

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

Facultad de Ingeniería Automotriz

TESIS DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERA EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Reparación y funcionamiento de un motor rotativo
wankel 10A mazda para implementar en un banco de
prácticas

Evelin Vanessa Tasigchana Amancha

Director: Ing. Raymond Suárez

2012

Quito, Ecuador

CERTIFICACIÓN

Yo, Evelin Vanessa Tasigchana Amancha, declaro que soy el autor exclusivo de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal mía. Todos los efectos académicos y legales que se desprendan de la presente investigación serán de mi exclusiva responsabilidad.

Evelin Vanessa Tasigchana Amancha
CI: 1720473402

Yo, Ing. Raymond Suarez, declaro que, en lo que yo personalmente conozco, a la Señorita, Evelin Vanessa Tasigchana Amancha, es la autora exclusiva de la presente investigación y que ésta es original, auténtica y personal suya.

Ing. Raymond Suarez
Director

AGRADECIMIENTO

En primer lugar a Dios, el ser incondicional de mi vida que me ha llenado de grandes bendiciones y ha sido el apoyo y la morada cuando necesito.

A mi hijo Tomás, la bendición más grande que Dios me ha dado, que con su luz llena mi corazón y me inspira a seguir adelante cruzando todo tipo de obstáculo.

A mis padres que han sido el apoyo incondicional y que con su cariño y esmero han sabido hacer de mí la persona que soy.

A mi compañero y amigo que ha sabido motivarme y apoyarme para seguir adelante con esta investigación.

Al Ing. Raymond Suárez por brindarme todo su apoyo durante este tiempo e impartirme sus conocimientos que son fundamentales para la realización del proyecto.

Al Ing. Cristóbal Arboleda por permitir realizar mi proyecto en su taller y haber sido un eje fundamental en la elaboración de mi tesis ya que con sus conocimientos extensos en motores rotativos ha sabido guiarme correctamente.

A mis hermanos que siempre han creído en mí y a los cuales adoro con toda el alma.

DEDICATORIA

Con todo el amor dedico esta tesis a mi hijo Tomás Benjamín que es el reto más increíble que Dios ha puesto en mi vida, con su ternura y sonrisa ha sabido hacer de mi cada día una mejor persona, ya que con su llegada empecé a ver la vida desde otra perspectiva.

A mis padres que sin ellos todo esto no hubiese sido posible ya que con sus sacrificios y su excelente ejemplo han sabido sacarme adelante y han sabido apoyarme en todos los proyectos que he emprendido.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 .- HISTORIA DEL MOTOR WANKEL..... | 1 |
| 1.1. ROTATIVOS KKM..... | 4 |
| 1.2. ROTATIVO 13B | 5 |
| 1.3. MODELO LUCRE..... | 6 |
| 1.4. ROTATIVOS CON TURBO | 7 |
| 1.4.1. COSMO RE TURBO..... | 7 |
| 1.4.2. RX7 SABANA..... | 8 |
| 1.4.3. EUNOS COSMO | 9 |
| 1.5. PRODUCCIÓN EN LÌNEA | 9 |
| | |
| CAPÍTULO 2 .- ESTUDIO DEL MOTOR WANKEL..... | 11 |
| 2.1. CONSTITUCIÓN DEL MOTOR WANKEL..... | 11 |
| 2.1.1. BLOQUE O CARCASA..... | 13 |
| 2.1.2. ROTOR..... | 16 |
| 2.1.3. MECANISMO DE SELLADO | 18 |
| 2.1.4. ÁRBOL MOTRIZ..... | 23 |
| 2.1.5. ENGRANAJES DE TRANSMISIÓN..... | 24 |
| 2.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR WANKEL | 25 |
| 2.2.1. CICLO TEÓRICO | 26 |
| 2.3. SISTEMA DE LUBRICACIÓN..... | 30 |
| 2.3.1. LUBRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DE SELLADO..... | 31 |
| 2.3.1. LUBRICACIÓN DEL EJE MOTOR | 33 |
| 2.4. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN..... | 35 |
| 2.4.1. REFRIGERACIÓN DEL ESTATOR | 35 |
| 2.4.2. REFRIGERACIÓN DEL ROTOR..... | 39 |
| 2.5. ENCENDIDO DOBLE..... | 43 |
| 2.6. SISTEMA DE ENCENDIDO..... | 46 |

| | | |
|---|---|-----------|
| 2.6.1. | PARTES DEL SISTEMA..... | 47 |
| 2.7. | SISTEMA DE COMBUSTIBLE..... | 55 |
| 2.7.1. | CARBURADOR..... | 56 |
| 2.8. | TERMODINÁMICA DEL MOTOR ROTATIVO WANKEL..... | 59 |
| 2.9.1. | PRIMER PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA..... | 59 |
| 2.9.2. | SEGUNDO PRINCIPIO DE LA TERMODINÁMICA..... | 60 |
| 2.9.3. | TRANSFORMACIONES DE UN SISTEMA TERMODINÁMICO..... | 61 |
| 2.9. | CICLO TERMODINÁMICO OTTO (MOTOR WANKEL)..... | 62 |
| 2.9.1. | ANÁLISIS TERMODINÁMICO..... | 64 |
| 2.10. | DIAGRAMA DE MANDO..... | 65 |
| CAPÍTULO 3 .- ARMADO Y DESARMADO DEL MOTOR WANKEL..... | | 67 |
| 3.1. | DESARMADO DEL MOTOR WANKEL..... | 67 |
| 3.2. | ARMADO DEL MOTOR WANKEL..... | 79 |
| CAPÍTULO 4 .- COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA EL MOTOR WANKEL | | 98 |
| 4.1. | GASES CONTAMINANTES..... | 98 |
| 4.1.1. | DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)..... | 98 |
| 4.1.2. | MONÓXIDO DE CARBONO (CO)..... | 99 |
| 4.1.3. | ÓXIDOS DE AZUFRE (SO _x)..... | 99 |
| 4.1.4. | ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)..... | 100 |
| 4.1.5. | HIDROCARBUROS (HC)..... | 100 |
| 4.1.6. | PARTÍCULAS..... | 101 |
| 4.2. | COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS..... | 102 |
| 4.2.1. | GLP (GAS LICUADO DE PETRÓLEO)..... | 103 |
| 4.2.2. | GAS NATURAL VEHICULAR (GNV)..... | 109 |
| 4.2.3. | BIOGÁS..... | 114 |
| 4.2.4. | ETANOL..... | 118 |
| 4.2.5. | METANOL..... | 121 |
| 4.2.6. | HIDRÓGENO..... | 125 |

| | |
|--|----------------|
| CAPÍTULO 5 .- BANCO DE PRÁCTICAS DEL MOTOR WANKEL..... | 138 |
| 5.1. CONEXIONES DE ENCENDIDO..... | 139 |
| 5.2. CALIBRACIÓN..... | 140 |
| 5.2.1. INSPECCIÓN Y TOMA DE MEDIDAS | 140 |
| 5.2.2. CÁLCULO DE RELACIÓN DE COMPRESIÓN | 156 |
| 5.2.3. ORDEN DE ENCENDIDO DEL MOTOR WANKEL..... | 162 |
| 5.2.4. PUESTA A PUNTO DEL MOTOR | 164 |
| 5.3 GUÍAS DE PRÁCTICAS..... | 165 |
| 5.4 MANTENIMIENTO DEL MOTOR..... | 177 |
| 5.4.1. INSPECCIÓN VISUAL ANTES DEL FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR 178 | |
| 5.4.2. MANTENIMIENTO DE CADA ELEMENTO DEL MOTOR..... | 179 |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 187 |
| BIBLIOGRAFÍA | 189 |
| ANEXOS..... | 190 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | | |
|---------------------|--|----|
| Gráfico 1.1 | Prototipo motor wankel KKM | 2 |
| Gráfico 1.2 | Marcas causadas por rozamiento excesivo | 3 |
| Gráfico 1.3 | Motor L8A | 4 |
| Gráfico 1.4 | Motor 13B | 5 |
| Gráfico 1.5 | Vehículo Lucre | 6 |
| Gráfico 1.6 | Cosmo RE turbo | 8 |
| Gráfico 1.7 | Motor 13B REW | 8 |
| Gráfico 1.8 | Producción en línea del motor wankel | 9 |
| Gráfico 1.9 | Rotativo alimentado por hidrógeno | 10 |
| Gráfico 2.1 | Partes del motor wankel | 12 |
| Gráfico 2.2 | Estator | 13 |
| Gráfico 2.3 | Materiales que forman el estator..... | 14 |
| Gráfico 2.4 | Partes del estator lateral | 16 |
| Gráfico 2.5 | Rotor | 17 |
| Gráfico 2.6 | Elementos de sellado..... | 19 |
| Gráfico 2.7 | Sentido de giro del segmento periférico..... | 20 |
| Gráfico 2.8 | Ubicación del segmento periférico | 21 |
| Gráfico 2.9 | Segmentos laterales | 22 |
| Gráfico 2.10 | Pernos de anclaje | 23 |
| Gráfico 2.11 | Eje motriz..... | 23 |
| Gráfico 2.12 | Engranajes..... | 25 |
| Gráfico 2.13 | Tiempos del motor | 26 |
| Gráfico 2.14 | Tiempo de admisión..... | 27 |
| Gráfico 2.15 | Tempo de compresión | 28 |
| Gráfico 2.16 | Tiempo de combustión..... | 29 |
| Gráfico 2.17 | Tiempo de expansión..... | 29 |
| Gráfico 2.18 | Fase de escape | 30 |
| Gráfico 2.19 | Sistema de lubricación | 31 |
| Gráfico 2.20 | Bomba de aceite | 32 |
| Gráfico 2.21 | Carrera del émbolo | 32 |
| Gráfico 2.22 | Partes del sistema de lubricación | 33 |
| Gráfico 2.23 | Sellos de aceite del rotor | 34 |
| Gráfico 2.24 | Pasajes de agua para refrigeración axial..... | 36 |
| Gráfico 2.25 | Pasajes de agua para refrigeración tangencial..... | 37 |
| Gráfico 2.26 | Mezcla precalentada por los gases de escape | 38 |
| Gráfico 2.27 | Refrigeración radial y axial por aire..... | 39 |

| | |
|--|----|
| Gráfico 2.28 Comportamiento del aceite dentro del motor | 40 |
| Gráfico 2.29 Temperatura en la superficie del rotor | 41 |
| Gráfico 2.30 Control de inyección de lubricante y temperatura de la carcasa del rotor | 42 |
| Gráfico 2.31 Refrigeración del rotor por la mezcla de admisión | 43 |
| Gráfico 2.32 Encendido doble | 44 |
| Gráfico 2.33 Diferencial de presión entre las dos bujías | 45 |
| Gráfico 2.34 Encendido convencional | 46 |
| Gráfico 2.35 Distancia de salto de corriente | 49 |
| Gráfico 2.36 Rotor | 50 |
| Gráfico 2.37 Condensador | 50 |
| Gráfico 2.38 Avance centrifugo | 52 |
| Gráfico 2.39 Avance por vacío | 53 |
| Gráfico 2.40 Eje del distribuidor | 53 |
| Gráfico 2.41 Cabeas de bujías | 54 |
| Gráfico 2.42 Bujías | 54 |
| Gráfico 2.43 Partes del Sistema de Combustible | 55 |
| Gráfico 2.44 Partes del Carburador | 57 |
| Gráfico 2.45 Transformaciones de un sistema térmico | 62 |
| Gráfico 2.46 Diagramas presión - volumen | 63 |
| Gráfico 2.47 Ciclo teórico del motor wankel | 66 |
| Gráfico 3.1 Vistas del motor antes de ser desarmado | 67 |
| Gráfico 3.2 Múltiple y juntas de escape | 68 |
| Gráfico 3.3 Carburador, múltiple y juntas de admisión | 68 |
| Gráfico 3.4 Polea de la bomba de agua | 69 |
| Gráfico 3.5 Bomba de Agua | 69 |
| Gráfico 3.6 Ventilador | 70 |
| Gráfico 3.7 Carcasa Posterior | 70 |
| Gráfico 3.8 Bomba auxiliar de aceite | 71 |
| Gráfico 3.9 Manguera de lubricación | 71 |
| Gráfico 3.10 Volante de inercia y guía | 72 |
| Gráfico 3.11 Carter y filtro de aceite | 72 |
| Gráfico 3.12 Polea del cigüeñal | 73 |
| Gráfico 3.13 Desmontaje tapa frontal | 73 |
| Gráfico 3.14 Engranaje distribuidor y canastilla | 74 |
| Gráfico 3.15 Tensor de la bomba de aceite | 74 |
| Gráfico 3.16 Bomba de aceite | 74 |
| Gráfico 3.17 Contrapeso | 75 |
| Gráfico 3.18 Desmontaje placa de apoyo del contrapeso | 75 |
| Gráfico 3.19 Orden de sacar o desajustar los pernos del motor | 76 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| Gráfico 3.20 | Desmontaje Rotor lateral | 76 |
| Gráfico 3.21 | Juntas de goma | 77 |
| Gráfico 3.22 | Desmontaje rotor | 77 |
| Gráfico 3.23 | Elementos de sellado..... | 78 |
| Gráfico 3.24 | Desmontaje sello de aceite del rotor..... | 78 |
| Gráfico 3.25 | Tapa intermedia y eje motriz..... | 79 |
| Gráfico 3.26 | Desmontaje rotor y estator frontal..... | 79 |
| Gráfico 3.27 | Retenedores o sellos de aceite..... | 80 |
| Gráfico 3.28 | Posición correcta del muelle del retenedor de aceite..... | 80 |
| Gráfico 3.29 | Montaje del retenedor de aceite externo..... | 81 |
| Gráfico 3.30 | Lóbulos en sus respectivas holguras | 82 |
| Gráfico 3.31 | Montaje del muelle del segmento lateral..... | 82 |
| Gráfico 3.32 | Segmentos laterales | 83 |
| Gráfico 3.33 | Segmento periférico y su muelle..... | 83 |
| Gráfico 3.34 | Solución para fijar los sellos de goma..... | 84 |
| Gráfico 3.35 | Bocines colocados en la tapa frontal | 84 |
| Gráfico 3.36 | Instalación del estator periférico | 85 |
| Gráfico 3.37 | Untar aceite..... | 85 |
| Gráfico 3.38 | Instalación del rotor primario..... | 86 |
| Gráfico 3.39 | Verificación del giro del rotor | 86 |
| Gráfico 3.40 | Instalación de la tapa intermedia y estator posterior..... | 87 |
| Gráfico 3.41 | Introducción del rotor posterior | 87 |
| Gráfico 3.42 | Untar aceite en rodamientos y piñones..... | 88 |
| Gráfico 3.43 | Tapa posterior..... | 88 |
| Gráfico 3.44 | Orden de ajuste de los pernos del motor | 89 |
| Gráfico 3.45 | Instalación del volante de inercia | 89 |
| Gráfico 3.46 | Placa de empuje, espaciador y canastilla del eje motriz..... | 90 |
| Gráfico 3.47 | Ajuste de placa de apoyo..... | 90 |
| Gráfico 3.48 | Insertar contrapesa | 91 |
| Gráfico 3.49 | guía del eje motriz..... | 91 |
| Gráfico 3.50 | Montaje de la bomba de aceite | 92 |
| Gráfico 3.51 | Ajuste del mecanismo tensor..... | 92 |
| Gráfico 3.52 | Señalización del engranaje de accionamiento distribuidor | 93 |
| Gráfico 3.53 | Medición del juego axial..... | 93 |
| Gráfico 3.54 | Instalación de la tapa frontal | 94 |
| Gráfico 3.55 | Orden de ajuste de los pernos de la bomba de agua | 95 |
| Gráfico 3.56 | Marcas de Leading y Trailing en la polea | 95 |
| Gráfico 3.57 | Distribuidores Leading y Trailing..... | 96 |
| Gráfico 3.58 | Múltiple de admisión y escape..... | 96 |
| Gráfico 3.59 | Parte frontal del motor | 97 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Gráfico 3.60 | Parte posterior del motor con motor de arranque | 97 |
| Gráfico 4.1 | Depósito de GLP..... | 105 |
| Gráfico 4.2 | Válvula de llenado..... | 105 |
| Gráfico 4.3 | Reductor y evaporador | 106 |
| Gráfico 4.4 | Inyector | 107 |
| Gráfico 4.5 | Centralita | 107 |
| Gráfico 4.6 | Selector de combustible..... | 108 |
| Gráfico 4.7 | Modificaciones para utilizar GNV | 111 |
| Gráfico 4.8 | Biodigestor | 115 |
| Gráfico 4.9 | Suministro de metanol vehicular | 124 |
| Gráfico 4.10 | Relación de expansión del hidrógeno | 126 |
| Gráfico 4.11 | Fenómeno de fragilización por hidrógeno | 127 |
| Gráfico 4.12 | Proceso de Electrólisis..... | 129 |
| Gráfico 4.13 | Reformador de vapor | 131 |
| Gráfico 4.14 | Reformador de oxidación parcial | 131 |
| Gráfico 4.15 | Reformador Auto Térmico..... | 132 |
| Gráfico 4.16 | Inyector de hidrógeno gasificado | 134 |
| Gráfico 4.17 | Sistema de hidrógeno combustible | 135 |
| Gráfico 4.18 | Botón cambio de combustible | 136 |
| Gráfico 4.19 | Indicadores del tablero..... | 136 |
| Gráfico 4.20 | Válvula para llenado de hidrógeno..... | 137 |
| Gráfico 5.1 | Flujo de procesos del banco de pruebas | 138 |
| Gráfico 5.2 | Panel de control Banco de Pruebas..... | 139 |
| Gráfico 5.3 | Esquema eléctrico del banco de pruebas | 140 |
| Gráfico 5.4 | Medida de planitud..... | 141 |
| Gráfico 5.5 | Toma de medida de diámetros | 142 |
| Gráfico 5.6 | Puntos para la toma de medida del estator | 143 |
| Gráfico 5.7 | Puntos para la toma de medida del rotor | 144 |
| Gráfico 5.8 | Toma de medida de diámetro interno y externo..... | 146 |
| Gráfico 5.9 | Toma de medida del pronunciado del sello de aceite | 147 |
| Gráfico 5.10 | Toma de medida de la altura del segmento periférico | 148 |
| Gráfico 5.11 | Juego del segmento periférico y su alojamiento | 149 |
| Gráfico 5.12 | Toma de medida del ápex para su reposición | 149 |
| Gráfico 5.13 | Altura libre del muelle | 150 |
| Gráfico 5.14 | Toma de medida del pronunciado del segmento lateral | 151 |
| Gráfico 5.15 | Juego entre el segmento lateral y su alojamiento | 152 |
| Gráfico 5.16 | Espacio entre el segmento lateral y el taco | 153 |
| Gráfico 5.17 | Toma de medida del pronunciado del taco | 154 |
| Gráfico 5.18 | Bomba se aceite en buen estado..... | 156 |
| Gráfico 5.19 | Sellado del estator lateral | 157 |

| | | |
|---------------------|---|-----|
| Gráfico 5.20 | Exceso de grasa en el estator periférico y una cara del rotor | 157 |
| Gráfico 5.21 | Colocación del rotor en su volumen máximo | 158 |
| Gráfico 5.22 | Comprobación de la posición correcta del rotor | 158 |
| Gráfico 5.23 | Placa de acrílico para la toma de medida exacta del volumen | 159 |
| Gráfico 5.24 | Tomando la medida del volumen máximo con pipetas calibradas | 159 |
| Gráfico 5.25 | Posición de volumen mínimo | 160 |
| Gráfico 5.26 | Toma de medida exacta del volumen | 161 |
| Gráfico 5.27 | Numeración de las cámaras de combustión | 163 |
| Gráfico 5.28 | Señales de la polea Leading y Trailing | 164 |
| Gráfico 5.29 | Elementos del motor wankel | 166 |
| Gráfico 5.30 | Elementos de sellado del motor | 167 |
| Gráfico 5.31 | Posición del manómetro para medir la compresión | 169 |
| Gráfico 5.32 | Toma de medida de máximo volumen del motor | 172 |
| Gráfico 5.33 | Toma de medida de volumen mínimo | 173 |
| Gráfico 5.34 | Señales de la polea Leading y Trailing | 175 |
| Gráfico 5.35 | Equipo de protección | 178 |
| Gráfico 5.36 | Comprobación de la tensión de la banda | 179 |
| Gráfico 5.37 | Comprobación de los cables de bujías | 183 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tabla 4-1 | Materiales resistentes a la exposición de hidrógeno..... | 127 |
| Tabla 5-1 | Medidas de planitud tomadas en los estatores laterales | 141 |
| Tabla 5-2 | Medidas de diámetros..... | 142 |
| Tabla 5-3 | Medida del ancho del estator en puntos específicos | 143 |
| Tabla 5-4 | Medida del ancho del rotor en puntos específicos | 145 |
| Tabla 5-5 | Medida de diámetros | 146 |
| Tabla 5-6 | Medidas de pronunciado del sello..... | 147 |
| Tabla 5-7 | Medida de la altura de los segmentos periféricos | 148 |
| Tabla 5-8 | Medidas del la luz entre el apex y su alojamiento..... | 149 |
| Tabla 5-9 | Toma de medida de la altura libre..... | 150 |
| Tabla 5-10 | Medidas del pronunciado del segmento lateral..... | 151 |
| Tabla 5-11 | Medidas de la luz entre el segmento lateral y su alojamiento | 152 |
| Tabla 5-12 | Medida de la luz entre el segmento lateral y el lóbulo | 153 |
| Tabla 5-13 | Medidas del pronunciado del taco | 154 |
| Tabla 5-14 | Tabla de orden de encendido | 163 |
| Tabla 5-15 | Pruebas realizadas a la batería | 180 |

SÍNTESIS

El motor rotativo es un conjunto de elementos mecánicos que transforma la energía química del combustible en energía mecánica (potencia) que los vehículos emplean para desplazarse. Este tipo de motor fue inventado y debe su nombre al científico alemán Felix Wankel que a la edad de 22 años, motivado por un sueño estableció un laboratorio para su desarrollo, en donde comenzaron las investigaciones del motor wankel en el año de 1924.

Actualmente la empresa Mazda es la que continúa con la fabricación de este tipo de motores ya que nos ofrece varias ventajas como suavidad de conducción, menor cantidad de piezas, entrega de mayor número de revoluciones, entre otras.

Básicamente el motor está compuesto por estator lateral, estator periférico (trocoide), eje excéntrico y el rotor con sus distintos elementos de sellado, este tipo de motor de combustión interna trabaja con un ciclo Otto de cuatro tiempos (admisión, compresión, trabajo, escape), los cuales los realiza en distintas partes de su carcasa.

Para mayor entendimiento vamos a tomar como referencia al motor alternativo Otto, en este caso los estatores periféricos tienen forma de 8 o una trocoide y vendrían a ser como los cilindros del motor alternativo mientras que los rotores poseen forma triangular y cumplen la función de los pistones, con la diferencia que en cada lado del rotor poseemos una hendidura que es la cámara de combustión, en este caso tendríamos 3 cámaras. 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.

La admisión de mezcla y escape de gases lo realiza mediante lumbreras ubicadas en su estator periférico o estator lateral las cuales se abren o se cierran mientras los vértices del rotor pasan por ellas, eliminando así el sistema de distribución que posee el motor alternativo. El cigüeñal produce tres vueltas cuando el rotor realiza una vuelta, dándonos como resultado mayor potencia de salida, esto ocurre ya que la relación de dientes entre la corona del rotor y el cono solidario al estator y concéntrico al cigüeñal es de 1.5; la transmisión de la fuerza generada lo realiza el rotor mediante la excéntrica del cigüeñal en la cual se apoya.

En este trabajo utilizaremos el motor rotativo wankel 10A de mazda, el cual es el más pequeño de su generación para realizar su estudio. Tomando en cuenta todos los conocimientos adquiridos sobre motores rotativos wankel vamos a proceder con la reparación de este tipo de motor logrando así el funcionamiento del mismo para poderlo colocar en un banco de pruebas que nos pueda ayudar a comprender mejor su manera de trabajar.

El desmontaje y montaje del motor lo realizaremos paso a paso tomando muy en cuenta la información recopilada sobre sus elementos y funciones, también los ajustes, torques y secuencias necesarias que requiere su armado.

El diseño y la implementación del motor en el banco de pruebas se lo realiza verificando las medidas del motor, la distribución correcta de su peso y las vibraciones que éste genera en su funcionamiento, también se debe implementar un

tablero en donde se pueda verificar constantemente cada uno de los parámetros del motor, tales como, presión de aceite, temperatura de agua, revoluciones del motor, entre otros.

Es de fundamental importancia proporcionar un manual de mantenimiento del motor wankel 10A en donde se detallará las inspecciones que se deben realizar antes de su uso y el mantenimiento que necesita cada uno de sus elementos para alargar su vida útil y que su funcionamiento sea en óptimas condiciones.

CAPÍTULO 1 .- HISTORIA DEL MOTOR WANKEL.

El motor wankel aparece gracias a su inventor Félix Wankel, el cual a la edad de 17 años de edad 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.

En 1957 se terminó el prototipo del motor rotativo DKM que estaba compuesto de un bloque trocoide y un rotor, el cual demostró que el sueño de Wankel se hacía

realidad aunque este motor tenía algunas complicaciones estructurales ya que su bloque trocoide giraba y esto lo hacía impráctico al momento de utilizarlo.

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



Gráfico 1.1 Prototipo motor wankel KKM¹

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.

¹ FUENTE: <http://sites.google.com/site/mvwankel/historia-y-evolucion-1/pagina-02-1>

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 a demás sirvieron de guía para las investigaciones posteriores.



Gráfico 1.2 Marcas causadas por rozamiento excesivo²

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.

² FUENTE: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p2.html>

1.1. ROTATIVOS KKM

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

- a. Dos rotores
- b. Tres rotores
- c. 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.



Gráfico 1.3 Motor L8A³

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

³ FUENTE: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p3.html>

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.

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. ROTATIVO 13B

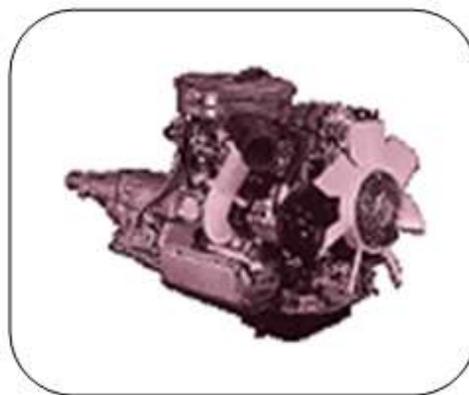


Gráfico 1.4 Motor 13B⁴

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.

⁴FUENTE: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p3.html>

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

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.

1.3. MODELO LUCRE



Gráfico 1.5 Vehículo Lucre⁵

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 del

⁵FUENTE: <http://sites.google.com/site/mvwankel/historia-y-evolucion-1/historia-y-evolucion-pag-04>

mismo, 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 FENIX, que en su primer 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.

1.4. ROTATIVOS CON TURBO

1.4.1. 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.



Gráfico 1.6 Cosmo RE turbo⁶

1.4.2. RX7 Sabana

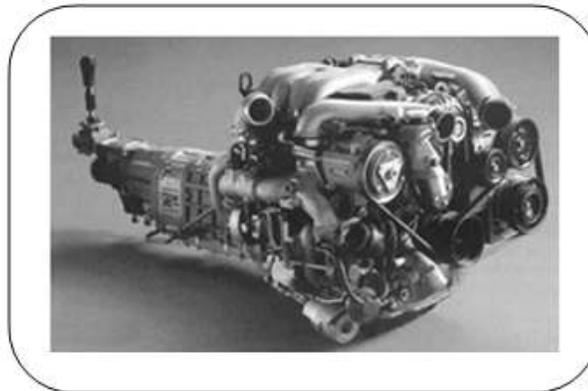


Gráfico 1.7 Motor 13B REW⁷

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.

⁶ FUENTE: <http://homepage3.nifty.com/yamataki/cosmo%20re%20turbo.html>

⁷ FUENTE: <http://www.turborx7.com/repics.htm>

1.4.3. 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.

1.5. PRODUCCIÓN EN LÍNEA



Gráfico 1.8 Producción en línea del motor wankel⁸

⁸FUENTE: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p7.html>

La planta de Mazda especializada en el motor rotativo se encuentra en Hiroshima, tiene una extensión 34 metros cuadrados y proporciona una producción de 15.000 unidades al mes.

Esta fábrica a implementado, gracias a su larga experiencia e investigaciones procesos innovadores en lo que se refiere a tecnología y mano factura como por ejemplo el revestimiento eficiente de la superficie trocoide y no solo se queda con el invento del motor rotativo a gasolina, sino que por el problema de contaminación ambiental, ha realizado pruebas de un motor a hidrógeno el mismo que no produce dióxido de carbono, el cual es el culpable del calentamiento de la tierra. Mazda en la actualidad sigue trabajando en la eficiencia de los prototipos rotativos a hidrógeno.



Gráfico 1.9 Rotativo alimentado por hidrógeno⁹

⁹FUENTE: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/story/p7.html>

CAPÍTULO 2 .- ESTUDIO DEL MOTOR WANKEL

El motor rotativo wankel es un motor térmico de combustión interna ya que transforma la energía calorífica obtenida de la combustión de combustibles en energía mecánica directamente utilizable para impulsar autos, lanchas, aviones, etc.

Estos motores al igual que el motor Otto cumple con los 4 tiempos (admisión, compresión, trabajo, escape) producidos en una vuelta de su rotor, pero se diferencian del Otto ya que su movimiento es rotatorio y no alternativo; obteniéndolo directamente de su rotor; lo cual nos da la ventaja de obtener menores pérdidas de potencia, obtener mayor número de revoluciones y operar con un mínimo número de componentes.

A demás en la misma vuelta del rotor se producen 3 explosiones causadas por una o dos bujías; es decir se dan 3 ciclos de 4 tiempos. La admisión y el escape se dan gracias a las dos lumbreras que posee el motor en su carcasa respectivamente.

2.1. CONSTITUCIÓN DEL MOTOR WANKEL.

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.

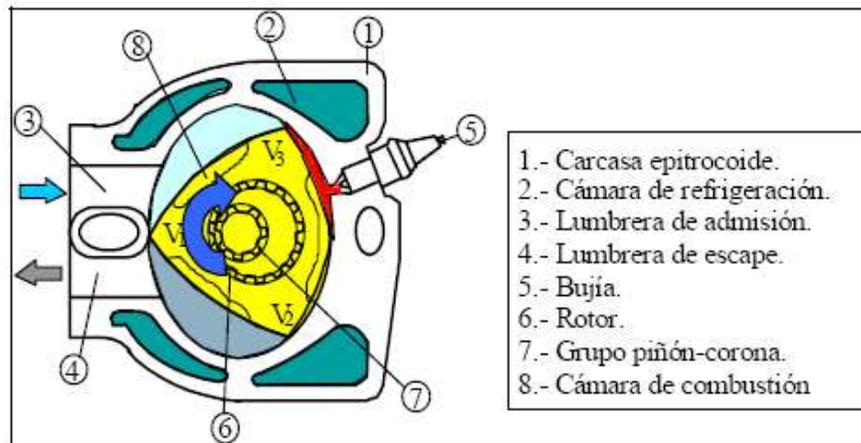


Gráfico 2.1 Partes del motor wankel¹⁰

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.

El motor wankel posee una constitución sencilla al igual que un motor de dos tiempos, a demás 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:

¹⁰ FUENTE: http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/motores/temas/ciclo_teorico.pdf

2.1.1. Bloque o Carcasa

También conocido como estator; es equivalente al conjunto de bloque y culata de un motor alternativo. Está compuesto por dos partes que son:

- Estator Periférico
- Estator Lateral

2.1.1.1. 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 conductor para el paso de refrigerante.



Gráfico 2.2 Estator¹¹

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.

¹¹FUENTE: <http://es.scribd.com/ingdanny/d/62139123-Motor-Wankel>

Por lo tanto el material con el cual está formado el estator debe cumplir con las siguientes características:

- Asegurar buenas condiciones para la refrigeración y lubricación.
- Soportar los esfuerzos causados por la combustión, tensiones térmicas y diferencias de temperatura.
- Resistir deformaciones para asegurar la estanqueidad en la cámara de combustión.



Gráfico 2.3 Materiales que forman el estator¹²

El estator está formado por aleaciones de aluminio ya que este material posee un coeficiente de dilatación elevado; también se lo puede producir en fundición pero su capacidad de evacuación de calor es muy baja.

El interior de la carcasa se recubre con una capa de acero cuyo terminado tiene forma de diente de sierra para que haya una mejor adherencia con la aleación de aluminio.

¹² FUENTE: <http://ebookbrowse.com/motores-rotativos-tipolog%C3%ADas-y-combustibles-alternativos-pdf-d70208273>

Los segmentos de los vértices del rotor giran a gran velocidad y al principio esto causaba desgaste excesivo en la pared del estator, con lo cual se reducía la vida útil del motor y por ende su rendimiento; la solución a este problema en la superficie es cromar, niquelar o emplear aleaciones de molibdeno con recubrimiento de granito por su propiedad de auto lubricación.

Estos tres materiales con los cuales está formado la carcasa o estator proporcionan las características necesarias para el buen funcionamiento del motor rotativo ya que cumplen con todas las necesidades provocadas por las gradientes de presiones y temperaturas causadas en el funcionamiento de dicho motor.

2.1.1.2. Estator lateral.

El estator lateral o tapas laterales del motor wankel también están sometidos a grandes presiones y temperaturas, es por este motivo que se las ha fabricado al igual que la carcasa, en aleaciones de aluminio por su ligereza y gran capacidad de evacuar el calor, pero estas aleaciones de aluminio requieren de un recubrimiento de capas metálicas de aceros especiales para mejorar sus características antifricción ya que sin este tratamiento tienen una resistencia menor al desgaste.

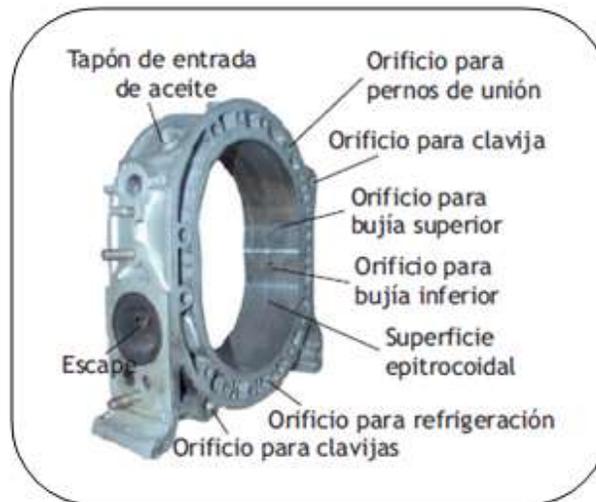


Gráfico 2.4 Partes del estator lateral¹³

Las caras laterales deben ser deslizantes para que puedan mantener un contacto continuo con los segmentos laterales y de los vértices del rotor sin que se produzca un desgaste excesivo de material; es por eso que en los motores de altas prestaciones se necesita un tratamiento especial en la superficie deslizante de endurecimiento por nitruración o inducción.

2.1.2. Rotor

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.

¹³ FUENTE: <http://ebookbrowse.com/motores-rotativos-tipolog%C3%ADas-y-combustibles-alternativos-pdf-d70208273>

Se podría mencionar que el rotor cumple la misma función que la biela y el pistón de un motor rotativo ya que transmiten la presión que ejercen los gases de combustión al cigüeñal; a demás hace la función de las válvulas de admisión y escape. 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.

Posee elementos de sellado tanto en sus vértices como a lo largo de sus caras laterales que tienen la función de hermetizar cada una de las cámaras para que los gases quemados, la mezcla aire combustible y el aceite lubricante no salgan del espacio confinado respectivamente.

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.



Gráfico 2.5 Rotor¹⁴

¹⁴ FUENTE: <http://www.drifting.es/2007/406/el-motor-rotativo/>

El rotor debe ser fabricado con un material que cumpla los siguientes aspectos:

- Gran resistencia al desgaste y a la fatiga de altas temperaturas
- Excelentes propiedades de mecanización
- Buenas propiedades de maleabilidad
- Bajo coeficiente de dilatación térmica

Por lo general se utiliza fundición de grafito esferoidal ya que mejora sensiblemente las propiedades mecánicas así sea su costo mayor a la fundición gris; sin embargo al trabajar con este tipo de material de gran densidad obtenemos un peso final del rotor demasiado grande; por este motivo en la actualidad se está usando aleaciones de aluminio y con esto se obtiene un peso menor del rotor lo cual reduce las cargas sobre el cojinete central y se consigue mayor velocidad de

Giro a la salida con un desgaste moderado sin necesidad de emplear un cojinete para altas prestaciones.

2.1.3. Mecanismo de Sellado

El motor wankel está compuesto por elementos de sellado dispuestos en tres formas características que fueron diseñadas para asegurar la estanqueidad en el motor y que los gases y fluidos en todo momento permanezcan en su sitio.

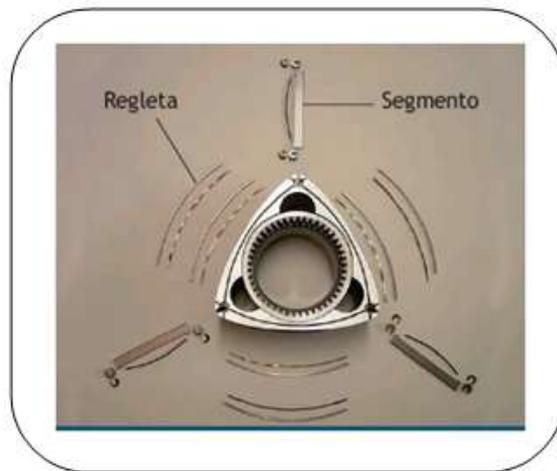


Gráfico 2.6 Elementos de sellado¹⁵

Los segmentos están sometidos a altas temperaturas y presiones de trabajo por lo cual es muy importante la forma y el material con los cuales están constituidos. Estos elementos deben mantener contacto en todo momento con la superficie correspondiente tanto del rotor como del estator; para que ocurra esto tienen unos pequeños muelles del lado contrario del rozamiento.

Los mecanismos de sellado están formados por tres tipos de segmentos que son:

- Segmentos Periféricos
- Segmentos Laterales
- Pernos de anclaje

¹⁵ FUENTE: <http://www.drifting.es/2007/406/el-motor-rotativo/>

2.1.3.1. Segmentos Periféricos.

Son los encargados de mantener la estanqueidad radial de las tres cámaras durante el giro del rotor; hay tres segmentos periféricos por cada rotor del motor wankel ubicados en los vértices del mismo.

Deben tener un diseño preciso y exhaustivo ya que están sometidos a las presiones y temperaturas de los gases de escape; a demás ayuda al perfecto deslizamiento con la cara interior del estator y si fuese el caso de lumbreras de admisión y escape periféricos; éstos hacen la función de las válvulas de admisión y escape respectivamente.



Gráfico 2.7 Sentido de giro del segmento periférico¹⁶

Estos segmentos periféricos están empujados por dos fuerzas que son:

- La fuerza que ejerce el muelle en el centro de su base y que ayuda a mantener en contacto al segmento periférico con la cara o pared interior del estator.

¹⁶FUENTE: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-sellos>

- La fuerza producida por la presión de los gases quemados a la cara opuesta de contacto del segmento.

Debemos tomar en cuenta que el muelle del segmento a parte de garantizar el contacto con la pared interior del rotor, sirve para corregir posibles errores geométricos que se producen en la fabricación del motor.

Al estar en contacto en todo momento los segmentos periféricos con el estator se debe tomar muy en cuenta los materiales y los tratamientos superficiales que a cada uno de estos se les da en su fabricación para que no haya un desgaste excesivo por el contacto permanente; antes se utilizaba el grafito en los segmentos por sus buenas propiedades de lubricación y en el estator se daba una superficie interior cromada; después se empezó a fabricar segmentos de fundición enfría por chorro de electrones manteniendo las mismas propiedades de la superficie del estator.

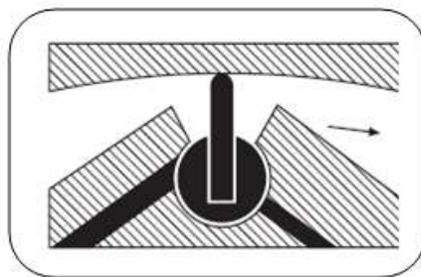


Gráfico 2.8 Ubicación del segmento periférico¹⁷

¹⁷ FUENTE: <http://www.drifting.es/2007/406/el-motor-rotativo/>

2.1.3.2. Segmentos Laterales.

Estos segmentos cumplen la función de proporcionar la estanqueidad axial o lateral entre el rotor y estator; van colocados a lo largo de la cara lateral del rotor para impedir que los gases de alta presión producidos por la combustión pasen al orificio lateral del rotor en donde se encuentran los engranajes de transmisión.

Tienen provistos unos muelles expansores instalados en las ranuras laterales del rotor que mantienen el contacto en todo instante con el estator lateral y están contruidos con el mismo material que los segmentos periféricos.

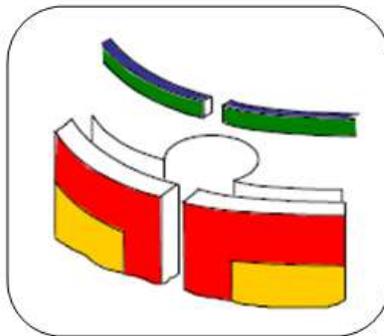


Gráfico 2.9 Segmentos laterales¹⁸

2.1.3.3. 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.

¹⁸ Fuente: http://www.uclm.es/profesorado/porrasyoriano/motores/temas/ciclo_teorico.pdf

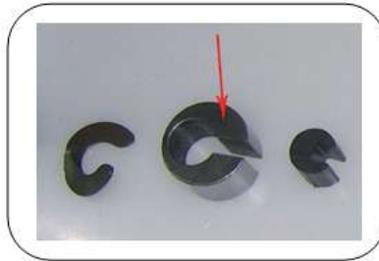


Gráfico 2.10 Pernos de anclaje¹⁹

2.1.4. 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 al 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.



Gráfico 2.11 Eje motriz²⁰

¹⁹ Fuente:

http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf

²⁰ Fuente: <http://mgallegosantos.files.wordpress.com/2010/01/tema-16.pdf>

2.1.5. Engranajes de Transmisión

Este mecanismo se encuentra formado por un engranaje de dientes exteriores fijo a la tapa lateral de estator y otro engranaje de dientes interiores sólidamente unido al rotor, el primero de estos se encuentra estático mientras que el otro cuando engrana con este produce el movimiento epitrocoide.

El engranaje de dientes exteriores se encuentra sujeto a la tapa lateral de estator mediante tornillos de fijación; su forma y grosor son adecuados para otorgar una rigidez y una resistencia a la fatiga aceptables.

El engranaje de dientes interiores posee una forma cilíndrica y un espesor muy pequeño; este engranaje se aloja en el interior del rotor mediante tornillos o pequeños muelles que absorben parte de las cargas a la cual se encuentra sometido este engranaje.

La relación del número de dientes entre ambos engranajes es de 2:3, lo cual nos proporciona una relación de transmisión de 1:3 entre la velocidad del rotor y el eje de salida.

Los dos tipos de engranajes anteriormente mencionados son de dientes rectos, los cuales aunque produzcan más ruido tienen la ventaja de ser más económicos y ofrecer una excelente transmisión de movimiento del rotor al eje sin transmitir ningún esfuerzo axial al rotor.

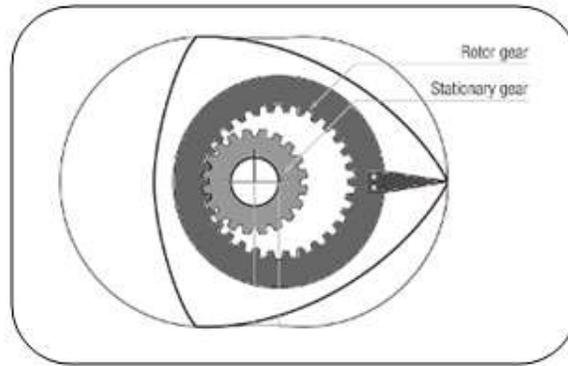


Gráfico 2.12 Engranajes²¹

2.2. FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR WANKEL

El motor wankel realiza un ciclo Otto de 4 tiempos ya que en cada vuelta del rotor, cada una de sus superficies realiza un ciclo completo; por este motivo se podría comparar a las caras del rotor con los pistones de los cilindros de un motor convencional. El motor posee tres caras por lo que se realizan 3 ciclos de trabajo completos por cada vuelta del rotor y el estator da 3 vueltas por una vuelta del mismo. Durante el giro del rotor, sus vértices mantienen contacto continuo con la carcasa.

Las fases de admisión y de escape se realizan por medio de lumbreras de admisión y de escape respectivamente y por ende no se necesita sistema de distribución.

²¹ Fuente: http://www.e-auto.com.mx/manual_detalle.php?manual_id=199

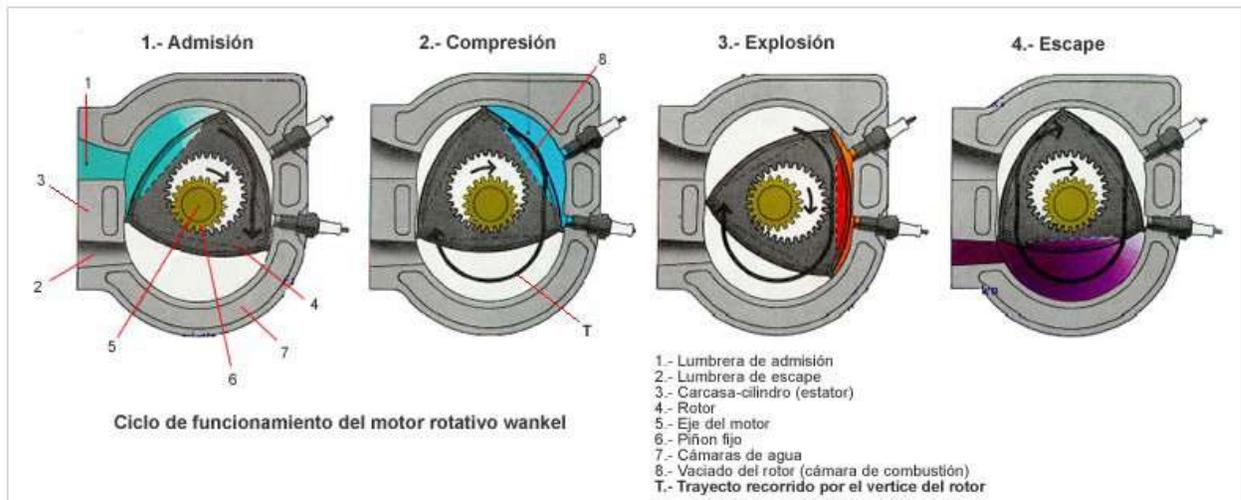


Gráfico 2.13 Tiempos del motor²²

2.2.1. Ciclo Teórico

El ciclo que cumple cada cara del rotor es equivalente al que lleva a cabo cada cilindro que realiza un ciclo Otto por lo tanto en cada giro del rotor se realizarán tres ciclos y el motor será parecido a uno alternativo de 3 cilindros.

A continuación se detallará el proceso termodinámico de una de las caras del rotor hasta que la misma complete el ciclo mencionado anteriormente.

2.2.1.1. Fase de Admisión.

Esta fase empieza cuando el vértice del rotor descubre la lumbrera de admisión, en ese instante la cámara de combustión tiene un volumen mínimo pero al seguir girando el rotor este volumen aumenta absorbiendo la mezcla aire-combustible debido a la depresión que se genera al girar el mismo. En el instante que le otro

²² Fuente: <http://trabajos.colegiopadredehon.com/2%20bach/tecnologiaII/motor%20wankel.pdf>

vértice del rotor cierra la lumbrera de admisión, la mezcla queda encapsulada y empieza la siguiente fase.

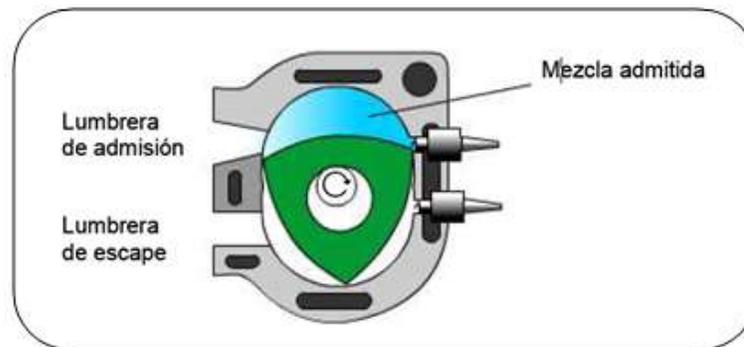


Gráfico 2.14 Tiempo de admisión²³

2.2.1.2. Fase de Compresión.

En esta etapa de compresión al seguir girando el rotor el volumen de la cámara va disminuyendo hasta llegar a enfrentarse la cara del rotor con las bujías; en este instante la cámara de combustión ha llegado a obtener el mínimo volumen; por consiguiente se produce el salto de la chispa y la combustión de la mezcla. Esta disminución de volumen se da por la forma del bloque y el giro del rotor.

En esta fase la cara del rotor queda bien ceñida con el bloque o estator y por lo tanto se podría dar una compresión excesiva la cual se evita gracias a las hendiduras que presentan cada una de las caras del rotor, las mismas forman las cámaras de combustión del rotor. El inconveniente que presentan estas hendiduras es la comunicación entre la lumbrera de admisión y escape, sin embargo las relaciones de

²³ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos.pdf>

compresión con las que trabaja es de 8:1 a 9,5:1 siendo esta última la que aparentemente nos da el consumo mínimo.

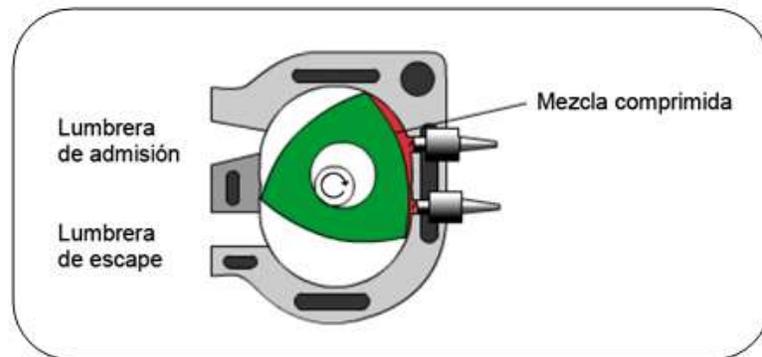


Gráfico 2.15 Tempo de compresión²⁴

2.2.1.3. Fase de Combustión o Trabajo.

La mayoría de los motores rotativos poseen dos bujías ya que la cámara de combustión es demasiado larga y si hubiese una sola, la inflamación de la llama sería demasiado lenta. Al momento en que salta la chispa se produce el incremento máximo de presión lo que hace que el rotor gire hacia el lado en donde el volumen de la cámara va creciendo es por este motivo que se llama también a este, ciclo de trabajo.

²⁴ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

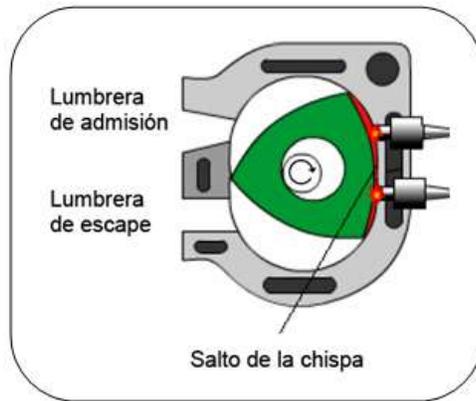


Gráfico 2.16 Tiempo de combustión²⁵

Los gases de la combustión se expanden moviendo el rotor hasta descubrir la lumbrera de escape y de esta manera termina esta fase de combustión.

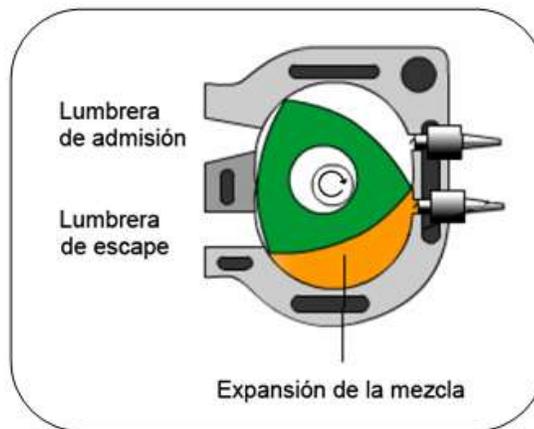


Gráfico 2.17 Tiempo de expansión²⁶

²⁵ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

²⁶ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

2.2.1.4. Fase de Escape.

Esta fase empieza cuando el vértice del rotor descubre la lumbrera de escape, los gases van saliendo por dicha lumbrera mientras el rotor sigue girando hasta obtener el volumen mínimo, el ciclo vuelve a empezar cuando el vértice descubre nuevamente la lumbrera de admisión.

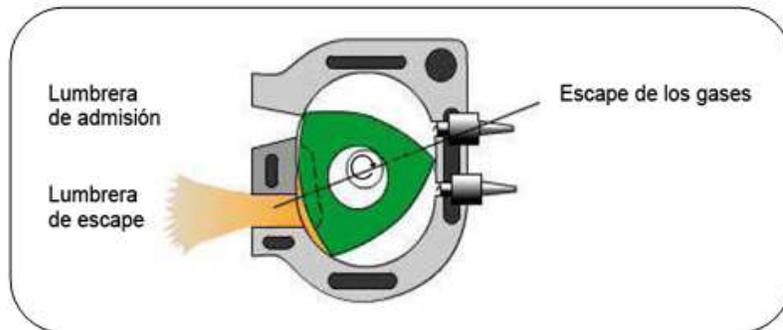


Gráfico 2.18 Fase de escape²⁷

2.3. SISTEMA DE LUBRICACIÓN.

La lubricación es la parte fundamental del mantenimiento preventivo del motor rotativo ya que evita que este sufra desgastes prematuros y tenga un excelente desempeño en su funcionamiento.

Algunos de los objetivos de la lubricación son los siguientes:

- Disminuir el desgaste
- Reducir el rozamiento entre piezas para alargar su vida útil

²⁷ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

- Reducir el calentamiento de los elementos que se desplazan unos contra otros.

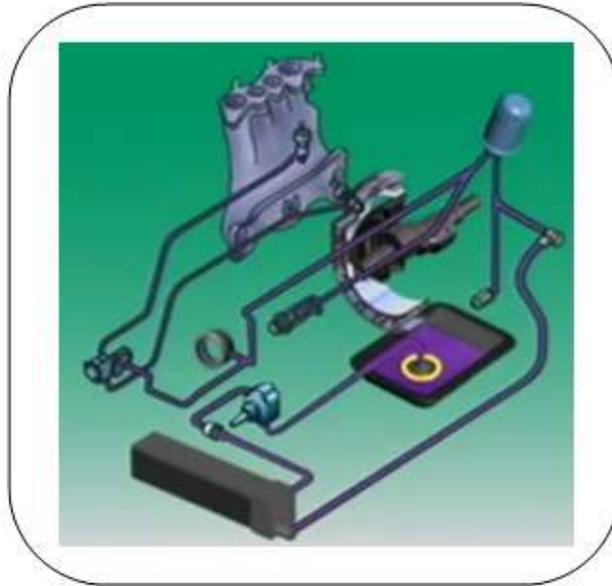


Gráfico 2.19 Sistema de lubricación²⁸

Para el motor wankel por lo general se emplean dos sistemas que permite llegar al fluido lubricante a las piezas que lo necesitan.

2.3.1. Lubricación de los Elementos de Sellado.

Para la lubricación de todos los elementos de sellado (segmentos, muelles) se utiliza una bomba que envía caudal de aceite en función de las condiciones de trabajo del motor (carga y velocidad) logrando así una cantidad justa de aceite y de esta manera se evita una mezcla excesiva de aceite-combustible para la lubricación.

²⁸ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>

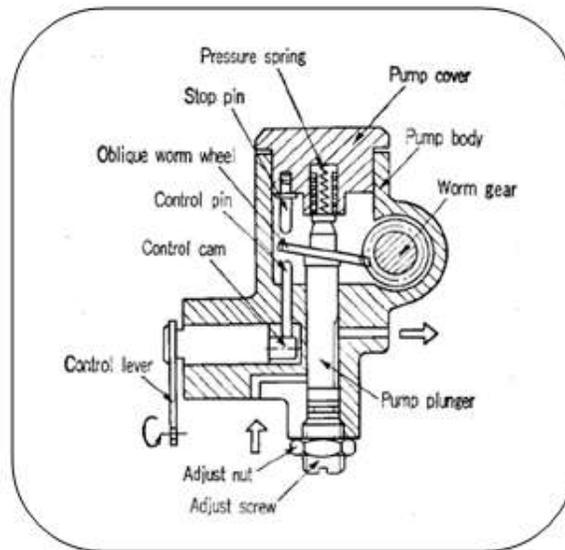


Gráfico 2.20 Bomba de aceite²⁹

En este tipo de lubricación se debe unir directamente el acelerador con la leva de control de la bomba de aceite, la cual ajusta la carrera del émbolo en función de las exigencias del motor.

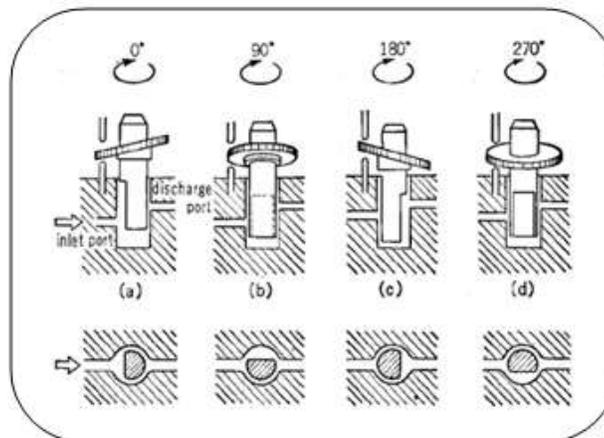


Gráfico 2.21 Carrera del émbolo³⁰

²⁹ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>

³⁰ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>

La lubricación en los segmentos nos da la ventaja de hermeticidad entre las cámaras de combustión ya que debido a la viscosidad del aceite se dificulta el intercambio de gases entre cámaras favoreciendo la acción o función de los segmentos.

2.3.1. Lubricación del eje motor

Para la correcta lubricación del eje de salida, engranajes y rodamientos se debe utilizar un sistema a presión con intercambiador de calor, el cual enfría el aceite para que el mismo no pierda sus propiedades de manera prematura al cumplir su función de refrigeración. El intercambiador de calor funciona cuando el aceite sobrepasa cierto valor de temperatura.

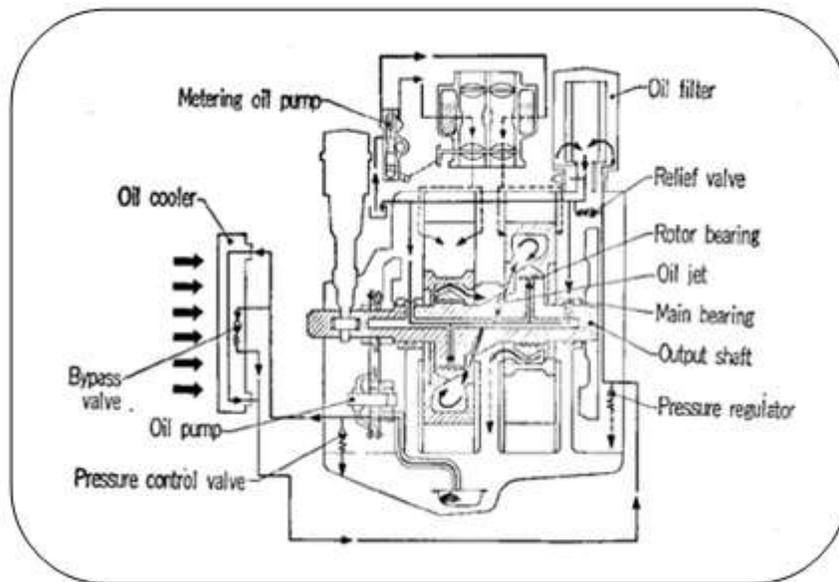


Gráfico 2.22 Partes del sistema de lubricación³¹

³¹ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>

Este sistema nos da la ventaja que el motor alcance inmediatamente una adecuada temperatura de trabajo, la misma que se mantiene más o menos constante una vez alcanzada la temperatura de funcionamiento.

La lubricación de estas piezas que están sometidas a gran fricción debe ser controlada para que el exceso de aceite no pueda ingresar a la cámara de combustión a través del pequeño espacio que queda entre la cara lateral del estator y el rotor. Estas pérdidas o fugas de lubricante se evitan con la implantación de sellos de aceite, los cuales se encuentran ubicados en las ranuras de la cara lateral del rotor y presionados contra la carcasa lateral mediante resortes.

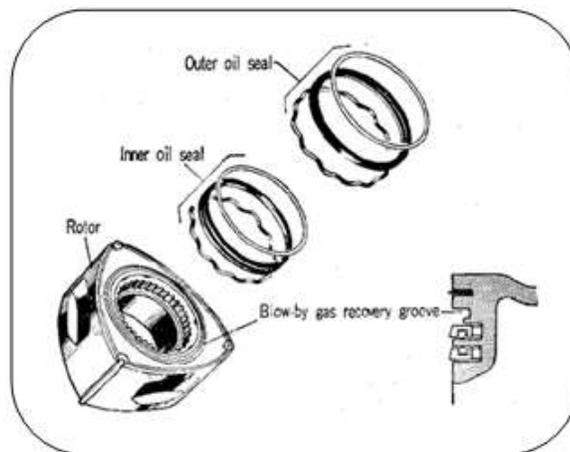


Gráfico 2.23 Sellos de aceite del rotor³²

A la pared del sello de aceite que se encuentra en contacto con la carcasa lateral del motor se la denomina labio del sello de aceite.

³² Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/sistema-de-lubricacion>

2.4. 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
- Refrigeración del rotor

2.4.1. Refrigeración del estator

El estator sufre enormes gradientes de temperatura los cuales se provocan ya que cada una de las fases del ciclo de cuatro tiempos se efectúan en el mismo sitio, por lo que aquí se obtienen zonas frías (correspondientes a la admisión y compresión) y zonas calientes (correspondientes a la combustión y escape) que provocan tensiones térmicas, las cuales deben ser anuladas con un adecuado sistema de enfriamiento.

Los objetivos de este sistema en el estator son:

- Homogeneizar la temperatura de todo el estator
- Evitar deformaciones térmicas

- Evacuar el calor almacenado en el rotor

Se han empleado dos tipos de refrigeración para el rotor el primero en donde se hace circular agua en el interior del bloque y el segundo se emplea una corriente de aire.

2.4.1.1. Refrigeración por agua.

A este tipo de refrigeración en el rotor se lo va a explicar de dos formas según la construcción del bloque:

- Se denomina refrigeración por flujo axial cuando los conductos del interior del rotor lo atraviesan de extremo a extremo en dirección al cigüeñal.

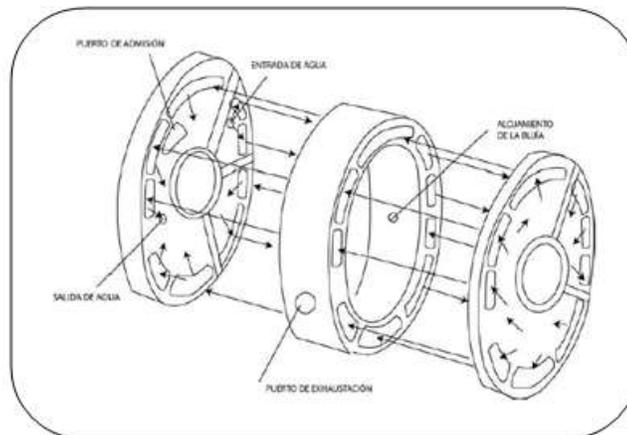


Gráfico 2.24 Pasajes de agua para refrigeración axial³³

- Se denomina refrigeración por flujo tangencial cuando el agua recorre independientemente cada una de las carcassas reduciendo la diferencia de

³³ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

temperatura en cada una de ellas, este sistema es apropiado en motores de varios rotores, los mismos. La manufactura de estas carcasas es difícil ya que los agujeros o ductos se encuentran muy unidos.

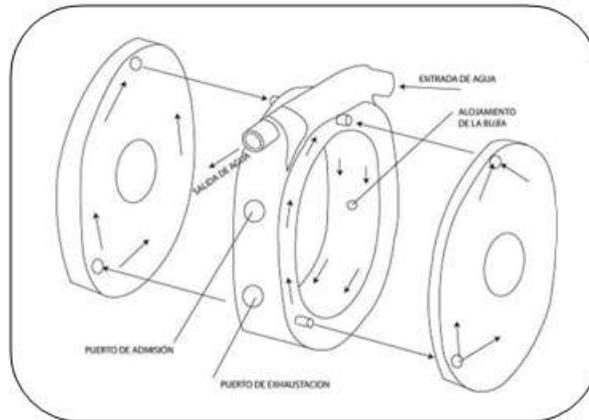


Gráfico 2.25 Pasajes de agua para refrigeración tangencial³⁴

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.

El efecto descrito anteriormente se puede mejorar cuando los gases de escape que están a mayor temperatura son dirigidos al área de menor temperatura de la carcasa.

³⁴ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

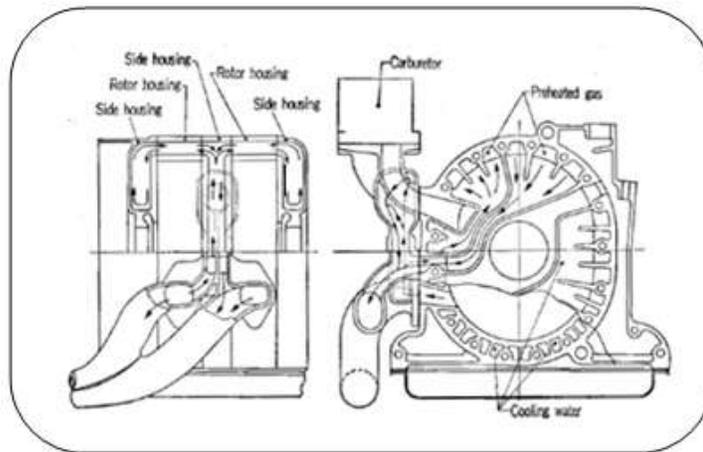


Gráfico 2.26 Mezcla precalentada por los gases de escape³⁵

Los elementos más significativos de la refrigeración por agua son:

- a) **Radiador:** Disipa el calor sustraído por el líquido refrigerante a la atmósfera con ayuda del ventilador.

- b) **Bomba de Agua:** Impulsa el agua al epitrocoide aspirándola desde la parte inferior del radiador. Se utilizan más del tipo centrífugo ya tienen la característica de mover elevados caudales con bajas presiones.

- c) **Ventilador:** Envía corriente de aire al radiador para ayudarlo a enfriar el agua cuando el vehículo va a poca velocidad y no se puede aprovechar la velocidad de marcha.

- d) **Termostato:** Impide el paso del agua cuando la temperatura del motor es muy baja.

³⁵ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

2.4.1.2. Refrigeración por aire.

La refrigeración por aire nos da una limitada evacuación de calor y se la utiliza en motores de escasas prestaciones y baja cilindrada. Es más utilizada en motores de motocicletas ya que se ahorra espacio y peso.

Para este tipo de refrigeración se debe aumentar la superficie de intercambio de calor con el aire exterior, esto se logra haciendo un gran número de aletas disipadoras sobre el estator y dependiendo de su forma se clasifican en refrigeración por aire de flujo radial o flujo axial.

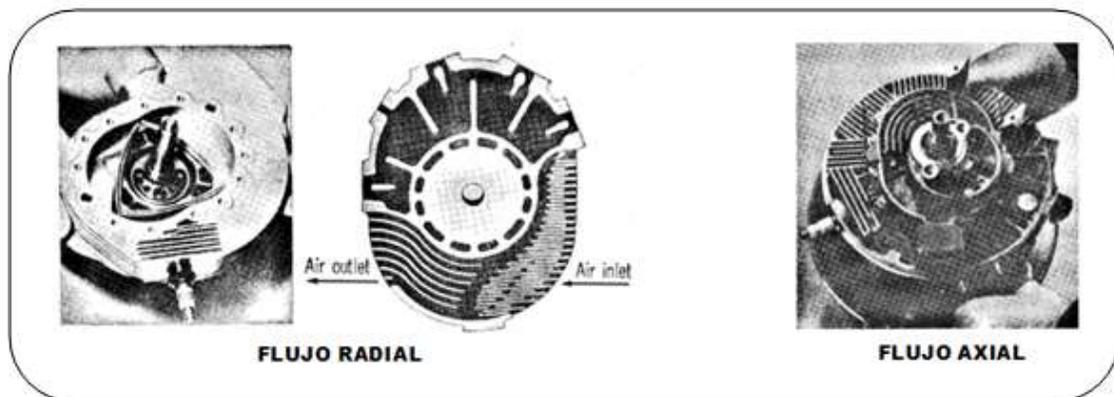


Gráfico 2.27 Refrigeración radial y axial por aire³⁶

2.4.2. 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.

³⁶ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

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.

2.4.2.1. Refrigeración por aceite

El eje motor introduce el aceite al interior del rotor, el mismo que gira arremolinadamente en su superficie interna recorriendo las cavidades practicadas en su interior, realizando de esta manera el intercambio de calor con las partes más calientes; después gracias a la fuerza centrífuga el aceite fluye fuera del rotor a través del centro del mismo y es recolectado en la bandeja de aceite por medio de la carcasa lateral.

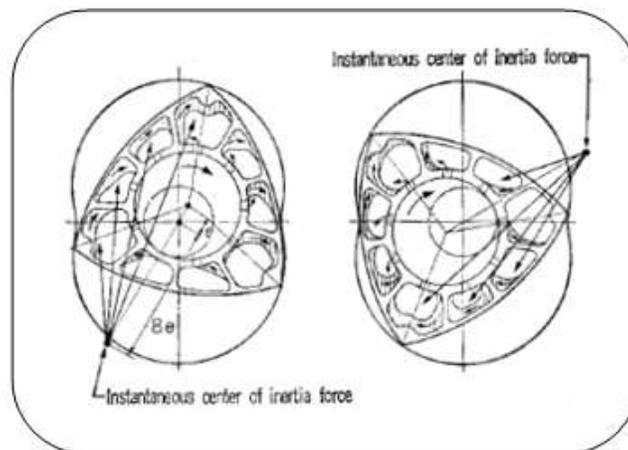


Gráfico 2.28 Comportamiento del aceite dentro del motor³⁷

³⁷ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

Para obtener un efecto de refrigeración y lubricación adecuadas se utiliza un intercambiador de calor, el cual enfría el aceite para que no pierda su viscosidad y resistencia de la película lubricante.

Para ubicar adecuadamente las nervaduras dentro del rotor y proporcionar una refrigeración adecuada tanto en el lado adelantado como en el lado atrasado del rotor, se debe tomar en cuenta que la temperatura más alta en la superficie del rotor se encuentra en el lado adelantado y la temperatura del lado atrasado tiene gran influencia para la auto ignición.

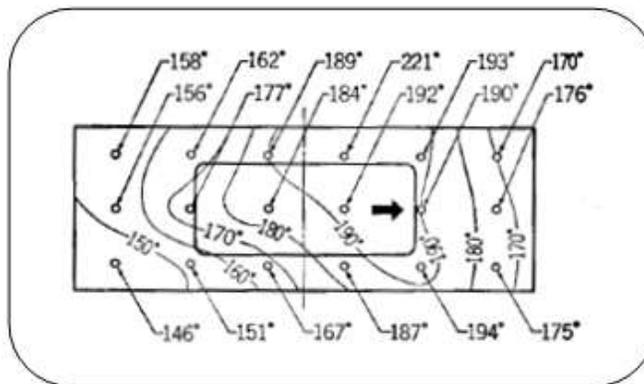


Gráfico 2.29 Temperatura en la superficie del rotor³⁸

La bomba que inyecta aceite al rotor está sincronizada con el desempeño del motor ya que 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

³⁸ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

medida que aumentan las revoluciones la fuerza centrífuga y la presión de aceite aplicado sobre la bola abrirán los conductos para la inyección del mismo.

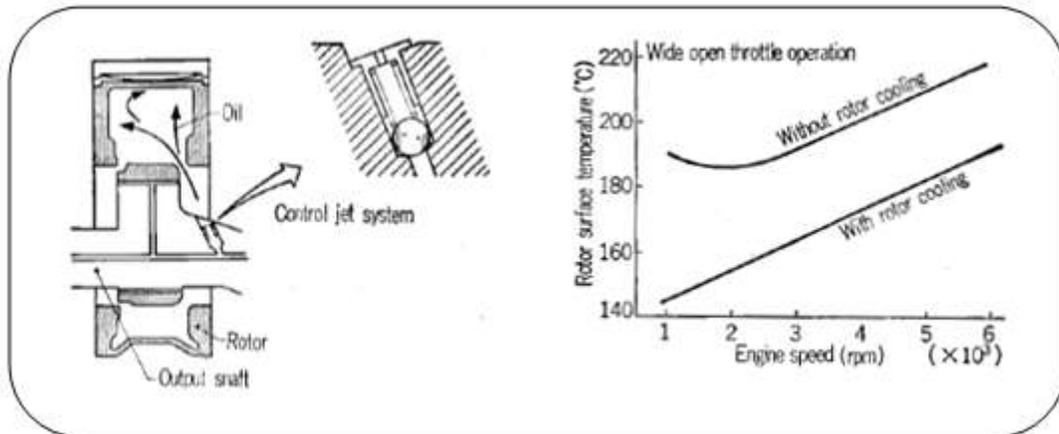


Gráfico 2.30 Control de inyección de lubricante y temperatura de la carcasa del rotor³⁹

La razón de utilizar aceite para refrigerar el rotor es que por su movimiento rotatorio no se consigue un buen sellado y el aceite puede pasar a las cámaras de combustión sin perjudicar la evolución de cada ciclo.

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 por ciento.

2.4.2.2. Refrigeración por 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

³⁹ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

lateral del mismo y posteriormente se introduce en la cámara de combustión siendo succionada por lumbrera de admisión obligando de esta manera a que la mezcla realice todo este recorrido. Una de las ventajas de este tipo de refrigeración a demás de su sencillez constructiva es que al captar el calor, se aprovecha la vaporización y atomización del combustible.

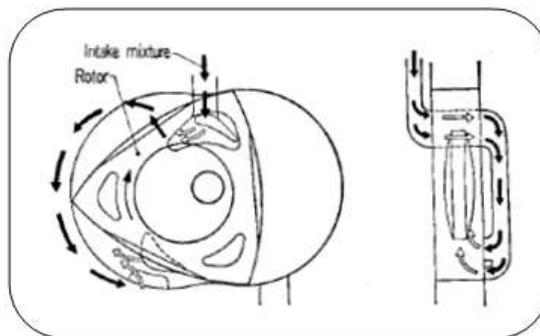


Gráfico 2.31 Refrigeración del rotor por la mezcla de admisión⁴⁰

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

2.5. ENCENDIDO DOBLE

Se debe evitar en todo momento el contacto entre los segmentos periféricos y los electrodos de las bujías, es por esto que las mismas van dispuestas en la cara interior del estator, se hacen dos orificios que atraviesan todo el estator y aquí se

⁴⁰ Fuente: <http://sites.google.com/site/mvwankel/refrigeracion>

fijan las bujías mediante un roscado y se procura que los electrodos no sobresalgan de la superficie del estator.

En el momento del trabajo de la mezcla, la cámara se encuentra dividida en dos subcámaras y es de fundamental importancia la ubicación de las dos bujías para que haya una buena propagación del frente de llama que recorre una geometría muy variable consiguiendo de esta manera un mejor rendimiento de la combustión en la cámara alargada del motor rotativo. Las bujías van dispuestas una en el lado retrasado de la cámara y otra en el lado adelantado creando así dos frentes de llama.

La bujía del frente de llama principal se encuentra ubicada ligeramente desfasada al punto muerto superior PMS evitando la pre-ignición y la bujía del frente de llama secundario se encuentra avanzada al PMS iniciando la combustión de los gases que se quedan atrapados inicialmente en la zona superior de la cámara de combustión.

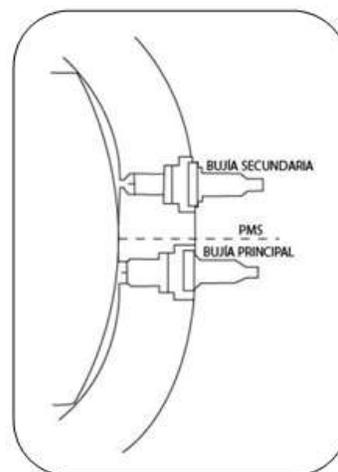


Gráfico 2.32 Encendido doble⁴¹

⁴¹ Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

La bujía que primero proporciona la chispa es la principal y posteriormente la secundaria logrando que los dos frentes de llama abarquen la totalidad de la cámara alargada quemando la mayor cantidad de combustible posible.

A las bujías del motor rotativo se las denomina como leading y trailing; las primeras se encuentran ubicadas en la parte inferior de la carcasa y son las bujías principales para encender la mezcla explosiva en las cámaras de combustión mientras que las trailing son las que ayudan a completar el proceso de producción y se encuentran ubicadas en la parte superior de la carcasa.

En la cámara de combustión al momento de la ignición se genera una distribución de presiones, el diferencial de presión en la cavidad de la bujía principal es casi nulo mientras que crece en la cavidad de la bujía secundaria, es por este motivo que el tamaño de la cavidad de la bujía secundaria es menor ya que al reducir el área de contacto se disminuye la fuerza que aplica presión en esta superficie.

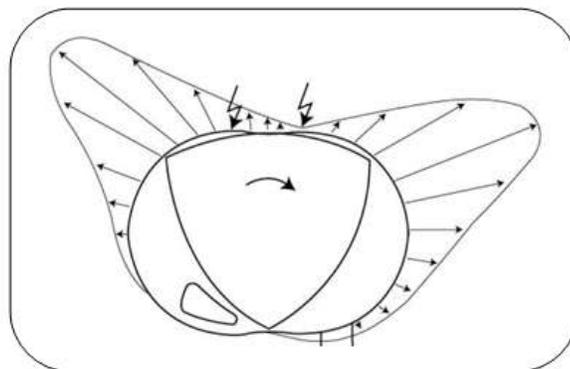


Gráfico 2.33 Diferencial de presión entre las dos bujías⁴²

⁴² Fuente:

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>

A continuación se mencionara algunas características que nos proporciona el sistema de encendido doble:

- Reducción de temperatura de los gases de salida ya que hay un menor tiempo de combustión y un mayor grado de expansión de gases.
- Al haber una combustión de mayor calidad se va a disminuir el consumo específico de combustible.
- Aumento en el nivel de las emisiones contaminantes NOx.

2.6. SISTEMA DE ENCENDIDO.

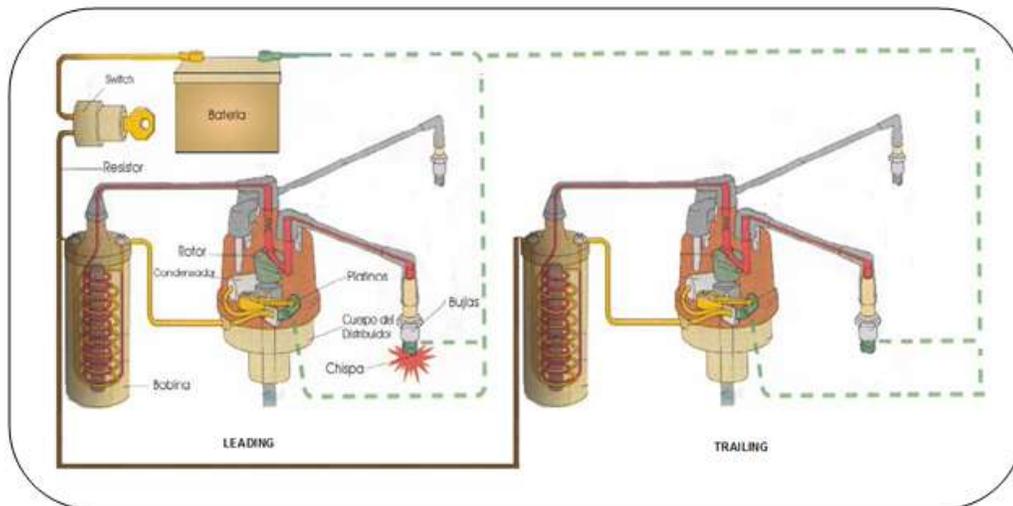


Gráfico 2.34 Encendido convencional⁴³

Para el motor rotativo wankel 10A vamos a utilizar un sistema de encendido convencional, en este caso específico se tiene dos distribuidores con sus respectivas

⁴³ Fuente:

<http://www.etp.uda.cl/areas/electromecanica/MODULOS%20CUARTO/SISTEMAS%20AUXILIARES%20DEL%20MOTOR/Gu%C3%ADa%20%20N%C2%B0%204%20Encendido%20convencional.pdf>

bobinas ya que al ser un encendido doble vamos a tener una fase de leading y otra de trailing.

En este tipo de sistema, la bujía para producir chispa necesita una tensión entre los 8.000 hasta los 15.000 voltios y esto depende de:

- Desgaste de las bujías
- Resistencia del rotor del distribuidor
- Punto de encendido o tiempo del motor
- Temperatura del motor
- Mezcla aire - combustible
- Resistencia de los cables de encendido
- Compresión de cada cámara de combustión de los rotores

2.6.1. Partes del Sistema

El sistema de encendido convencional está compuesto por:

a.- **Batería:** La batería de 12 voltios es un acumulador eléctrico que se basa en principios químicos; está formada por seis vasos no comunicados con un electrodo positivo de bióxido de plomo y otro electrodo negativo de plomo.

b.- **Bobinas de Encendido:** La tensión de 12v que suministra la batería nos es suficiente para la producción de la chispa en la bujía por lo que esta tensión debe ser aumentada hasta que alcance un valor en el cual sea posible el salto

de la chispa entre los electrodos; este aumento de tensión se lo puede lograr a través de la bobina, la cual es un transformador que recibe de la bobina la baja tensión y la transforma en alta tensión que es indispensable para la producción de la chispa.

La bobina está construida en una carcasa metálica y posee en su interior un núcleo de hierro laminado y dos bobinados, el uno primario y el otro secundario. Por lo general el bobinado primario posee 350 espiras más gruesas que el secundario y van conectadas en los bornes 15 y 1 mientras que el bobinado secundario tiene 20.000, el un terminal va conectado al borne intermedio o salida de alta tensión y el otro terminal se encuentra internamente conectado al bobinado primario.

c.- **Distribuidor con platino:** En el tiempo que el platino se encuentra cerrado, se produce un campo magnético en el núcleo de la bobina y va aumentando hasta llegar a su punto máximo, en este momento el eje de levas acciona la apertura del platino y se interrumpe la circulación de corriente por el circuito primario, inmediatamente el condensador absorbe la corriente que podría saltar entre los contactos del platino haciendo que se quemem; actúa como un acumulador.

El campo magnético que se produjo en el núcleo de la bobina desaparece repentinamente y sus líneas magnéticas empiezan a producir tensión en el bobinado secundario, esta alta tensión se dirige a través del cable de alta

tensión de la bobina hacia la tapa del distribuidor pasando por el rotor y se distribuye en cada cámara de combustión en su momento de trabajo.

d.- **Rotor:** Cuando el rotor gira dentro de la tapa del distribuidor, la corriente salta entre la punta del rotor y el terminal de la tapa al distribuir la alta tensión provocando desgaste de material en estos dos elementos.



Gráfico 2.35 Distancia de salto de corriente⁴⁴

La bobina tendrá que producir mayor tensión mientras haya mayor distancia para el salto de corriente entre la tapa del distribuidor y el rotor.

El rotor posee un resistor que atenúa las interferencias electromagnéticas producidas por la chispa, las mismas que interfieren en el funcionamiento de los componentes electrónicos del vehículo.

⁴⁴ Fuente: http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf



Gráfico 2.36 Rotor⁴⁵

e.- **Condensador de Encendido:** Actúa como un amortiguador de impulsos evitando que salten chispas en el ruptor ya que al abrirse el platino se crea tensión en el primario y las placas del condensador empiezan a cargarse evitando también que se quemen los contactos del ruptor y forme suciedad.



Gráfico 2.37 Condensador⁴⁶

f.- **Variador de avance centrífugo:** Se necesita un avance de encendido ya que la combustión se demora 2 milisegundos en producirse por lo que si la chispa salta en el máximo momento de compresión en el PMS, la combustión se

⁴⁵ Fuente: http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf

⁴⁶ Fuente:

<http://www.etp.udu.cl/areas/electromecanica/MODULOS%20CUARTO/SISTEMAS%20AUXILIARES%20DEL%20MOTOR/Gu%C3%ADa%20%20N%C2%B0%204%20Encendido%20convencional.pdf>

producirá 2 milisegundos después y para esto el pistón habrá bajado un poco sin aprovechar al máximo la explosión. Por este motivo el salto de chispa debe ser un poco antes para aprovechar toda la fuerza y la combustión se realice en el momento óptimo, este tiempo es unos grados antes del PMS y depende de cada marca.

El avance en grados provoca que la chispa salte a un tiempo T antes del PMS y este tiempo T es el que tarda el motor en recorrer estos grados, pero cuando más rápido gire el motor y esté a más revoluciones tardará menor tiempo en recorrer esos grados, por lo que necesitamos un mecanismo que aumente los grados de avance de encendido a medida que aumentan las revoluciones del motor.

Sobre el eje del rotor se colocan dos masas, una en cada lado, al aumentar las revoluciones del motor, aumenta la fuerza centrífuga sobre las masas y tira de ellas hacia afuera, cuando llega a un cierto valor empiezan a ceder los resortes que sujetan las masas y estas se desplazan hacia afuera a medida que aumentan las revoluciones y empujan a la leva desplazándola para que abra antes el ruptor adelantando el encendido en función de las revoluciones del motor.

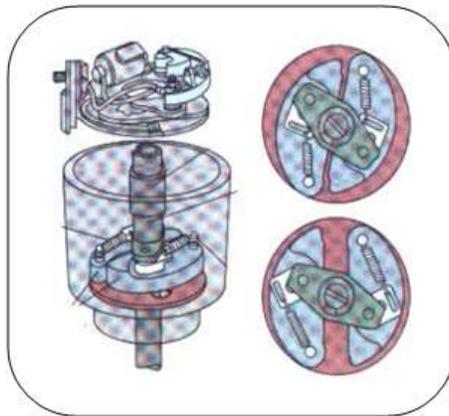


Gráfico 2.38 Avance centrífugo⁴⁷

g.- **Variador de avance de encendido por vacío:** Este tipo de variador de avance toma en cuenta la carga del motor, si el vehículo marcha con la mariposa abierta del todo, y el llenado de los cilindros es completo, el avance de encendido deberá ser menor que cuando se marcha con la mariposa media cerrada ya que impide un llenado total. Esto se da porque la velocidad de propagación de la inflamación es mayor cuanto más comprimida se encuentra la mezcla.

Para conocer la carga del motor, nos basta saber la presión del colector de admisión, es por esto que conectamos un tubo a la admisión que llega a una cámara hermética en el distribuidor, la cual está cerrada en un extremo por una membrana flexible, el otro lado de la membrana está a presión atmosférica y se conecta con una varilla que se desplaza con ella moviendo la leva para adelantar el encendido.

⁴⁷ Fuente:

<http://www.etp.uda.cl/areas/electromecanica/MODULOS%20CUARTO/SISTEMAS%20AUXILIARES%20DEL%20MOTOR/Gu%C3%ADa%20%20N%C2%B0%204%20Encendido%20convencional.pdf>

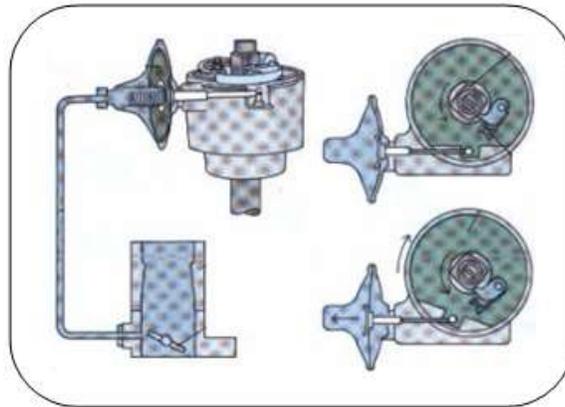


Gráfico 2.39 Avance por vacío⁴⁸

h.- **Eje de arrastre:** Es un eje metálico que engrana con la polea del cigüeñal, llevando este giro a los otros elementos que se encuentran unidos a él de forma física o elástica como las levas.



Gráfico 2.40 Eje del distribuidor⁴⁹

i.- **Cables de alta tensión:** Tienen dos características importantes; la primera es conducir la alta tensión producida por la bobina hacia las bujías sin permitir fugas de corriente y garantizando que haya una combustión sin fallas y la

⁴⁸ Fuente: http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf

⁴⁹ Fuente: http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf

segunda es eliminar interferencias electromagnéticas que causa la alta tensión de la chispa, ya que estas perjudican el correcto funcionamiento de los componentes electrónicos del vehículo.



Gráfico 2.41 Cables de bujías⁵⁰

j.- **Bujías:** Cuando llega la corriente a la cámara de combustión del rotor indicado, se necesita un elemento que haga saltar la chispa que inflame la mezcla y esta es la función de la bujía de encendido.



Gráfico 2.42 Bujías⁵¹

⁵⁰ Fuente: <http://autopartes.vivastreet.com.mx/refacciones-auto+ecatepec/cables-para-bujias/17648421>

⁵¹ Fuente: <http://www.rotarypit.com/encendido.htm#Bujias>

2.7. SISTEMA DE COMBUSTIBLE

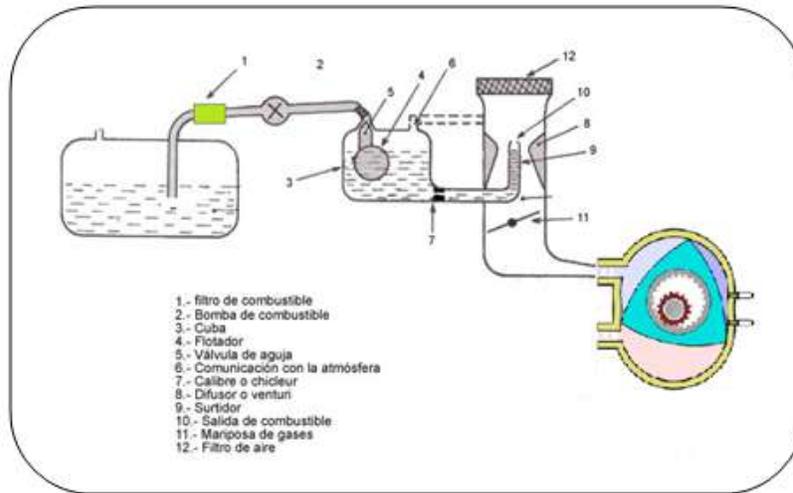


Gráfico 2.43 Partes del Sistema de Combustible⁵²

Su función almacenar el combustible y entregar una cantidad precisa, limpia y a la presión correcta, para satisfacer las exigencias del motor. Un sistema en buenas condiciones asegura un flujo abundante y efectivo de combustible en todas las prestaciones del motor.

- a) **Bomba:** Extrae el combustible del tanque o depósito y lo suministra al carburador para el funcionamiento del motor. Dado que la presión de la alimentación de combustible debe permanecer constante cualquiera sea el régimen del motor, el combustible es entonces suministrado en un caudal mayor de lo realmente necesario, volviendo el excedente nuevamente al tanque.

⁵² Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.com/carburador.htm>

- b) **Filtro:** Se encarga de retener las impurezas presentes en el combustible ya que estas ocasionan fallas en el funcionamiento del motor.

- c) **Tuberías:** Transportan el combustible desde el depósito hasta el carburador y también lo retornan al tanque. Su rotura, perforación o “estrangulamiento” permiten la fuga del combustible, la entrada de aire al sistema, o la interrupción de la circulación, lo que siempre causará problemas.

2.7.1. Carburador

Produce la mezcla compuesta por 14 partes de aire con una de gasolina, esta mezcla debe permitir el funcionamiento del motor en todas las condiciones y debe facilitar el encendido en frío, alterando la proporción de la mezcla, al permitir el ingreso de una mayor proporción de gasolina.

Su funcionamiento se basa en el principio de venturi que consiste en variar el diámetro interior de un tubo, con lo que se logra aumentar la velocidad de paso del aire, creando las condiciones propicias para la aspiración de la gasolina.

Los carburadores pueden tener, uno, dos o cuatro venturi (bocas o entradas), y se pueden montar por parejas, usando un múltiple de admisión especial para tal fin. Además pueden ser horizontales o verticales.

Las partes del carburador son:

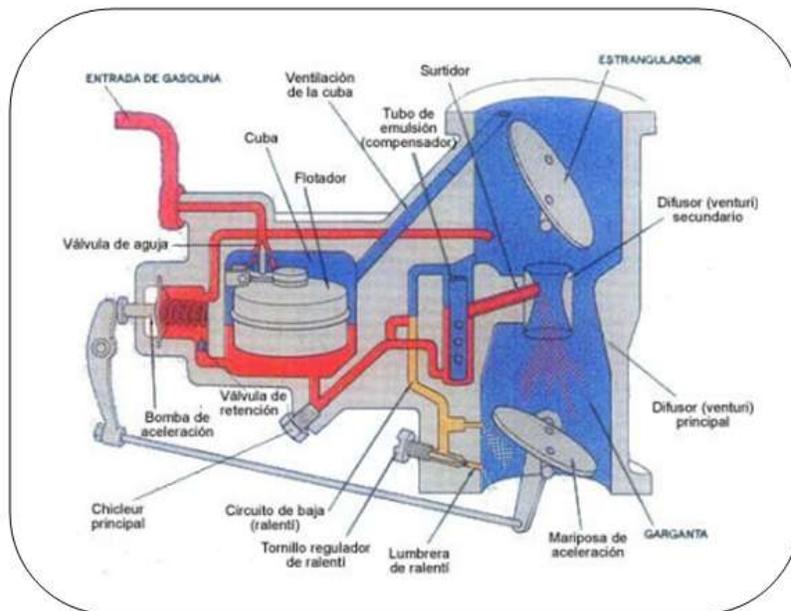


Gráfico 2.44 Partes del Carburador⁵³

- a) **Cuerpo:** Es la estructura que contiene todos los elementos necesarios para el funcionamiento del carburador. Un carburador puede ser de uno, dos o cuatro cuerpos. En su interior se mezclan las 14 partes de aire y la parte de gasolina, necesarias para el funcionamiento del motor.
- b) **Cuba:** Aquí se almacena la gasolina proveniente del tanque de combustible. Se encuentra una aguja o punzón, que están unidos a un flotador que sube o baja de acuerdo al nivel de combustible que se encuentre en la cuba, permitiendo la entrada o no de gasolina al interior, según las necesidades de cada momento.

⁵³ Fuente: <http://www.coches20.com/definicion-carburador/>

- c) **Aguja o Punzón:** Su función es impedir o permitir la entrada del combustible a la cuba, tapando o destapando un fino orificio, de acuerdo al nivel existente dentro de la taza o depósito del carburador.

- d) **Flotador:** Elemento que sube o baja dentro de la cuba, de acuerdo con la cantidad de combustible presente. Se encarga de ordenar mediante un vástago cuando la aguja debe permitir o impedir la entrada de combustible a la cuba.

- e) **Surtidor o Chicler:** Orificio mediante el cual pasa aire o gasolina, el carburador posee varios de estos elementos los cuales permiten el paso de los dos componentes de la mezcla.

- f) **Boquilla de inyección:** Es parte del cuerpo del carburador, posee un estrangulamiento llamado venturi el cual acelera la salida de aire y crea la depresión necesaria para la aspiración de gasolina.

- g) **Choke:** Altera la entrada de aire para enriquecer la mezcla carburada, aumentando así la proporción de gasolina obteniendo así un mejor encendido del motor en frío.

2.8. TERMODINÁMICA DEL MOTOR ROTATIVO 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.

2.9.1. Primer principio de la termodinámica

Es la ley de conservación de energía para el estudio de las máquinas térmicas el cual nos dice que la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma. La energía interna del sistema cambiará si se realiza trabajo sobre éste o intercambia

calor con otro; por lo tanto el calor es la energía necesaria que debe intercambiar el sistema para compensar las diferencias entre trabajo y energía interna.

El calor no se transforma íntegramente en trabajo ya que al calentar un sistema, este transforma una parte de calor en trabajo y el resto lo destina a modificar su energía interna, con esto deducimos que:

$$Q = W + \Delta U \Rightarrow \Delta U = Q - W$$

En donde:

U= energía interna (debida a la energía química y la energía cinética de las partículas)

Q= calor absorbido es positivo, cedido es negativo

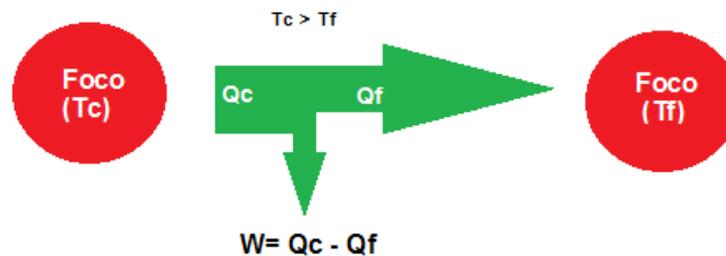
W= trabajo realizado (expansión) es positivo, aportado al sistema (compresión) negativo.

2.9.2. Segundo principio de la termodinámica

El flujo de calor espontáneo siempre es unidireccional, desde los cuerpos de mayor temperatura hacia los de menor temperatura hasta lograr conseguir un equilibrio térmico.

Carnot manifestó que mientras una cantidad de trabajo se puede convertir íntegramente en calor, la transformación inversa de calor a trabajo no puede

realizarse de una forma total, a demás es necesario que parte del calor pase de un foco calorífico a temperatura alta a otro de temperatura inferior.



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.

$$W_{\text{realizado}} = Q_1 - Q_2$$

2.9.3. Transformaciones de un sistema termodinámico

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 Temperatura descritos a continuación.

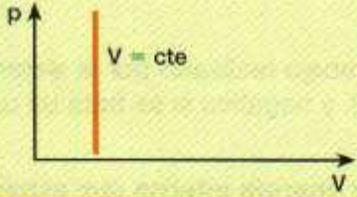
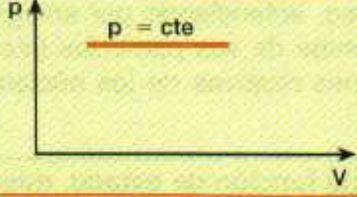
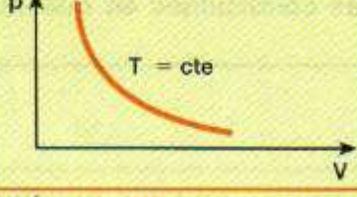
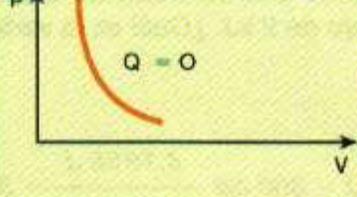
| Transformación | Representación gráfica | Ecuación |
|-------------------------------|---|--|
| Isocora ($V = \text{cte}$) |  | $p = k T$ (Segunda ley de Gay-Lussac) |
| Isobara ($p = \text{cte}$) |  | $V = k T$ (Primera ley de Gay-Lussac) |
| Isoterma ($T = \text{cte}$) |  | $p V = \text{cte}$ (Ley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

Gráfico 2.45 Transformaciones de un sistema térmico⁵⁴

2.9. CICLO TERMODINÁMICO OTTO (MOTOR WANKEL)

En el ciclo Otto el fluido de trabajo es la mezcla de aire-combustible cuya combustión es provocada por una chispa. Los productos de la combustión se expansionan y son evacuados; el aire-combustible se introduce nuevamente y se repite el ciclo.

⁵⁴ Fuente: <http://www.slideshare.net/gueste99c45e/los-principios-de-la-termodinmica-tema-8>

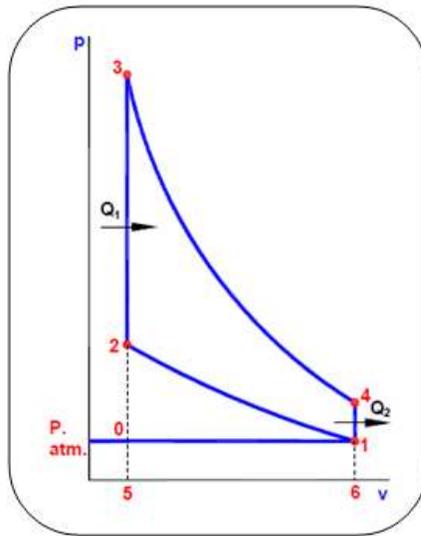


Gráfico 2.46 Diagramas presión - volumen⁵⁵

a) 0-1 Admisión Isobara

El aire carburado se introduce en la cámara dando como resultado que la presión y la temperatura final es igual a la atmosférica.

b) 1-2 Compresión Adiabática

El aire-combustible es comprimido en el interior de la cámara sin intercambio de calor con el exterior. En este proceso la temperatura del fluido se eleva, pero no lo suficiente para provocar su detonación. El trabajo realizado por el rotor es el área 1-2-5-6-1, que es un trabajo de signo positivo para el sistema.

⁵⁵ Fuente: <http://mgallegosantos.files.wordpress.com/2010/01/tema-16.pdf>

c) 2-3 Transformación Isocora

Cuando la mezcla está comprimida a P2 se produce la inflamación del gas por medio de la chispa de la bujía, esta adición de calor Q1 a volumen constante produce la elevación brusca de la temperatura y la presión a P3.

d) 3-4 Expansión Adiabática

La combustión de la mezcla ha terminado y la presión generada produce el giro del rotor aumentando el volumen con descenso significativo de la presión y la temperatura. La masa gaseosa se ha expandido adiabáticamente. El trabajo realizado es correspondiente al área 3-4-6-5-3 de signo negativo para el sistema.

e) 4-1 Expansión Isocora

Con la apertura de la lumbrera de escape, se pone la cámara a presión atmosférica, con un descenso importante de presión mientras que el rotor avanza en su sentido de giro. El calor que no se ha transformado en trabajo es cedido a la atmósfera.

2.9.1. Análisis termodinámico

Rendimiento Teórico (η_T): Considerando al motor como un sistema cerrado en los estatores y un ciclo, se cumplirá que:

$$\eta_T = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - |Q_2|}{Q_1} = 1 - \frac{|Q_2|}{Q_1}$$

Si consideramos a la mezcla de aire-combustible como un gas ideal y estudiamos el trabajo producido en las diferentes transformaciones termodinámicas obtenemos la siguiente ecuación:

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{9.4^{1.4-1}}$$

$$\eta_T = 0.59$$

$$\eta_T = 59\%$$

2.10. DIAGRAMA DE MANDO

El diagrama de mando nos permite conocer los reglajes necesarios para el mayor rendimiento del motor, es decir es el ciclo teórico del motor wankel, pero en la práctica no corresponde con este, por lo que hay que buscar técnicas que acerquen lo máximo posible los valores reales a los teóricos.

En la actualidad las principales técnicas utilizadas son:

- Colocación y forma de las lumbreras de admisión y escape, para obtener el mejor llenado y evacuado posible de los gases.
- Avance al encendido (AE), para conseguir que se alcance la máxima presión al inicio de la expansión.

- Sobrealimentación, para aumentar el rendimiento volumétrico, mejorar el llenado y aumentar así el rendimiento.

Con estas disposiciones mencionadas logramos mejorar el ciclo real, pero no se llega al teórico, el cual está representado en la figura 2.46.

En el motor wankel el punto de encendido debe ser muy preciso, ya que si la combustión empieza antes de que el rotor esté en la posición correcta, la explosión puede empujar el rotor en sentido contrario con lo que podría dañarse el motor.

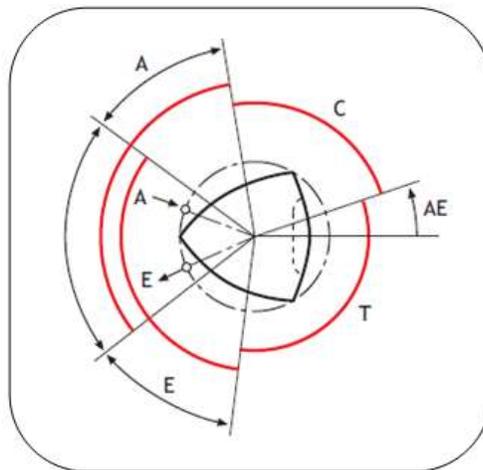


Gráfico 2.47 Ciclo teórico del motor wankel⁵⁶

⁵⁶ Fuente:
http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf

CAPÍTULO 3 .- ARMADO Y DESARMADO DEL MOTOR WANKEL

3.1. DESARMADO DEL MOTOR WANKEL

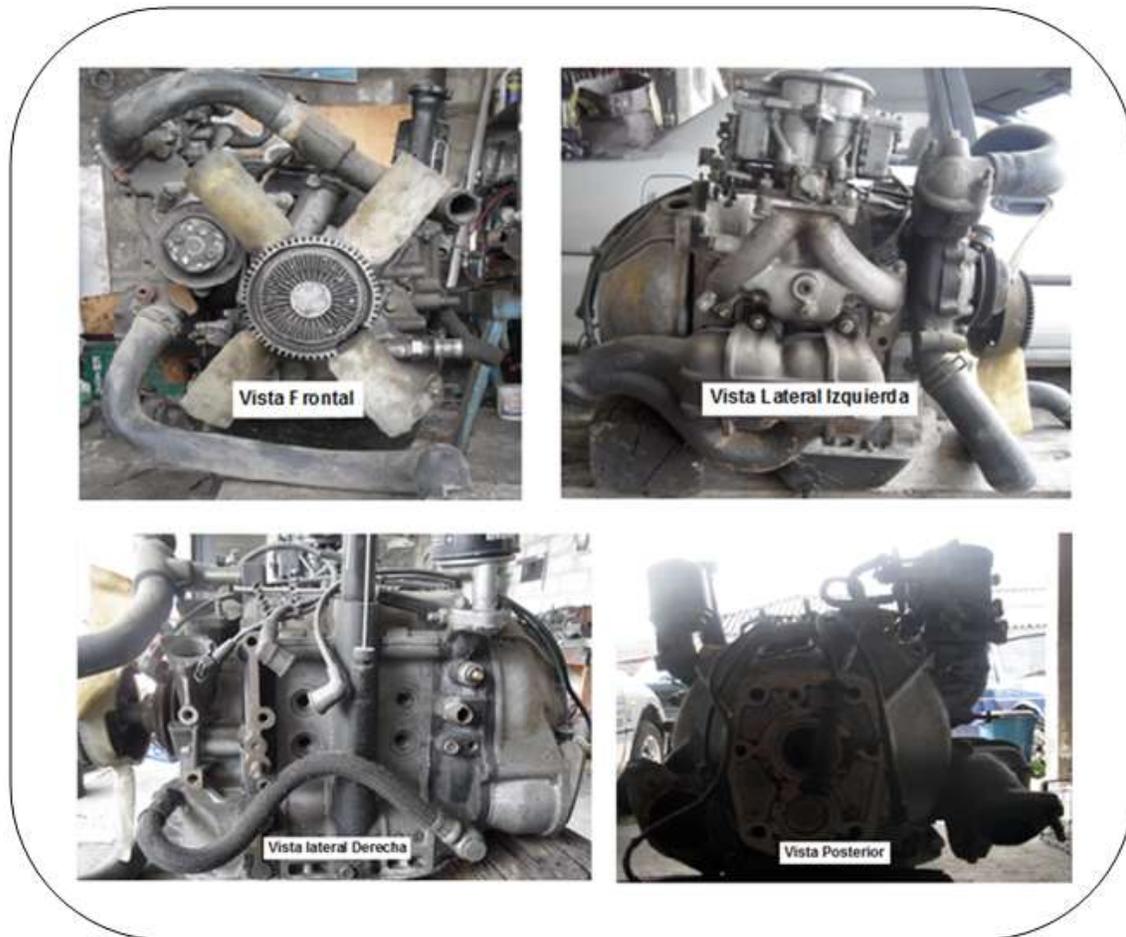


Gráfico 3.1 Vistas del motor antes de ser desarmado

Los pasos a seguir para el desarmado del motor Wankel son:

1. Remover el múltiple de escape sacando sus cuatro tuercas con copa número 17 y despegar sus respectivas juntas.



Gráfico 3.2 Múltiple y juntas de escape

2. Desmontar el múltiple de admisión con sus respectivas juntas y con el cuerpo de carburación. Utilizamos copa número 13 para las 6 tuercas.



Gráfico 3.3 Carburador, múltiple y juntas de admisión

3. Sacar la polea de la bomba de agua, trabando la misma y utilizando una llave número 10 para sus 4 pernos.



Gráfico 3.4 Polea de la bomba de agua

4. Remover la bomba de agua sacando sus respectivos pernos y tuercas;
también desmontar el alojamiento de la misma y del termostato



Gráfico 3.5 Bomba de Agua

5. Desmontar el ventilador sacando sus cuatro pernos con una llave número 8.



Gráfico 3.6 Ventilador

6. Sacar la carcasa posterior que aloja al volante de inercia para lo cual usamos copa número 17 para los 4 pernos y 2 tuercas.



Gráfico 3.7 Carcasa Posterior

7. Desmontar la bomba auxiliar de aceite cuya función es lubricar los segmentos del rotor de acuerdo al número de revoluciones del motor, utilizamos llave 10 para sus dos pernos.



Gráfico 3.8 Bomba auxiliar de aceite

8. Remover las mangueras de lubricación con llave número 24.

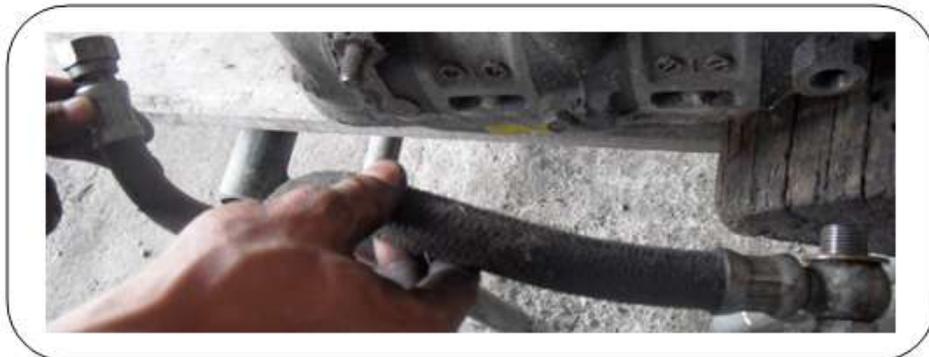


Gráfico 3.9 Manguera de lubricación

9. Trabar el volante de inercia y con una copa gruesa desajustar la tuerca; tener cuidado al momento de remover el volante ya que se encuentra una pequeña guía al momento de desmontarlo.



Gráfico 3.10 Volante de inercia y guía

10. Desmontar el filtro de aceite, cárter y coladera utilizando la llave número 13 y copa número 10 respectivamente. Tener mucho cuidado al momento del desmontaje ya que los empaques de los distintos elementos pueden dañarse.

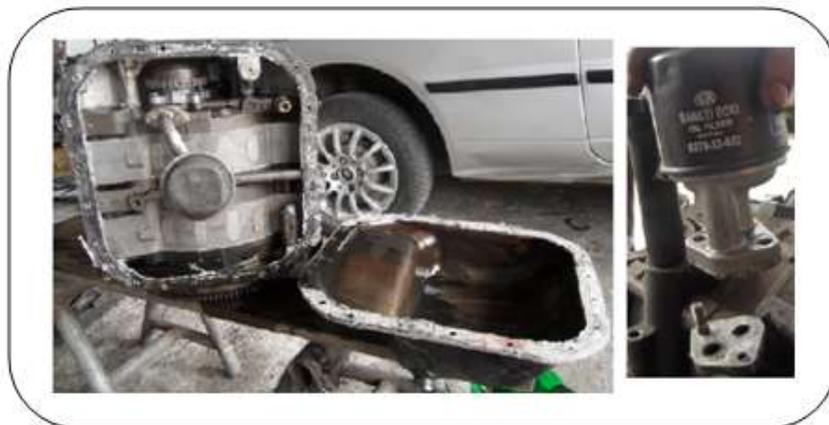


Gráfico 3.11 Carter y filtro de aceite

11. En la tapa frontal del motor, sacar la polea del cigüeñal con su respectiva guía.



Gráfico 3.12 Polea del cigüeñal

12. Desmontar la tapa frontal con su respectivo empaque; sacar el o ring ubicado en el conducto de aceite.



Gráfico 3.13 Desmontaje tapa frontal

13. Deslizar el engranaje distribuidor con su canastilla.



Gráfico 3.14 Engranaje distribuidor y canastilla

14. Desmontar el mecanismo tensor de la bomba de aceite desajustando sus dos pernos con copa o llave número 12.



Gráfico 3.15 Tensor de la bomba de aceite

15. Remover la bomba de aceite desajustando sus cuatro pernos con llave número 10 y deslizarla cuidadosamente hacia arriba con su cadena y piñón que va al eje excéntrico.



Gráfico 3.16 Bomba de aceite

16. Sacar la guía, el contrapeso, la arandela de empuje y la canastilla.



Gráfico 3.17 Contrapeso

17. Desajustar los 6 pernos con llave número 12 y sacar la placa de apoyo, la canastilla, el espaciador y la arandela de empuje.



Gráfico 3.18 Desmontaje placa de apoyo del contrapeso

18. Virar el motor y poner su cara posterior o alojamiento trasero hacia arriba para poder sacar los pernos de presión. Debemos aflojar estos pernos poco a poco en tres tiempos y en la secuencia que se muestra en la figura a continuación.



Gráfico 3.19 Orden de sacar o desajustar los pernos del motor

19. Levantar la cubierta posterior del motor, retirar los segmentos del rotor que se encuentren pegados en su superficie y volverlos a colocar en sus respectivos alojamientos.



Gráfico 3.20 Desmontaje Rotor lateral

20. Retirar las juntas de estanqueidad de la cara posterior del alojamiento posterior del rotor o housing y con mucho cuidado sacar las dos clavijas tubulares o bocines.

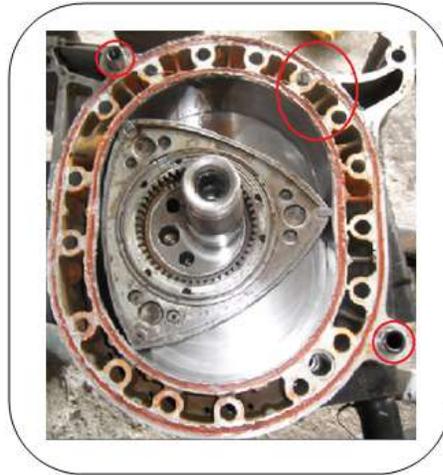


Gráfico 3.21 Juntas de goma

21. Sacar el rotor con mucho cuidado, sin que sus componentes se estropeen.



Gráfico 3.22 Desmontaje rotor

22. Con mucha precaución sacar cada uno de los segmentos periféricos (ápex), laterales y de anclaje (lóbulos) del rotor con sus respectivos resortes y ponerlos en una bandeja identificando en qué lugar del rotor va cada uno.

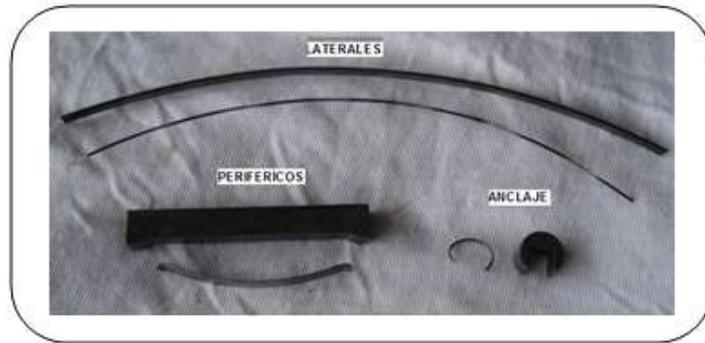


Gráfico 3.23 Elementos de sellado

23. Remover los sellos de aceite internos y externos del rotor y sus respectivos espirales; siendo muy precavidos para que no se deformen sus labios. Realizar este procedimiento con las dos caras del rotor.



Gráfico 3.24 Desmontaje sello de aceite del rotor

24. Retirar el housing o estator posterior y sacar las juntas de estanqueidad de su cara frontal.
25. Elevar la tapa intermedia y al mismo tiempo con mucho cuidado elevar el eje excéntrico para poder sacar la tapa y por último el eje.



Gráfico 3.25 Tapa intermedia y eje motriz

26. Quitar el rotor frontal y el estator o housing frontal siguiendo los mismos pasos que en los posteriores.



Gráfico 3.26 Desmontaje rotor y estator frontal

3.2. ARMADO DEL MOTOR WANKEL

Antes de empezar armando el motor tomar en cuenta que los o rings, sellos de goma y empaques deben ser reemplazados.

1. Armar los dos rotores, empezando por los retenedores de aceite.



Gráfico 3.27 Retenedores o sellos de aceite

2. Instalar los resortes de los retenedores en sus respectivas ranuras, tomando en cuenta que los bordes redondos de los muelles o resortes van en el agujero que se encuentra en cada alojamiento del retenedor y el sentido en que va montado va a ser horario en las caras frontales de los rotores y anti horario en las caras posteriores.

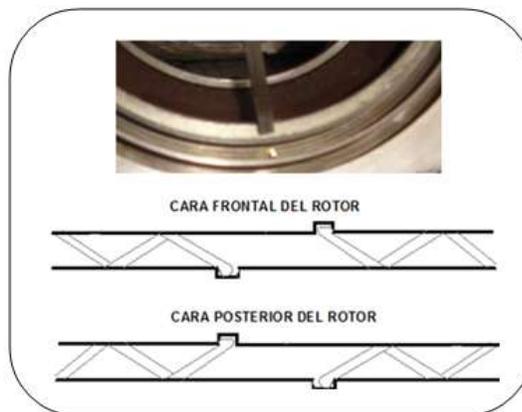


Gráfico 3.28 Posición correcta del muelle del retenedor de aceite

3. Poner un nuevo o ring en cada retenedor de aceite y colocar cada uno en su ranura de modo que el borde cuadrado del muelle calce en una de las

pequeñas guías que tiene el sello de aceite o retenedor, como se muestra en la figura anterior.



Gráfico 3.29 Montaje del retenedor de aceite externo

4. Poner los espirales y los lóbulos o tacos en cada uno de sus alojamientos con una pequeña pinza, supervisando que delimiten bien con el alojamiento de los ápex o segmentos periféricos, y la posición de los mismos se debe guiar con la huella que estos dejan en el rotor, los muelles forman una pequeña ceja en donde asientan tanto en sus alojamientos como en las partes inferiores de los tacos y de acuerdo a esta señal se los debe colocar. Una vez colocados comprobar el pequeño juego que debe haber, presionando cada lóbulo con los dedos.



Gráfico 3.30 Lóbulos en sus respectivas holguras

5. Colocar cada muelle de los segmentos laterales en su respectivo alojamiento, tomando en cuenta que las puntas deben ir hacia arriba.



Gráfico 3.31 Montaje del muelle del segmento lateral

6. Al colocar los segmentos laterales debemos fijarnos que su parte inferior es la que tiene marcas de su respectivo muelle y debemos comprobar presionando con los dedos el pequeño juego que estos tienen tanto lateral como hacia arriba y abajo.



Gráfico 3.32 Segmentos laterales

7. Cada muelle y cada segmento periférico debe ser colocado en su respectivo alojamiento confirmando el suave movimiento que debe tener al presionar su cabeza.

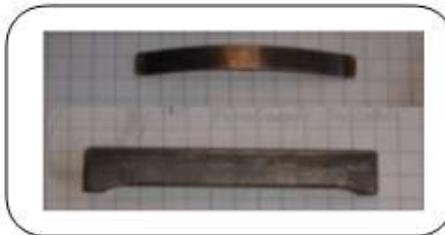


Gráfico 3.33 Segmento periférico y su muelle

8. Debemos preparar los dos housing colocando nuevos sellos de goma y los o rings, para fijar los sellos de goma utilizamos un pegamento especial.



Gráfico 3.34 Solución para fijar los sellos de goma

9. En la tapa frontal del rotor colocar el piñón o cono y los bocines cubiertos de aceite para poder colocar el primer housing.



Gráfico 3.35 Bocines colocados en la tapa frontal

10. Colocamos el primer housing con mucho cuidado que los sellos de goma o los o rings se muevan de su respectivo alojamiento.



Gráfico 3.36 Instalación del estator periférico

11. Poner aceite en las paredes del housing, en el interior del piñón y en la tapa frontal.



Gráfico 3.37 Untar aceite

12. Poner el rotor teniendo mucha precaución que los sellos laterales, periféricos y los tacos puedan caerse, el lado del rotor que va con la dentadura o corona va hacia el piñón de la tapa frontal.



Gráfico 3.38 Instalación del rotor primario

13. Colocar el cigüeñal y girarlo para ver el buen funcionamiento del rotor con todos sus elementos.



Gráfico 3.39 Verificación del giro del rotor

14. Elevar el eje excéntrico o cigüeñal unos 25mm y colocar la tapa intermedia a través de este. Poner los bocines con aceite en su superficie y colocar con mucho cuidado el housing posterior.



Gráfico 3.40 Instalación de la tapa intermedia y estator posterior

15. Poner aceite en las paredes del housing posterior y en la superficie de la tapa intermedia, colocar el rotor posterior siendo muy cuidadosos que sus segmentos se estropeen o se caigan. Colocamos el rotor delantero con uno de sus vértices apuntando en medio de los orificios de las bujías, en cambio el rotor posterior es colocado de forma contraria, es decir que su cámara de combustión va a estar en dirección a los alojamientos de las bujías.



Gráfico 3.41 Introducción del rotor posterior

16. Poner suficiente aceite en el piñón estacionario y el rodamiento principal; moviendo el eje excéntrico comprobamos el buen funcionamiento del rotor.



Gráfico 3.42 Untar aceite en rodamientos y piñones

17. Colocar la tapa posterior.



Gráfico 3.43 Tapa posterior

18. Poner los 19 pernos del motor y ajustarlos en el orden que el gráfico lo indica, aplicar aceite en las roscas de los pernos y al momento de ajustarlos no hacerlo de una sola vez, se lo debe realizar en tres tiempos, el ajuste final debe ser con un torque de 3.8 m.kg. Después de esto debemos girar el eje excéntrico y comprobar que la rotación sea ligera y suave.



Gráfico 3.44 Orden de ajuste de los pernos del motor

19. Aplicar aceite de motor en el retenedor de aceite de la tapa posterior, poner la guía en el eje excéntrico e instalar el volante de inercia con su respectiva rodela y tuerca, la misma que debe ser ajustada con un torque de 50m.kg.



Gráfico 3.45 Instalación del volante de inercia

20. Asentar el motor sobre su volante de inercia y en su parte frontal colocar en el cigüeñal la placa de empuje, deslizar el espaciador y la canastilla; y poner en estos suficiente aceite



Gráfico 3.46 Placa de empuje, espaciador y canastilla del eje motriz

21. Poner la placa de apoyo y ajustar sus 6 pernos.



Gráfico 3.47 Ajuste de placa de apoyo

22. Deslizar la canastilla aplicando en esta aceite, y junto con la contrapesa deslizar la arandela de empuje.



Gráfico 3.48 Insertar contrapesa

23. Para empezar a instalar la bomba de aceite, debemos poner la guía en el cigüeñal.



Gráfico 3.49 guía del eje motriz

24. Poner la cadena de la bomba de aceite en el piñón que al eje excéntrico y en la rueda dentada de la bomba e instalarlos en sus respectivos alojamientos, es decir en el eje excéntrico y en el eje de la bomba. Ajustamos los cuatro pernos de la bomba.



Gráfico 3.50 Montaje de la bomba de aceite

25. Acoplar el mecanismo tensor y ajustar sus dos pernos.



Gráfico 3.51 Ajuste del mecanismo tensor

26. Deslizar la canastilla y el engranaje de accionamiento distribuidor en el eje excéntrico tomando en cuenta que la señal que hay en el engranaje vaya hacia la tapa delantera.



Gráfico 3.52 Señalización del engranaje de accionamiento distribuidor

27. Se debe medir el juego final del eje excéntrico, para esto colocamos la polea del cigüeñal y la ajustamos; instalamos un reloj palpador cuya punta va dirigida al perno de la polea, encerramos el reloj y empezamos a mover axialmente al eje excéntrico. La medida tomada o el juego final debe ser de **0.04 a 0.07 mm**

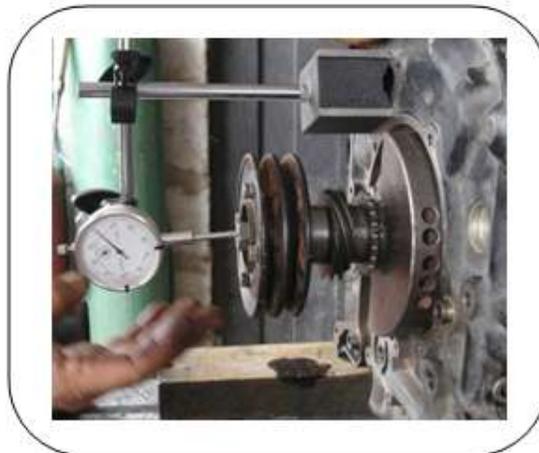


Gráfico 3.53 Medición del juego axial

28. Colocar un nuevo o ring en el conducto de aceite de la tapa frontal. Colocar el empaque y la cubierta frontal del rotor e instalar la polea del cigüeñal apretando su perno con un torque de 10 a 12 m.kg



Gráfico 3.54 Instalación de la tapa frontal

29. Colocar la coladera de aceite y sujetar sus dos pernos, debemos aplicar un cordón continuo de silicona en la superficie donde va montado el cárter y poner el empaque.

30. Aplica silicona en el empaque e instalar el cárter, los pernos del cárter deben tener un torque de 0.7 a 10 m.kg.

31. Instalar la bomba de agua y ajustar las tuercas y pernos en la secuencia descrita en la siguiente figura. Los pernos y las tuercas de la bomba de agua deben tener un torque de 1.8 a 2.7 m.kg.



Gráfico 3.55 Orden de ajuste de los pernos de la bomba de agua

32. Poner los dos o rings donde asienta el filtro de aceite e instalar el filtro y su alojamiento en la tapa posterior.

33. Los dos distribuidores que tiene el motor es uno de Leading y otro de trailing; para poderlos instalar primero debemos hacer coincidir las dos marcas que tiene la polea del cigüeñal con la punta o guía que hay en la coraza delantera.



Gráfico 3.56 Marcas de Leading y Trailing en la polea

34. Alinear las marcas que hay en la carcasa de los dos distribuidores y las poleas conductoras.

35. Instalar los dos distribuidores haciendo que giren sus poleas y embonen, colocar sus pernos y ajustar.



Gráfico 3.57 Distribuidores Leading y Trailing

36. Colocar un nuevo empaque en el múltiple de admisión y de escape e instalarlos en el motor.



Gráfico 3.58 Múltiple de admisión y escape

37. Instalar el alternador y su polea en la parte superior de la bomba de agua y ajustar su perno y la placa de regulación del mismo. Colocar la banda y tensionarla moviendo el perno de la placa de regulación, en el momento que quede con una tensión adecuada ajustar el perno.



Gráfico 3.59 Parte frontal del motor

38. Poner el motor de arranque en la parte posterior del motor wankel y ajustar sus tres pernos.



Gráfico 3.60 Parte posterior del motor con motor de arranque

CAPÍTULO 4 .- COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS PARA EL MOTOR

WANKEL

El impacto ambiental producido por el proceso de combustión de gasolina en los motores rotativos ha llevado a desarrollar investigaciones de nuevas tecnologías para reducir emisiones contaminantes por medio de la utilización de combustibles alternativos de tipo ecológico que ayudarán a la conservación del medio ambiente.

Los principales gases contaminantes emitidos por un motor rotativo de encendido provocado (MREP) son los siguientes:

- Dióxido de Carbono (CO₂)
- Monóxido de Carbono (CO)
- Hidrocarburos (HC)
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Partículas
- Óxidos de Azufre (SO_x)

4.1. GASES CONTAMINANTES

4.1.1. Dióxido de carbono (CO₂)

Es un gas incoloro, inodoro e incombustible, por lo que posee un poder antidetonante muy elevado, no es toxico pero al reducir la proporción de oxígeno en el aire tiende a ser perjudicial para la salud.

Es el principal responsable del efecto invernadero porque ayuda a atrapar el calor proveniente del sol en nuestra atmósfera. Sin el dióxido de carbono la tierra estaría muy fría.

Este gas proviene de la exhalación de los seres vivos, al quemar cualquier material que contenga carbono, etc.; el aumento de este elemento es el principal responsable del calentamiento global ya que la capa de ozono se está desintegrando.

4.1.2. Monóxido de carbono (CO)

Es un gas inodoro, incoloro, inflamable y altamente tóxico que puede causar la muerte en niveles elevados ya que al ser inhalado se mezcla con la hemoglobina de la sangre impidiendo la absorción de oxígeno y causando asfixia.

Este gas se forma como producto intermedio de la combustión incompleta de un hidrocarburo, el cual se somete a presiones y temperaturas elevadas en la cámara de combustión, esto conjuntamente con una deficiencia de oxígeno impide completar la oxidación del CO al CO₂, es decir el monóxido de carbono se produce a un paso previo de la producción del dióxido de carbono.

4.1.3. Óxidos de azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre emitidos a la atmósfera por el proceso de combustión de carbono, petróleo, diesel, gas natural son el anhídrido sulfuroso (SO₂) y el anhídrido sulfúrico (SO₃), este último en menor proporción.

Estos óxidos de azufre son gases incoloros que poseen un olor irritante, en el agua se disuelven formando una disolución ácida, por lo que son los principales causantes de la lluvia ácida ya que en la atmósfera al mezclarse con el vapor de agua forman ácido sulfúrico.

4.1.4. Óxidos de nitrógeno (NO_x)

El monóxido de nitrógeno (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) se producen en el seno de los gases producto de la combustión a elevadas presiones y temperaturas en la cámara, conjuntamente con la presencia de suficiente oxígeno; en el momento de mayor producción de este gas es en el pico de presión debido a la combustión rápida. El dióxido de nitrógeno es un gas de color pardo de olor penetrante cuya exposición provoca una irritación fuerte en el sistema respiratorio.

La emisión de este tipo de óxidos se puede limitar reduciendo la temperatura; esto lo logramos teniendo un buen sistema de refrigeración, retardando el momento de la inyección y por último utilizando una válvula de recirculación de gases hacia la admisión o EGR.

4.1.5. Hidrocarburos (HC)

Son restos de combustible que no reaccionaron en la combustión o lo hicieron parcialmente, son los mayores contribuyentes para el smog de la ciudad y tóxicos

para la salud. Estos tipos de gas contaminante son producidos en mayor cantidad en los vehículos a diesel y se producen por:

- Proceso de enfriamiento de la pared, quiere decir que cuando se inicia la llama de combustión y ésta alcanza a las paredes de la cámara, las cuales están a menor temperatura, la llama se extingue antes de que todo el combustible se quemara por completo dejando una pequeña porción de hidrocarburos no quemados que salen al exterior por medio del sistema de escape.
- Cuando hay depósitos de carbón en la cámara de combustión y nos encontramos en el momento de la compresión de la mezcla, los hidrocarburos quedan atrapados en estos poros y en el tiempo de trabajo no se queman y son liberados en el momento de escape hacia el exterior.
- Una de las causas más comunes son problemas en el sistema de encendido, como un cable de distribución con cortocircuito, una chispa inadecuada; también una mezcla no combustible, es decir demasiado rica o demasiado pobre y la inyección tardía del combustible aumentan el nivel de HC.

4.1.6. Partículas

Las partículas emitidas por el proceso de combustión se componen de compuestos orgánicos solubles (HC), carbón y compuestos orgánicos no solubles; los factores que permiten la formación de estos contaminantes son las altas presiones y

temperaturas en la cámara de combustión, junto con la falta de oxígeno adecuado para poderlas quemar.

Debido a lo indicado anteriormente, la cadena del hidrocarburo tiende a romperse y se deshidrogena, haciendo que el carbono permanezca en forma de partícula sin poder quemarse.

Los tipos de partículas que se producen son dos:

- Partículas secas que son partículas de carbono que forman el humo negro.
- Partículas húmedas que son HC sin quemar junto con la combustión de aceites que se encuentran sobre un núcleo de carbono.

4.2. COMBUSTIBLES ALTERNATIVOS

Los combustibles alternativos que podemos utilizar en los motores wankel de encendido provocado para poder disminuir la emanación de los gases contaminantes producidos por la combustión son.

- GLP o Gas licuado de petróleo
- Gas Natural
- Hidrógeno

4.2.1. GLP (Gas licuado de petróleo)

Es un producto derivado proveniente de la mezcla de propano y butano en variadas proporciones ya sea del 40% de butano y el 60% de propano; se lo obtiene en el proceso de refinado del petróleo crudo, del gas natural o de la obtención del petróleo.

Este hidrocarburo cambia de estado gaseoso (presión atmosférica) a líquido en condiciones de presión moderada (5-9 bar) y enfriamiento; para su almacenamiento a gran escala es refrigerado como un líquido, pero para su transporte y almacenamiento local se lo coloca en tanques o envases presurizados.

En **refinerías** el GLP se obtiene mediante la destilación del petróleo, en donde se van separando ordenadamente de acuerdo a su punto de ebullición y densidades los distintos componentes; entre ellos el propano y butano, los cuales son los componentes del gas licuado del petróleo.

A partir del **Gas natural**, el GLP se obtiene por el proceso denominado de licuefacción; en donde al gas natural se lo envía a distintas plantas de procesos para poder obtener cada uno de sus componentes. En la planta de fraccionamiento, el componente líquido que queda de los anteriores procesos se separa en etano, GLP y gasolinas naturales.

4.2.1.1. Propiedades

- Es incoloro e inodoro, por lo que para su comercialización se exige que sea mezclado con una sustancia odorizante.

- Dos veces más pesado que el aire en su etapa de vapor.
- No contiene azufre ni plomo.
- No es tóxico ni corrosivo, pero reemplaza a O₂ por lo que no se recomienda respirarlo mucho tiempo.
- Más liviano que el agua, casi a la mitad de su peso.
- Índice de octano 107

4.2.1.2. Aplicación en el motor rotativo

El GLP es un combustible alternativo apto para ser utilizado en el motor rotativo wankel, tomando en cuenta que el encendido del motor siempre se lo realiza con gasolina y a partir de los 40 grados centígrados que alcanza el refrigerante se puede activar el funcionamiento del GLP. Para que sea apto este tipo de combustible en nuestro vehículo se debe someter a algunas adaptaciones en el sistema de inyección tales como:

- a. **Depósito:** Se recomienda que tenga forma trocoidal, es decir la forma de la rueda de emergencia que va en el maletero, con esto no aumentamos el volumen en este lugar. Si es un vehículo 4x4 y su rueda de emergencia se encuentra en la puerta trasera, se instalará un depósito cilíndrico en el maletero. El depósito debe estar lleno en un 80 por ciento de su capacidad total, para poder mantener el equilibrio entre la fase líquida y gaseosa en su interior.



Gráfico 4.1 Depósito de GLP⁵⁷

- b) **Válvula de llenado exterior:** Es el orificio por donde vamos a cargar GLP para llenar el depósito, se lo puede instalar al lado de la boca de llenado de la gasolina o sino en un lateral posterior del vehículo.



Gráfico 4.2 Válvula de llenado

- c) **Válvula de Corte:** Es una electroválvula que corta el suministro de gas GLP cuando el vehículo se para y cuando se selecciona el sistema de alimentación por gasolina u otro combustible.

⁵⁷Fuente: http://www.iae.org.ar/seminarios/semiglp_informelAE.pdf

d) **Reductor-Vaporizador:** Este elemento se encarga de mantener o estabilizar la presión del gas para el correcto funcionamiento del sistema, ya que el gas pasa de estado líquido a gaseoso. Este cambio de estado se logra por el cambio de presión en el circuito y por la transferencia de calor extraída por el circuito de refrigeración del motor, provocando así un doble beneficio, primero la gasificación del GLP y en segundo lugar el refrigerante llega más frío al motor. En este elemento se realizan los siguientes ajustes:

- Regulación de la alimentación en frío (ralentí).
- Regulación del flujo del carburante en alta.



Gráfico 4.3 Reductor y evaporador⁵⁸

e) **Inyectores:** Inyectan el gas en el colector de admisión para que pueda ingresar directamente a la cámara de combustión.

⁵⁸ Fuente: http://www.iae.org.ar/seminarios/semiglp_informelAE.pdf



Gráfico 4.4 Inyector⁵⁹

- f) **Centralita:** Recibe datos del sensor de presión, temperatura del gas, revoluciones del motor y del tiempo de inyección de gasolina para poder controlar el dosificado de gas necesario para el motor en cualquier régimen.



Gráfico 4.5 Centralita⁶⁰

- g) **Conmutador:** Es un mando de control que lo podemos instalar en el tablero del vehículo, por medio del cual podemos seleccionar el tipo de combustible que deseamos utilizar en circulación, sin necesidad de apagar el motor. Este conmutador también nos indica en todo momento la cantidad de combustible que queda en el depósito de GLP, el tipo de combustible que estamos utilizando y nos alerta si hay alguna avería en el sistema.

⁵⁹ Fuente: http://www.iae.org.ar/seminarios/semiglp_informelAE.pdf

⁶⁰ Fuente: http://www.iae.org.ar/seminarios/semiglp_informelAE.pdf



Gráfico 4.6 Selector de combustible⁶¹

4.2.1.3. Características del GLP en un vehículo

- Hay un mayor consumo de GLP con respecto a la gasolina, pero queda compensado con el costo del combustible ya que el primero es más barato.
- Ligera pérdida de potencia en altas rpm (3-10 CV).
- En bajas revoluciones, el motor tiene un funcionamiento más suave y más energético.
- Los gases de escape sin compuestos de azufre y plomo.
- Reducción del nivel de ruido en un 50 por ciento, dándonos como resultado un funcionamiento de motor más silencioso, suave y sin vibraciones.
- Reducción de emisiones contaminantes regulados (CO, HC, NOx, Partículas, etc.).
- Reducción del nivel de CO2 causante del efecto invernadero en un 15 por ciento.
- Se reduce en un 99 por ciento de emisiones de partículas.
- La combustión con GLP no deja residuos, por lo que va a haber cambios de aceite mas espaciados y la vida útil del motor va a aumentar.

⁶¹ Fuente: http://www.iae.org.ar/seminarios/semiglp_informelAE.pdf

- Mantenimiento más económico ya que hay menor número de averías y periodos de cambio de aceite más largos.

4.2.2. Gas natural vehicular (GNV)

Es una fuente de energía no renovable formado por la mezcla de gases ligeros que se encuentran en los yacimientos petroleros, ya sea disuelto, asociado con el petróleo o en depósitos de carbón.

La composición del gas natural varía según la procedencia del yacimiento, pero por lo general está formado principalmente por metano (en un 80-90%), en menor porcentaje otros gases como el etano, propano y butano; y otros líquidos como pentano, hexano, heptano, entre otros. Este gas puede ser húmedo cuando contiene hidrocarburos líquidos en suspensión, o seco si no los contiene.

El GNC es gas natural asociado cuando está acompañado de petróleo y gas natural no asociado cuando los yacimientos son exclusivos de gas natural.

La licuación del gas natural se consigue a bajas temperaturas ya que es más ligero que el aire. El almacenamiento de este combustible alternativo se lo realiza en forma gaseosa, en cilindros, a una presión elevada de 200 bares; para poder transportarlo en buques metaneros, el gas sufre el proceso de licuefacción maximizando así la masa de gas transportada y en su destino se somete a un proceso de regasificación (cambio de líquido a gas) para poder ser comercializado.

4.2.2.1. Propiedades

- Es incoloro, inodoro, insípido en su estado natural.
- Es más seguro que otras fuentes de energía ya que su temperatura de combustión es elevada y tiene un estrecho intervalo de inflamabilidad.
- Se presenta en forma gaseosa a una temperatura superior de -161 grados centígrados.
- Su densidad relativa (0.60) es menor a la del aire por lo que tiende a elevarse y puede desaparecer fácilmente del lugar donde se encuentra a través de una grieta.
- No es corrosivo ni tóxico.

4.2.2.2. Aplicación en el motor wankel

El gas natural se adapta muy bien a los motores de ciclo Otto ya que tiene muy buena resistencia a la detonación, se mezcla en forma homogénea con el aire y presenta un solo átomo de carbono por su composición química simple, lo que nos da como resultado una combustión más completa libre de hollín y menor emisión de gases contaminantes.

Si por algún motivo se presenta una combustión incompleta, los hidrocarburos hallados en el escape en su mayoría será metano, el cual es inofensivo para la salud pero si aporta al efecto invernadero.

El gas natural puede ser utilizado como combustible en los vehículos con motores wankel ya sea sólo o como un sistema bifuel, es decir, dependiendo las necesidades podemos utilizar gasolina o gnv por medio de un selector.

Para ser utilizado el GNV se debe realizar algunas modificaciones en el automotor tales como:

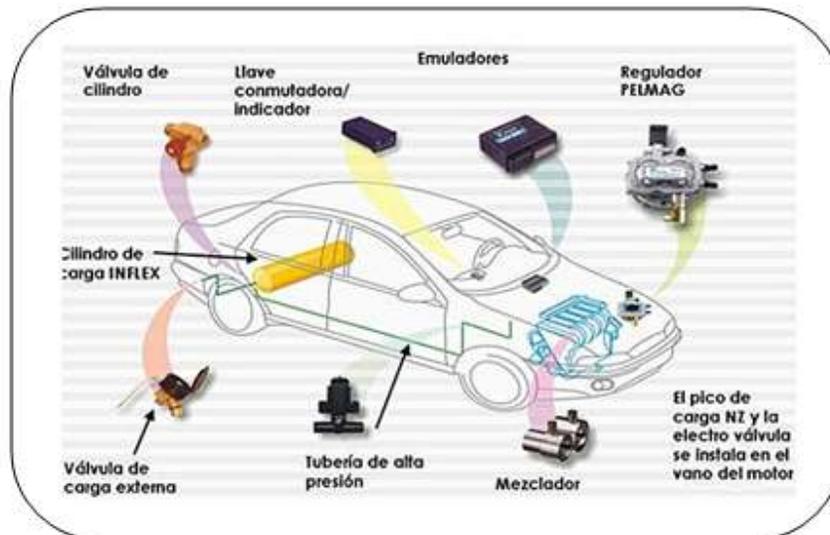


Gráfico 4.7 Modificaciones para utilizar GNV⁶²

- a) **Switch conmutador de combustible:** Se encuentra instalado en el interior del vehículo y permite alternar el uso de gasolina y GNV. Cuando se elige GNV, este conmutador activa todos los dispositivos electromecánicos para mantener una adecuada operación con este combustible.

⁶² Fuente: http://www.soberania.org/Articulos/articulo_4833.htm

- b) **Regulador de Presión:** Éste dispositivo permite bajar la presión en etapas sucesivas incluida la presión de aspirado del motor. Cuando trabajamos con este combustible, el regulador de presión debe estar calefaccionado, es decir se debe adaptar una circulación de agua caliente proveniente del sistema de refrigeración del motor con el objeto de evitar que se congele el gas por efectos de la disminución de presión. El regulador de presión debe ser chequeado una vez al año.
- c) **Unidad de mezcla:** Permite realizar la mezcla entre el aire y el gas natural. Esta unidad se instala antes del múltiple de admisión y su diseño varía de acuerdo al tipo de motor.
- d) **Válvula de carga:** Permite el paso de gas natural para poder ser combustionado en el motor.
- e) **Cilindros de Gas:** Permite almacenar el gas comprimido a una presión de 200 bares (3000 psi). Este cilindro es de acero sin costuras y posee válvulas de seguridad en su parte superior, las cuales previenen fugas. Su inspección debe ser cada 5 años.

El funcionamiento de gas natural en el vehículo es muy sencillo ya que cuando el motor requiere de este combustible, sale de los depósitos y pasa a través de la válvula controlada manualmente hacia el regulador de combustible, se

inyecta a presión atmosférica a través del mezclador, fluyendo así hacia la cámara de combustión como en el ciclo Otto.

4.2.2.3. Características del GNV

- Menor costo de producción, por lo que va a ser más económico que los combustibles tradicionales.
- Al ser un combustible limpio, su combustión en el motor produce menor producción de CO₂, casi un 20% con respecto a la gasolina, ya que contiene menos carbono que cualquier combustible fósil.
- Este tipo de combustible produce en su combustión metano, el cual es precursor de los gases de efecto invernadero, pero como su producción es menor, estará bien compensada con la disminución sustantiva de dióxido de carbono.
- La producción de CO se ve disminuida en un 70%, la de hidrocarburos no metálicos en un 89% y las de óxido de nitrógeno en un 87%.
- El peso y el espacio adicional que debemos proporcionar para los cilindros de almacenamiento se traduce en una reducción de carga del vehículo.
- En los vehículos con baja cilindrada tendremos una reducción del 15% de potencia que se manifiesta en la etapa de arranque.
- No genera dióxidos de azufre, ya que no contienen casi nada de azufre en su composición.

- Los cambios de aceite varían desde los 16.000 a los 32.000km por tener una combustión limpia sin carbonilla.
- La temperatura de encendido (649 C) es el doble con respecto a la de la gasolina
- El índice de octano del gas natural (115-130) es mayor que el de la gasolina (87-97); mientras más alto sea el número mayor capacidad antidetonante tendrá el combustible, haciendo del GNV un combustible seguro que nos permite un mayor avance de encendido sin detonación o cascabeleo provocando así una mejor combustión en el motor sin riesgo de daño.

4.2.3. Biogás

El Biogás conocido como "Gas de los Pantanos" es producido por la fermentación anaeróbica (sin oxígeno) de residuos orgánicos e inorgánicos, mezclados con agua y depositados en un recipiente cerrado e impermeable (Biodigestor) a temperaturas que van entre los 20 y 30 grados centígrados, se descomponen debido a las bacterias anaeróbicas.

Podemos encontrar varios productos orgánicos a través de los cuales se puede obtener biogás, entre ellos tenemos los desechos de los animales domésticos como las vacas, cerdos y aves, residuos vegetales como pastos, hojas secas, paja y basura doméstica.

El biogás es una mezcla de gases, en donde sus principales componentes son el metano y el dióxido de carbono producidos por la fermentación de la materia orgánica en ausencia de aire con la acción de un grupo de microorganismos cuya composición depende del desecho utilizado y las condiciones en el que se procesa.

El lugar en donde se realiza la producción de biogás se llama biodigestor y las fases que intervienen en su producción son las siguientes:

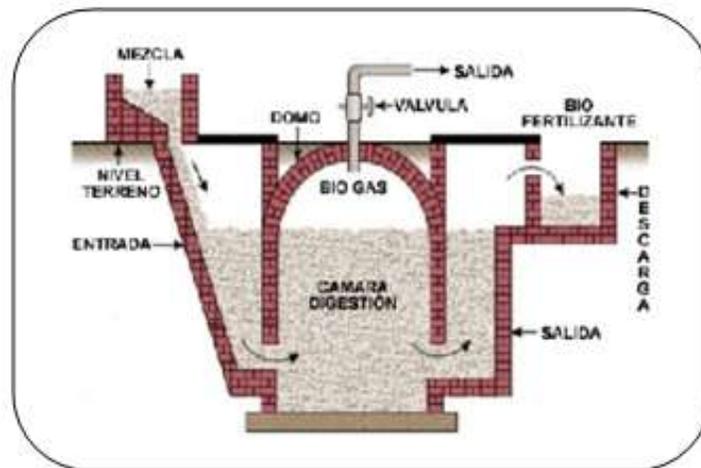


Gráfico 4.8 Biodigestor⁶³

- a. **Fase de hidrólisis:** Las bacterias que intervienen en esta etapa hacen que la materia orgánica virgen con sus largas cadenas de estructuras carbonadas se rompan y se transformen en cadenas más cortas y simples (ácidos orgánicos) liberando así hidrógeno y dióxido de carbono.

Los microorganismos o bacterias que trabajan en esta etapa son llamados anaeróbicos facultativos.

⁶³ Fuente: <http://biodigestores.org/>

- b. **Fase de acidificación:** Las bacterias acetogénicas provocan la degradación de los ácidos orgánicos formando el grupo acético $\text{CH}_3\text{-COOH}$, liberando así hidrógeno y dióxido de carbono.
- c. **Fase metanogénica:** En esta fase intervienen las bacterias pertenecientes al grupo achibacterias las cuales dan como productos finales metano y dióxido de carbono.

Al finalizar estas tres etapas obtenemos gas y un líquido.

El **Gas** está compuesto por un 55-77% de metano, 30-40% de dióxido de carbono, 1-3% de hidrógeno y de 2-5% de otros gases.

El **Líquido** es conocido como biofertilizante (inodoro) que contiene 20% de proteínas, 14% de nitrógeno, 20% de potasio y posee un PH de 7,5.

4.2.3.1. Propiedades

- El poder calorífico del biogás dependerá de la cantidad de metano que contenga.
- Si obtenemos más de un 50% de metano, podremos utilizarlo como combustible ya que va a ser inflamable.
- La concentración de metano va a ser mayor a temperaturas bajas, pero obtendremos menor cantidad de combustible.
- Su densidad es de $1,23 \text{ kg/m}^3$

- Punto de inflamación 700 grados centígrados
- El número de octano es de 162,53.

4.2.3.2. Uso en el motor wankel

El biogás necesita una depuración para poder utilizarlo como combustible para vehículos ya que está compuesto aproximadamente por un 65% de metano, un 35% de dióxido de carbono y otros elementos; el biogás debe elevar su valor energético, por lo tanto se retira el CO₂, dejando un 95% aproximado de biometano, el cual es equivalente técnicamente al gas natural en producción energética.

Por ser un gas equivalente en aproximación con el gas natural, las modificaciones que se realizarían al vehículo para poder impulsarlo con biogás o biometano serán parecidas a las que se utilizarán con gas natural y estas son:

- Cilindros
- Unidad de mezcla
- Conmutador de combustible
- Regulador de presión, entre otros.

4.2.3.3. Características del Biogás Vehicular

- Un tanque lleno de biogás nos da una autonomía de 300 a 400 km/h
- Su poder antidetonante es elevado, por lo que es ideal para motores de encendido provocado.

- Las emisiones de CO₂ disminuyen considerablemente con respecto a los vehículos que trabajan con gasolina.
- Hay una ligera reducción de CO y HC.

4.2.4. Etanol

El etanol es un alcohol que se puede producir de dos formas:

- Por medio del procesamiento de materia biológica, en especial de ciertas plantas que tengan gran contenido de sacarosa (caña de azúcar, remolacha), almidón (maíz, patata, yuca), celulosa (madera, residuos de tipo agrícola); cuando se produce de esta manera se lo llama bioetanol.
- Por modificación química del etileno, por hidratación del mismo.

El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas como la caña de azúcar, remolacha, cereales o biomasa; obteniendo de esta manera alcohol hidratado que contiene aproximadamente un 5% de agua, el cual después de ser deshidratado puede utilizarse como combustible.

La fabricación de bioetanol debe pasar por las siguientes fases:

- **Dilución:** Se adhiere agua para ajustar la cantidad de azúcar en la mezcla o la cantidad de alcohol que hay en el producto.
- **Conversión:** Se convierte el almidón/celulosa en azúcares fermentables, esto lo logramos gracias a la utilización de malta, extractos de enzimas contenidas

en la malta o por el tratamiento del almidón/celulosa con ácido en un proceso denominado hidrólisis ácida.

- **Fermentación:** Es un proceso anaeróbico (en ausencia de aire) realizado básicamente por las levaduras, en donde se obtiene el alcohol y otra variedad de productos.
- **Destilación o deshidratación:** Mediante el calor se separa los distintos componentes líquidos de una mezcla (etanol/agua). Una forma de destilación es la obtención del alcohol a partir de la aplicación de calor a la mezcla fermentada.

Cuando el bioetanol se mezcla con la gasolina, se produce un biocombustible que reduce las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. Se puede mezclar con la gasolina E5, E10; es decir un 5% o un 10% de etanol mezclado con el combustible sin realizar ningún tipo de modificaciones en el motor.

4.2.4.1. Propiedades

- A presión y temperatura ambiente el etanol se presenta en forma líquida
- Es incoloro e inflamable
- Elemento volátil
- Su punto de ebullición es de 78 grados centígrados.

4.2.4.2. Uso en el motor wankel

Como se indico anteriormente en vehículos a gasolina como es el motor wankel, se puede utilizar el etanol en pequeñas cantidades mezclado con el combustible (E5 o E10) sin necesidad de realizar ninguna modificación para su uso, de esta manera se usa al etanol como componente oxigenante de la gasolina y antidetonante.

También se lo puede utilizar como sustituto de la gasolina en porcentajes de etanol mayores como es el E85 (85% de etanol y 15% de gasolina) en donde sí se necesitan realizar modificaciones al vehículo automotor. En este caso el motor debe adoptar niveles de compresión más elevados ya que el octanaje del etanol es más elevado que el de la gasolina; con esto podemos obtener una ganancia de eficiencia del 10%. El mayor octanaje del etanol hace que el motor obtenga más energía útil del calor del combustible.

Los elementos que van a estar en contacto con el etanol deben tener cambios en sus materiales constructivos tales como tratamientos anticorrosivos en las superficies metálicas de las bombas de combustible, filtros y tanques.

4.2.4.3. Características del bioetanol como combustible

- Cuando se utiliza E10 en el motor a gasolina, podremos tener una reducción del 25 al 40% de monóxido de carbono e hidrocarburos.
- Presenta corrosión de partes mecánicas y sellos cuando se utiliza en vehículos no modificados.
- Las emisiones de óxido de nitrógeno se ven incrementadas.

- Se produce bioetanol de fuentes renovables
- Es menos inflamable que la gasolina y tiene baja toxicidad

4.2.5. Metanol

El metanol es un alcohol que se obtiene a partir de la fermentación de la madera, paja de cereales u oleaginosos tomando el nombre de bioalcohol; también se produce a través de un tratamiento que se realiza al gas natural, entre otros.

Este elemento surge como combustible alternativo por las elevadas emisiones producidas por la combustión de naftas que han ido destruyendo la capa de ozono. El poder calorífico de la gasolina es el doble que el metanol haciendo que este sea más rentable.

Para utilizar el metanol de la manera más adecuada debemos tomar en cuenta los siguientes puntos:

1. Es un hidrocarburo que se enciende fácilmente y se quema en el aire.
2. El vapor del metanol tiene un peso molecular mayor que el del aire, es decir es más denso; en caso de una fuga, el vapor de metanol tiende a concentrarse en espacios más bajos.
3. La ingesta de una pequeña cantidad de metanol (30-60 mililitros) puede causar la muerte, no se tiene que comer, beber, respirar o estar parado sobre metanol ya que en ínfimas cantidades causa ceguera irreversible.

4. El metanol es un elemento miscible en el agua, esto quiere decir que una solución del 25% de metanol y el 75% de agua se considera un líquido inflamable.

Las formas de obtención de metanol son las siguientes:

- Por la destilación destructiva de las astillas de madera en ausencia de aire y a 400 grados centígrados de temperatura; de ahí su nombre de alcohol de madera.
- A partir del gas natural se obtiene metanol calentándolo y mezclándolo con vapor de agua, después se lo pasa sobre un catalizador de níquel convirtiendo la mezcla en gas reformado o también conocido como gas de síntesis. Al gas de síntesis lo enfriamos, comprimimos y lo pasamos sobre un catalizador de cobre-zinc produciendo metanol crudo (80% metanol y 20% agua).

El último proceso es destilar al metanol crudo eliminando así el agua, alcoholes superiores y otras impurezas obteniendo como resultado final metanol de grado químico.

4.2.5.1. Propiedades del metanol

- En condiciones normales de presión y temperatura el metanol es líquido incoloro.
- Su viscosidad es escasa
- No posee sabor pero su olor es leve frutal.

- Miscible en el agua y con otros solventes orgánicos.
- Es tóxico e inflamable.
- Tiene gran poder calorífico y arde con llama incolora.

4.2.5.2. Uso en el motor Wankel

Se puede utilizar al metanol como combustible en las siguientes formas:

1. Se lo usa en la producción de MTBE, el cual es un aditivo que mejora la combustión de combustibles sin plomo, se mezcla con la gasolina como fuente de octanaje y como oxigenante para reducir la cantidad de emisiones contaminantes del motor.
2. Se realizan mezclas de metanol y gasolina en rangos de M3, M15, M85, en este último se deben realizar modificaciones en el motor.
3. Por último se utiliza metanol puro como combustible en el motor M100 en donde se deben realizar modificaciones o tener vehículos flexibles para distintos combustibles.

El metanol es muy corrosivo para los motores de gasolina y diesel, es por este motivo que cuando se va a utilizar M85 o M100 se deben realizar modificaciones en el material en el que están contruidos los motores para que no tengas un desgaste prematuro; también se deben realizar modificaciones en las líneas de combustible, bombas, depósito, etc. para que puedan trabajar con este alcohol.

Algunos vehículos que utilizan metanol en grandes proporciones tenían fallas en la parte superior de la muralla del cilindro y en el anillo superior, esto se debe a que el metanol al momento de combustionarse forma ácido perfórmico, el cual es nocivo para el material del motor, una de las soluciones sería un aceite lubricante que proteja al motor de este tipo de ácido.



Gráfico 4.9 Suministro de metanol vehicular⁶⁴

4.2.5.3. Características del metanol como combustible

- Aminora la cantidad de emisiones contaminantes que salen por el sistema de escape.
- Produce menor cantidad de óxidos de nitrógeno ya que tiene una baja temperatura de combustión de la llama casi a la mitad de la gasolina.
- No emite humo negro al operar con mezcla rica.
- Produce bajas emisiones sulfurosas ya que casi no contiene azufre.
- Forma ácidos (perfórmico) durante la combustión que corroen los materiales.
- En partidas en frío se mezcla con el aceite contaminándolo.

⁶⁴ Fuente: <http://www.energiaadebate.com/Articulos/septiembre2007/barruetasep2007.htm>

4.2.6. Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento más abundante de la tierra, sin embargo no lo encontramos en estado puro con facilidad ya que reacciona muy fácilmente con otros elementos. No es un recurso natural como el petróleo o el carbón y no se puede explotar de la misma manera, por lo tanto se debe generar a partir de otros componentes químicos, debido a esto es considerado un portador secundario de energía y se lo denomina como vector energético.

Reformado de hidrocarburos es el proceso de extraer hidrógeno a partir de combustibles fósiles, este en la actualidad es el proceso principal y menos costoso que se utiliza para producir hidrógeno. El inconveniente de este medio de producción de hidrógeno es la emisión de sustancias contaminantes y el consumo de combustibles no renovables.

Electrólisis del agua es la extracción de hidrógeno a partir del agua, este proceso es renovable y no emite sustancias contaminantes al medio ambiente, pero si requiere de grandes cantidades de energía eléctrica.

Otras técnicas o procesos alternativos de obtener hidrógeno son:

- Descomposición termoquímica del agua
- Producción a partir de la biomasa
- Procedimientos biológicos
- Procedimientos industriales
- Foto conversiones

Estos últimos métodos mencionados son una gran opción para el futuro, pero en la actualidad siguen siendo experimentales y producen cantidades mínimas de hidrógeno.

4.2.6.1. Propiedades del hidrógeno

- El hidrógeno puro es inodoro, incoloro e insípido; si se produjera un escape de hidrógeno, éste sería casi invisible en la luz de día.
- No es tóxico, pero podría resultar asfixiante ya que desplaza al oxígeno que se encuentra en el aire.
- Su densidad es muy baja tanto en estado líquido como gaseoso.
- La relación de expansión del hidrógeno es de 1:848, es decir que en estado gaseoso en condiciones atmosféricas, el hidrógeno ocupa 848 veces más que cuando está en estado líquido.

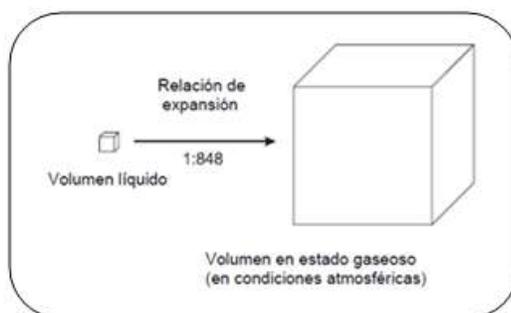


Gráfico 4.10 Relación de expansión del hidrógeno⁶⁵

⁶⁵Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2006/GCBA/1233/html/media/hidrogenocombustible.pdf>

- La llama del hidrógeno se presenta en color azul claro y resultan casi invisibles a la luz del día por ausencia de hollín, pero en la oscuridad o con luz artificial son muy perceptibles.
- El número de octano es de 130, es decir que tiene características antidetonantes elevadas.
- La exposición constante al hidrógeno produce un fenómeno llamado fragilización por hidrógeno, esto le ocurre a algunos materiales y es definido como la pérdida de resistencia y ductilidad que da paso a la iniciación de fracturas mecánicas.

Tabla 4-1 Materiales resistentes a la exposición de hidrógeno⁶⁶

| Aleaciones resistentes | Aleaciones no resistentes |
|------------------------------|--|
| Acero inoxidable (austenita) | Aleaciones de hierro (ferrita, martensita) |
| Aleaciones de cobre | Titanio y aleaciones de titanio |
| Aleaciones de aluminio | Algunas aleaciones de níquel |

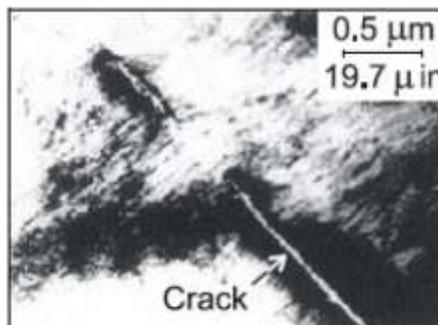


Gráfico 4.11 Fenómeno de fragilización por hidrógeno⁶⁷

⁶⁶ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

4.2.6.2. Electrólisis del Agua

En este proceso se utiliza la electricidad para descomponer el agua en sus componentes elementales que son el hidrógeno y el oxígeno. Se prefiere este método ya que se consigue hidrógeno sin tener que recurrir a los combustibles fósiles y obtenemos un producto final de alta pureza que es factible tanto para pequeñas y grandes escalas.

Para realizar la electrólisis del agua utilizamos una cuba electrolítica, la cual está formada por una serie de células en donde cada una posee un electrodo positivo y otro negativo; estos van sumergidos en el electrolito (agua eléctricamente conductora en la cual se agrega iones de H_2 en la forma de hidróxido alcalino de potasio KOH) para facilitar la salida o migración de los iones.

El **ánodo** es el electrodo positivo que generalmente está formado de níquel y cobre y se encuentra recubierto con óxidos de metales como el tungsteno, rutenio y manganeso.

El **cátodo** es el electrodo negativo que generalmente está formado de níquel revestido con mínimas cantidades de platino como catalizador, en ausencia de este catalizador el hidrógeno activo se acumulará en el electrodo bloqueando así su flujo.

El **diafragma** o separador de gas evita que el hidrógeno se mezcle con el oxígeno y permite el paso libre de iones. Este elemento se fabrica generalmente

⁶⁷ Fuente: <http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp?languageid=9&GasID=36&CountryID=19>

de asbesto y tiende a romperse cuando es sometido a una temperatura a partir de 80 grados centígrados.

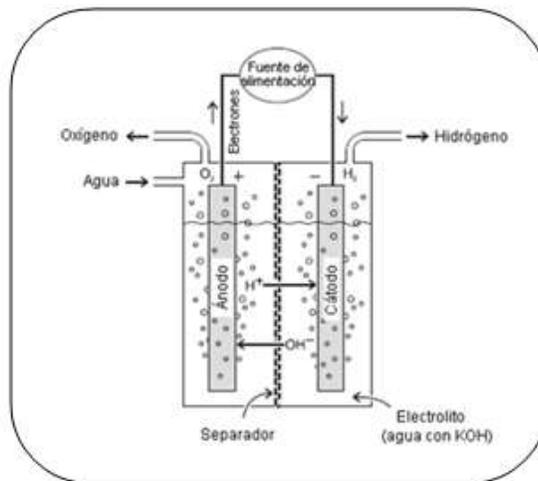


Gráfico 4.12 Proceso de Electrólisis⁶⁸

La cantidad de energía eléctrica que se necesita para la electrólisis se puede compensar en algo agregando energía térmica a la reacción. Es recomendable que la cuba electrolítica funcione a bajas tensiones con calor agregado ya que la energía térmica es más barata que la electricidad; la eficiencia de la electrólisis aumenta a medida que se aumenta la temperatura de funcionamiento.

El coste de quemar los combustibles fósiles para la generación de electricidad para la electrólisis es de tres a cinco veces mayor que el proceso de reformado de hidrocarburos para obtener oxígeno, es por este motivo que todo el proceso debe ser realizado con fuentes de energía renovables no contaminantes (hidroeléctrica, fotovoltaica, solar térmica y eólica) para que sea verdaderamente limpio el combustible alternativo adquirido.

⁶⁸ Fuente: <http://www.energiamadre.com/energias-renovables-hidrogeno.php>

4.2.6.3. Reformado de Hidrocarburos

El reformado es un proceso químico en donde reacciona el hidrógeno contenido en varios combustibles con la presencia de vapor y/o oxígeno en una corriente de gas rica en hidrógeno, la mezcla resultante que es gas rico en hidrógeno toma el nombre de reformado.

La composición exacta del gas reformado depende del combustible base y del proceso utilizado, pero siempre contiene compuestos como nitrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono y una pequeña cantidad de combustible que no se reformó; cuando se extrae el hidrógeno del gas reformado, la mezcla de gas se llama refinado.

El equipo que se encarga del reformado del combustible se llama procesador del reformado o del combustible y existen tres tipos de procesadores que los mencionamos a continuación:

- **Reformadores de Vapor:** Requiere temperaturas entre 450 y 925 grados centígrados y presiones entre 20 y 35 bar, es una de las técnicas más aplicadas en la producción de hidrógeno ya que son económicas y eficientes. El principio de funcionamiento de este tipo de reformadores se basa que el hidrógeno contenido en el combustible se descompone gracias al vapor excedente que existe en los catalizadores níquelosos produciendo así una mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono.

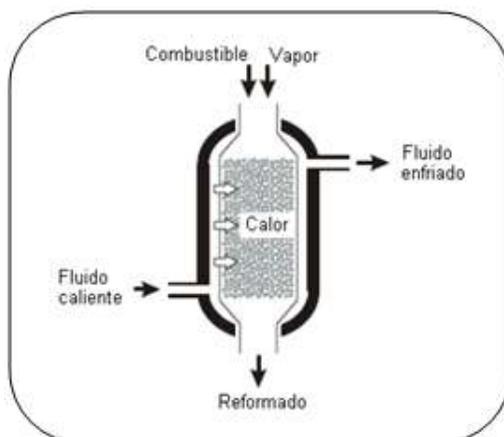


Gráfico 4.13 Reformador de vapor⁶⁹

- **Reformadores de oxidación parcial POX:** Se utilizan para reformar hidrocarburos más pesados como el diesel, gasolina o aceite pesado a temperaturas y presiones elevadas de 1150 - 1315 grados centígrados y 60 bar. Estos reformadores hacen reaccionar una mezcla pobre de oxígeno (aire) con el combustible para producir hidrógeno y monóxido de carbono.

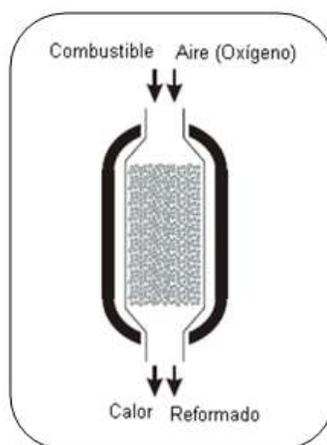


Gráfico 4.14 Reformador de oxidación parcial⁷⁰

⁶⁹ Fuente: <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno/produccion>

⁷⁰ Fuente: <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno/produccion>

- **Reformadores auto térmicos:** Combina en una sola unidad la eficiencia de los reformadores de vapor con la capacidad de carga de los reformadores de oxidación, aquí se alimentan en forma conjunta el combustible, el vapor y oxígeno en el catalizador que realiza los dos tipos de reacciones, de vapor y de oxidación. En este tipo de reformadores se elimina la necesidad de una fuente de calor externa ya que el calor generado en el proceso de oxidación parcial proporciona el calor necesario para el reformado por vapor.

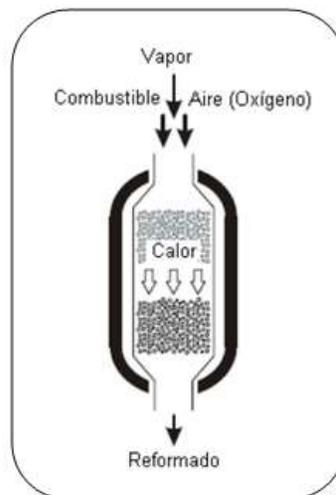


Gráfico 4.15 Reformador Auto Térmico⁷¹

Los combustibles que podemos reformar para obtener hidrógeno son:

- **Metano:** Es el combustible base más económico para el reformado, debe ser purificado antes de iniciar el proceso de reformado ya que los niveles bajos de compuestos sulfurosos deben ser eliminados.

⁷¹ Fuente: <http://www.textoscientificos.com/quimica/hidrogeno/produccion>

- **Metanol:** Puede ser reformado a temperaturas bajas de 200 y 300 grados centígrados.
- **Diesel y Gasolina:** Disponen de un cociente de hidrógeno menor a otros combustibles base por lo que se va a obtener poca producción de H₂.
- **Carbón:** Para su reformado se utiliza un proceso muy costoso, a demás tiene altos niveles de impurezas y habrá poca producción de hidrógeno.

4.2.6.4. Aplicación en el motor Wankel

El hidrógeno como combustible ha dado buenos resultados en el motor wankel ya que su configuración minimiza las dificultades de combustión porque se eliminan los movimientos alternativos de otro tipo de motores; al tener el hidrógeno ciertas características tales como mejor energía de ignición, mayor rango de inflamabilidad y menor distancia de apagado, lo hace muy susceptible a generar una ignición prematura o pre encendido que en el caso de este tipo de motores no ocurre ya que se divide en dos partes bien diferenciadas por sus temperaturas dando un lugar específico para cada tiempo de funcionamiento logrando que al momento de la admisión haya una temperatura baja que evite este problema.

En lo que se refiere a la lubricación presenta algunos inconvenientes este tipo de motor ya que el aceite que lubrica los sellos se encuentra en contacto con la mezcla aire-hidrógeno que al momento de combustionarse no sólo se quemara hidrógeno sino también aceite provocando de esta manera el consumo de aceite y la generación de emisiones de dióxidos de carbono y óxidos de nitrógeno, entre otras;

por este motivo al motor wankel que funciona con hidrógeno no se lo cataloga como un ZEV (zero emisión vehicle).

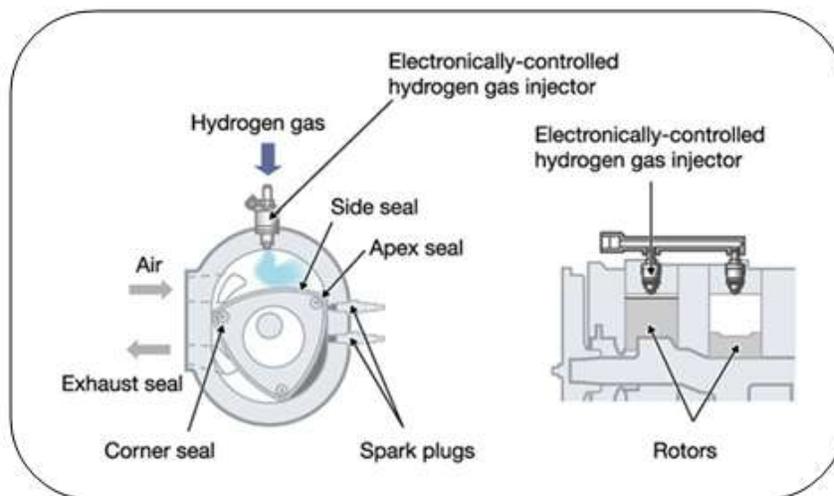


Gráfico 4.16 Inyector de hidrógeno gasificado⁷²

En lo que se refiere a la inyección hay dos formas de inyectar el combustible, la primera es a temperatura ambiente (gas) o la segunda es criogenizando el combustible (líquido); en esta última veremos un aumento de potencia y rendimiento del motor ya que se potencia el llenado del cilindro por la temperatura extremadamente baja. Se han visto un desgaste excesivo en las partes móviles del sistema de inyección provocado por el H₂ al ser un gas muy seco, en cambio la gasolina sirve también como lubricante para dichos elementos.

Mazda lleva investigando más de 15 años la aplicación de hidrógeno como combustible en su motor rotativo y el primero que lanzó al mercado es el vehículo Rénesis RX8 Hydrogen el cual funciona con **210 CV** de potencia y 222 Nm de par, siendo capaz de recorrer 550 kilómetros gracias a su depósito de gasolina de 61

⁷² Fuente: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/hre/rx-8/index.html>

litros. En el modo de **hidrógeno**, la potencia máxima es de **109 CV** y el par de 140 Nm, por lo que se puede circular con bastante agilidad. El tanque de hidrógeno de 110 litros nos da una autonomía de 100 kilómetros. Por tanto, en total este deportivo **puede recorrer 650 kilómetros** llevando los dos tanques llenos.

A continuación describiremos alguna de las características de este vehículo.

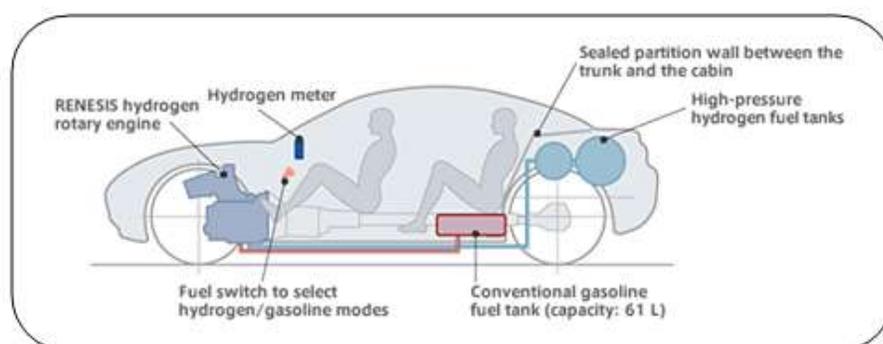


Gráfico 4.17 Sistema de hidrógeno combustible⁷³

- a) **Cambio de combustible:** Cuando se ha terminado el combustible hidrógeno en el vehículo, éste cambia a modalidad gasolina automáticamente; aunque esté el vehículo en movimiento, el conductor presionando manualmente el botón en forma de rotor puede cambiar de hidrógeno a gasolina sin ninguna complicación en el funcionamiento. Para realizar el cambio de gasolina a hidrógeno es necesario que el vehículo se detenga. El botón que realiza el cambio de modalidad de combustibles se encuentra ubicado en la parte izquierda del conductor bajo el tablero y se ilumina de color azul cuando funciona con combustible H₂.

⁷³ Fuente: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/hre/rx-8/index.html>



Gráfico 4.18 Botón cambio de combustible⁷⁴

- b) **Indicadores de combustible:** En el tablero de instrumentos se encuentran los dos indicadores de combustible, tanto para hidrógeno como para gasolina y el que se está consumiendo, permanece iluminado para indicar su utilización. También suena un timbre antes y después de cada cambio de modalidad de combustible para que el conductor esté alerta.



Gráfico 4.19 Indicadores del tablero⁷⁵

- c) **Depósitos de combustible:** El depósito de gasolina se encuentra ubicado bajo el asiento posterior del vehículo y los dos depósitos de hidrógeno están en el maletero; sin embargo el vehículo posee un cómodo espacio interior. Los

⁷⁴ Fuente: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/hre/rx-8/index.html>

⁷⁵ Fuente: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/hre/rx-8/index.html>

surtidores o tomas de combustible se encuentran una a cada lado de la carrocería posterior del vehículo.



Gráfico 4.20 Válvula para llenado de hidrógeno⁷⁶

4.2.6.5. Características del hidrógeno como combustible

- El hidrógeno nos ayuda a solucionar los problemas de polución que los combustibles tradicionales provenientes del petróleo causaban ya que nos proporciona casi cero porcentajes de emisiones contaminantes.
- Debido a las propiedades del hidrógeno, es muy propenso a provocar autoencendido en el motor Otto convencional ya que puede encontrar zonas de alta temperatura en la cámara de combustión mientras la válvula de admisión se encuentre abierta.

⁷⁶ Fuente: <http://www.mazda.com/mazdaspirit/rotary/hre/rx-8/index.html>

CAPÍTULO 5 .- BANCO DE PRÁCTICAS DEL MOTOR WANKEL

Para la elaboración del banco de prácticas del motor wankel hemos utilizado tubos cuadrados y planchas laminadas al frío de hierro, el proceso se detalla en el flujo expuesto a continuación.

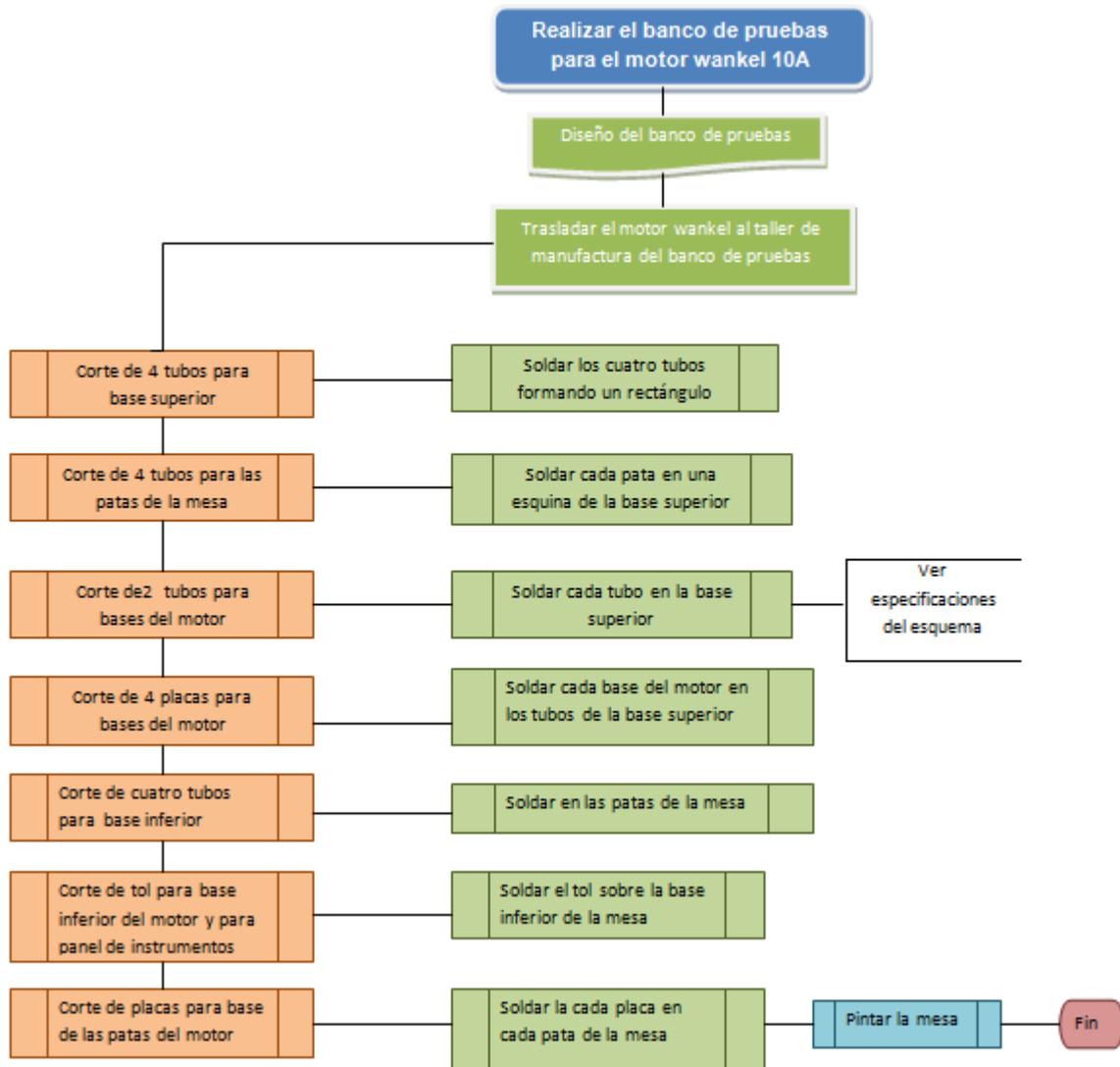


Gráfico 5.1 Flujo de procesos del banco de pruebas⁷⁷

⁷⁷ Autor: Evelin Tasigchana

5.1. CONEXIONES DE ENCENDIDO

Para el funcionamiento del motor se le ha dotado de un sistema de encendido compuesto por:

- Motor de Arranque
- Alternador
- Bobina leading
- Bobina trailing
- Distribuidor leading
- Distribuidor trailing
- Bujías Bosch Bur7EQ y BUR9EQ
- Batería de 12 voltios

También se ha implementado un panel de control en el cual verificaremos los parámetros de funcionamiento del motor como lo podemos observar a continuación:

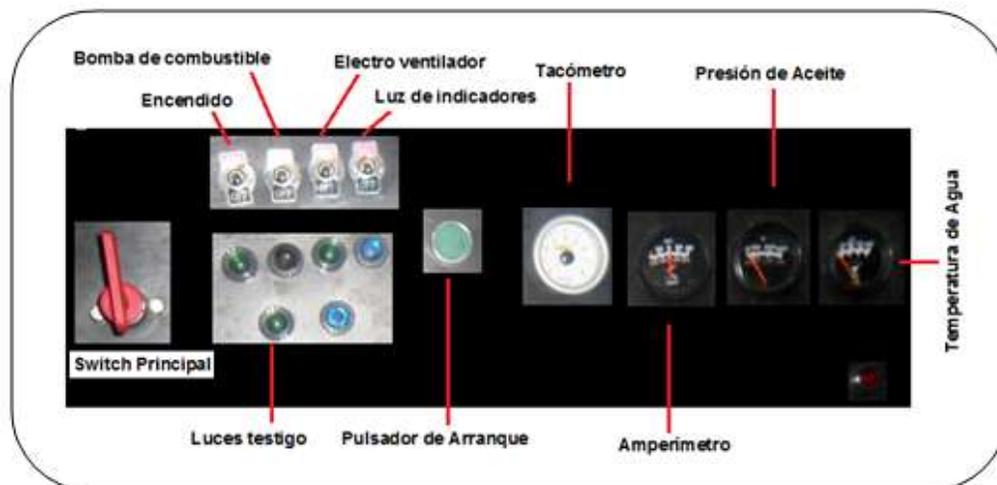


Gráfico 5.2 Panel de control Banco de Pruebas

Para mayor entendimiento del sistema eléctrico implementado en el banco de pruebas del motor wankel 10A he realizado un esquema eléctrico en un simulador electrónico, el cual nos va a servir para aprender de manera más esquemática y funcional la manera de operar el sistema.

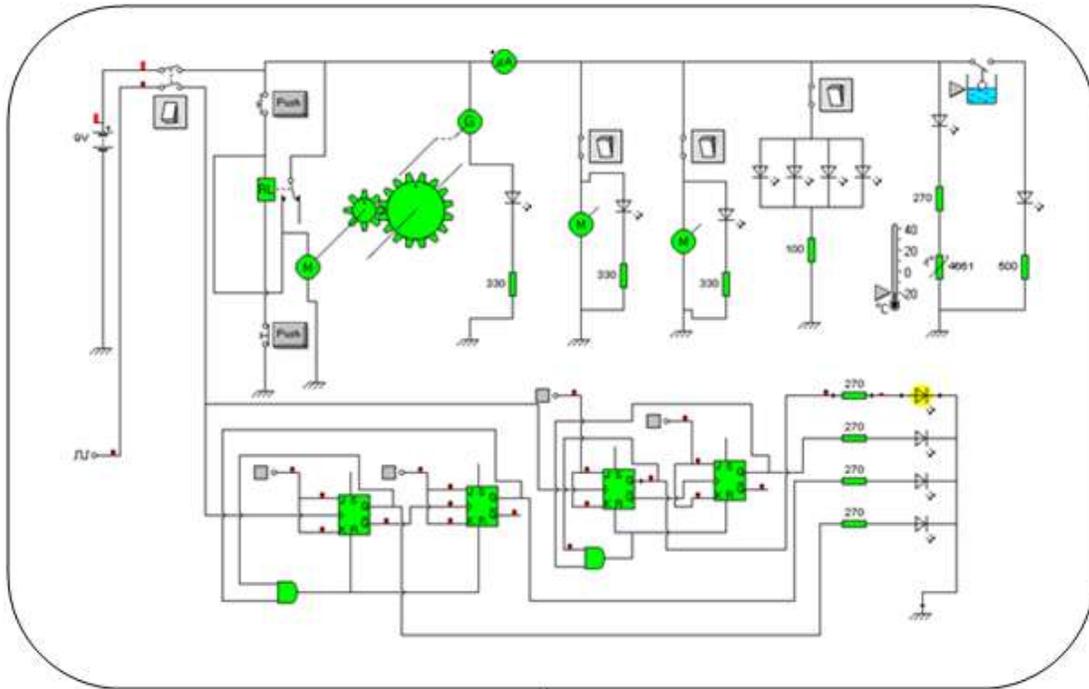


Gráfico 5.3 Esquema eléctrico del banco de pruebas⁷⁸

5.2. CALIBRACIÓN

5.2.1. Inspección y Toma de medidas

5.2.1.1. Tapa frontal, intermedia y posterior

1. Verificar si las superficies de las tapas no estén recalentadas o dañadas.

⁷⁸ Fuente: Programa Crocodile clips 3.2

2. Tomar las medidas de planitud como se indica a continuación y con esto comprobaremos si es apta o no para el correcto funcionamiento del motor.

Medida límite: 0.04 mm (0.0016 in)⁷⁹

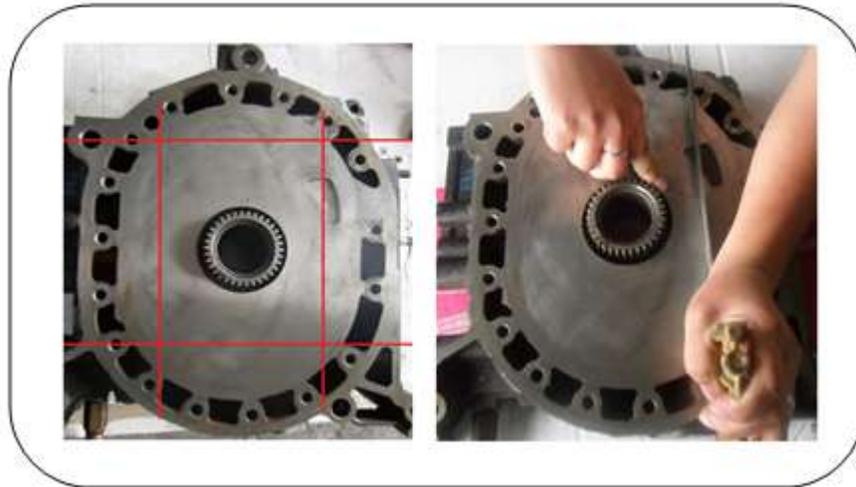


Gráfico 5.4 Medida de planitud

Las medidas máximas tomadas en cada tapa son:

Tabla 5-1 Medidas de planitud tomadas en los estatores laterales⁸⁰

| Tapa Frontal | Tapa Intermedia | Tapa Posterior |
|---------------------|------------------------|-----------------------|
| 0.035mm | 0.028mm | 0.038mm |

5.2.1.2. Piñón estacionario de la tapa frontal

1. Chequear que el piñón no se encuentre desgastado, recalentado o dañado.
2. Verificar su luz tomando la medida del diámetro interior del piñón y el diámetro exterior del eje excéntrico donde se asienta el piñón.

⁷⁹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁸⁰ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

Medida estándar: 0,004 – 0.007 mm (0.0016 – 0.0028 in)⁸¹

Medida límite: 0.10 mm (0.0039 in)⁸²



Gráfico 5.5 Toma de medida de diámetros

Tabla 5-2 Medidas de diámetros⁸³

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------------------------|----------------|----------------|
| Diámetro interno piñón | 43mm | 43mm |
| Diámetro externo del eje | 42,92 | 42,96 |

5.2.1.3. Estator periférico

1. Comprobar que la superficie cromada del estator no tenga daños como oxidación, descamación ya que en caso contrario se lo debe reemplazar
2. Verificar con un micrómetro el ancho del estator periférico en cuatro puntos específicos detallados a continuación.

⁸¹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁸² Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁸³ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana



Gráfico 5.6 Puntos para la toma de medida del estator

3. Si la diferencia entre el valor del punto A y el valor mínimo de los puntos B; C y D son superiores a 0.06 mm (0,0024 in), el estator debe ser reemplazado.

Tabla 5-3 Medida del ancho del estator en puntos específicos⁸⁴

| | Estator 1 | Estator 2 |
|----------|------------------|------------------|
| A | 59.99 | 59.99 |
| B | 60.01 | 60.00 |
| C | 59.99 | 60.00 |
| D | 60.01 | 60.01 |

⁸⁴ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

5.2.1.4. Rotor

1. Inspeccionar cuidadosamente que el rotor no se encuentre recalentado o demasiado dañado ya que lo tendríamos que reemplazar.
2. Comprobar que el engranaje interno del rotor no tenga grietas, no esté sobrecalentado, desgastado o que sus dientes se encuentren devastados.
3. Verificar la luz o juego entre el estator periférico y el rotor mediante la toma de media del ancho del estator en el punto A y el ancho del rotor, el cual se lo mide en tres puntos especificados a continuación:

Medida estándar: 0.12 - 0.18 mm (0.0047 – 0.0071 in)⁸⁵

Medida límite: menor que 0.10 mm (0.004 in)⁸⁶



Gráfico 5.7 Puntos para la toma de medida del rotor

⁸⁵ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁸⁶ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

Tabla 5-4 Medida del ancho del rotor en puntos específicos⁸⁷

| Rotor 1 | Rotor 2 |
|----------------|----------------|
| 59.83 | 59.85 |
| 59.84 | 59.88 |
| 59.84 | 59.85 |

4. Si la luz es mayor que lo especificado se debe reemplazar el rotor y si es inferior significa que el engranaje interno se encuentra un poco salido por lo que se debe golpearlo ligeramente con un martillo de goma y chequear de nuevo las medidas.

5.2.1.5. Rodamiento del Rotor

1. Inspeccionar que el rodamiento no tenga daños excesivos como oxidación, grietas entre otras, caso contrario lo debemos reemplazar.
2. Comprobar el juego entre el diámetro interno del rodamiento y el diámetro externo del eje motriz en donde se ubica o asienta el rodamiento del rotor

Medida estándar: 0.04 – 0.08 mm (0.0016 – 0.0031 in)⁸⁸

Medida límite: 0.10 mm (0.0039 in)⁸⁹

⁸⁷ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

⁸⁸ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁸⁹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.8 Toma de medida de diámetro interno y externo

Tabla 5-5 Medida de diámetros⁹⁰

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|------------------------------------|----------------|----------------|
| Diámetro interno rodamiento | 74mm | 74mm |
| Diámetro externo excéntrica | 73.91mm | 73.90mm |

5.2.1.6. Sello de aceite y muelle del rotor

1. Inspeccionar que el sello de aceite no se encuentre desgastado o tenga algún tipo de daño.
2. Verificar el libre movimiento del sello de aceite en el alojamiento del rotor presionándolo con el dedo.
3. Comprobar el pronunciado del sello de aceite y reemplazarlo si es menor que el límite.

Pronunciado: 0.5 mm (0.020 in)⁹¹

⁹⁰ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

⁹¹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.9 Toma de medida del pronunciado del sello de aceite

Tabla 5-6 Medidas de pronunciado del sello⁹²

| | ROTOR 1 | ROTOR 2 |
|-----------------------------|----------------|----------------|
| Sello Interno lado A | 0.51mm | 0.5mm |
| Sello interno Lado B | 0.51mm | 0.51mm |
| Sello externo lado A | 0.5mm | 0.51mm |
| Sello externo lado B | 0.53mm | 0.52mm |

5.2.1.7. Segmento periférico

1. Inspeccionar que los segmentos no tengas rupturas, excesivo desgaste u otro tipo de daños ya que tendríamos que reemplazarlos.
2. Medir la altura de los segmentos con un micrómetro y reemplazarlos si son menores que el límite.

Medida standard: 8.5 mm (0.335 in)⁹³

Límite: 7.0 mm (0.276 in)⁹⁴

⁹² Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

⁹³ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.10 Toma de medida de la altura del segmento periférico

Tabla 5-7 Medida de la altura de los segmentos periféricos⁹⁵

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Ápex A | 8.15mm | 8.14mm |
| Ápex B | 8.13mm | 8.15mm |
| Ápex C | 8.13mm | 8.10mm |

3. Verificar el juego que existe entre el segmento periférico y su alojamiento colocándolo en su lugar, las galgas deben ser insertadas hasta que su punta llegue al fondo de la ranura. Si el valor excede el límite se debe reemplazar el ápex o segmento periférico.

Standard: 0.05 – 0.09 mm (0.002 – 0.0035 in)⁹⁶

Límite: 0.15 mm (0.006 in)⁹⁷

⁹⁴ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁹⁵ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

⁹⁶ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

⁹⁷ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.11 Juego del segmento periférico y su alojamiento

Tabla 5-8 Medidas de la luz entre el ápex y su alojamiento⁹⁸

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Apex 1 | 0.15mm | 0.14mm |
| Apex 2 | 0.10mm | 0.10mm |
| Apex 3 | 0.12mm | 0.13mm |

4. Cuando el ápex es reemplazado por un nuevo se debe chequear el juego entre el segmento y la medida A del estator periférico con la utilización de un micrómetro.



Gráfico 5.12 Toma de medida del ápex para su reposición

Medida: 0.13 – 0.17 mm (0.0051 – 0.0067 in)⁹⁹

⁹⁸ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

⁹⁹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

- Comprobar que el resorte del segmento periférico no tenga desgaste excesivo y que su altura libre sea menor que el límite o de lo contrario se lo debe reemplazar.

Límite de la altura libre: 5.5 mm (0.22 in)¹⁰⁰

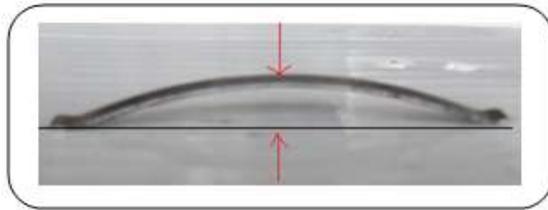


Gráfico 5.13 Altura libre del muelle

Tabla 5-9 Toma de medida de la altura libre¹⁰¹

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|-----------------|----------------|----------------|
| Spring 1 | 5.3mm | 5mm |
| Spring 2 | 5mm | 5,2mm |
| Spring 3 | 5,1mm | 5.1mm |

5.2.1.8. Segmento Lateral

- Comprobar el libre movimiento del sello lateral en su alojamiento presionándolo con el dedo.
- Verificar el pronunciado del segmento y si es menor que el límite hay que reemplazarlo.

Pronunciado: 0.5 mm (0.02 in)¹⁰²

¹⁰⁰ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

¹⁰¹ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana



Gráfico 5.14 Toma de medida del pronunciado del segmento lateral

Tabla 5-10 Medidas del pronunciado del segmento lateral¹⁰³

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Lado A | 0.52mm | 0.53mm |
| | 0.51mm | 0.52mm |
| | 0.52mm | 0.53mm |
| Lado B | 0.5mm | 0.51mm |
| | 0.54mm | 0.54mm |
| | 0.54mm | 0.54mm |

3. Inspeccionar el juego entre el segmento lateral y su alojamiento con una galga. Si el juego excede el límite tenemos que reemplazar el segmento.

Juego standard: 0.03 – 0.07 mm (0.0012 – 0.0028in)¹⁰⁴

Límite: 0.10 mm (0.0039 in)¹⁰⁵

¹⁰² Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

¹⁰³ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

¹⁰⁴ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.15 Juego entre el segmento lateral y su alojamiento

Tabla 5-11 Medidas de la luz entre el segmento lateral y su alojamiento

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Lado A | 0.10mm | 0.09mm |
| | 0.089mm | 0.08mm |
| | 0.092mm | 0.09mm |
| Lado B | 0.10mm | 0.09mm |
| | 0.098mm | 0.088mm |
| | 0.092mm | 0.097mm |

4. Instalar el segmento lateral y el lóbulo y comprobar el espacio libre entre estos con una galga.

Límite: 0.4 mm (0.016 in)¹⁰⁶

¹⁰⁵ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

¹⁰⁶ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979



Gráfico 5.16 Espacio entre el segmento lateral y el taco

Tabla 5-12 Medida de la luz entre el segmento lateral y el lóbulo¹⁰⁷

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Lado A | 0.38mm | 0.40mm |
| | 0.38mm | 0.38mm |
| | 0.36mm | 0.36mm |
| Lado B | 0.38mm | 0.38mm |
| | 0.36mm | 0.40mm |
| | 0.40mm | 0.38mm |

5. Cuando se sustituye el segmento lateral por uno nuevo se debe ajustar el juego con el lóbulo limando el filo del sello o alrededor del taco con una lima fina.

Juego: 0.05 – 0.15 mm (0.002-0.006 in)¹⁰⁸

¹⁰⁷ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

¹⁰⁸ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

5.2.1.9. Lóbulos o Tacos

1. Compruebe que el sello o taco no tenga desgaste excesivo, grietas o cualquier tipo de daño, si hay alguna de estas condiciones reemplazarlo.
2. Inspeccionar el libre movimiento del taco en la ranura del rotor pulsándolo con el dedo.
3. Verificar que el pronunciado del taco de la superficie del rotor, reemplazar el muelle si su pronunciado es menor que el límite.



Gráfico 5.17 Toma de medida del pronunciado del taco

Límite: 0.5mm (0.02in)¹⁰⁹

Tabla 5-13 Medidas del pronunciado del taco¹¹⁰

| | Rotor 1 | Rotor 2 |
|---------------|----------------|----------------|
| Lado A | 0.52mm | 0.53mm |
| | 0.51mm | 0.52mm |
| | 0.52mm | 0.53mm |
| Lado B | 0.5mm | 0.51mm |

¹⁰⁹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

¹¹⁰ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

| | | |
|--|--------|--------|
| | 0.54mm | 0.54mm |
| | 0.54mm | 0.54mm |

4. Chequear que el muelle no se encuentre desgastado.

5.2.1.10. Eje Excéntrico

1. Chequear que el eje no posea grietas, sobrecalentamiento, desgaste y asegurarse que los conductos de aceite estén abiertos.
2. Para comprobar el desgaste del eje, colocarlo en dos bloques con forma de V y posicionar un reloj palpador, girar lentamente el eje y anotar las lecturas del indicador y si es mayor que el límite hay que reemplazarlo por uno nuevo.
3. Asegurarse que el tapón ciego del extremo del eje no tenga fugas de aceite y no esté flojo. Si existen fugas remover el tapón con una llave hexagonal Allen y reemplazar el o ring.
4. Comprobar que los jets de aceite estén funcionando correctamente, verificar la debilidad del resorte y si no existe algún daño en la bola de acero; estos chorros o jets de aceite se han instalado en el eje excéntrico y se abren cuando el número de revoluciones del motor aumenta.

Límite: 0.06mm (0.0024in)¹¹¹

¹¹¹ Fuente: Manual de reparación Mazda RX7 1979

5.2.1.11. Bomba de Aceite

1. Verificar que la cadena de aceite no presente enlaces rotos.
2. Comprobar que el piñón del eje excéntrico y el piñón de la bomba no tengan grietas, dientes desgastados o algún tipo de daño, si esto ocurre reemplazar con piezas nuevas.



Gráfico 5.18 Bomba de aceite en buen estado

5.2.2. CÁLCULO DE RELACIÓN DE COMPRESIÓN

5.2.2.1. Cálculo del mayor volumen obtenido en el motor wankel

1. Poner el piñón en la tapa frontal del rotor y ajustar.
2. Tapar el orificio de admisión, en este caso utilizamos un tipo de suelda fría llamada epoxi la cual consiste en la mezcla de dos cremas una blanca y otra negra que después de un tiempo de untarla en el orificio se endurece y después pulimos.



Gráfico 5.19 Sellado del estator lateral

3. Untar grasa en el housing específicamente en el alojamiento interno donde se colocan los sellos de goma y en los extremos del rotor que van pegados a la tapa frontal, después de haber colocado sus segmentos periféricos y lóbulos.



Gráfico 5.20 Exceso de grasa en el estator periférico y una cara del rotor

4. Colocar el housing o estator periférico y asegurarlo con dos postes o bocines
5. Poner el rotor y moverlo hasta que se ubique en el mayor volumen que posee.



Gráfico 5.21 Colocación del rotor en su volumen máximo

6. Se debe comprobar el correcto posicionamiento del rotor con una regla verificando que los dos ápex se encuentran en el mismo nivel.



Gráfico 5.22 Comprobación de la posición correcta del rotor

7. En una placa de acrílico transparente realizamos un orificio y la colocamos sobre la cámara de volumen máximo que vamos a medir, previo a esto ponemos grasa en el estator y en el rotor para que la placa se pegue por completo.



Gráfico 5.23 Placa de acrílico para la toma de medida exacta del volumen

8. Poner el líquido para sacar el volumen máximo por medio de una pipeta graduada hasta que tope la totalidad de la superficie del acrílico y sacar la medida.

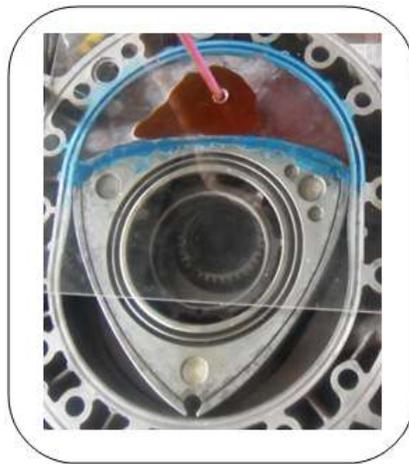


Gráfico 5.24 Tomando la medida del volumen máximo con pipetas calibradas

Medida tomada: 569,97cc

5.2.2.2. Cálculo del mínimo volumen obtenido en el motor wankel

1. Alistar el rotor colocando sus segmentos periféricos, lóbulos o tacos y sus ápex, después untar grasa en cada segmento y lóbulo.
2. Poner el rotor y moverlo hasta que se ubique en el menor volumen que posee.

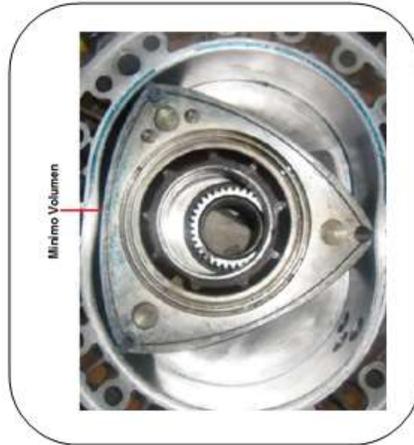


Gráfico 5.25 Posición de volumen mínimo

3. En una placa transparente plástica realizar un pequeño orificio para poder introducir el líquido.
4. Poner bastante aceite en el lado del rotor y estator que va a ser medido y presionar la placa hasta que quede pegada para descartar fugas de líquido.
5. Colocar el líquido con la pipeta de medición hasta que tope con toda la superficie de la placa plástica y tomar la medida.



Gráfico 5.26 Toma de medida exacta del volumen

Medida tomada: 60,33cc

Para el cálculo de la relación de compresión utilizamos la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{V_u}{V_c}, \text{ en donde;}$$

V_u= Volumen unitario

V_c= Volumen de la cámara de combustión

$$R_c = \frac{569,97 \text{ cc}}{60,33 \text{ cc}}$$

$$R_c = 9,447 : 1$$

Para el cálculo de la cilindrada utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_H = (V_u - V_c) \times 2$$

$$V_H = (569,97 \text{ cc} - 60,33 \text{ cc}) \times 2$$

$$V_H = 1019,28 \text{ cc}$$

Para el cálculo del rendimiento utilizamos la siguiente fórmula:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{R_c^{\gamma-1}}, \text{ en donde;}$$

η_t = Rendimiento térmico

R_c = Relación de compresión

γ = Constante del gas (entre 1,15 y 1,33)

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{9,447^{(1,33-1)}}$$

$$\eta_t = 0,523$$

5.2.3. Orden de Encendido del Motor Wankel

Obtener el orden de encendido de un motor wankel de dos rotores a partir de la figura indicada a continuación:

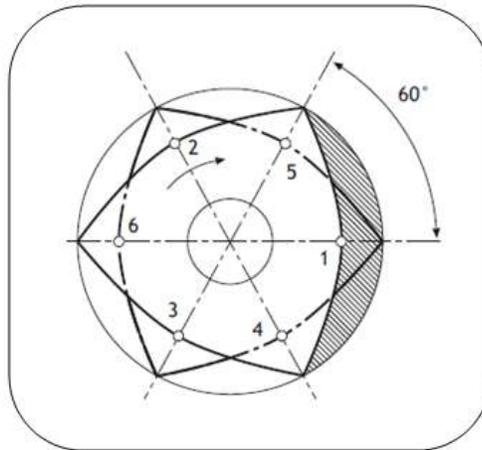


Gráfico 5.27 Numeración de las cámaras de combustión¹¹²

Analizando la figura anterior obtenemos la siguiente tabla

Tabla 5-14 Tabla de orden de encendido¹¹³

| | 0 ^o | 120 ^o | 240 ^o | 360 ^o |
|---|----------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 | T | E - A | C | |
| 2 | C | T | E - A | |
| 3 | E - A | C | T | |
| 4 | T | E - A | C | T |
| 5 | C | T | E - A | C |
| 6 | A | C | T | E |

Como resultado obtenemos que el orden de encendido del motor es:

1 - 5 - 2 - 6 - 3 - 4

¹¹² Fuente:

http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf

¹¹³ Autor: Evelin Vanessa Tasigchana

5.2.4. Puesta a punto del motor

Para poner a punto el motor, es decir para que tenga un buen encendido y funcionamiento hay que poner los dos distribuidores (leading y trailing) en el lugar preciso con su respectivo adelanto y retraso para lo cual seguimos los siguientes pasos:

1. Sacar las bujías
2. Mover la polea del cigüeñal y hacer coincidir la marca del leading de la polea con la aguja de la tapa. Este paso se lo realiza verificando que en el primer rotor ya haya pasado un vértice del mismo y se encuentre en la cámara de compresión.



Gráfico 5.28 Señales de la polea Leading y Trailing

3. Conectar el multímetro en continuidad al distribuidor leading y a masa.
4. Mover la carcasa de leading en sentido anti horario y parar cuando el pito del multímetro deje de sonar.
5. Verificar que coincida exactamente con la marca del cigüeñal y ajustar el perno del distribuidor.

6. Realizar el mismo proceso para colocar el distribuidor trailing, poner las bujías y comprobar conectando la lámpara estroboscópica y arrancando el motor.

5.3 GUÍAS DE PRÁCTICAS

En el banco de pruebas del motor wankel podremos realizar varias prácticas que nos servirán para entender mejor el funcionamiento del motor rotativo; aquí presento algunas guías que podremos elaborar.

Antes de empezar a realizar distintas prácticas en el motor wankel debemos tomar en cuenta las siguientes normas de seguridad.

- El área donde se van a realizar las distintas actividades debe estar limpia.
- Utilizar la vestimenta y elementos de protección adecuados.
- Realizar secuencialmente los pasos que se plantean en la guía.
- Utilizar de manera adecuada todas las herramientas.
- No se debe realizar la manipulación de los elementos sin antes consultar con el instructor.
- Revisar el instructivo de los elementos de medición.
- Hay que tener cuidado con la manipulación de los instrumentos para evitar dañarlos.

PRÁCTICA 1

ESTRUCTURA Y FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR WANKEL 10A

Objetivo: Identificar cada uno de los elementos que forman el motor wankel teniendo en cuenta la función que cumplen.

Herramientas:

- Motor wankel 10A

Procedimiento:

Las partes principales del motor wankel son las siguientes:

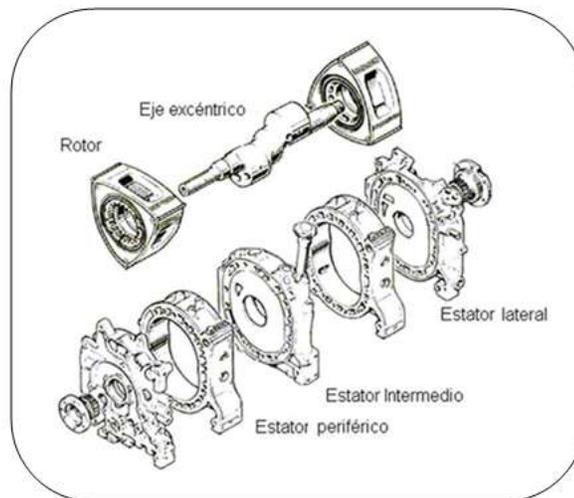


Gráfico 5.29 Elementos del motor wankel¹¹⁴

Rotor: Su forma es triangular de lados iguales ligeramente convexos, en cada uno de sus tres lados posee una cámara de combustión en donde se realizan los cuatro

¹¹⁴Fuente: <http://www.bolido.com/2011/08/tipos-y-geometrias-de-motores-a-combustion-segunda-parte/>

tiempos en cada vuelta del motor. En el centro del rotor encontramos un orificio que posee un dentado interno llamado corona.

Estator periférico: En su interior que tiene forma de epitrocoide gira el rotor cumpliendo los cuatro tiempos, aquí se encuentra ubicada la lumbrera de escape y los orificios para las bujías, también se aprecian los ductos de refrigeración.

Estator lateral: Canaliza los sistemas de lubricación y refrigeración, a parte a través de este se realiza la admisión de la mezcla fresca ya que aquí se encuentra alojada la lumbrera de admisión.

Eje excéntrico: Se encuentran apoyados sobre las piezas laterales por rodamientos y la transmisión de fuerzas entre el rotor y el eje se realiza a través de sus excéntricas.

Los elementos de sellado del motor son los siguientes:

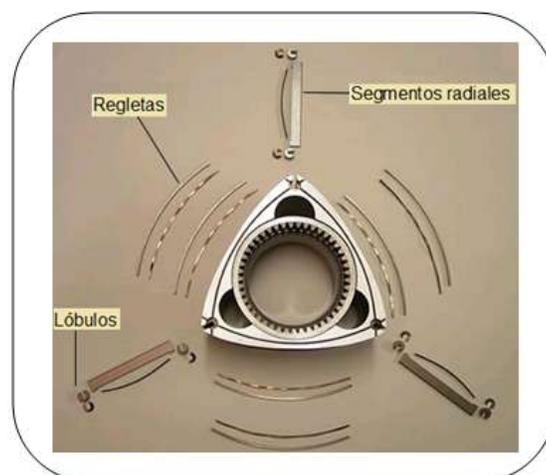


Gráfico 5.30 Elementos de sellado del motor¹¹⁵

¹¹⁵ Fuente: <http://www.drifting.es/2007/406/el-motor-rotativo/>

Segmentos radiales: Su función es conseguir la estanqueidad radial de las tres cámaras durante el giro del motor.

Regletas: Forman la estanqueidad lateral entre el estator lateral y el rotor. Su aspecto es similar a una lámina doblada en forma de ola.

Lóbulos: Se encuentran situados en las esquinas del rotor y son la base de unión entre las regletas y los segmentos.

Conclusiones:

- Los principales elementos que conforman el motor rotativo son los estatores laterales y periféricos, los rotores, el eje excéntrico y el mecanismo de sellado que nos ayuda a mantener la hermeticidad del motor y evitar fugas de presión.

Recomendaciones:

- Al manipular las partes del motor rotativo tener mucho cuidado con los muelles y mecanismo de sellado ya que son partes pequeñas delicadas.

PRÁCTICA 2

MEDIDA DE COMPRESIÓN DEL MOTOR WANKEL

Objetivo: Conocer la medida de compresión que tiene el motor rotativo wankel 10A

Herramientas:

- Manómetro
- Copa y extensión para sacar bujías.

Procedimiento:

- 1) Encender el motor y ponerlo a una temperatura normal de funcionamiento que es de 85 grados aproximadamente.
- 2) Extraer los cables de alta tensión de las bujías tomando en cuenta el orden en el que se encuentran.
- 3) Desenroscar una de las bujías del primer rotor y colocar el manómetro de lectura directa.

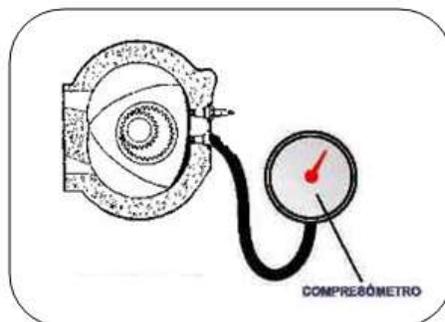


Gráfico 5.31 Posición del manómetro para medir la compresión¹¹⁶

¹¹⁶ Fuente: <http://www.members.tripod.com/~roteng/mci4.htm>

- 4) Accionar el motor de arranque con el acelerador completamente abierto.
- 5) Tomar la medida, colocar la bujía y repetir el mismo procedimiento con el segundo rotor.

Conclusiones:

- La temperatura normal de funcionamiento del motor wankel es de 85 grados centígrados.

Recomendaciones:

- Para proceder a tomar la medida de compresión del motor, éste debe encontrarse en su temperatura normal de funcionamiento para poder tener una medida más real.

PRÁCTICA 3

CÁLCULO DE RELACIÓN DE COMPRESIÓN Y CILINDRADA DEL MOTOR

WANKEL

Objetivo:

- Calcular la relación de compresión del motor
- Tomar la medida de volumen mínimo y máximo del motor

Herramientas:

- Llaves o copas para colocar el piñón
- Líquido refrigerante o de frenos para tomar la medida de volúmenes
- Pipetas con medidas de exactitud
- Grasa
- Acrílico transparente

Procedimiento:

Para calcular la relación de compresión del motor wankel debemos tomar las medidas del volumen mínimo y máximo del motor.

Volumen Máximo:

- 1) Colocar el piñón en la tapa frontal, ajustarlo y tapar el orificio de admisión.

- 2) Untar grasa en la cara frontal del housing y colocarlo mediante dos bocines presionando contra la tapa frontal para que se peguen y no fugue el líquido.
- 3) Colocar los mecanismos de sellado en el rotor y untarlo con bastante aceite para poderlo instalar en el housing.
- 4) Mover el rotor hasta que se posicione en la parte de mayor volumen.
- 5) En un acrílico realizar un orificio y ponerlo sobre la parte en donde vamos a medir el volumen.
- 6) Con una pipeta de medida ir colocando el líquido y tomar el resultado final.

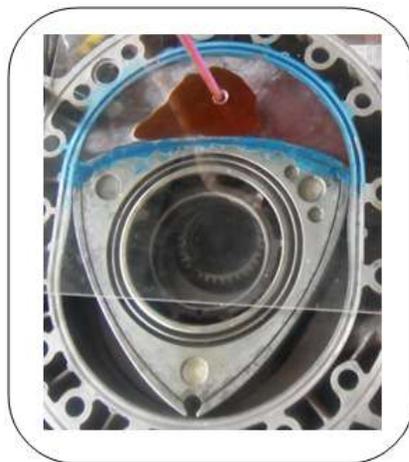


Gráfico 5.32 Toma de medida de máximo volumen del motor

Medida tomada: 569,97cc

Volumen Mínimo:

- 1) Seguir los pasos anteriores y mover el rotor hasta que se encuentre en su volumen mínimo.
- 2) Colocar el acrílico y con las pipetas tomar la medida exacta del volumen.



Gráfico 5.33 Toma de medida de volumen mínimo

Medida tomada: 60,33cc

Para el cálculo de la relación de compresión utilizamos la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{V_u}{V_c}, \text{ en donde;}$$

V_u = Volumen unitario

V_c = Volumen de la cámara de combustión

$$R_c = \frac{569,97 \text{ cc}}{60,33 \text{ cc}}$$

$$R_c = 9,447 : 1$$

Para el cálculo de la cilindrada del motor utilizamos la siguiente fórmula:

$$V_H = (V_u - V_c) \times 2$$

$$V_H = (569,97 \text{ cc} - 60,33 \text{ cc}) \times 2$$

$V_H = 1019.28 \text{ cc}$

Conclusiones:

- Para el cálculo de la cilindrada del motor wankel debemos restar al volumen máximo el volumen mínimo ya que al tomar la medida del V_{max} se encuentra incluido la cámara de combustión.

Recomendaciones:

- Para tomar las medidas de volúmenes del motor wankel debemos utilizar pipetas con graduaciones claras para obtener un resultado bien aproximado.

PRÁCTICA 4

PUESTA A PUNTO DEL MOTOR

Objetivo:

Conocer y realizar el procedimiento para poner a punto el motor wankel.

Herramientas:

- Llaves
- Multímetro
- Lámpara estroboscópica

Procedimiento:

- 1) Sacar las bujías
- 2) Mover la polea del cigüeñal y hacer coincidir la marca del leading de la polea con la aguja de la tapa. Este paso se lo realiza verificando que en el primer rotor ya haya pasado un vértice del mismo y se encuentre en la cámara de compresión.



Gráfico 5.34 Señales de la polea Leading y Trailing

- 3) Conectar el multímetro en continuidad al distribuidor leading y a masa.
- 4) Mover la carcasa de leading en sentido anti horario y parar cuando el pito del multímetro deje de sonar.
- 5) Verificar que coincida exactamente con la marca del cigüeñal y ajustar el perno del distribuidor.
- 6) Realizar el mismo proceso para colocar el distribuidor trailing, en este caso se mueve la carcasa de trailing en sentido horario.
- 7) Poner las bujías y comprobar conectando la lámpara estroboscópica y arrancando el motor.

Conclusiones:

- Poner a punto el motor wankel es de suma importancia ya que de esto depende que funcione en óptimas condiciones en todos los rangos o cargas.

Recomendaciones:

- Para confirmar que el proceso descrito de puesta a punto con la ayuda del multímetro está bien ejecutado utilizamos la lámpara estroboscópica que nos ayudará a verificar que el motor está funcionando correctamente.

5.4 MANTENIMIENTO DEL MOTOR

Hay varios tipos de mantenimiento, los cuales detallaremos a continuación:

- **Mantenimiento Correctivo:** Aquí se reparan las diferentes partes del vehículo en el momento en que empiezan a fallar o dejan de funcionar.
- **Mantenimiento Preventivo:** Consiste en seguir con las instrucciones que da el fabricante en el manual de mantenimiento en donde se detalla el tipo de servicio y los espacios de tiempo en que se deben realizar las operaciones de mantenimiento.
- **Mantenimiento Predictivo:** En este tipo de mantenimiento se realizan pruebas o mediciones que nos permiten deducir si es necesario realizar algún tipo de corrección o ajuste antes que se produzca una falla.

En este caso vamos a especificar paso a paso el mantenimiento preventivo que debemos realizar al motor rotativo.

En primer lugar para empezar a realizar cualquier tipo de mantenimiento o alguna práctica en el motor rotativo debemos utilizar la vestimenta y protección adecuada ya que se requiere cuidados especiales y precauciones porque trabajamos con equipos a altas temperaturas, materiales y líquidos combustibles, vapores inflamables, cables con alta tensión, herramientas manuales y eléctricas, entre otras.

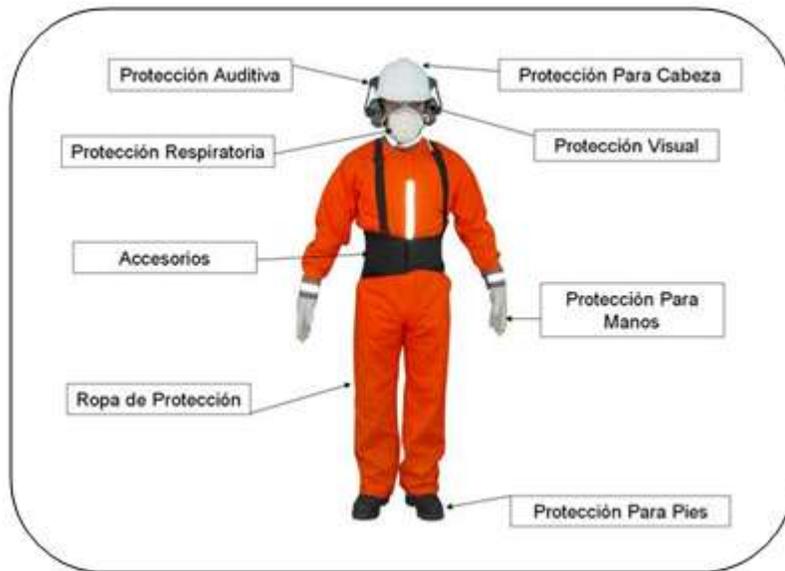


Gráfico 5.35 Equipo de protección¹¹⁷

5.4.1. Inspección visual antes del funcionamiento del motor

Antes de poner en marcha el motor debemos realizar las siguientes inspecciones visuales:

- Verificar el nivel de aceite en la bayoneta inspeccionando que se encuentre entre las marcas L – H.
- Revisar el nivel de refrigerante del motor ya que si no hay el refrigerante necesario podría sobrecalentarse.
- Inspeccionar los bornes de la batería, que no se encuentren sulfatados o corroídos.
- Chequear que los cables de tensión no tengan algún tipo de fisura o se encuentren rotos.

¹¹⁷ Fuente: <http://dihargentina.blogspot.com/2011/09/equipo-de-proteccion-obreros.html>

- Revisar que el tanque de combustible tenga gasolina y se encuentre bien tapado.

5.4.2. Mantenimiento de cada elemento del motor

Bandas

- Mensualmente verificar quebraduras y espesores y si es necesario cambiarlas.
- Revisar y ajustar la tensión de la banda de tal manera que al presionarla con el pulgar, ésta se flexiones de 10 a 15mm ya que una banda floja no nos garantiza una buena carga del alternador y podría dañar la bomba de agua.

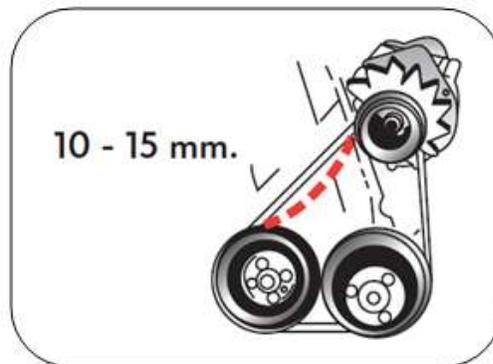


Gráfico 5.36 Comprobación de la tensión de la banda¹¹⁸

Tiempo de reposición: 60.000km o 2 años.

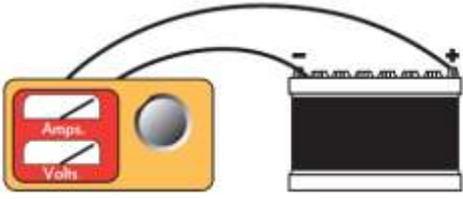
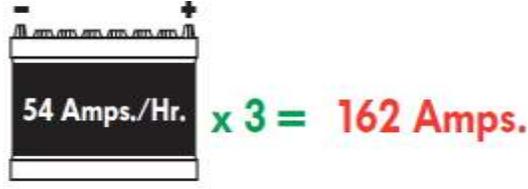
¹¹⁸ Fuente:

http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf

Batería

- Verificar que la fijación de la batería sea correcta y que su caja no se encuentre dañada.
- Los bornes deben estar libres de corrosión y sus conectores deben estar bien apretados; si es necesario utilizar un cepillo de alambre para limpiarlos.
- Para probar el estado de la batería debemos realizar una prueba de carga detallado a continuación:

Tabla 5-15 Pruebas realizadas a la batería¹¹⁹

| | |
|--|--|
| 1) Conectar el probador de carga a la batería. |  |
| 2) Ver la capacidad de la batería escrita en la caja y ajustarla a 3 veces más. |  |
| Leer el voltaje bajo carga; debe ser mayor a 9,6 v, caso contrario reemplazarla. | |

Tiempo de reposición: 40.000km o 2 años aproximadamente

¹¹⁹ Fuente:

http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf

Radiador

- Verificar visualmente si existe alguna fuga o haya alguna superficie dañada y si lo encuentra, reponerlo inmediatamente.
- Revisar el nivel del depósito de refrigerante y si es necesario aumentar; hágalo con refrigerante ya que si lo hace con agua esta contiene impurezas que se adhieren a las paredes del motor y pueden causar corrosión.
- Cuando el motor está frío revisar la tapa o tapón del radiador que se encuentre limpia y esté libre de fisuras.
- Cambiar el líquido refrigerante cada 2 años o 40.000km ya que termina su vida útil y pierde sus propiedades.

Tiempo de reposición: 60.000km o 3 años aproximadamente.

Bujías

- Deben estar libre de carbón o suciedad ya que su buen estado es importante para que haya una buena combustión y no haya exceso de emisiones al ambiente.
- Verificar con una galga la distancia que hay entre los electrodos la cual es de 0.7 a 0.8mm.
- No raspar las bujías con cepillo de alambre ya que aparte de retirar la carbonilla se raspa la cerámica blanca que es un aislante eléctrico que se debilita haciendo que la corriente se puede desviar a la rosca de la bujía.

- Al momento de cambiar las bujías tomar en cuenta que este motor necesita una bujía fría y una caliente para cada rotor por lo que se recomienda cambiar por las BUR7EQ y BUR9EQ que son de marca NGK.

Tiempo de reposición: 60.000km o 3 años.

Cambio de Aceite

- Revisar mensualmente el nivel de aceite y verificar que se encuentre entre los indicadores H – L de la bayoneta; este tipo de motor consume aceite de acuerdo a las revoluciones que se encuentre por lo que hay que aumentar el nivel con el mismo tipo de aceite.
- Cuando realice el cambio de aceite también sustituir el filtro de aceite.
- El tipo de aceite utilizado es SAE 20 W 50.

Tiempo de reposición: 10.000km o 6 meses.

Filtro de Combustible.

- Es atacado por las impurezas del combustible por lo que su reposición se realiza cada cierto tiempo de funcionamiento ya que si se sobrecarga de contaminación, el sistema de alimentación del vehículo no funcionará en óptimas condiciones.

Tiempo de reposición: 10.000km o 6 meses.

Cables de corriente.

- Revisar que no tengan ningún tipo de fisura ya que como consecuencia tendremos fugas de corriente que provocan fallas en el sistema de encendido.
- Tenemos un resistor o supresor a lo largo del cable y formando parte de él; su resistencia dependerá del largo del cable, mientras más largo sea habrá mayor resistencia. El valor de resistencia recomendado por metro cuadrado es de 9 a 23 kilohomios, si no se encuentra entre este intervalo reemplazarlo.



Gráfico 5.37 Comprobación de los cables de bujías¹²⁰

- Para retirar o conectar el cable de bujías realizarlo presionando sus terminales.

Bobina.

- Comprobar la caída de tensión del primario con la ayuda de un voltímetro conectado a 15 y a masa; nos debe dar una caída de 1v aproximadamente (12v - 1v= 11v). Esta comprobación se debe hacer en contacto.

¹²⁰ Fuente: http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf

- Verificar la tensión del primario, poniendo el motor en marcha y con la ayuda de un osciloscopio ver que la tensión se encuentre entre 250 a 350v.
- Chequear la resistencia del primario con un multímetro conectado a los terminales 15 y 1; nos debe dar un resultado entre 2,5 y 3,5 ohmios.
- Inspeccionar que la resistencia del secundario sea de 8,5 a 9,5 kilo ohmios.

Distribuidores

Este tipo de mantenimiento o verificaciones se realiza cada afinamiento del motor, es decir cada 6 meses para comprobar el estado y funcionamiento de cada componente.

- Verificar que la apertura del platino sea de 0,35mm a 0,5mm y que sus contactos se encuentren limpios y en buen estado.
- Medir con un dinamómetro la fuerza del muelle que sujeta del martillo del platino, debe ser de 500 gr.
- Revisar que los contactos del rotor no se encuentren deteriorados o con exceso de suciedad, caso contrario cambiarlo por uno nuevo ya que se dificulta la correcta conducción.
- Verificar que la carcasa del condensador se encuentre en masa y que su cable esté conectado en paralelo con el ruptor o platino.

- Comprobar visualmente que la tapa del distribuidor se encuentre en buen estado, que no posea grietas y que sus terminales no estén sucios o deteriorados.
- Inspeccionar la elongación de los resortes de avance centrífugo ya que si se encuentran agarrotados se debe cambiar por uno de iguales características.
- Chequear que el tubo del avance por vacío no tenga ningún tipo de impurezas ni fisuras y que la membrana no se encuentre deteriorada, caso contrario proceder con la reposición de los mismos.

Carburador

- Limpiar el carburador con un limpia carburadores en espray, esto nos ayudará a destapar los pasajes que están reducidos en su luz por los depósitos de residuos o el polvo asegurando así el paso normal del combustible y el aire.
- Revisar y ajustar los jets o chiclés.
- Inspeccionar los tres tornillos que regulan al carburador el de bajas, de altas y de ralentí; los ajustes deben ser pequeños no más de $\frac{1}{4}$ de vuelta ya que el motor es muy susceptible a estos pequeños cambios.
- Este tipo de mantenimiento se lo debe realizar cada 20.000km o 1 año.

Afinamiento del motor

El afinamiento del motor requiere de una serie de mantenimientos especificados anteriormente, los cuales nos ayudarán al desenvolvimiento suave y económico del motor wankel. Este tipo de afinamiento se lo debe realizar cada 20.000km o 1 año y las actividades realizadas son:

- Cambio de aceite.
- Cambio de filtros de aceite, aire y combustible.
- Cambio de platinos, ajuste del tiempo de motor, mantenimiento del carburador
- Cambio de bujías e inspección visual de cables de tensión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- El funcionamiento del motor rotativo wankel se basa en que es un motor de combustión interna que emplea la presión creada por la mezcla aire combustible para producir trabajo, realizando sus cuatro tiempos (admisión, compresión, trabajo, escape) en distintas partes del estator periférico, en cada una de sus tres cámaras de combustión formadas en cada lado del rotor y transmitiendo la fuerza hacia el eje motriz por medio de su excéntrica.
- Para la combustión de la mezcla aire – combustible se utilizan dos bujías en cada rotor denominadas Leading y Trailing; sus chispas saltan en intervalos de tiempo distintos haciendo que la bujía trailing termine la combustión y ayuda a que el rotor siga moviéndose en su sentido horario.
- Para armar el motor wankel se necesita verificar que cada uno de sus elementos tenga una determinada calibración para que no haya fugas de compresión y el motor funcione de manera óptima.
- La elaboración del manual de mantenimiento y las normas de seguridad le permiten al usuario realizar un buen manejo del banco de pruebas del motor wankel 10A y brindan la información suficiente para realizar con éxito cada una de las operaciones y verificaciones planteadas por el profesor en la hora de trabajo.

Recomendaciones

- Tener en claro el principio de funcionamiento del motor rotativo wankel para poder operarlo sin ningún tipo de dificultad aprovechando al máximo todos los conocimientos adquiridos.
- Es importante elegir bien el tipo de bujías del motor ya que deben tener especificaciones distintas, la una debe ser caliente y la otra fría; se recomienda la bujía BUR9EQ para leading y BUR7EQ para trailing de la marca NGK.
- Tener los elementos necesarios para tomar las medidas de cada uno de los elementos que componen el motor wankel y determinar si son aptos o no para su funcionamiento.
- Utilizar las protecciones necesarias para manipular el motor y realizar paso a paso las inspecciones que se necesitan hacer antes de ponerlo a funcionar, así como seguir el plan de mantenimiento del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

- Wasdyke Raymond g., Motores Wankel Operación Prueba y Evaluación, Primera Edición, México, Editorial Limusa, 1991.
- Obert Edward F., Motores de combustión interna Análisis y Aplicaciones, Segunda Edición, México, Editorial Continental, 1982.
- Hermógenes Gil, Manual CEAC del Automóvil, Barcelona, Editorial Ceac, 2003.
- Crouse, Motores Puesta a Punto y Rendimiento del Motor, Primera Edición, Valencia – España, Editorial Alfaomega, 2005.
- Arias Paz Manuel, Manual de Automóviles, 50^a Edición, Madrid – España, Editorial Dossat, 1990.
- http://www.macmillanprofesional.es/fileadmin/files/online_files/_pro/demo/contenidos/vehiculos/libros_y_cuadernos/Castellano/Motores_Castellano.pdf
- <http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7367/1/MOTORES%20ROTATIVOS.%20Tipolog%C3%ADas%20y%20combustibles%20alternativos..pdf>
- http://www.catalogobosch.com/BibliotecaPDF_es/Encendido/Sistemas_de_Encendido.pdf

ANEXOS