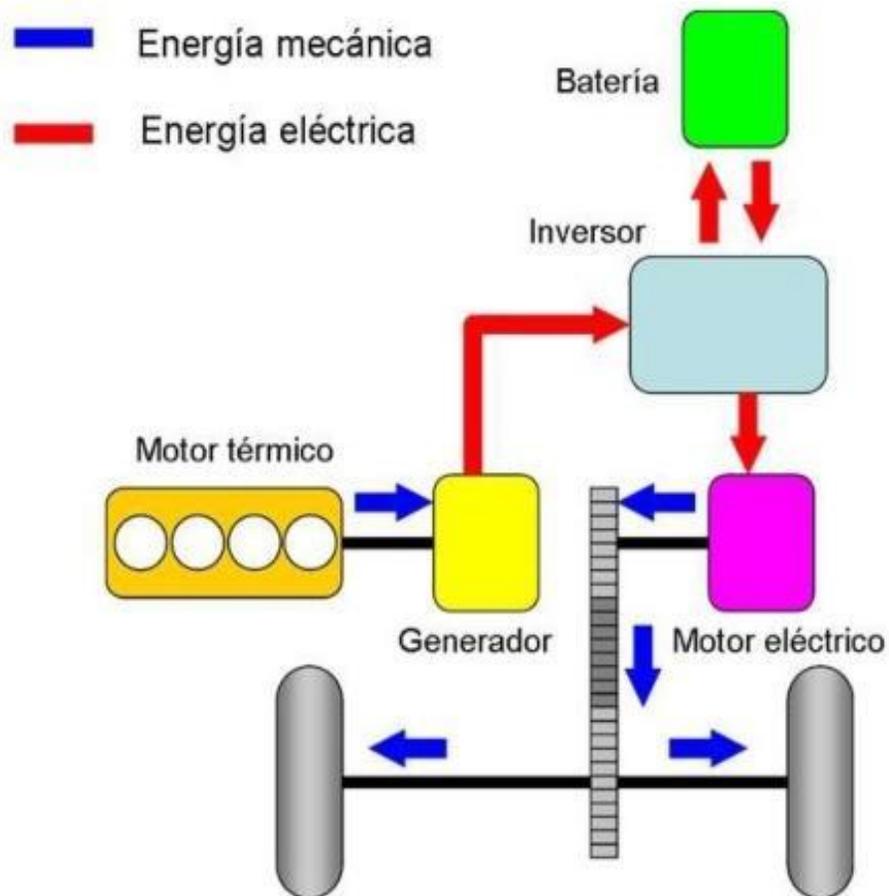
De igual manera los vehículos eléctricos de autonomía extendida también son denominados híbridos en serie, debido a que cuentan con un depósito de gasolina y motor térmico con los que se puede aumentar o adquirir cierta autonomía varios cientos de kilómetros extra.

Por tal razón se puede resumir que la mecánica o motor de combustión en este caso motor Wankel nunca impulsará al conjunto directamente.

El esquema técnico de la figura 67, lo representa, como un sistema híbrido montado en serie, donde en lugar de actuar ambos sistemas uno junto al otro, es el motor térmico el que actúa primero, al brindarle energía al segundo motor

(motor eléctrico) para impulsar el conjunto. Todos los vehículos de este tipo arrancan y funcionan de manera 100 % eléctrica y no es hasta que la batería descende de cierto nivel cuando se pone en marcha la mecánica térmica impulsada por el motor térmico.

Figura 67. **Esquema técnico de vehículos híbridos con autonomía extendida**



Fuente: *Vehículo de autonomía extendida*. <https://soymotor.com/coches/articulos/guia-electricidad-vehiculo-autonomia-extendida-977045>. Consulta: 10 de diciembre de 2021.

Al momento de encender y empezar a funcionar el motor térmico, la autonomía se incrementa a un nivel dependiente al tamaño del depósito de combustible y a la mecánica utilizada, aunque el consumo que puede registrar debería ser bastante más económico que en el caso de que propulsara directamente a las ruedas.

Esto es debido principalmente a dos razones:

- La primera es que los motores son pequeños y están optimizados para este uso específico.
- Y segundo, las solicitudes de aceleración y los picos de potencia repercuten sobre la parte eléctrica, pues el térmico siempre funciona a ritmo constante, lo que permite mantenerlo en el umbral de la mejor eficiencia mecánica.

3.4. Realizar una comparación de autonomía utilizando el motor Wankel

En la actualidad la mayoría de los modelos de vehículos eléctricos poseen, cada vez más, de una mayor autonomía. En paralelo las administraciones públicas de las ciudades con mayor cantidad de este tipo de vehículos en sus carreteras dedican más inversiones a apostar por la sostenibilidad y el resguardo del medioambiente, con base en, instalar puntos de recarga para estos automóviles. Y beneficiando a los usuarios con este aporte a que un vehículo pueda recorrer de 400 hasta 600 kilómetros aproximadamente sin necesidad de recargar.

Los automóviles eléctricos nos aportan una buena cantidad de ventajas muy importantes con respecto a los modelos convencionales de motores de combustión interna, pero de igual manera nos proporcionan inconvenientes a los cuales se debe prestar atención; dentro de sus ventajas encontramos unas muy diferenciales vinculadas al ahorro en combustible, la exención de impuestos en algunos países, las subvenciones, el coste de mantenimiento y la emisión baja de gases contaminantes a la atmósfera.

Aun así, una gran cantidad de posibles compradores potenciales dudan a la hora de decidirse en comprar uno de estos vehículos, esto debido en gran parte a la autonomía que ofrecen. Además, por el momento todavía algunos puntos de recarga son bastante lentos.

De los principales puntos para tener en cuenta en los vehículos eléctricos es la densidad energética de sus baterías ya que esta suele ser muy baja. Por lo tanto, en esta línea, en el caso específico de las baterías de ion de litio, hay que añadir que estas no se pueden descargar por completo ni tampoco recargar al cien por ciento, por consiguiente, a su vez se reduce aún más su autonomía. Por la razón principal de que las baterías pierden su capacidad de manera progresiva a medida que su tiempo de uso se alarga, teniendo la necesidad de llegar a sustituirlas cuando su reducción de autonomía alcanza el treinta por ciento aproximadamente.

En resumen, los vehículos eléctricos en el transcurso de aproximadamente un año pueden perder alrededor de un 2,3 por ciento de su autonomía. Esto se traduce que, al paso de doce años de vida útil, la autonomía de un vehículo eléctrico que por ejemplo en un inicio alcanzaba los 600 kilómetros, ahora estaría alcanzando en torno a los 430 kilómetros, lo que supone un veintiocho por ciento menos de autonomía durante el transcurso de ese lapso.

De tal manera se puede deducir que al momento de utilizar un motor de combustión interna como por ejemplo el motor Wankel, como un extensor de autonomía para vehículos eléctricos podría ser de gran utilidad en este momento, debido a que se estarían igualando las mismas prestaciones y brindando beneficios muy parecidos a los de un vehículo eléctrico, ya que el consumo de combustible seguiría siendo menor, por lo tanto se tendrían bajas emisiones de gases contaminantes a la atmosfera y mayor aprovechamiento de la energía, lo cual los seguiría catalogando como seguros para el medio ambiente, además se mejoraría considerablemente la autonomía en ciertos aspectos importantes como por ejemplo la atracción de una mayor cantidad de clientes potenciales que anteriormente tenían ciertas dudas debido a la autonomía que proporcionaban estos vehículos y que además se les incluía puestos de carga lentos que harían sus viajes más largos y cansados.

Por lo tanto, al momento de utilizar dicha configuración se estaría abarcando una autonomía mayor o similar, además al momento de necesitar recorrer una mayor cantidad de kilómetros, se evitarían paradas largas de recarga ya que el motor rotativo se encargaría de abastecer de energía las baterías.

Con base en esta configuración, la autonomía de un vehículo eléctrico que en un inicio alcanzaba los 450 kilómetros, con esta extensión estaría alcanzando una cantidad igual o parecida de kilómetros al momento de trabajar únicamente con el motor eléctrico, sin embargo en esta ocasión tendríamos el beneficio de que al momento que se queden sin carga nuestras baterías se puede continuar con nuestro trayecto, ya que cuando las baterías empiezan a perder parte de su energía, el motor térmico se encargara de abastecerlas y por lo tanto brindar una mayor cantidad de kilómetros evitando paradas largas de recarga y tiempos más extensos de recorrido.

4. TABLA DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MOTOR WANKEL EN UN VEHÍCULO HÍBRIDO

4.1. Análisis de datos e información obtenida

Los automóviles híbridos son uno de los medios de transporte más sostenible, que creció y actualmente siguen creciendo gracias a ciertas transformaciones que han ido sufriendo a lo largo de los años y creando diferentes tipos y modelos de vehículos de esta índole incluso llegando a lo más reciente que son los vehículos eléctricos puros y recargables, sin embargo a pesar de empezar a formar parte del futuro y de las mejores opciones sostenibles en cuanto a medio de transporte se refiere, pero aún hay muchos aspectos y características con opciones y oportunidades de mejora; y se espera que este tipo de vehículos, ya sea propiamente eléctrico o híbrido enchufable, mejoren en el siguiente lustro.

Continuando con la información conocida se puede analizar la situación actual de los vehículos desde puntos de vista diferentes en cuanto a características y componentes:

Por ejemplo, desde el punto de vista de las baterías, el cual es uno de los componentes fundamentales en los vehículos eléctricos debido a su gran dependencia para el funcionamiento de estos, así como también por su mantenimiento y coste de estas y sin embargo su densidad energética es baja.

Llegamos a confirmar que son un componente demasiado necesario y con mucha opción de mejora ya que su funcionamiento es limitado a una cantidad de

kilómetros y por si eso no fuera suficiente además su vida útil va disminuyendo conforme avanzamos en el tiempo. Ya que conforme su vida útil comienza a disminuir la cantidad de kilómetros que proporcionaba en un principio empieza a disminuir lo cual obliga a realizar paradas de recarga más continuas y esto implica un tiempo de viaje en carretera mucho más largo y agotador.

Por lo que una de las soluciones más acertada es esta opción de autonomía extendida ya que el motor Wankel aportaría ese tiempo necesario al momento de funcionar como un cargador para nuestras baterías y sería útil para llegar a nuestro destino sin necesidad de realizar paradas de recarga. Sin perder de vista el avance de la tecnología, estructura y autonomía en las baterías para vehículos eléctricos, ya que conforme avanzamos se estudian y se ponen a prueba nuevas propuestas y nuevos diseños de baterías que nos aporta el punto exacto en cuanto nuestras necesidades y van mejorando tanto su vida útil como su cantidad y capacidad de proporcionar kilómetros de calidad en carretera, evitando paros innecesarios e imprevistos.

Teniendo en cuenta que uno de los principales puntos de los vehículos eléctricos es que la densidad energética de sus baterías es muy baja. En esta línea, en el caso específico de las de ion de litio, hay que añadir que no se pueden descargar por completo ni tampoco llenar al 100 %, lo que a su vez reduce aún más su autonomía. Esto se debe a que las baterías van perdiendo capacidad de manera progresiva a medida que envejecen, llegando a ser sustituidas cuando dicha reducción alcanza el 30 %.

Otro punto importante a tener en cuenta es el tipo y condiciones de uso del vehículo eléctrico. Porque como se sabe siempre un vehículo tradicional consume proporcionalmente más en ciudad, debido al uso de las marchas cortas y de los acelerones bruscos. Pero en el caso de los vehículos eléctricos ocurre

exactamente lo contrario, ya que consumen mucho menos dentro de las localidades que en carretera, donde tienen que mantener velocidades sostenidas.

Además, el uso de los sistemas y componentes para la comodidad de los pasajeros en el vehículo consume mucha más energía, por ejemplo, la calefacción consume bastante energía, porque el motor eléctrico no genera calor como en el caso de los vehículos de combustión. Esto se debe a que para producir calor se necesita gastar electricidad para generarlo, por lo que uno de los puntos a favor que tienen son la climatización programable.

Con base en esto la solución más eficaz al momento de adquirir un vehículo eléctrico es analizar la información de los diferentes modelos que existen y hay en venta y relacionar sus prestaciones y su capacidad de autonomía con respecto al precio final.

En la actualidad, se encuentran vehículos eléctricos que pueden recorrer sin recargar entre 250 y 600 kilómetros. Además, se pueden encontrar, el tipo de batería que integran y su consumo, expresado en kWh. Además, existen comparadores en internet que gracias a las pruebas que realizan los especialistas indican, junto a esta autonomía homologada por el fabricante, la autonomía real del automóvil, que suele ser algo menor.

Por ejemplo, un vehículo que hoy se ofrece en el mercado de gama media, poseerá una batería de en torno a 70 kWh de capacidad, con un consumo que rondará los 20 kWh por cada 100 kilómetros. En condiciones normales sin hacer demasiado uso del sistema de calefacción, su autonomía real debería superar, al menos, los 300 kilómetros, aunque siempre será más prudente reducir unos 25 kilómetros esa cifra para evitar quedarnos sin batería en un momento dado;

más adelante se realizan tablas y gráficos con dicha información para poder tener datos, parámetros e ideas más concisas acerca de dicha autonomía.

Por lo tanto, si el precio de las baterías de los vehículos eléctricos repercute directamente en el precio final del automóvil, esto es y será un aspecto que frena el avance del vehículo eléctrico. También la falta de infraestructuras de recargas rápidas a falta de una autonomía significativamente grande es un aspecto importante para tener en cuenta.

Sin embargo, hay un aspecto que hace que esa transición hacia el vehículo eléctrico sea bastante complicada para la mayoría de los automovilistas ya que existe un inconveniente y es el qué pasa con los vehículos que se quedan en la calle y no tienen un estacionamiento en casa. Ya que estos no son precisamente unos pocos.

Un vehículo eléctrico es una opción viable si tienes donde cargarlo. No tiene por qué ser un garaje individual, una plaza de aparcamiento también sirve para instalar un punto de carga. Pero incluso en el centro de las grandes ciudades, no hay plazas de aparcamiento suficientes para todos; Entonces con tanto vehículo estacionado en la calle, las soluciones que se nos ofrece actualmente para poder recargar un vehículo eléctrico son bien pocas. Las hay, pero nos limitan mucho y no son una opción viable para la mayoría de los automovilistas. Y es aquí donde encontramos que la solución podría venir de los eléctricos de autonomía extendida.

Pues de ser un sistema que parece haber caído en el olvido más absoluto ahora aparece como una solución satisfactoria en la fase de transición para los fabricantes y para los usuarios que no pueden disponer de un punto de carga en su domicilio.

El eléctrico de autonomía extendida es un automóvil que se mueve exclusivamente por la potencia que suministra el o los motores eléctricos que lo equipan. Es decir, es un vehículo eléctrico.

La electricidad que alimenta el motor eléctrico puede venir de la energía almacenada en su batería mediante las frenadas regenerativas, tras cargar la batería vía una toma de corriente o bien de la energía producida por un motor de combustión interna que actúa a modo de generador. Por lo tanto, el motor de combustión interna funciona a un régimen constante por lo que el consumo en carburante se mantendría en niveles muy bajos.

La dificultad que podríamos obtener sería encontrar el mejor compromiso entre la capacidad de la batería y la mayor densidad posible para no mermar el consumo de combustible. Con una mayor capacidad de la batería se puede aprovechar más las frenadas regenerativas y almacenar más energía para usar menos el motor de combustión interna. Pero de igual manera si el vehículo debe llevar una batería demasiado grande, aumentaría el peso del vehículo y por tanto el consumo final cada vez que recurriese a utilizar al motor de combustión interna.

4.2. Elaboración de tabla de resultados de autonomía

Con base en la información adquirida y tabulada de una prueba de eficiencia en vehículos eléctricos, analizamos los parámetros más importantes en cuanto a vehículos eléctricos se refiere; de los modelos más comunes y conocidos de largo alcance, equipados con las baterías más grandes disponibles actualmente en el mercado.

Se analizó la información de alrededor de 18 vehículos eléctricos y se cuantificó la cantidad de kilómetros que pueden hacer y la cantidad de kilómetros que consumen realmente en el tráfico.

El objetivo de la prueba era medir en carretera, bajo condiciones lo más realistas posibles, el rendimiento de los vehículos en términos de autonomía y consumo de energía. La prueba se realizó conduciendo por uno de los mayores circuitos de carretera de Europa.

La prueba consistía en utilizar los vehículos en el tráfico extremadamente variable, en el tiempo muerto y el largo de todo el recorrido. Realizar la prueba en estos vehículos significaba viajar a velocidades máximas de autopista alternando con deceleraciones más o menos progresivas y posteriores aceleraciones.

Básicamente es una prueba de esfuerzo que se utiliza para comprobar sobre el terreno tanto la eficacia de los sistemas de regeneración durante el frenado como la eficacia del motor durante la recuperación.

Además del tráfico, hay que tener en cuenta las variables ambientales y las especificaciones de cada vehículo. Y aclarar que no todos los vehículos estaban equipados con neumáticos optimizados y específicos para vehículos eléctricos.

Los protagonistas de la prueba fueron todos los vehículos eléctricos disponibles actualmente en el mercado con una batería de más de 70 kWh y otros con menor capacidad de batería, pero económicamente más accesibles. Todos estos modelos difieren en precio, tamaño y prestaciones, por lo que no son directamente comparables. Sin embargo, las mediciones que surgen de esta

prueba son de interés para todos los compradores potenciales, porque marcan la diferencia en cuanto a necesidades de movilidad se refiere.

Los resultados de la prueba se obtuvieron bajo las siguientes condiciones de conducción: la prueba se realizó a mediodía, a partir de las 11.30 horas aproximadamente, los vehículos circularon durante una longitud de 68,2 km por vuelta, todos los vehículos se condujeron en el programa de conducción normal, el aire acondicionado de cada vehículo se ajustó a 22 ° C, la velocidad de cruceo fue de 130 km/h, se exigía un estilo de conducción progresivo en los desplazamientos, siguiendo el tráfico y evitando aceleraciones o frenadas bruscas, cuando se alcanzaba el 5 % de carga residual, se autorizaba a cada conductor a abandonar la autopista para buscar la estación de recarga más cercana y recoger los datos registrados por el ordenador de viaje.

Los datos finales de la prueba son el resultado de lecturas manuales, lecturas del ordenador de a bordo y las medidas tomadas por un software, que realizó el seguimiento por satélite de los vehículos y recogió los datos de la unidad de control electrónico.

En primer lugar, se encuentran la capacidad de batería que trae cada vehículo teóricamente versus la capacidad real brindada por la batería en condiciones reales de movilidad y condiciones presentadas en el día a día.

Tabla II. **Batería nominal vs Batería Real**

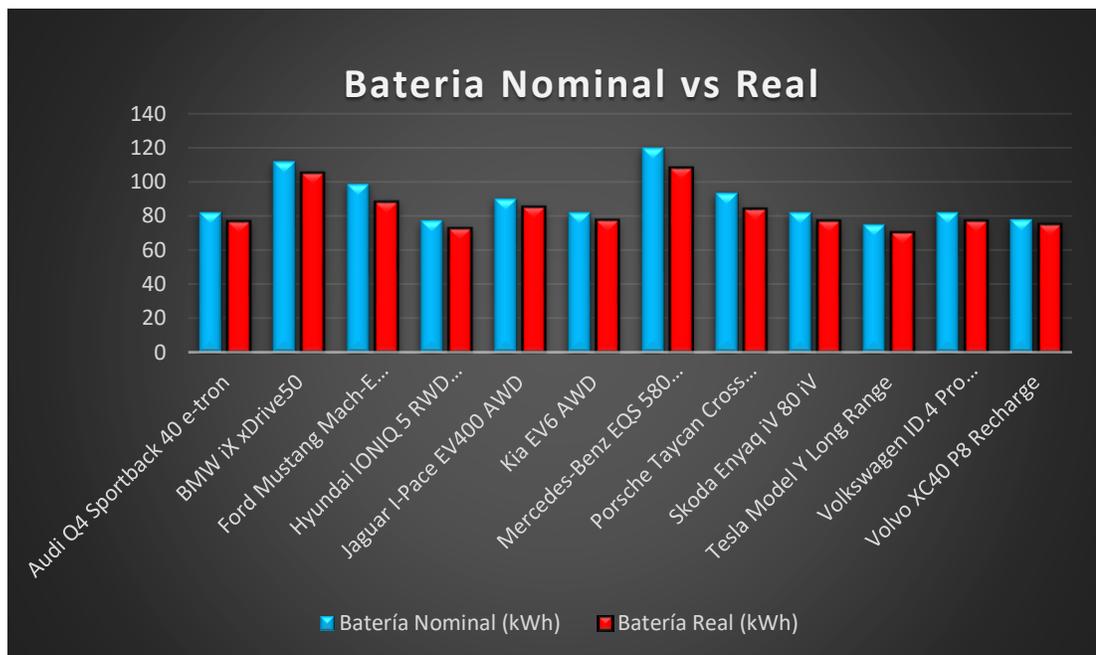
Tipo de Vehículo	Batería Nominal (kWh)	Batería Real (kWh)
Audi Q4 Sportback 40 e-tron	82	76,6
BMW iX xDrive50	112	105
Ford Mustang Mach-E Extended Range AWD	98,7	88
Hyundai IONIQ 5 RWD Evolution	77,4	72,6
Jaguar I-Pace EV400 AWD	90	85
Kia e-Niro	39,2	35
Kia EV6 AWD	82	77,4
Mercedes-Benz EQS 580 4Matic	120	108
MINI Cooper SE	32,6	30
Peugeot e-208	50	48
Porsche Taycan Cross Turismo Turbo S	93,4	84
Renault Zoé	40	38
Skoda Enyaq iV 80 iV	82	77
Tesla Model 3	50	48
Tesla Model Y Long Range	75	70
Volkswagen ID.3	55	50
Volkswagen ID.4 Pro-Performance	82	77
Volvo XC40 P8 Recharge	78	75

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Se puede observar en la tabla II, la comparación realizada que se encontró en cuanto a la capacidad de batería que se tenía de fábrica contra la capacidad real que es entregada en los vehículos al momento de utilizarlos en el día a día bajo condiciones reales de funcionamiento, con lo cual se puede corroborar que lo que se había mencionado acerca de que la autonomía que dan desde que se obtienen de fábrica se les debe restar unos 25 a 30 km reales debido a la diferencia de capacidad real que encontramos al momento de realizar las pruebas de campo correspondientes.

Y confirmar de igual manera la información que aproximadamente 20 kWh nos proporcionan alrededor de 100 km de trayecto en condiciones normales reales.

Figura 68. **Gráfico batería Nominal vs. Real**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Se realizó un gráfico de barras para demostrar la diferencia en cuanto al valor nominal de la batería, proporcionado desde fábrica, versus el valor real arrojado de la batería en condiciones normales de funcionamiento.

Los vehículos eléctricos de la prueba son muy diferentes, por lo que es importante obtener una visión general de la capacidad de la batería, distinguiendo entre el valor nominal y el valor real utilizado en la carretera, dependiendo de la lógica de gestión electrónica del fabricante. Las baterías más grandes son claramente destinadas a los vehículos más importantes en términos de tamaño y posicionamiento, mientras que la batería relativamente más pequeña es para vehículos más compactos y económicos.

También se puede observar las cifras de potencia de carga de corriente alterna y de corriente continua en la tabla III. Pero el valor que marca la diferencia para un coche de viaje es el valor de corriente continua, que indica el pico máximo de potencia que se puede alcanzar en la carga ultrarrápida. Porque en la práctica, todos los vehículos de la prueba consiguen cargar entre el 5 % y el 80 % en 30-40 minutos aproximadamente

Tabla III. **Cifras de Potencia. Corriente Alterna vs Corriente Continua**

Tipo de Vehículo	AC (kW)	DC (kW)
Audi Q4 Sportback 40 e-tron	11	125
BMW iX xDrive50	11	195
Ford Mustang Mach-E Extended Range AWD	11	150
Hyundai IONIQ 5 RWD Evolution	11	220
Jaguar I-Pace EV400 AWD	11	100
Kia e-Niro	11	220
Kia EV6 AWD	11	220
Mercedes-Benz EQS 580 4Matic	22	200
MINI Cooper SE	11	200
Peugeot e-208	11	220
Porsche Taycan Cross Turismo Turbo S	11	270
Renault Zoé	11	220
Skoda Enyaq iV 80 Iv	11	125
Tesla Model 3	11	250
Tesla Model Y Long Range	11	250
Volkswagen ID.3	11	125
Volkswagen ID.4 Pro-Performance	11	125
Volvo XC40 P8 Recharge	11	150

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Luego llegamos a un parámetro fundamental y bastante determinante al momento de elegir y adquirir un vehículo eléctrico y es su autonomía con la cual llegamos a los resultados detallados en la tabla IV, donde se puede observar que los vehículos que oficialmente llegan más lejos son Tesla Model 3 con 448 km y

el BMW iX con 416 km. Y entre los vehículos que se detienen primero o recorren menos distancia encontramos el Volvo XC40 con 285 km, el Kia e-Niro con 289 km y el MINI Cooper SE con 270 km.

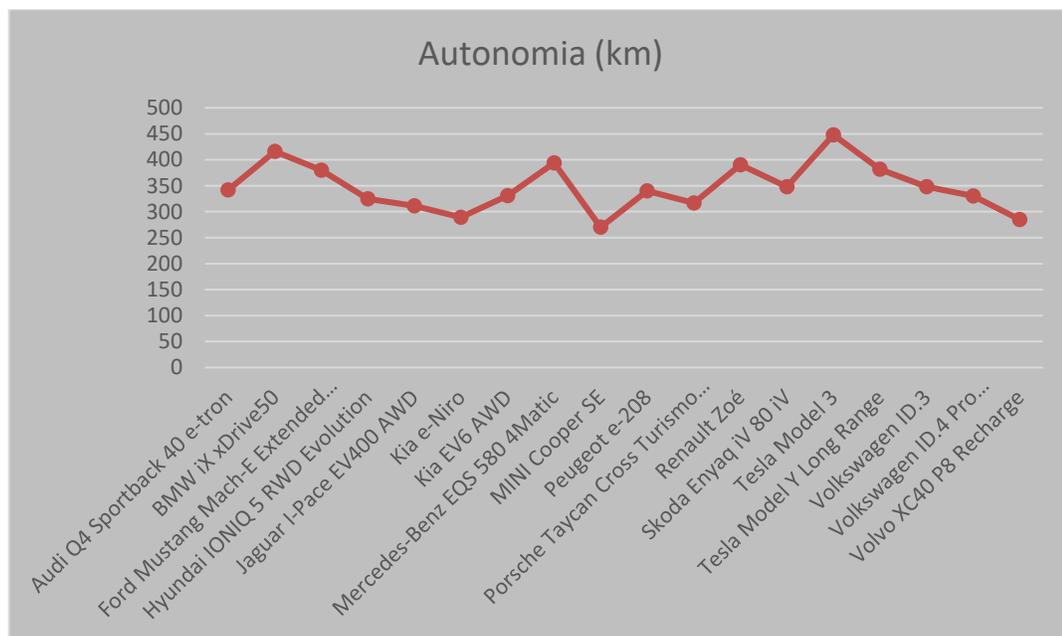
Tabla IV. **Autonomía**

Tipo de Vehículo	Autonomía (km)
Audi Q4 Sportback 40 e-tron	342
BMW iX xDrive50	416
Ford Mustang Mach-E Extended Range AWD	380
Hyundai IONIQ 5 RWD Evolution	325
Jaguar I-Pace EV400 AWD	311
Kia e-Niro	289
Kia EV6 AWD	331
Mercedes-Benz EQS 580 4Matic	394
MINI Cooper SE	270
Peugeot e-208	340
Porsche Taycan Cross Turismo Turbo S	317
Renault Zoé	390
Skoda Enyaq iV 80 Iv	348
Tesla Model 3	448
Tesla Model Y Long Range	382
Volkswagen ID.3	348
Volkswagen ID.4 Pro-Performance	330
Volvo XC40 P8 Recharge	285

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Siempre teniendo en cuenta que dichos vehículos son eléctricamente puros utilizando baterías de aproximadamente 70 kWh los más altos y con sistemas de frenos regenerativos para abastecer las baterías, sin embargo es un punto de inflexión considerable que al momento de utilizar un motor en este caso Wankel rotativo como generador de energía para mantener nuestras baterías cargadas, podríamos obtener una mayor autonomía aproximada sin necesidad de realizar paros de recarga, según datos y estudios consultados y analizados.

Figura 69. **Gráfico autonomía**



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

Por lo que si por ejemplo se tiene un vehículo; con base en nuestros datos de la tabla II con una batería de 70 kWh y con base en la media de autonomía de la tabla IV y brinde una autonomía de 400 km, que teóricamente quede aun energía para continuar el trayecto, pero adicional a eso se le coloque en serie un motor Wankel como generador de energía para abastecer las baterías, se estaría

encontrando que básicamente se tendría una autonomía teórica de 600 km como mínimo sin realizar paradas de recarga lo cual sería un beneficio excelente, ya que podríamos movilizarnos de un extremo de una ciudad a otro sin ningún inconveniente, además de poder realizar viajes entre ciudades sin preocuparnos por la carga de nuestras baterías; y de ser necesario realizar una recarga hasta llegar al punto final del recorrido.

Se finalizó con un análisis de costes detallado en la tabla V, con los vehículos de la prueba en términos de economía, ya que es un excelente parámetro y muy importante para los potenciales compradores y es de mucha utilidad para poder tener una idea real del precio que costaría un vehículo y que proporcione una autonomía aceptable con la capacidad necesaria de poder moverse de un punto a otro sin necesidades de recarga y que sea factible y cómodo económicamente.

Tabla V. **Precio de Vehículos**

Tipo de Vehículo	Precio (Quetzales)
Audi Q4 Sportback 40 e-tron	Q380 030,70
BMW iX xDrive50	Q809 245,50
Ford Mustang Mach-E Extended Range AWD	Q433 356,21
Hyundai IONIQ 5 RWD Evolution	Q350 504,70
Jaguar I-Pace EV400 AWD	Q626 028,90
Kia e-Niro	Q216 783,00
Kia EV6 AWD	Q374 296,44
Mercedes-Benz EQS 580 4Matic	Q1 139 276,30
MINI Cooper SE	Q244 910,40
Peugeot e-208	Q250 582,50
Porsche Taycan Cross Turismo Turbo S	Q1 489 555,60
Renault Zoé	Q215 229,00
Skoda Enyaq iV 80 lv	Q351 981,00
Tesla Model 3	Q357 342,30
Tesla Model Y Long Range	Q497 280,00
Volkswagen ID.3	Q250 504,80
Volkswagen ID.4 Pro-Performance	Q362 043,15
Volvo XC40 P8 Recharge	Q435 702,75

Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Excel.

4.3. Factibilidad e inconvenientes de incorporar el motor Wankel como extensor de autonomía

Con base en los análisis realizados y datos recopilados se puede obtener una valoración más detallada con parámetros importantes y necesarios para determinar las razones que nos pueden hacer una propuesta factible y los inconvenientes que se pueden encontrar con dicha propuesta.

Lo aceptable de esta propuesta es que presumiblemente contará con la etiqueta cero emisiones y además no se necesita estar pendientes de la autonomía y de los tiempos para recargar ya que, gracias al depósito de

combustible, la combinación de un motor eléctrico con el motor térmico y el paquete de baterías, se lograría alcanzar una autonomía eléctrica aproximada de unos 670 km que serían excelentes para una movilidad diaria y eficiente.

Con base en esto y sabiendo que la empresa Mazda es la que tiene la patente de uso del motor rotativo, se puede encontrar la principal idea de que uno de los precursores de esta idea sería ellos con su propuesta del Mazda MX-30 rotativo que precisamente no sería un híbrido enchufable al uso. Y además que el rotativo sería un generador externo encargado de alimentar la batería del sistema eléctrico en las situaciones que este lo necesite. Por lo tanto, este vehículo podría funcionar en un rango óptimo de revoluciones haciendo que el consumo de gasolina y emisiones de CO₂ sea más bajo que en muchos rivales de competidores directos.

Además de mantener la configuración eléctrica, el pequeño motor térmico será capaz de recargar la batería sobre la marcha y/o alimentar directamente el propulsor eléctrico. En cualquier caso, el vehículo siempre lo impulsara la parte eléctrica.

También gracias al pequeño tamaño del motor rotativo, este se adapta perfectamente a toda la estructura interna de un vehículo cien por cien eléctrico. Por lo cual el motor rotativo sólo se activará cuando el nivel de carga de la batería está llegando a su fin, y es exactamente en ese momento, cuando el motor rotativo entra en acción para accionar el generador.

El retorno del motor rotativo con función de extender y alargar la autonomía de un vehículo eléctrico es un paso más en la estrategia de electrificación pura, específicamente en Mazda donde sus principales propuestas de vehículos eléctricos no han desarrollado una autonomía adecuada ni satisfactoria para la

movilidad y el mercado actual, esta propuesta es un gran paso para comenzar a aumentar la autonomía de sus vehículos y posicionarse en un mejor sector del mercado actual de vehículos eléctricos.

Por lo tanto, en lugar de desarrollar un vehículo eléctrico con un extensor de autonomía que solo funcione en emergencias o largos trayectos, la mejor opción es replantear el proyecto para dar vida a un vehículo que se acerque al planteamiento del híbrido en serie, en un concepto donde la autonomía eléctrica que brinde la batería sea menor y que el generador trabaje de forma mucho más frecuente.

Otra opción que lo hace factible es que al ser híbrido y combinar las ventajas de un vehículo de motor convencional con las del eléctrico. Proporciona mayor potencia, aceleración y autonomía, bajo un menor consumo y contaminación. Además, de la capacidad de la batería de los vehículos híbridos de recargarse mientras se conducen. Estos vehículos también ofrecen los frenos, seguridad y confort de los modelos de combustión.

En términos de economía y la inversión del vehículo, el híbrido sale ganando. Porque un automóvil híbrido es más barato que uno eléctrico. Pero en cuanto a mantenimiento, el vehículo híbrido sigue contando con elementos de desgaste. Tiene embrague, filtros, correa de distribución, entre otros. Por lo tanto, el híbrido seguramente pasará más veces por el taller que el eléctrico, que requiere menos mantenimiento.

En cuanto al gasto energético, es más económico hacer kilómetros con electricidad que con combustible. Ya que el eléctrico no necesita nada de combustible, gasta menos por kilómetro. Y por una cierta cantidad se puede instalar un punto de recarga en casa para siempre.

Un punto a favor sería que la autonomía de los vehículos eléctricos supera actualmente los 300 kilómetros en la mayoría de los modelos. Sin embargo, esto es dependiente en gran medida a el tipo de batería y del modelo elegido. Sin embargo, los vehículos eléctricos más pequeños, destinados a un uso cotidiano y urbano, suelen tener una autonomía en un rango de 100 km a 250 km o menos, y es en este sector donde nuestra propuesta puede tener auge y aceptación para proporcionar mayor cantidad de kilómetros cuando sea requerido o específicamente en viajes mucho más largos. Ya que los modelos más caros, tienen una autonomía superior a 500 km.

Las baterías más comunes son las de iones de litio. Presentes en la mayoría de los vehículos eléctricos, debido a que este tipo de batería tienen las características fundamentales de ser barata, eficiente y duradera. Su mayor inconveniente es su sensibilidad al frío, es decir, pierde capacidad cuando bajan las temperaturas. Finalmente se encontró que utilizar un motor rotativo como extensor de autonomía en vehículos híbridos puede ser una manera factible, muy eficaz y con excelentes resultados alcanzables a corto y mediano plazo, pensando alcanzar en un futuro cercano la electrificación completa, para disminuir de gran manera la huella de carbono que actualmente producimos y contamina y daña el planeta.

Figura 70. **Motor rotativo a hidrógeno**



Fuente: *Motor rotativo como extensor de autonomía en vehículos híbridos.*

<https://forococheselectricos.com/mazda-planea-usar-un-motor-rotativo-como-extensor-de-autonomia.html> Consulta: 6 de julio de 2022.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que las tecnologías están avanzando a pasos agigantados y que, si a corto plazo una de nuestras opciones aceptables es un vehículo híbrido, no hay que olvidar las diferentes tecnologías que trabajan al lado de estas propuestas de electrificación por varias razones, tanto para reducir la explotación y demanda del petróleo como para reducir la contaminación ambiental producida por la huella de carbono.

Es aquí donde sale un posible inconveniente que a la vez se transforma en otra opción aceptable y considerable en el futuro de la movilidad, como es el de los motores de hidrógeno e incluso vehículos híbridos utilizando motores o motores rotativos a hidrógeno; el problema con este cambio es el de ofrecer unas mecánicas más fiables, más baratas y más eficientes en conjunto que las actuales.

No obstante, para ello deben realizarse ciertos acomodos de cara a funcionar mediante hidrógeno, siendo el principal, el hecho de dejar de lado la refrigeración por aceite tan típica en estos motores. En cuanto a la utilización del

hidrógeno como combustible, esto ofrece otros beneficios como temperaturas más homogéneas en las cámaras de combustión y la prevención de auto detonaciones no deseadas.

Figura 71. **Pila de combustible de hidrógeno**



Fuente: *Hidrogeno como extensor de autonomía*. <https://www.diariomotor.com/electricos/pila-hidrogeno-extensor-autonomia-coche-electrico/> Consulta: 6 de julio de 2022.

El desarrollo de estos motores solo contempla el uso de un rotor de cara a contener los costes de fabricación, mantenimiento y peso. Por lo cual estos motores estarían diseñados únicamente a trabajar a una carga y régimen de revoluciones constante; y es aquí donde se encuentra el posible acomodo a nuestra propuesta o incluso propuestas similares al lado, con otras iniciativas, pero mismos objetivos e intenciones. Aun así, dichos motores se planea ofrecerlos en distintos tamaños según el tipo de transporte al que vaya dirigido.

CONCLUSIONES

1. Se realizó una recopilación acerca de las experiencias empíricas en cuanto a estructura, diseño y funcionamiento de los primeros motores Wankel, desde su creación hasta sus primeras aplicaciones en la industria automotriz, donde su diseño y funcionamiento era completamente diferente y revolucionario a lo que estábamos acostumbrados en ese momento; también se analizaron las primeras propuestas acerca de los vehículos híbridos desde sus primeras impresiones hasta los diferentes tipos y diseños de los mismos, además de conocer y recopilar los primeros vehículos híbridos e incluso eléctricos que fueron introducidos hace unos años al mercado.
2. Se determinó y analizó detalladamente la composición, y funcionamiento de los diferentes tipos de vehículos híbridos actualmente en el mercado, así como también la estructura, diseño y procesos de los vehículos equipados con motor Wankel, desde las principales partes y sistemas hasta su estructura, ventajas y desventajas respectivamente, con la intención de determinar y conocer acerca de esas diferentes formas y tecnologías utilizadas en los vehículos para brindar movimiento y poder transportarnos de un lugar a otro, con base en esto se puede conocer acerca de las experiencias en cuanto a rendimiento de los vehículos híbridos y los pocos pero existentes vehículos con motor de combustión interna Wankel.
3. Se evaluó la posibilidad de utilizar el motor Wankel colocado en serie en un vehículo híbrido como generador de energía para mantener las baterías

con energía con la intención de evitar paros innecesarios de recarga, analizamos la posible ubicación del motor, su principal funcionamiento o utilización específica en dicha configuración, así como también las razones por las que el motor Wankel puede ser el adecuado o ideal en dicha configuración, de igual manera describimos y analizamos los beneficios que van de la mano con las razones fundamentales para optar por esta propuesta, ya que encontraríamos un nuevo funcionamiento para un motor que actualmente está en desuso pero en el pasado dio excelentes resultados y prestaciones que serían un punto para poder tomar en cuenta y querer utilizarlos en esta nueva propuesta y que se adapta a el avance que estamos sufriendo en la movilidad y transporte.

4. Se analizó los beneficios esperados al utilizar dicha configuración y al momento de utilizar el motor Wankel, que prácticamente lo utilizaríamos en un régimen constante y no se le exigiría mayor demanda, lo cual nos ayudaría a mantenerlo en un proceso de bajas emisiones, porque específicamente los vehículos de este tipo arrancarían y funcionarían de manera eléctrica completa y solamente cuando la batería descienda de un cierto nivel empezaría a funcionar la mecánica térmica impulsada por el mencionado motor.
5. La factibilidad de utilizar esta propuesta con dicha configuración podría ser asequible debido a que proporcionaría una mayor autonomía en carretera y evitaría constantes paros de recarga, también al momento de no contar con un lugar para guardar nuestro vehículo beneficiaría debido a que por el inconveniente no podríamos tener un cargador en casa, de igual manera se debe tener en cuenta el posible inconveniente, y sería la posible incorporación de motores de hidrogeno para eliminar la dependencia de

combustibles fósiles y además proporcionar excelentes e incluso probablemente mejores beneficios.

RECOMENDACIONES

1. Considerar que a pesar de que los motores rotativos han sido utilizados en el pasado e incluso han ofrecido excelentes prestaciones, utilizados en vehículos de competencia y utilizados a altas revoluciones, en la actualidad han ido quedando obsoletos, sin uso y prácticamente en la historia, posiblemente por la complejidad de sus componentes y funcionamiento, sin embargo debido a la grandiosa imagen que ofreció en el pasado es una razón considerable para tenerlo en cuenta en este tipo de propuesta que ya es parte de la modernidad y nuevas tecnologías en movilidad y transporte, además de su cómodo tamaño y forma.
2. Concientizar que en la actualidad estamos frente a las nuevas formas de movilidad con la electrificación de vehículos y anteriormente con las propuestas de vehículos híbridos, sin embargo no se han logrado asentar completamente debido a costos, diferentes tipos de funcionamiento e incluso espacios y lugares específicos para cada uno, ya que necesitan de espacios para recargar y de dispositivos encargados de proporcionar dicha energía, gracias a esto es donde se puede esperar una gran acogida a este tipo de propuesta ya que se le da una nueva manera de funcionar a el motor rotativo y además se adapta a las nuevas tecnologías de vehículos híbridos y eléctricos donde el principal objetivo es eliminar la dependencia de combustibles fósiles.
3. Reconocer que debido al aumento y costo de combustibles fósiles, grandes compañías se pusieron a indagar nuevas maneras de tecnología para movilizarnos de un lugar a otro, por lo que es aquí donde surgen los

nuevos vehículos híbridos como primer paso y actualmente los automóviles eléctricos ya que eliminan el uso de combustibles fósiles y a la vez los convierten mucho más amigables con el medio ambiente, el cual es un problema extremadamente serio por el estado actual de nuestros recursos naturales.

4. Establecer que la configuración propuesta puede parecer una propuesta arriesgada, pero brinda la posibilidad de acogerse a las nuevas tecnologías y sobre todo aportar mayor autonomía y capacidad en el uso diario, ya que se evita realizar paros de recarga y evita depender de un lugar específico para guardar y recargar nuestros vehículos, sin olvidar que el motor rotativo estará funcionando a un régimen constante el cual permite mantenerse dentro del umbral necesario y con bajas emisiones contaminantes, además por consiguiente no se consumiría mayor combustible fósil por lo que puede ser una opción factible mientras la tecnología avanza y se encuentra una mejor solución.
5. Considerar factible nuestra propuesta, en lo que la tecnología avanza, porque en paralelo están surgiendo los motores a hidrógeno e incluso posibles configuraciones de motores híbridos que en lugar de un motor de combustión interna, que funciona mediante combustible, utilizan motores a hidrogeno, lo cual eliminaría por completo la dependencia y el uso de combustibles fósiles que prácticamente es uno de los principales objetivos y metas de la industria automotriz, además de eliminar la producción de gases contaminantes lo cual hace que la propuesta sea de gran valor y forme parte del cambio pensando en la movilidad actual.

BIBLIOGRAFÍA

1. ÁLVAREZ Mónica; PEREZ Julio; ROVIRA Joan. *Motores alternativos de combustión interna*. Segunda edición. Barcelona: UPC. 2005. 1024 p.
2. *Autonomía de un vehículo eléctrico y claves para su uso*. [en línea]. <<https://www.bbva.com/>>. [Consulta: 8 de noviembre de 2020].
3. CAJAMARCA Diego. GARCÍA Eduardo. *Determinación de las ventajas ambientales que presenta un vehículo híbrido respecto a un vehículo normal de similares características*. Trabajo de graduación, Universidad Politécnica Salesiana. 2010. 210 p.
4. *Características y definición de un vehículo de autonomía extendida*. [en línea]. <<https://soymotor.com/>>. [Consulta: 6 de noviembre de 2020].
5. *Conducir eficientemente un vehículo eléctrico nada tiene que ver con uno de combustión*. [en línea]. <<https://movilidadelectronica.com/>>. [Consulta: 28 de octubre de 2021].
6. *Diferencias entre las cuatro tecnologías de electrificación*. [en línea]. <<https://www.hibridosyelectricos.com/>>. [Consulta: 7 de noviembre de 2020].
7. *El futuro de los vehículos eléctricos de autonomía extendida*. [en línea]. <<https://www.motorpasion.com/>>. [Consulta: 6 de noviembre de 2020].

8. *El motor Wankel y su futuro unido al hidrógeno.* [en línea]. <<https://soymotor.com/>>. [Consulta: 6 de julio de 2022].
9. *El vehículo Mazda de autonomía extendida con motor rotativo.* [en línea]. <<https://www.motorpasion.com/>>. [Consulta: 10 de julio de 2022].
10. FARELL Marc Barthe. Castillo Manuel. *Motores Rotativos, Tipologías y Combustibles Alternativos.* España: UPC. 2009. 156 p.
11. GIACOSA Dante. *Motores Endotérmicos.* Tercera edición. España: Dossat, S.A. 2000. 390 p.
12. *Híbridos enchufables y eléctricos de autonomía extendida.* [en línea]. <<https://www.motorpasion.com/>>. [Consulta: 6 de julio de 2022].
13. JIMÉNEZ Bernabé. *Técnicas básicas de electricidad de vehículos.* Segunda Edición. Málaga: IC. 2012. 50 p.
14. *Mas de cinco millones de vehículos eléctricos por todo el mundo.* [en línea]. <<https://www.bbva.com/>>. [Consulta: 13 de abril de 2021].
15. MEZQUITA José Font. RUIZ Juan. *Tratado sobre automóviles.* Trabajo de graduación, Universidad Politécnica Salesiana. 2004. 1020 p.
16. NAVARRO Angulo. *Desarrollo técnico y evaluación de los aspectos del motor rotativo.* Terrassa: UPC. 2002. 180 p.
17. RAMOS Marc. *Hidrógeno, Aplicación en Motores de Combustión Interna.* Barcelona: UPC. 2009. 150 p.

18. *Vehículo híbrido y eléctricos cuando suponen un ahorro.* [en línea]. <<https://www.bbva.com/>>. [Consulta: 15 de noviembre de 2021].
19. WASDYKE Raymond. *Motores Wankel Operación Prueba y Evaluación, Experimentos con Motores de Combustión Interna.* México: Limusa, 1991. 80 p.
20. WEIST, Margaret. *Elementos de Maquinas.* Séptima Edición. México: Prentice Hall. 1999. 866 p.