

Otros Motores Térmicos

Las transparencias son el material de apoyo del profesor para impartir la clase. No son apuntes de la asignatura. Al alumno le pueden servir como guía para recopilar información (libros, ...) y elaborar sus propios apuntes

Departamento: Ingeniería Eléctrica y Energética
Area: Máquinas y Motores Térmicos

CARLOS J RENEDO renedoc@unican.es

Despachos: ETSN 236 / ETSIIT S-3 28

<http://personales.unican.es/renedoc/index.htm>

Tlfn: ETSN 942 20 13 44 / ETSIIT 942 20 13 82

1

- 1.- Introducción
- 2.- Motor Stirling
- 3.- Motor Ericsson
- 4.- Motor Atkinson
- 5.- Motor Wankel
- 6.- Motor Elsbett
- 7.- Simulaciones

<http://www.animatedengines.com/>

1.- Introducción

Además de los clásicos motores alternativos Otto y Diesel existen otros motores térmicos, entre ellos destacan:

- Motor Stirling (Robert Stirling, 1790-1878, Escocia)
- Motor Ericsson (John Ericsson, 1803-1889, Suecia)
- Motor Atkinson (James Atkinson, 1846-1914, Inglaterra)
- Motor Wankel (Felix Wrankel 1902-1988, Alemania)
- Motor Elsbett (Ludwig Elsbett, 1913-2003, Alemania)

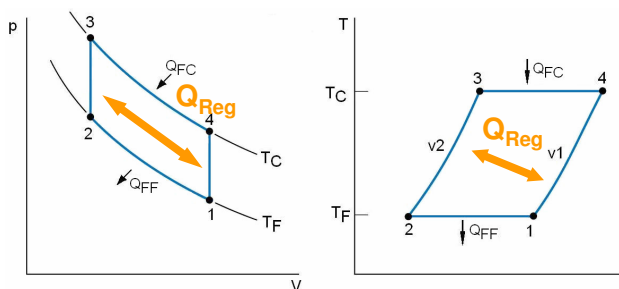
2

2.- Motor Stirling (I)

El suministro de Q se realiza a T cte

Respecto al ciclo de Carnot sustituye los procesos adiabáticos por isócoros con un regenerador (reversible)

Todo el Q se comunica a T cte (Q_{23} proviene de Q_{41})



Q_{FC} a T cte, $\eta = \eta_{Carnot}$

$$\eta = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

Problemas constructivos $\eta_{real} < \eta_{teórico}$

El calor se puede obtener mediante **combustión externa** (malos combustibles)

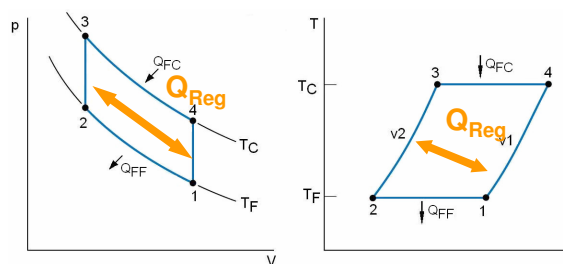
3

2.- Motor Stirling (II)

$$\eta = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}}$$

$$\eta_{Stirling} = 1 - \frac{Q_{41} + Q_{12}}{Q_{23} + Q_{34}}$$

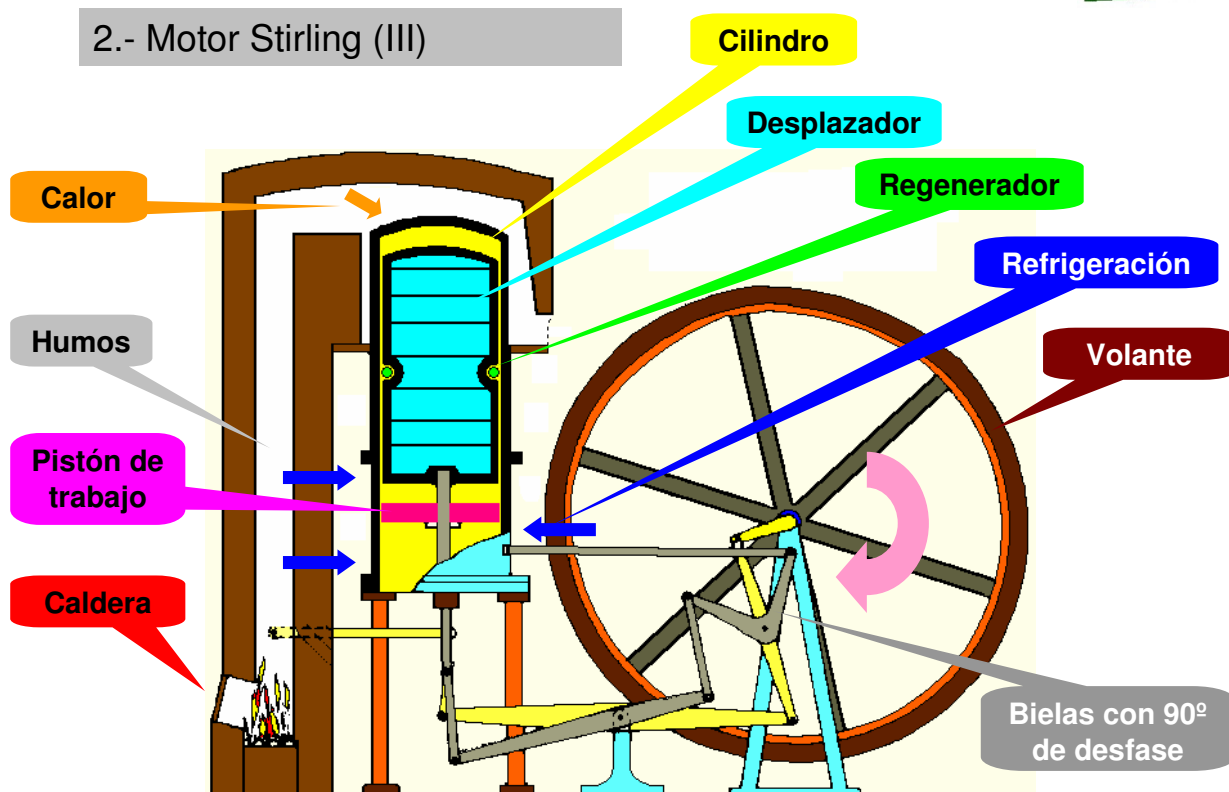
$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{12} = \left| T = cte \right| = W_{12} = \int_1^2 p dv = R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1} \\ Q_{23} = "0" \quad \leftarrow \text{Regenerador} \\ Q_{34} = \left| T = cte \right| = W_{34} = \int_3^4 p dv = R T_3 \ln \frac{v_4}{v_3} = \left| v_3 = v_1; v_4 = v_2 \right| = R T_3 \ln \frac{v_2}{v_1} \\ Q_{41} = "0" \quad \leftarrow \text{Regenerador} \end{array} \right.$$



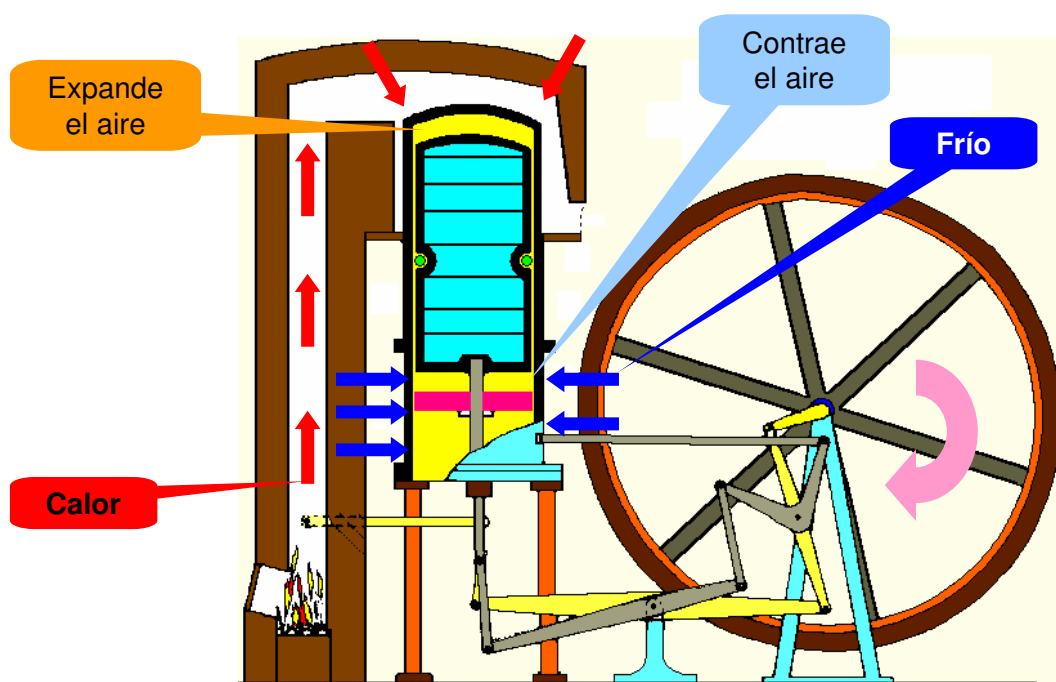
$$\eta_{Stirling} = \frac{"0" + R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}}{"0" + R T_3 \ln \frac{v_2}{v_1}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}} = \eta_{Carnot}$$

4

2.- Motor Stirling (III)



2.- Motor Stirling (IV)

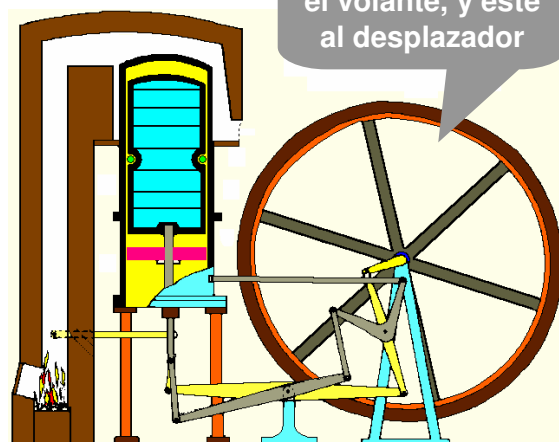


2.- Motor Stirling (V)

El **desplazador** es liviano y no conduce fácilmente calor de un extremo a otro

Al medio existe un anillo de material capaz de absorber y ceder calor que es el **regenerador**

Cuando el desplazador se mueve hacia abajo, la mayor parte del aire dentro del **cilindro** queda en la zona caliente y se expande, empujando el **pistón de trabajo** hacia abajo



Aquí se entrega trabajo al exterior y gira el **volante**

Al suceder esto, una serie de **bielas** mueven el desplazador hacia arriba, desplazando la mayor parte del aire a través del regenerador hacia la zona fría
(carrera desplazador > carrera del pistón; desfasadas 90°)

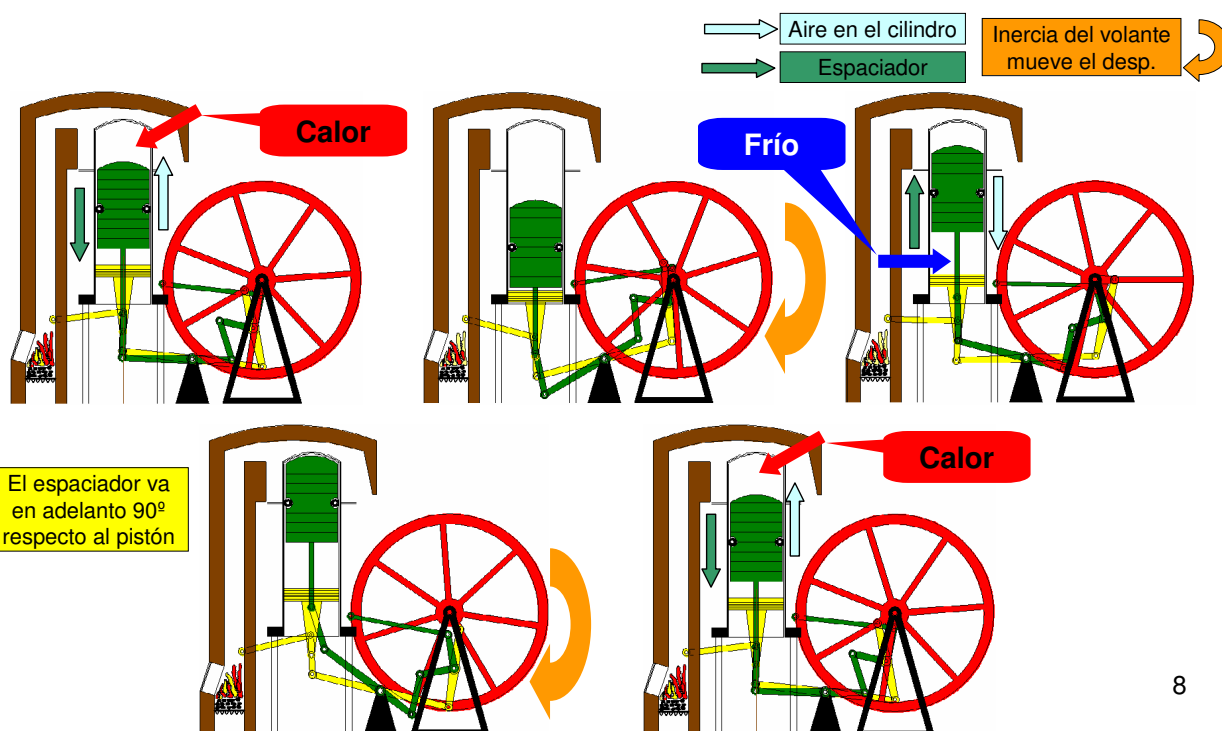
Allí se enfría el aire, baja la presión, el pistón sube, y se repite el ciclo

7

2.- Motor Stirling (VI)

En movimiento en:

<http://www.moteur-stirling.com/Diapo8.gif>

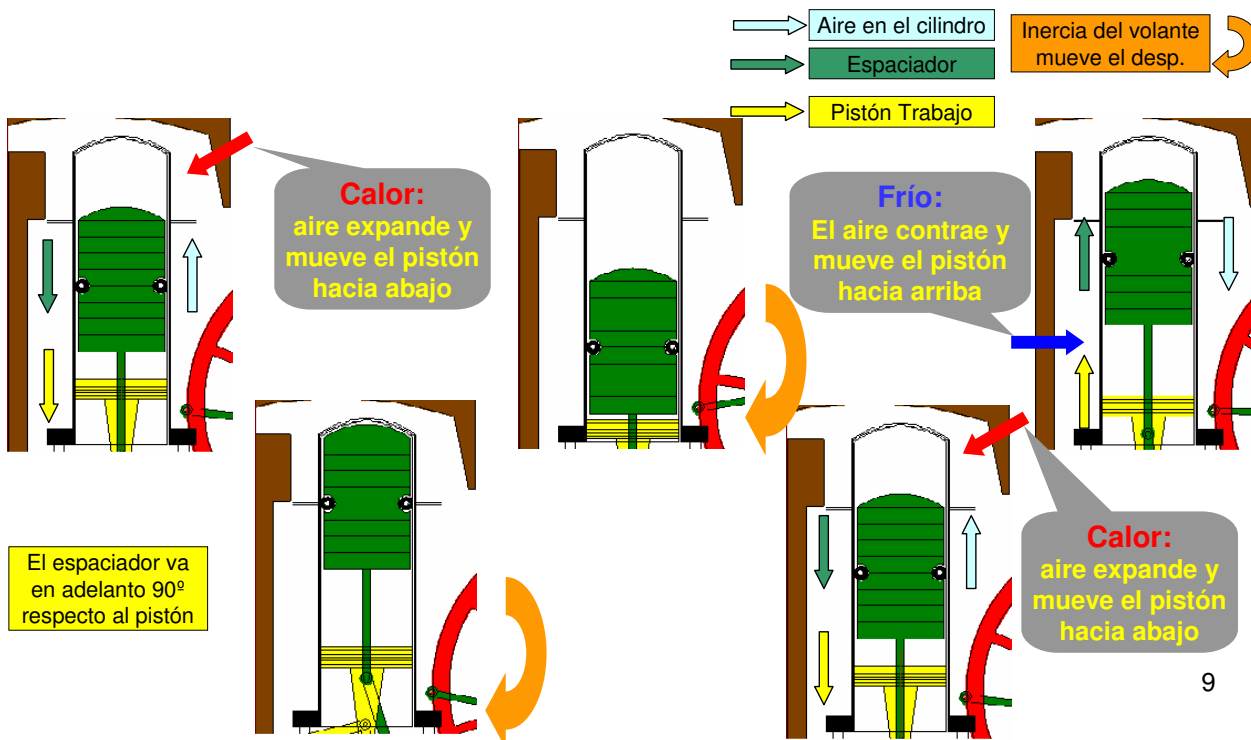


8

2.- Motor Stirling (VII)

En movimiento en:

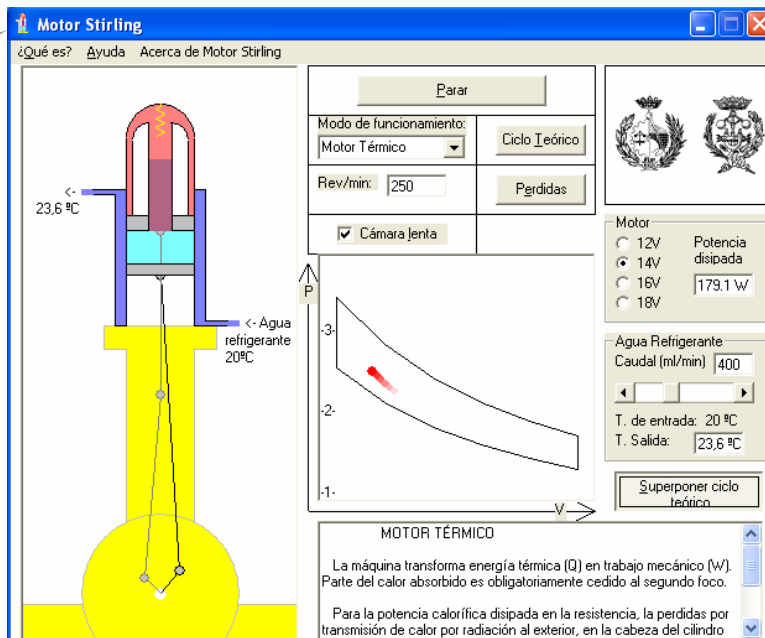
<http://www.moteur-stirling.com/Diapo8.gif>



2.- Motor Stirling (VIII)

<http://www2.ubu.es/ingelec/maqmot/>

Programa de simulación del funcionamiento de una Máquina Stirling

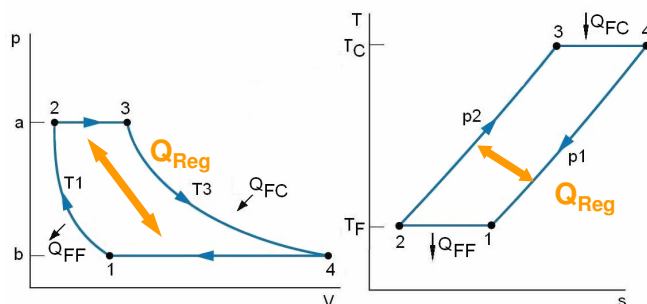


3.- Motor Ericsson (I)

El suministro de Q se realiza a T cte

Respecto al ciclo de Carnot sustituye los procesos adiabáticos por isóbaros con un regenerador (reversible)

Todo el Q se comunica a T cte (Q_{23} proviene de Q_{41})



Q_{FC} a T cte, $\eta = \eta_{Carnot}$

$$\eta = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

Problemas constructivos $\eta_{real} < \eta_{teórico}$

El calor se puede obtener mediante **combustión externa** (malos combustibles)

11

3.- Motor Ericsson (II)

$$\eta = 1 - \frac{Q_{FF}}{Q_{FC}}$$

$$\eta_{Ericsson} = 1 - \frac{Q_{41} + Q_{12}}{Q_{23} + Q_{34}}$$

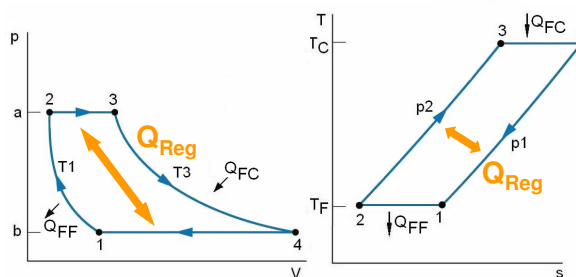
$$Q_{12} = \left| T = cte \right| = W_{12} = \int_1^2 p dv = R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$Q_{23} = "0" \quad \leftarrow \text{Regenerador}$$

$$Q_{34} = \left| T = cte \right| = W_{34} = \int_3^4 p dv = R T_3 \ln \frac{v_4}{v_3} = \left| v_3 = v_1; v_4 = v_2 \right| = R T_3 \ln \frac{v_2}{v_1}$$

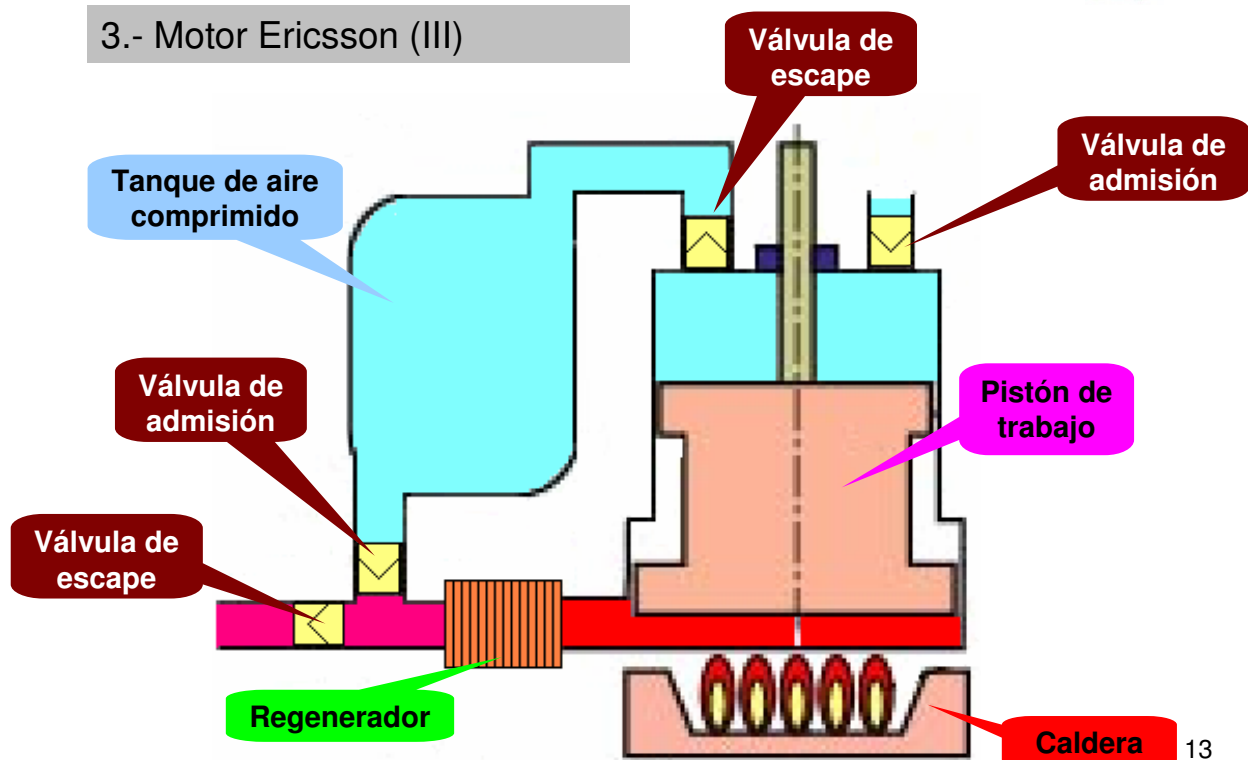
$$Q_{41} = "0" \quad \leftarrow \text{Regenerador}$$

$$\eta_{Ericsson} = 1 - \frac{"0" + R T_1 \ln \frac{v_2}{v_1}}{"0" + R T_3 \ln \frac{v_2}{v_1}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}} = \eta_{Carnot}$$



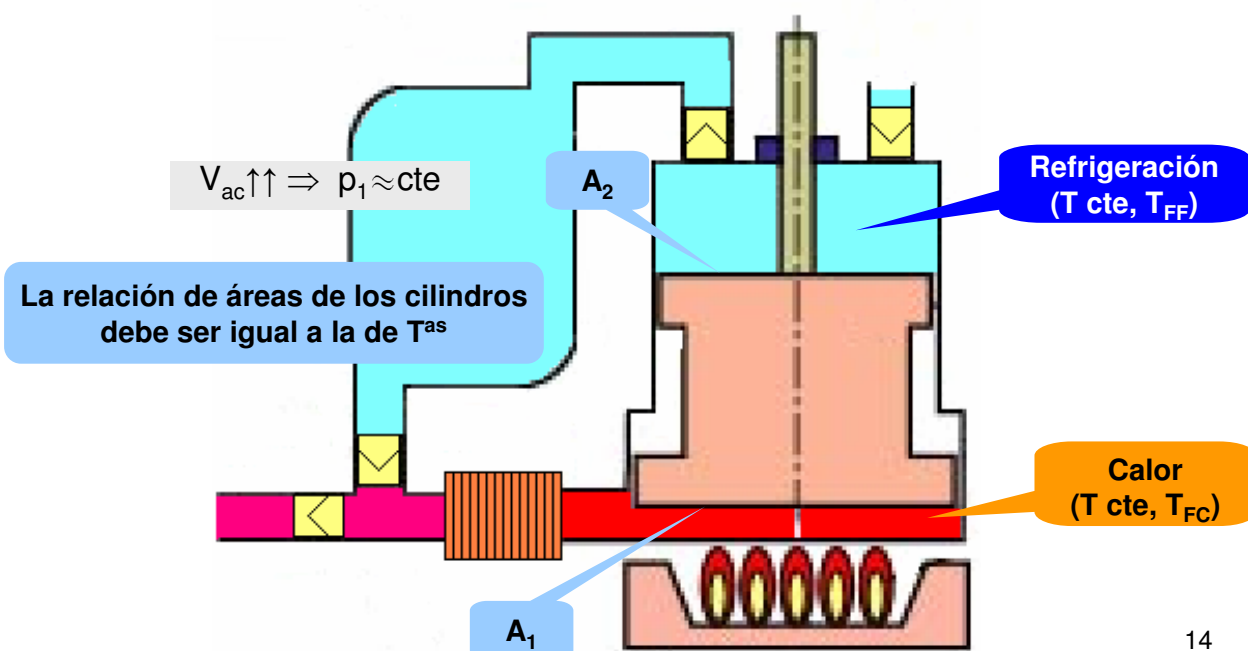
12

3.- Motor Ericsson (III)



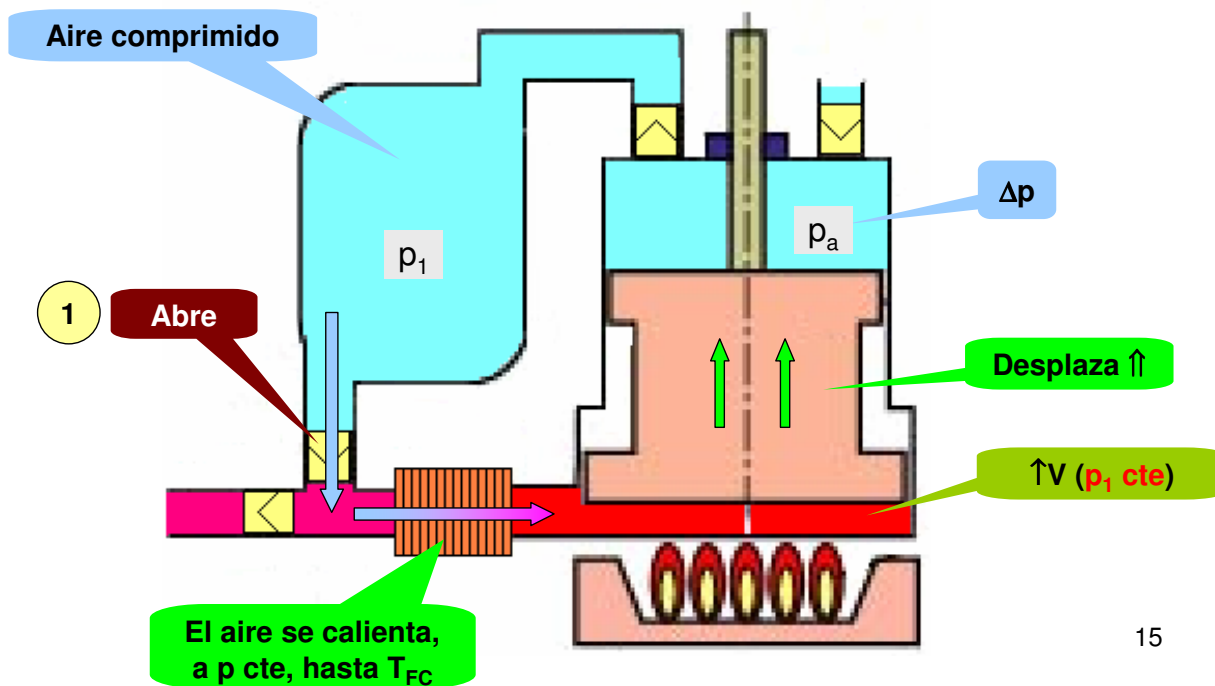
13

3.- Motor Ericsson (IV)



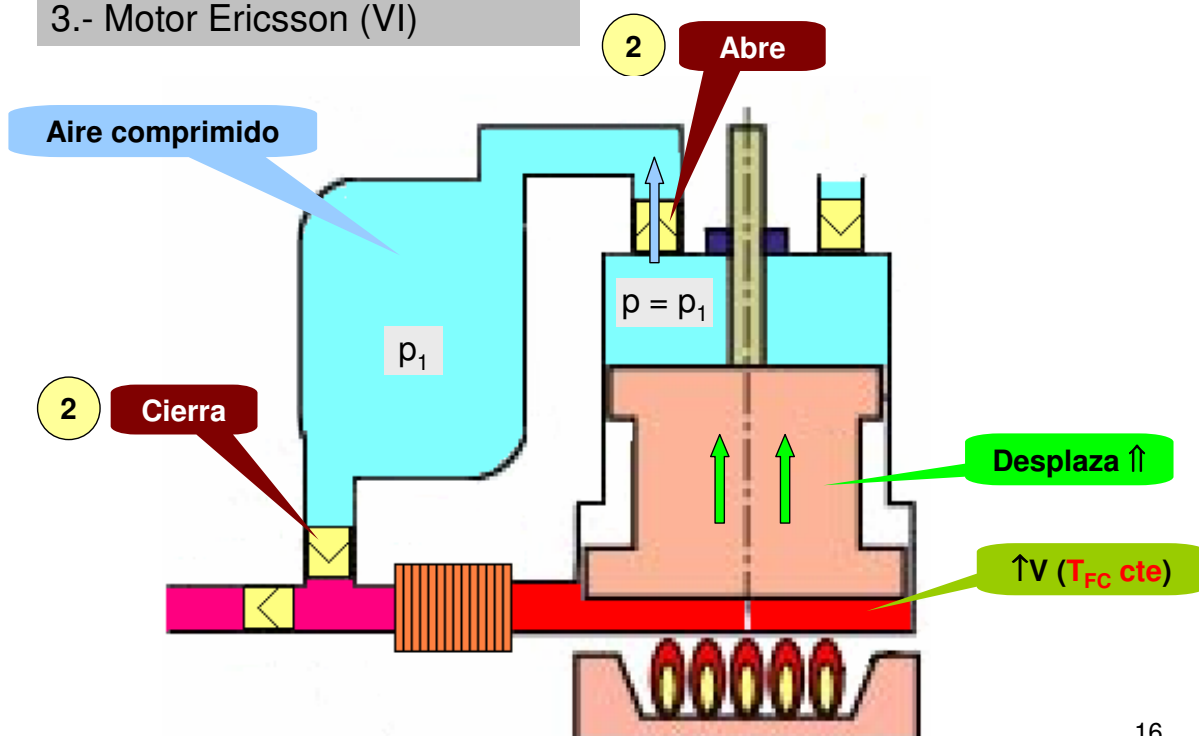
14

3.- Motor Ericsson (V)



15

3.- Motor Ericsson (VI)

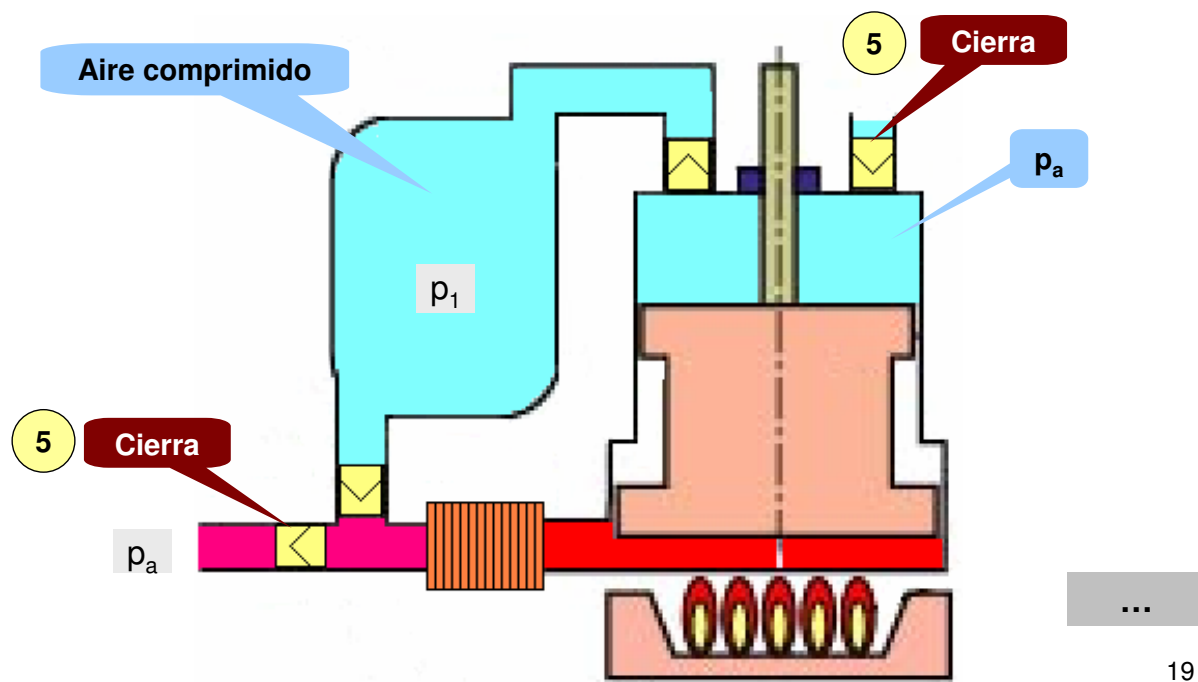


16

17

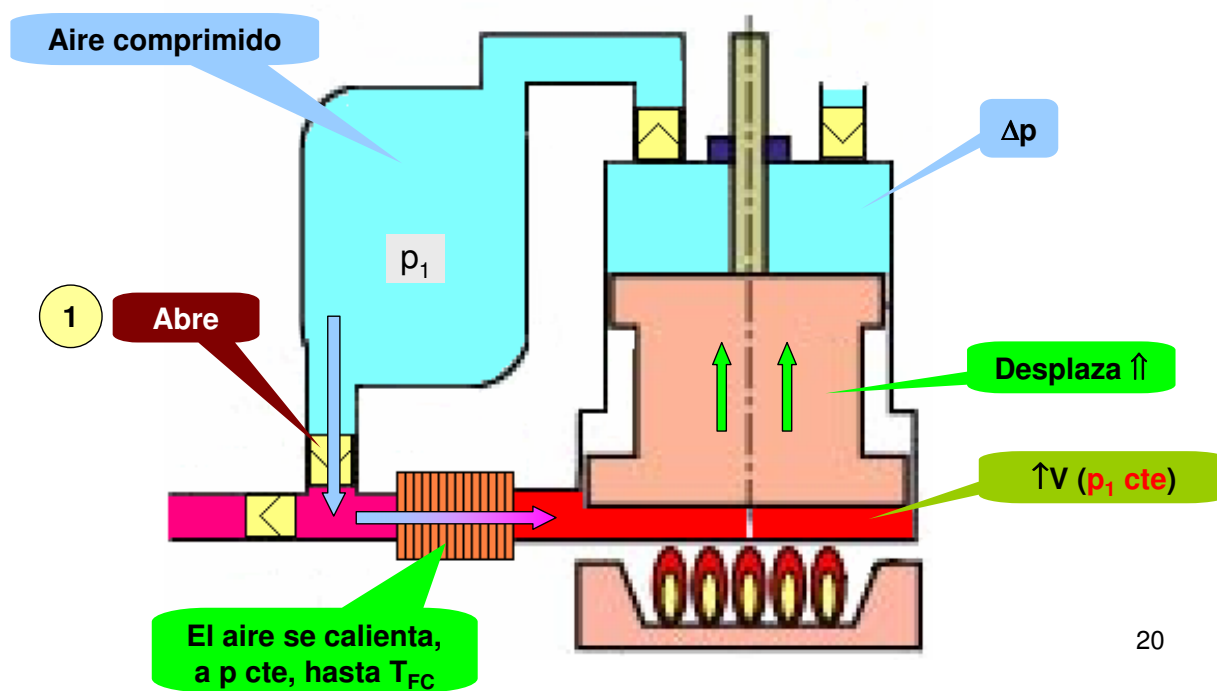
18

3.- Motor Ericsson (IX)



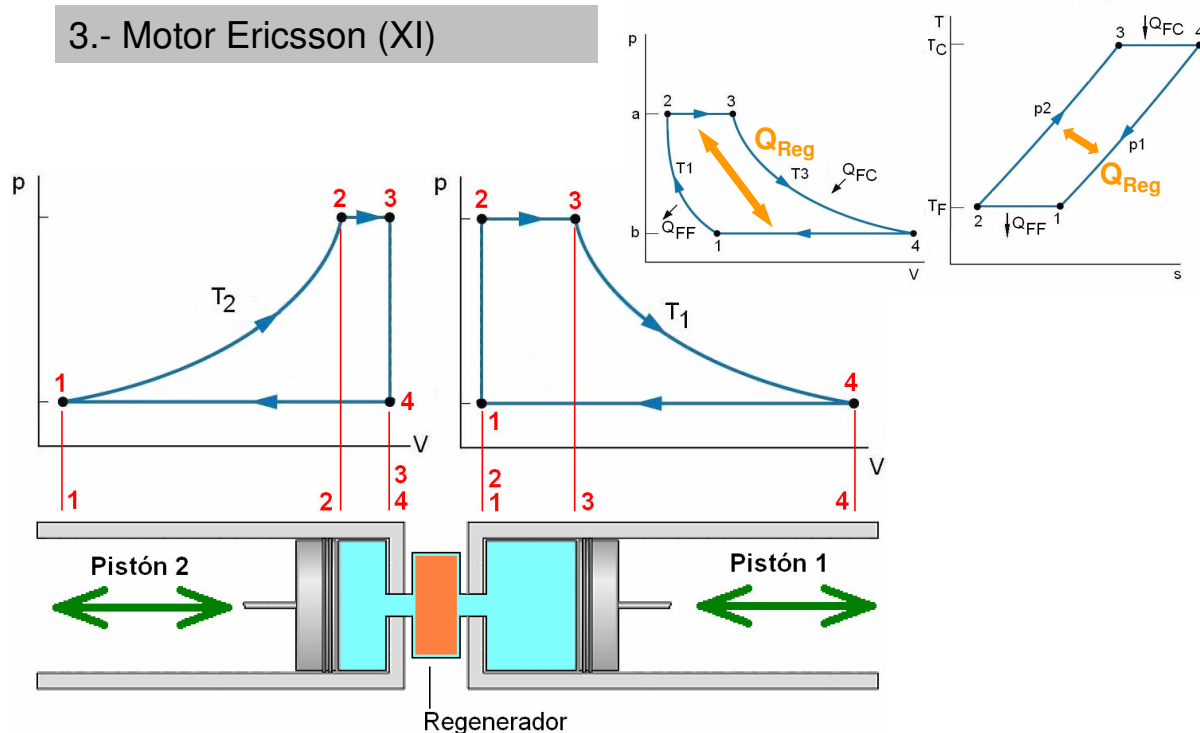
19

3.- Motor Ericsson (X) ... (V)



20

3.- Motor Ericsson (XI)



21

3.- Motor Ericsson (XII)

Comparativa de ciclos:

Ciclo	Compresión	Aporte de calor	Expansión	Extracción de calor
Carnot	adiabática	isoterma	adiabática	isoterma
Stirling	isócara	isoterma	isócara	isoterma
Ericsson	isobára	isoterma	isóbara	isoterma

El **Regenerador** hace que:

$$\eta_{Carnot} = \eta_{Stirling} = \eta_{Ericsson} = 1 - \frac{T_{FF}}{T_{FC}}$$

Tanto el motor **Stirling** como **el Ericsson** permiten combustión exterior (combustibles sólidos de baja calidad)

22

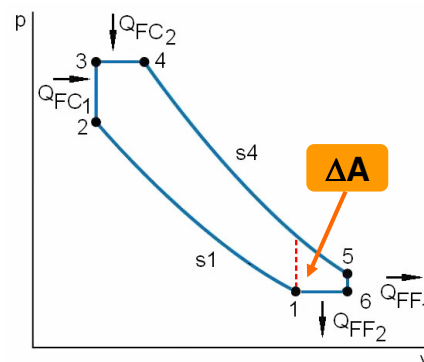
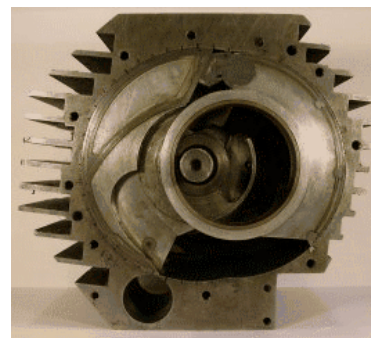
4.- Motor Atkinson (I)

Es un motor rotatorio, que puede funcionar con diesel o hidrógeno

La carcasa tiene forma de 8 tumbado, y es asimétrica, estando la parte derecha reservada para la admisión y parte de la compresión y la izquierda para el ciclo de trabajo

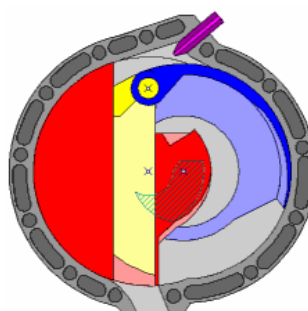
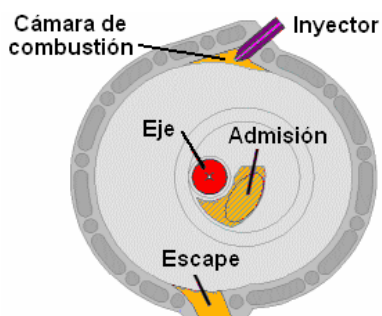
Permite la expansión completa de los gases, por lo que extrae el máximo de energía de los mismos

Aunque la compresión es mayor que en un motor normal y la T^a de combustión también, los gases de escape salen a una T^a inferior

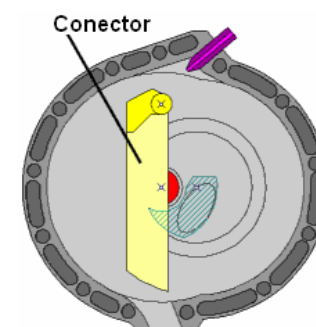
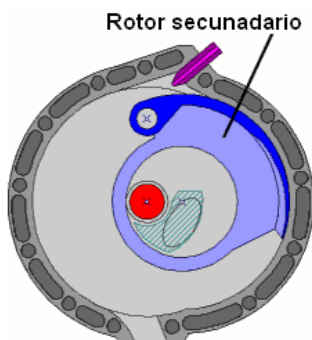
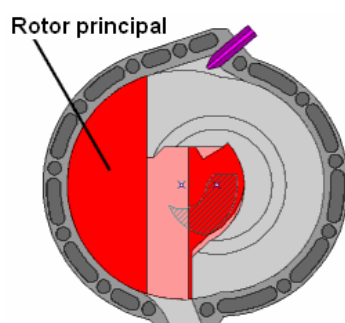
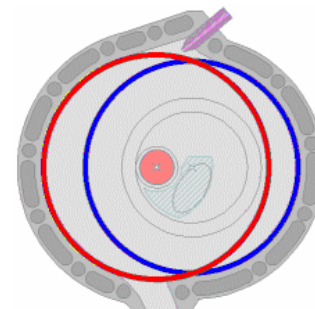


ΔA sobre el ciclo Diesel real

4.- Motor Atkinson (II)



Trayectorias de los 2 rotores



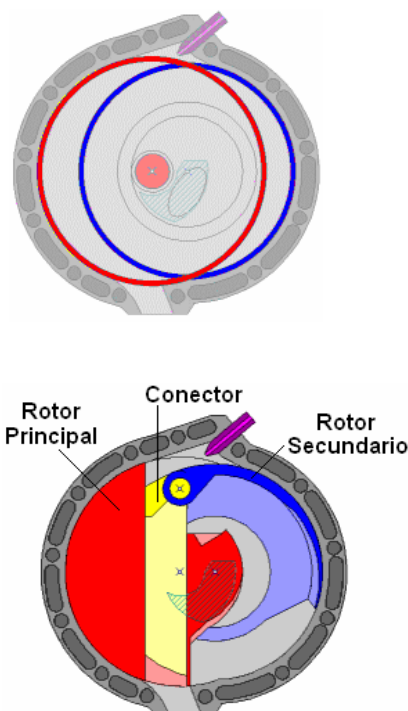
4.- Motor Atkinson (III)

El motor consta de dos cámaras circulares entrelazadas de diferentes diámetros

Dentro de estas cámaras giran dos rotores con centros separados

Cada rotor sigue su propia trayectoria y no basan su recorrido en la carcasa, por lo que el sellado de los rotores contra las paredes de la cámara es excelente debido a sus órbitas circulares y grandes superficies de contacto

Los dos rotores están conectados entre sí por otro componente que tiene una cuasi-órbita circular. Los tres elementos son el mecanismo interno del motor



25

4.- Motor Atkinson (IV)

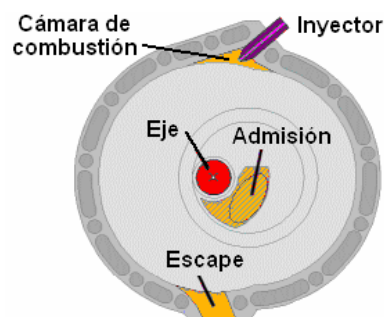
La admisión se produce en el centro del motor

Compresión y expansión se producen en la periferia de manera uniforme, lo que facilita la evacuación del calor

La dilatación del motor es uniforme al no tener un lugar caliente y otro frío, por lo que no requiere una alta tolerancia de fabricación

Cada cámara del motor esta totalmente separada de las demás, esto facilita el empleo de combustibles alternativos como el hidrógeno sin los problemas de válvulas asociados a los motores de pistón

Por ser rotativo, la revolución máxima podrá ser más de una vez y media la de un motor convencional, lo que aumenta la elasticidad del motor



26

4.- Motor Atkinson (V)

Con una fase de trabajo por revolución, produce más del doble de la potencia que un motor convencional. A igualdad de cilindrada tendría casi la mitad de tamaño y peso. además de producir un 27% más de potencia, junto con un aumento del 12% en la eficiencia

No se da la misma separación de ciclos que un motor diesel clásico. En este motor hay **dos etapas de compresión**: la primera tiene una baja relación de compresión. En la segunda el aire es llevado a una mayor presión y es en ese momento cuando el combustible es inyectado, se inflama y se inicia la expansión

Después del **barrido** de los gases de escape (en esta fase hay una cierta recirculación), el aire se renovará parcialmente pues parte volverá a actuar de nuevo en la próxima fase de barrido, el resto del aire pasa a ser de nuevo comprimido en la segunda fase de compresión

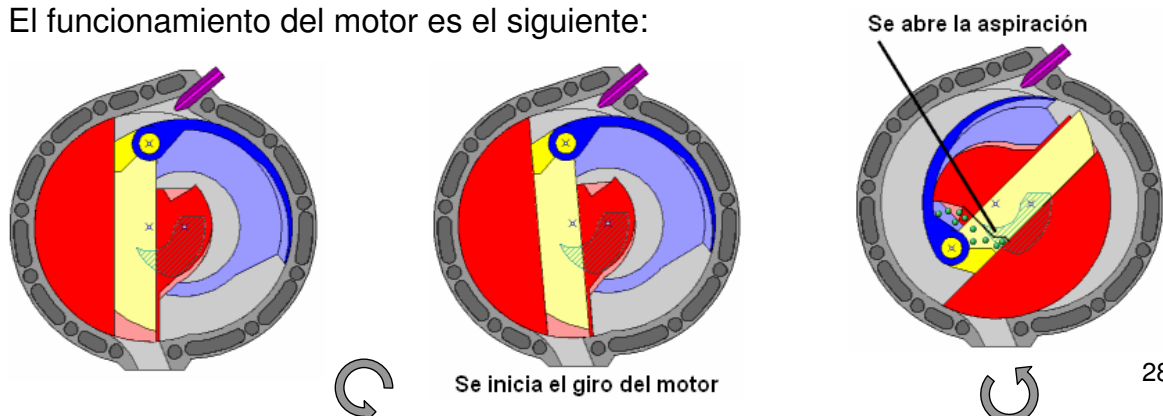
27

4.- Motor Atkinson (VI)

En la fase de **admisión** hay una parte de gases recirculados aportados por el barrido, esto reduce las emisiones y economiza combustible

En la **expansión** de los gases se produce en un volumen mayor que el de compresión, esto disminuye la temperatura de los gases de escape y por lo tanto aumenta la eficiencia termodinámica: $\uparrow(T_{\max} - T_{\min})$

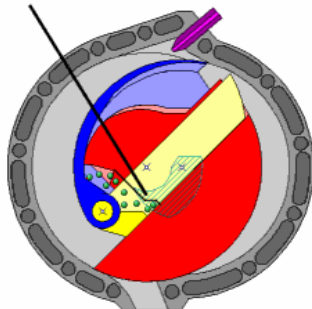
El funcionamiento del motor es el siguiente:



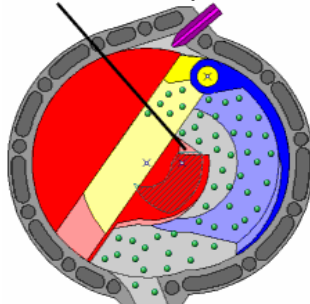
28

4.- Motor Atkinson (VII)

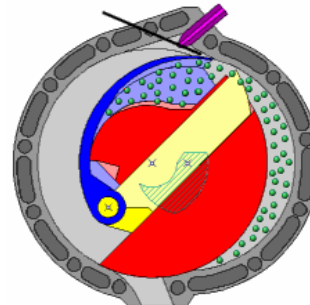
Se abre la aspiración



Se cierra la aspiración



El rotor secundario llega a la cámara de combustión



Se va llenando la cámara



Se inicia una primera etapa de compresión

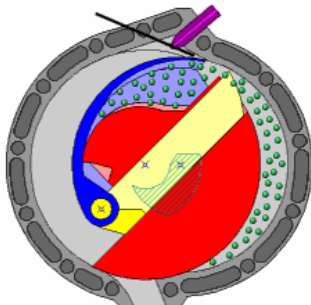


Termina la 1ª compresión

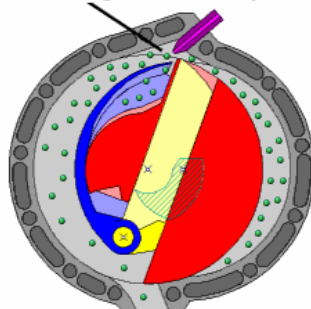
29

4.- Motor Atkinson (VIII)

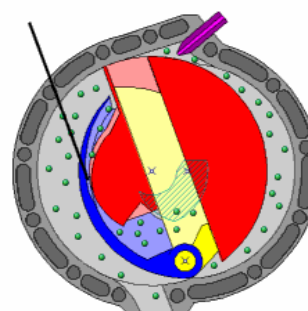
El rotor secundario llega a la cámara de combustión



Se produce un bypas en el barrido de los gases de escape



Termina el bypas y parte del aire barrido es ahora aspirado



Termina la primera etapa de compresión



Se expulsa el aire de la combustión anterior



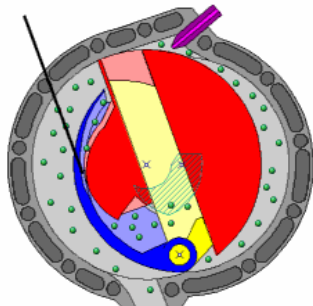
Se inicia el barrido de la combustión del ciclo anterior

Se inicia la segunda etapa de compresión

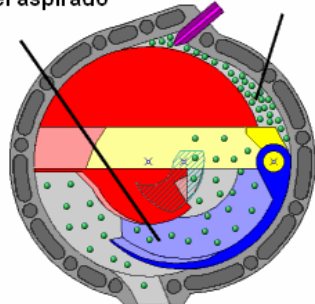
30

4.- Motor Atkinson (IX)

Termina el bypas y parte del aire
barrido es ahora aspirado

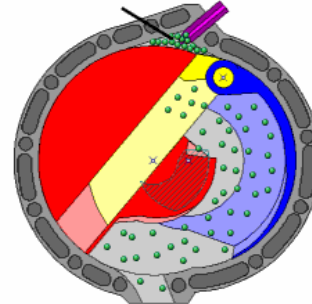


El aire barrido
se mezcla
con el aspirado



2ª compresión
(alta tasa de comp)

El aire comprimido ocupa
la cámara de combustión



Se inicia la segunda
etapa de compresión

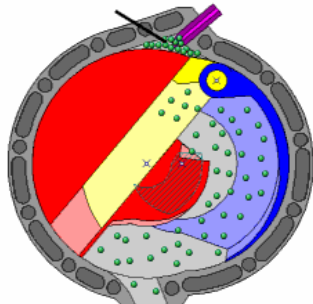


Termina la segunda
etapa de compresión

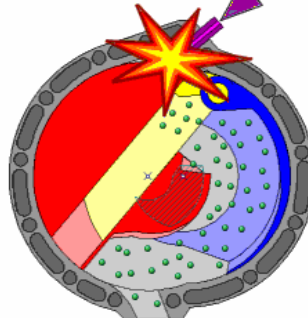
31

4.- Motor Atkinson (X)

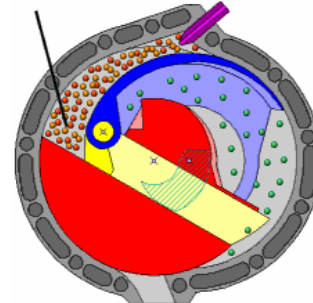
El aire comprimido ocupa
la cámara de combustión



Se inyecta el combustible
y se detona la mezcla



La expansión provoca
un gran par motor



Termina la segunda
etapa de compresión

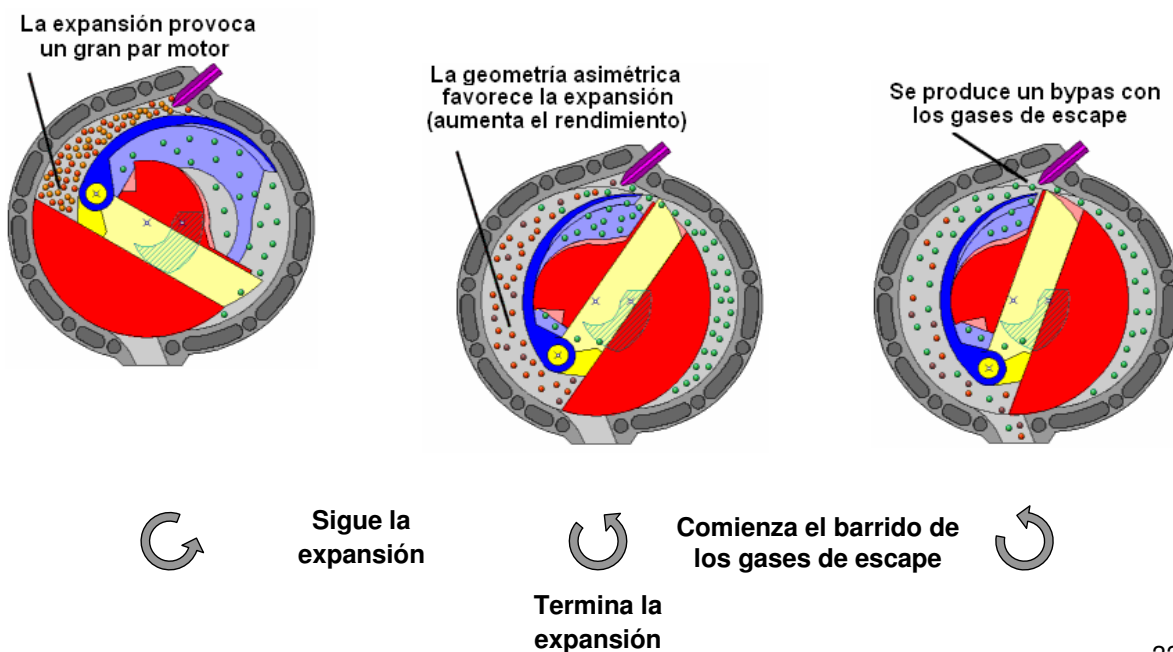


Comienza la
expansión



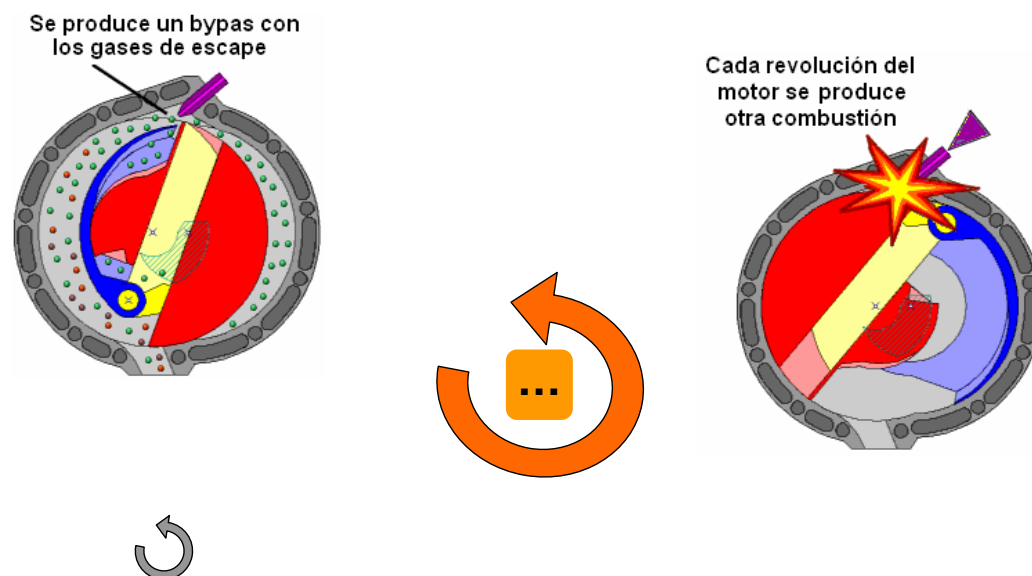
32

4.- Motor Atkinson (XI)

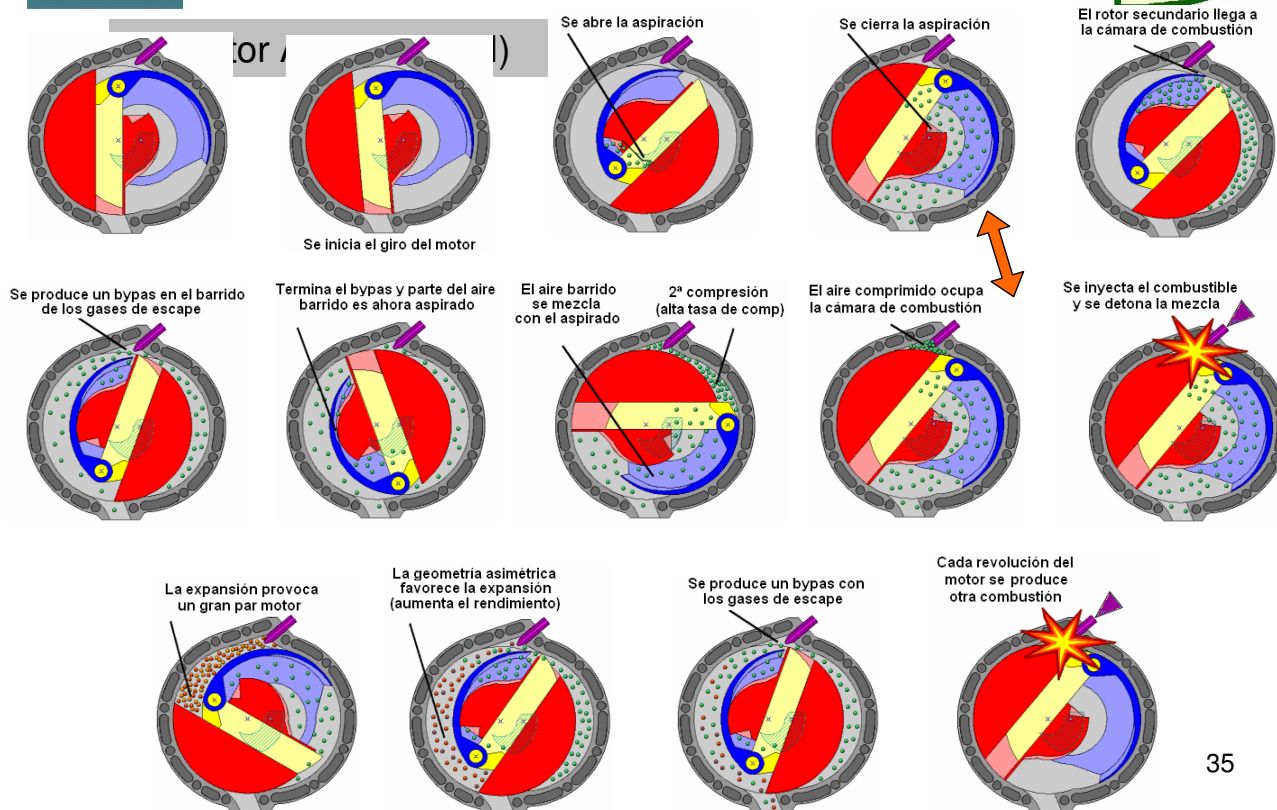


33

4.- Motor Atkinson (XII)



34



35

5.- Motor Wankel (I)

Es un **motor rotatorio de combustión interna** inventado por Felix Wrankel (1902-1988)

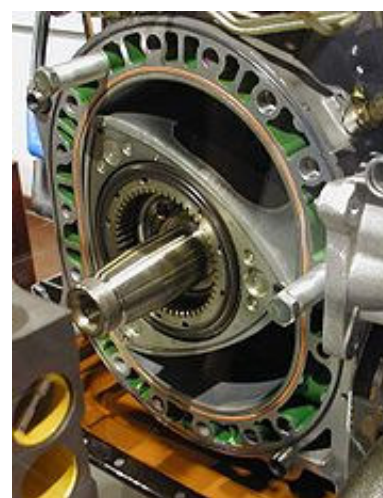
Se desarrollan los 4 tiempos en lugares distintos de la carcasa o bloque

El cilindro es una cavidad con forma de 8, dentro de la cual se encuentra un rotor triangular que realiza un giro de centro variable

Tiene tres compartimentos formados por las caras del rotor y la pared de la cubierta

El rotor comunica su movimiento giratorio a un cigüeñal que se encuentra en su interior, y que gira ya con un centro único

La presión creada por la combustión está contenida en la cámara formada por una parte del recinto y sellada por uno de los lados del rotor triangular



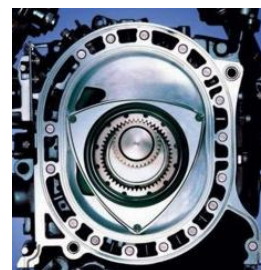
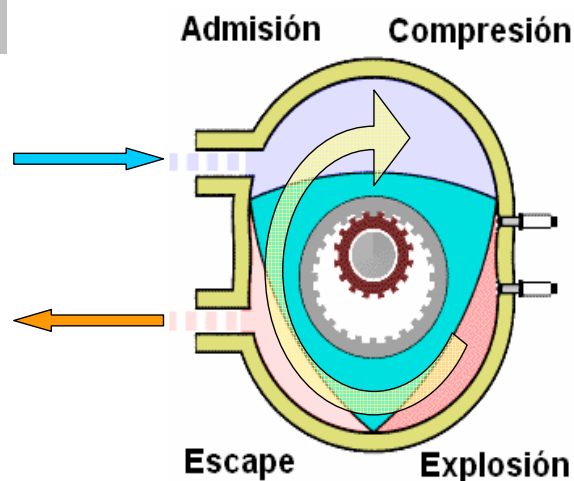
36

5.- Motor Wankel (II)

El rotor sigue un recorrido en el que mantiene sus 3 vértices en contacto con el alojamiento, delimitando así tres compartimentos separados de mezcla

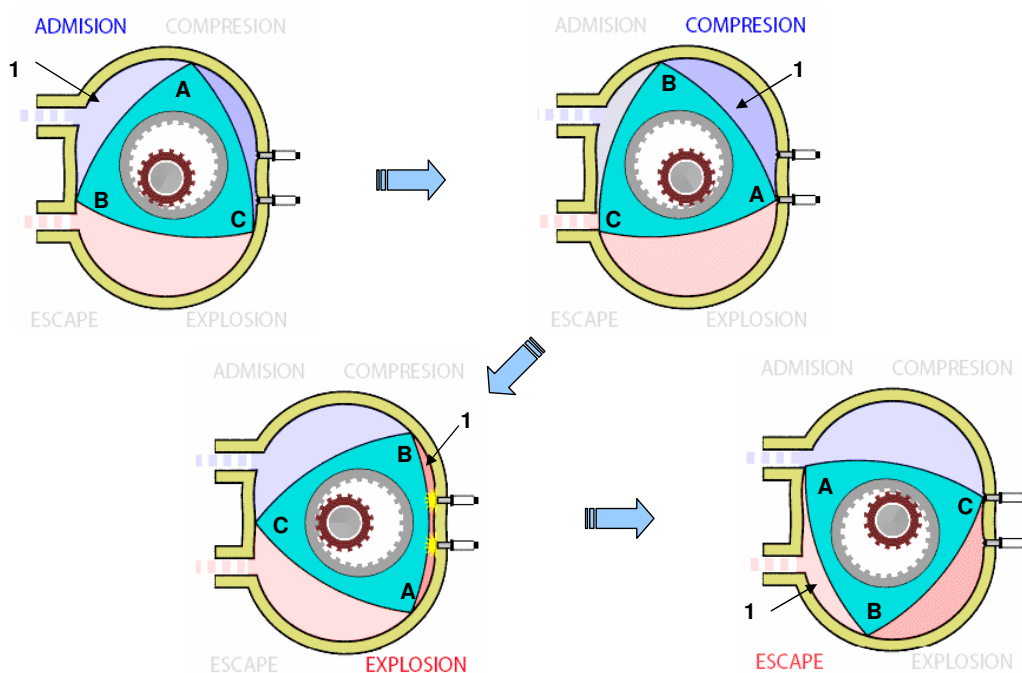
A medida que el rotor gira dentro de la cámara, cada uno de los 3 volúmenes se expanden y contraen alternativamente

Esta expansión-contracción la que succiona el aire y el combustible hacia el motor, comprime la mezcla, extrae su energía expansiva y la expelle hacia el escape



37

5.- Motor Wankel (III)



38

5.- Motor Wankel (IV)

Ventajas:

- **Menos piezas móviles**, tiene un 40 por ciento menos de piezas, y la mitad de volumen y de peso que un motor alternativo de 4 tiempos (mayor fiabilidad)
- **Suavidad de marcha**, están ocurriendo los “cuatro tiempos” simultáneamente, dando un empuje constante
- **Buenas características**, tiene una curva excepcionalmente alta de relación de transformación de potencia-peso y una buena curva del esfuerzo de torsión a todas las velocidades del motor
- **Menor velocidad de rotación**: el rotor gira a 1/3 de la velocidad del eje, por lo que las piezas principales mueven más lentamente que las de un motor convencional, (mayor fiabilidad)
- **Menores vibraciones**: es un motor de diseño simple y todos los componentes giran en el mismo sentido, en lugar de sufrir las constantes variaciones; las inercias internas del motor son muy pequeñas (no hay bielas, ni volante de inercia, ni recorrido de pistones)

39

5.- Motor Wankel (V)

Desventajas:

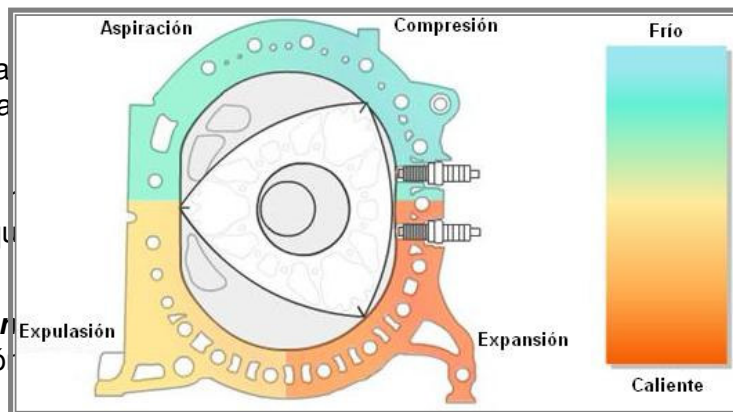
- **Emisiones**: es más complicado ajustarse a las normas de emisiones contaminantes
- **Costos de mantenimiento**: al no estar tan difundido, su mantenimiento resulta costoso
- **Consumo**: la eficiencia termodinámica (relación consumo-potencia) se ve reducida por la forma alargada de las cámaras de combustión y la baja relación de compresión
- **Difícil estanqueidad**: resulta muy difícil aislar cada una de las 3 secciones del cilindro en rotación, que deben ser impermeables unas de otras para un buen funcionamiento
- **Sincronización del encendido**: si se inicia antes de que el pistón rotativo se encuentre en la posición adecuada se empuja en sentido contrario, pudiendo dañar el motor
- **Desequilibrio térmico**: admisión y explosión ocurren en pts fijos del motor

40

5.- Motor Wankel (V)

Desventajas:

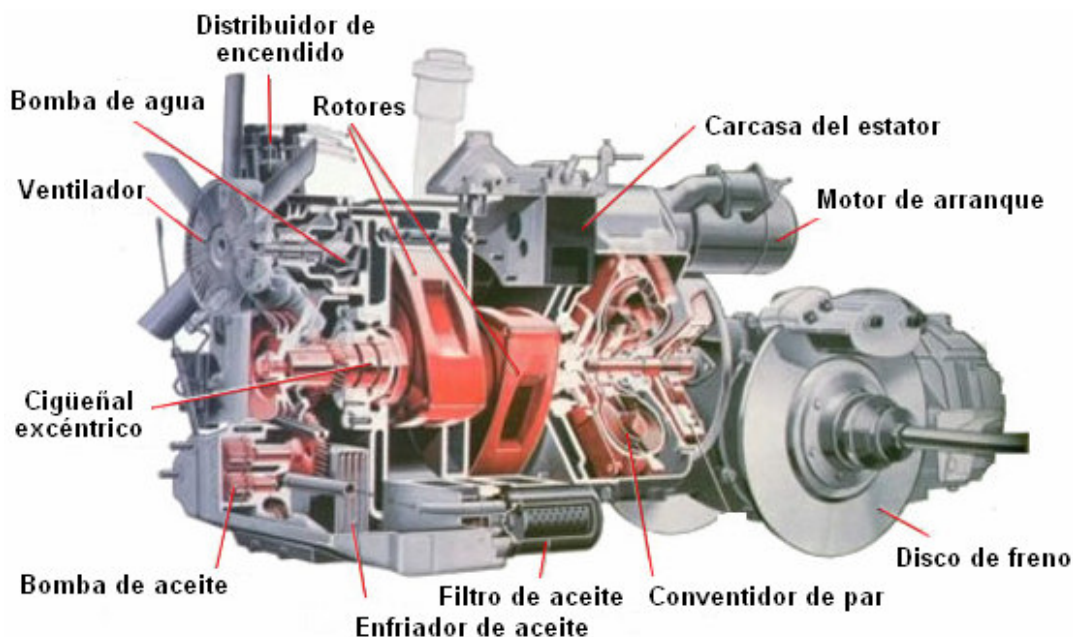
- **Emisiones:** es más complicado ajustarse a las normas de emisiones contaminantes
- **Costos de mantenimiento:** al no estar tan difundido, su mantenimiento resulta costoso
- **Consumo:** la eficiencia es baja por la forma alargada del rotor y la poca compresión
- **Difícil estanqueidad:** el rotor no sella bien el cilindro en rotación, que provoca fugas de gas y funcionamiento irregular
- **Sincronización del encendido:** el rotor no encuentra en la posición correcta el momento de encendido del motor
- **Desequilibrio térmico:** admisión y explosión ocurren en pts fijos del motor



41

5.- Motor Wankel (VI)

Motor Wankel de 2 rotores:



42

6.- Motor Elsbett (I)

Las diferencias entre aceites vegetales (biodiesel) y gasóleo no son significativas en cuanto se refiere a densidad, poder calorífico y número de octanos, pero sí se presenta una notable diferencia en cuanto a viscosidad

Se puede:

- modificar el motor para utilizar biodiesel (puro o en mezcla con diesel)
- modificar el biodiesel para poder utilizarlo como diesel

El **Motor Elsbett** está pensado para **funcionar con biodiesel** mediante la modificación de un motor diesel convencional

Además de que el biodiesel no contiene azufre, el motor quema todo el combustible, por lo que se le puede considerar **un motor limpio**

Tiene una **eficiencia térmica superior al 40%** (un motor gasolina o diesel no supera el 30%), lo que le permite proporcionar más energía mecánica útil

43

6.- Motor Elsbett (II)

No dispone del convencional sistema de enfriamiento

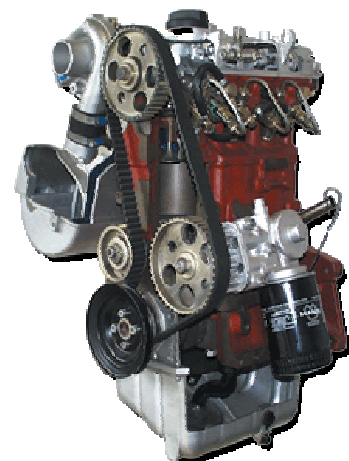
- ahorra piezas, peso y volumen al motor
- le permite trabajar a una T^a más alta $\Rightarrow \uparrow \eta$

Es un motor casi adiabático

- intercambia muy poco calor con el medio
- Evita entre el 25 y el 50% de las pérdidas de energía en refrigeración

La cámara de combustión es esférica

- permite que haya un exceso de aire $\Rightarrow$ todo el combustible se quema
- se estratifica la temperatura del motor
 - el núcleo de la combustión puede llegar a 1.300°C
 - la zona del contacto del pistón no supera 650°C normal en cualquier motor
 - la T de los gases de escape es un poco superior a la de los motores diesel

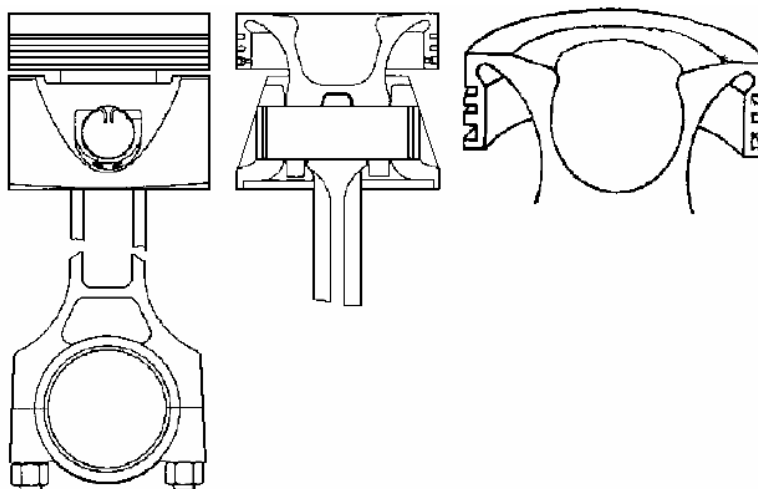


44

6.- Motor Elsbett (III)

Los elementos que le distinguen de un motor diesel convencional son:

- **Un pistón articulado** con la parte superior aislada térmica y acústicamente situado dentro de una cámara de combustión de forma esferoidal

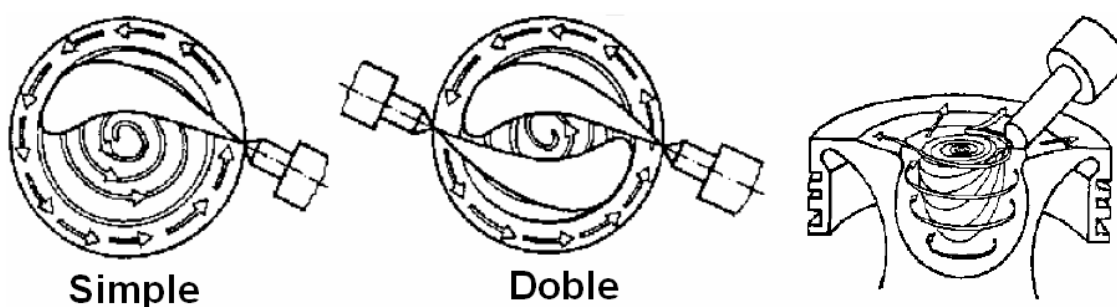


45

6.- Motor Elsbett (III)

Los elementos que le distinguen de un motor diesel convencional son:

- **Un pistón articulado** con la parte superior aislada térmica y acústicamente situado dentro de una cámara de combustión de forma esferoidal
- **Uno o dos inyectores por cilindro**, de un solo agujero y autolimpiables, que inyectan el aceite vegetal a la cámara de combustión tangencialmente y esto permite una perfecta nebulización de la mezcla aire combustible, lo que evita que se hagan depósitos carbonosos



6

6.- Motor Elsbett (III)

Los elementos que le distinguen de un motor diesel convencional son:

- **Un pistón articulado** con la parte superior aislada térmica y acústicamente situado dentro de una cámara de combustión de forma esferoidal
- **Uno o dos inyectores por cilindro**, de un solo agujero y autolimpiables, que inyectan el aceite vegetal a la cámara de combustión tangencialmente y esto permite una perfecta nebulización de la mezcla aire combustible, lo que evita que se hagan depósitos carbonosos
- La **tapa de los cilindros** dispone de una pequeña cámara anular por la cual circula el **aceite lubricante** que se emplea como refrigerante. Ya que el sistema de refrigeración no es con agua, la tapa del cilindro no lleva junta
- Un pequeño **radiador de aceite** permite cerrar el circuito del aceite lubricante-refrigerante

47

6.- Motor Elsbett (IV)

El motor Elsbett es el único sistema que se puede aplicar en cualquier motor diesel con una mínima intervención y por un coste razonable

La intervención en el motor diesel consiste básicamente en:

- anular la cámara de agua del bloque
- cambiar los pistones
- cambiar la tapa de los cilindros
- añadir un radiador para el aceite lubricante-refrigerante
- cambiar los latiguillo y manquitos del circuito de combustible

La única condición es que el motor no disponga de elementos cerámicos

El problema que puede surgir en el funcionamiento del motor está asociado al arranque en frío (bajas T exterior), ya que la elevada viscosidad del biodiesel puede provocar problemas en el bombeo del combustible