

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES



# **DISEÑO DE UN MECANISMO ALTERNATIVO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

Trabajo de Investigación presentado por Luis Fernando King Theissen  
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica.

Guatemala  
2003



**DISEÑO DE UN MECANISMO ALTERNATIVO DE  
TRANSMISIÓN DE POTENCIA DE UN MOTOR  
DE COMBUSTIÓN INTERNA**

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

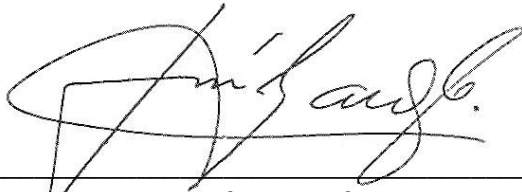


# **DISEÑO DE UN MECANISMO ALTERNATIVO DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA**

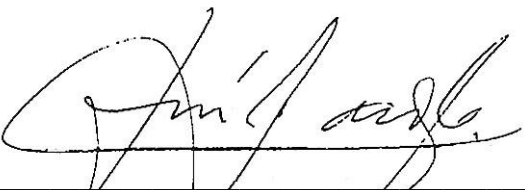
Trabajo de Investigación presentado por Luis Fernando King Theissen  
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica.

Guatemala  
2003

Vo.Bo.

(f)   
Ingeniero José Joaquín Garoz  
Asesor

Tribunal:

(f)   
Ingeniero José Joaquín Garoz

(f)   
Ingeniero Carlos Paredes

(f)   
Ingeniero Manuel Ruano

Fecha de aprobación: Guatemala 7 de Noviembre 2003.

# ÍNDICE

Índice de figuras.....	viii
Índice de tablas.....	x
Resumen.....	xi
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	3
A. DESCRIPCIÓN DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS.....	3
1. Clasificación de los motores.....	3
2. Componentes de un motor.....	8
B. CICLOS DE POTENCIA DE LOS MOTORES.....	11
1. Ciclo de cuatro tiempos.....	11
2. Ciclo de dos tiempos.....	13
C. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UN MOTOR RECIPROCANTE.....	15
1. Propiedades geométricas de los motores reciprocantes.....	16
D. DISEÑO DE LA BIELA.....	17
1. Cálculos de esfuerzos.....	18
2. Manufactura.....	20
III. MARCO OPERATIVO.....	23
A. DESARROLLO DEL CONCEPTO.....	23
1. Comparación del comportamiento funcional.....	24
B. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FUNCIONAL.....	29
1. Cálculo del radio aparente de cigüeñal.....	30
2. Propiedades geométricas del modelo.....	31
C. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.....	37

1. Vista general.....	38
2. Ensamble del modelo.....	39
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	43
V. BIBLIOGRAFÍA.....	45

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No1. Motor de ciclo de cuatro tiempos.....	4
Figura No.2 Motor de ciclo de dos tiempos.....	4
Figura No.3 Motor de movimiento alternativo.....	5
Figura No. 4 Motor de movimiento rotativo.....	6
Figura No.5 Motor radial.....	7
Figura No. 6 Componentes de un motor.....	8
Figura No.7 Motores encendidos por compresión.....	13
Figura No. 8 Cálculo de esfuerzos.....	18
Figura No. 9 Cálculo de esfuerzos.....	19
Figura No. 10 Desarrollo del concepto.....	23
Figura No.11 Comparación del ciclo de cuatro tiempos encendido por chispa.....	25
Figura No12 Carrera de compresión cilindro No. 1.....	26
Figura No13 Carrera de expansión cilindro No. 1.....	26
Figura No14 Carrera de escape cilindro No.1.....	28
Figura No15 Carrera de admisión cilindro No. 1.....	29
Figura No16 Esquema general del motor.....	32
Figura No17 Diagrama de fuerzas del modelo.....	33
Figura No. 18 Simplificación de fuerzas.....	34
Figura No. 19 Deformación esperada por las cargas sobre el modelo de fuerzas.....	35
Figura No.20 Sumatoria de fuerzas del modelo.....	36
Figura No. 21 Vista general.....	38
Figura No. 22 Vista general.....	38
Figura No. 23 Ensamble del modelo.....	39
Figura No. 24 Ensamble del modelo.....	39
Figura No. 25 Ensamble del modelo.....	40
Figura No. 26 Ensamble del modelo.....	40
Figura No. 27 Ensamble del modelo.....	41
Figura No. 28 Ensamble del modelo.....	41

Figura No.29	Ensamble del modelo.....	41
Figura No. 30	Ensamble del modelo.....	42
Figura No. 31	Ensamble del modelo.....	42
Figura No. 32	Conclusiones y recomendaciones.....	44

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla No. 1. Propiedades geométricas de los motores reciprocantes .....	16
Tabla No.2 Manufactura.....	21
Tabla No. 3 Propiedades geométricas del modelo.....	31
Tabla No. 4 Construcción del modelo .....	37

# RESUMEN

En la presente tesis se explora un nuevo concepto para un mecanismo aplicable a un motor de combustión interna. No pretende ser una guía para su construcción específica. Por el contrario propone un modelo físico, construido y maquinado en acero, aluminio y bronce, con el propósito de entender cinéticamente el concepto e iniciar con la discusión de las ventajas y desventajas del mismo. Se presenta las capacidades del modelo y como sus potencialidades tales como; menor peso, menor cantidad de elementos involucrados en el mecanismo un mejor balance cinético, dinámico y de esfuerzos así como su versátil capacidad de compresión variable. Estas potencialidades hacen válido que se permita tomar este documento como una guía para una posterior discusión y desarrollo de modelos específicos en la industria automotriz. Discusión que pudieran dar paso a motores capaces de manejar diferentes combustibles y de responder de mejor manera a las demandas de potencia respondiendo a situaciones de óptimo desempeño y eficiencia.

# I. INTRODUCCIÓN

Desde que se inventó el motor de combustión interna su funcionamiento mecánico básico no ha variado mucho. Siguen siendo de cilindro y pistón. Aunque se han hecho esfuerzos para mejorarlo y modificarlo, no se han obtenido mayores logros. Por ejemplo, se desarrolló un motor rotativo que no tuvo el éxito que se le pronosticaba. Los esfuerzos han sido encaminados a mejorar otras partes del motor, tales como: el sistema de encendido e inyección de combustible, que actualmente funcionan con sincronización electrónica o computarizada. También se ha mejorado la calidad de los materiales haciéndolos más livianos y resistentes, ha sido evidente el desarrollo de la tecnología en materia de combustibles y lubricantes, se ha buscado mayor eficiencia en los motores aumentando la cantidad de válvulas de admisión y de escape, modificando el tamaño, cantidad y calidad de los cojinetes axiales y radiales. De la misma manera la cantidad de ejes de leva y su versatilidad de sincronización ha variado para hacer más eficiente el motor.

Podríamos continuar analizando cada uno de los componentes de los motores actuales y llegaríamos a la conclusión de que se han hecho mejoras notables y esfuerzos millonarios para fabricar mejores motores, sin embargo no es ese el objeto de la presente tesis, sino plantear un nuevo concepto en la transmisión de la fuerza del pistón hacia el volante, sustituyendo a la biela y el cigüeñal por un mecanismo de pivote con biela única de movimiento cónico, que pretende ser más liviano, sencillo y económico. Al mismo tiempo da margen a otras opciones como una carrera de compresión variable que haría posible la utilización de diferentes combustibles. Así mismo

al modificar la relación de tamaño entre los componentes de este sistema, podrían obtenerse potencia y velocidad de motor variables.

Esta tesis no resolvió, ni desarrolló todos los problemas que podrían derivarse al desarrollar este concepto pues no era el objeto construir un motor completo, sino demostrar que este mecanismo funciona, ya que todo el resto de sistemas y mecanismos serian iguales a cualquier motor convencional. Para el efecto se construyó el modelo del mecanismo que se describe con detalle en el desarrollo de este trabajo.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. DESCRIPCIÓN DE LOS MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS

Un motor de combustión interna es el que transforma la energía química en energía mecánica. La cual se hace disponible por lo general a través de un eje giratorio. La energía química es primero convertida en energía térmica por la combustión u oxidación del combustible. Esta energía térmica eleva la temperatura y presión de los gases dentro del cilindro, y luego los gases a alta presión se expanden contra los mecanismos del motor, el cual a través de los eslabones transfiere el movimiento a un eje rotatorio, que se conecta a la transmisión y/o tren de potencia para transmitir energía mecánica rotatoria.

#### 1. Clasificación de los Motores

##### a. Tipos de encendido.

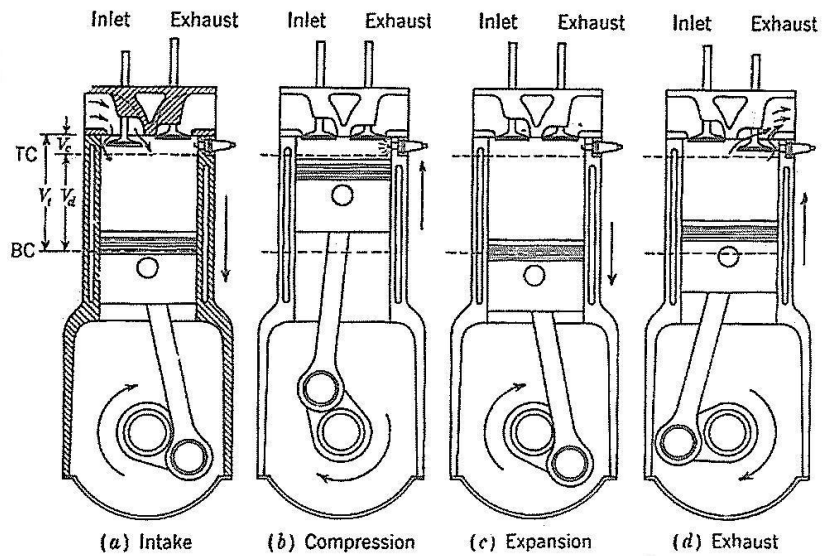
1) *Encendido por chispa (SI)*. Un motor encendido por chispa es aquel en el cual cada ciclo de combustión se inicia con una chispa proveniente de una bujía. Dicha chispa es producida por una descarga de alto voltaje entre dos electrodos los cuales hacen que se inicie la combustión de la mezcla de aire combustible en la cámara de combustión.

2) *Encendido por compresión (a)*. El proceso de combustión se lleva a cabo cuando la mezcla de aire combustible se auto-enciende debido a las altas temperaturas en la cámara de combustión causada por la alta compresión de la mezcla.

## b. Ciclos de potencia de los motores

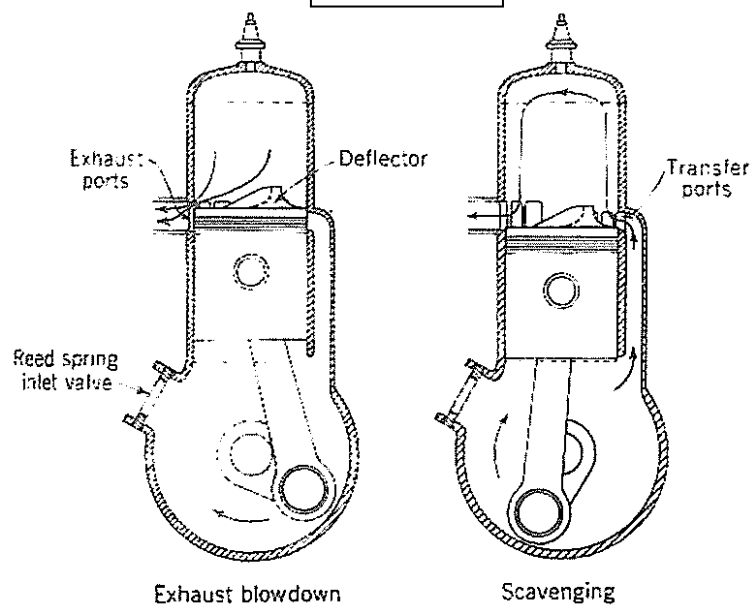
1) *Motor de ciclo de cuatro tiempos.* Rinde un ciclo de potencia por cada cuatro movimientos del pistón, de igual manera efectúa dos revoluciones del cigüeñal por cada ciclo de potencia.

Figura No. 1



2) *Motor de ciclo de dos tiempos.* Un ciclo de dos tiempos experimenta dos movimientos del pistón en una revolución del volante, por cada ciclo de potencia.

Figura No. 2



### c. Localización de las válvulas

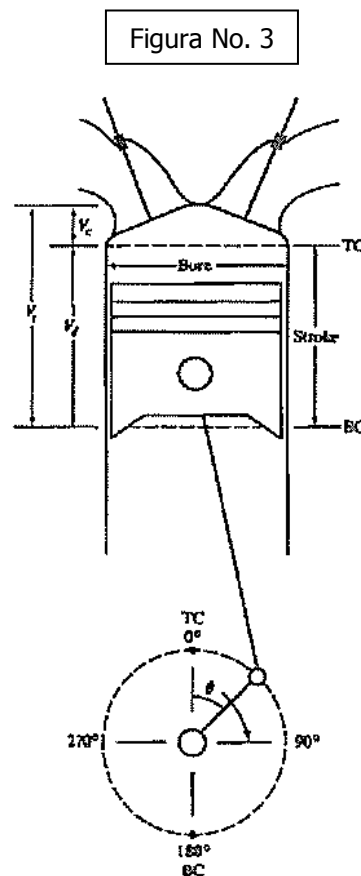
1) *Motor de válvulas a la culata.* También llamado con culata en I.

2) *Motor de válvulas en el bloque.* También llamado con culata en L.

3) *Motor con culata en F.* Posee una válvula en la culata y la otra en el bloque; es poco común.

### d. Diseño básico

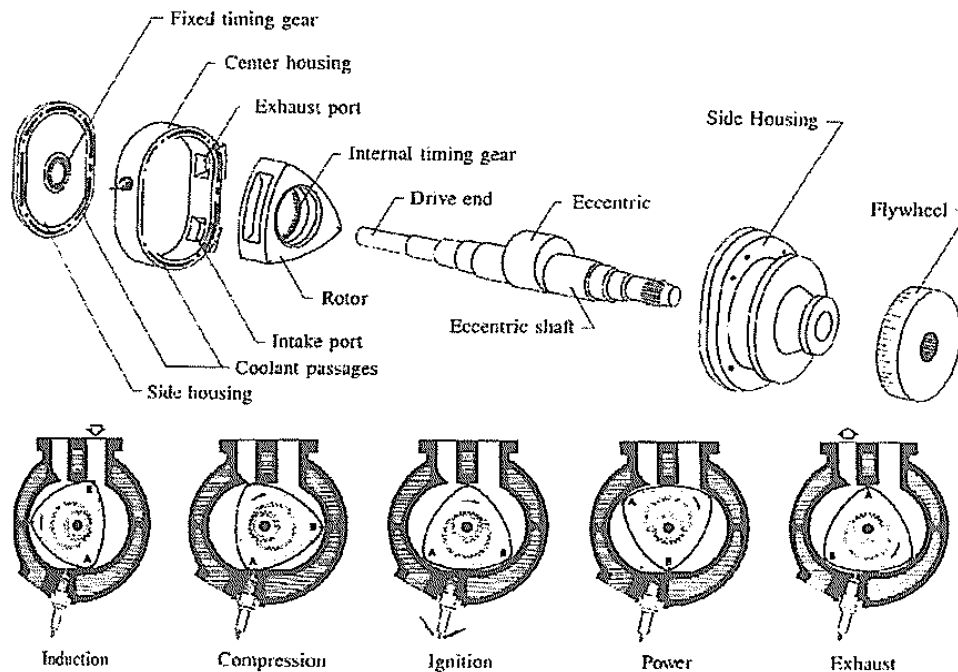
1) *Motor de movimiento alternativo.* El motor tiene uno o más cilindros en los cuales los pistones tienen movimiento alternativo. La cámara de combustión está localizada en el punto más alto del cilindro. La potencia es suministrada a un eje cigüeñal rotativo por medio de eslabonamientos mecánicos con los pistones.



2) *Rotativos.* El motor es fabricado a partir de un estator construido alrededor de un rotor y eje cigüeñal excéntrico. Las

cámaras de combustión se localizan en el bloque que permanece estático. Recientemente este tipo de motor ha sido mejorado con nuevos materiales y procesos de manufactura, es un tipo de motor que promete nuevos logros.

Figura No. 4



#### e. Posición y número de cilindros de los motores de movimiento alternativo

1) *Motor de cilindro único.* Un solo pistón conectado al eje cigüeñal.

2) *Motor en línea.* Los cilindros están posicionados de manera paralela.

3) *Motor en V.* Dos bancos de cilindros con un ángulo entre ellos a lo largo del eje cigüeñal.

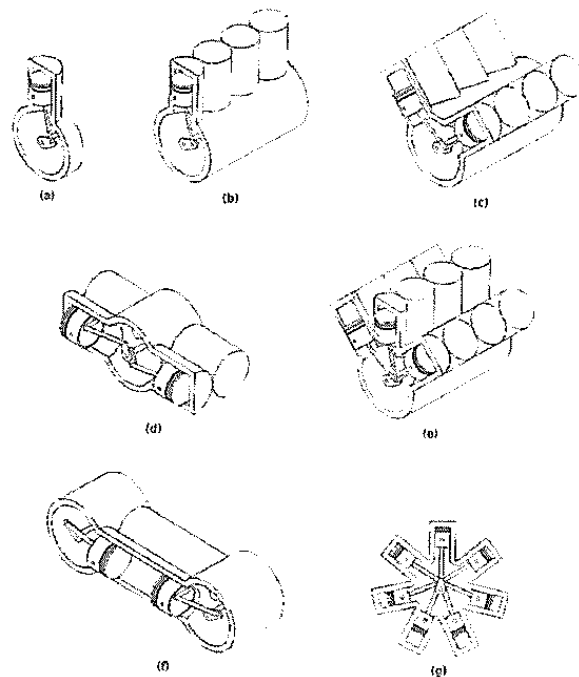
4) *Motor de cilindros opuestos.* Un motor en V con un ángulo de  $180^\circ$  entre los cilindros opuestos.

5) *Motor en W.* Igual al motor en V, solo que con tres bancos de cilindros.

6) *Motor de pistones opuestos.* Dos pistones en cada cilindro con la cámara de combustión en el centro, en medio de los pistones.

7) *Motor radial.* En él, los cilindros se posicionan en un plano circular alrededor del eje central. Las bielas de los pistones están conectadas al eje cigüeñal. El banco de cilindros generalmente consiste de un número impar, variando de 3 a 13 ó más. La operación es muy suave debido a sus características.

Figura No. 5



#### f. Proceso de toma de aire

1) *Motor naturalmente aspirado.* El aire ingresa al motor en las condiciones atmosféricas.

2) *Motor supercargado.* Aspiración que pasa por un compresor accionado por el eje cigüeñal.

3) *Motor turbocargado.* Aspiración que pasa por un arreglo turbina-compresor accionado por los gases de escape.

4) *Motor de aire de admisión comprimido en el bloque.* Sistema usado en motores de dos tiempos que utiliza el bloque como el compresor del aire de admisión.

### g. Método de entrada del combustible

1) *Motor carburado.* Utiliza un carburador que aspira y pulveriza el combustible.

2) *Motor inyectado.* Los inyectores realizan la tarea de introducir el combustible.

### h. Tipo de combustible

1) *Motor de gasolina.*

2) *Motor de diesel.*

3) *Motor de gas.*

4) *Otros.*

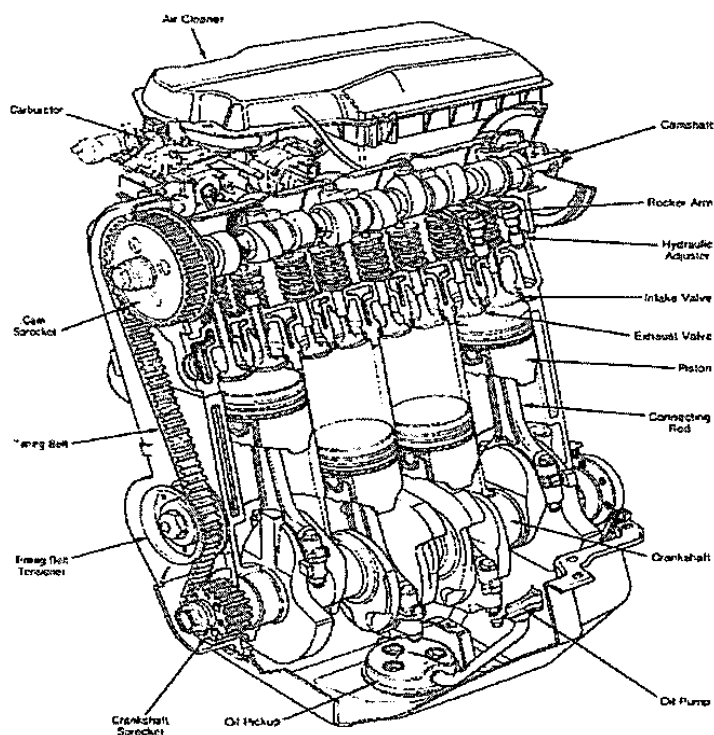
### i. Tipo de enfriamiento

1) *Motor enfriado por aire.*

2) *Motor enfriado por agua u otro líquido.*

## 2. Componentes de un Motor

Figura No. 6



Las diferentes partes que componen un motor de combustión interna de movimiento alternativo son:

**a. Bloque.** Cuerpo del motor que contiene los cilindros, hecho de hierro fundido o aluminio. El bloque de los motores enfriados por agua incluye camisas de enfriamiento alrededor de los cilindros. En los enfriados por aire la superficie exterior del bloque tiene aletas de enfriamiento.

**b. Eje de levas.** Eje utilizado para empujar las válvulas y abrirlas en el momento preciso en el ciclo del motor, ya sea en forma directa o mediante eslabonamientos hidráulicos. Puede estar localizado en la cabeza del motor (culata) o dentro de la aceitera. Generalmente es fabricado con acero forjado o hierro fundido y es accionado por medio de una banda o cadena. Para reducir su peso, algunos ejes de levas son hechos a partir de un eje hueco con los lóbulos de las levas instalados a presión.

**c. Carburador.** Dispositivo de flujo Venturi. Éste dosifica la cantidad apropiada de combustible en el flujo de aire de admisión mediante un diferencial de presión. Actualmente ya no se utiliza. Ha sido sustituido por los sistemas de inyección de combustible.

**d. Cámara de combustión.** El espacio del cilindro entre la cabeza del pistón y la culata donde ocurre la combustión. La combustión ocurre cerca del punto muerto superior de la posición del pistón.

**e. Biela.** Pieza que conecta el pistón con el eje cigüeñal, fabricada de acero o aleaciones en la mayoría de motores, pero puede ser de aluminio en motores pequeños.

**f. Aletas de enfriamiento.** Aletas metálicas en la superficie externa de los cilindros y culata de un motor enfriado por aire. Enfrían los cilindros por medio de transferencia de calor por conducción y convección.

**g. Aceitera.** Parte del bloque del motor que rodea al eje cigüeñal. Está conectado al depósito del aceite lubricante.

**h. Eje cigüeñal.** Eje rotativo a través del cual el trabajo realizado por el motor es suministrado a los sistemas externos. Está conectado al bloque del motor por medio de bujes que permiten su rotación cuando los pistones

ejercen fuerza sobre él por medio de las bielas que están conectadas a desfase en el mismo. La mayoría son fabricados de acero forjado o hierro fundido.

**i. Cilindros.** Partes del bloque del motor donde los pistones realizan su movimiento alternativo. Sus paredes son duras y altamente pulidas. Pueden ser maquinados directamente en el bloque o poseer camisas de metal duro metidos a presión en el mismo. Las camisas pueden ser secas, sin contacto con el agua de enfriamiento o húmedas, estando en contacto con el sistema de enfriamiento.

**j. Múltiple de escape.** Sistema de tubería que conduce los gases de escape hacia fuera del motor, usualmente está hecho de hierro fundido.

**k. Candela de resistencia (glow plug).** Pequeña resistencia eléctrica montada dentro de la cámara de combustión de varios motores encendidos por compresión. Utilizada para precalentar la cámara de tal forma que la combustión ocurra cuando el motor está frío. Se apaga luego de que el motor arranca.

**l. Cabeza (Culata).** Pieza que cierra la parte alta de los cilindros y que, usualmente, contiene parte del volumen de huelgo de la cámara de combustión. Se fabrica de hierro fundido o aluminio y se fija al bloque del motor con pernos debidamente torqueados. Usualmente contiene la bujía y las válvulas en el caso de los motores encendidos por chispa, y los inyectores en el caso de los encendidos por compresión. Algunos motores tienen también montado en ella el eje de levas.

**m. Múltiple de admisión.** Sistema de tuberías que conducen el aire entrante a los cilindros. Puede ser de materiales compuestos, plástico o metal.

**n. Pistón.** Masa en movimiento alternado que transmite las fuerzas de presión de la cámara de combustión al eje cigüeñal. Su parte alta se denomina corona y sus lados, faldas.

**o. Anillos de pistón.** Anillos metálicos que se posicionan en surcos circunferenciales alrededor del pistón y forman una superficie deslizante contra las paredes del cilindro. Cerca de la parte alta del pistón se posicionan dos o más anillos de compresión. Su propósito es formar un sello entre el pistón y las

paredes del cilindro, así como restringir el paso de los gases de combustión hacia la aceitera. Bajo los anillos de compresión se sitúa otro anillo de lubricación, el cual asiste la lubricación de las paredes y reduce el consumo de aceite.

**p. Bujía.** Dispositivo eléctrico utilizado para iniciar la combustión en los motores encendidos por chispa. Crea una descarga de alto voltaje a través de un par de electrodos. Se fabrican en metal rodeado de un aislamiento cerámico.

**q. Radiador.** Intercambiador líquido-aire que remueve el calor del líquido de enfriamiento del motor luego de que éste ha intercambiado calor con el bloque.

**r. Válvulas.** Usadas para permitir el flujo de carga de mezcla aire-combustible hacia adentro y afuera de los cilindros en el tiempo apropiado en el ciclo. Generalmente se fabrican de acero forjado.

## **B. CICLOS DE POTENCIA DE LOS MOTORES**

La mayoría de motores de combustión interna operan ya sea en un ciclo de cuatro tiempos o en uno de dos tiempos. Estos ciclos básicos son estándar para todos los motores, con sólo pequeñas variaciones de un diseño a otro.

### **1. Ciclo de cuatro tiempos**

#### **a. Motores encendidos por chispa.**

1) *Primer tiempo: Admisión.* El pistón viaja del punto muerto superior (TDC por sus iniciales en inglés) hacia el punto muerto inferior (BDC por sus iniciales en inglés) con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada. El efecto de este movimiento es la creación de un vacío que produce una presión diferencial que hace que el aire viaje hacia el interior de la cámara de combustión por medio del múltiple de admisión. A medida que el aire viaja

por el sistema, se agrega el combustible en la cantidad adecuada ya sea por medio de inyectores o mediante un carburador.

2) *Segundo tiempo: Compresión.* Cuando el pistón alcanza el BDC, la válvula de admisión se cierra y el pistón vuelve a viajar al TDC con todas las válvulas cerradas. Esto comprime la mezcla de aire-combustible incrementando su presión y temperatura. El tiempo finito requerido para cerrar la válvula de admisión significa que la compresión no empieza sino hasta un tiempo transcurrido el BDC. Cerca del final de la carrera de compresión, la bujía es accionada y la combustión se inicia.

3) *Combustión.* La combustión de la mezcla ocurre en un corto tiempo, con el pistón cerca del TDC. Comienza cerca del final de la carrera de compresión y se alarga hasta un poco pasado el TDC en la carrera de potencia. La temperatura y presión de la cámara aumenta como consecuencia del cambio de composición química de la mezcla a gases de combustión.

4) *Tercer tiempo: Expansión o carrera de potencia.* Con todas las válvulas cerradas, la alta presión creada por el proceso de combustión empuja el pistón hacia abajo, produciendo trabajo útil en el ciclo. Como consecuencia del incremento de volumen, la presión y temperatura disminuyen.

5) *Resople de escape (exhaust blowdown).* Casi al final de la carrera de potencia, la válvula de escape se abre. La presión y temperatura de la cámara son aún un poco más altas que las de los alrededores, lo cual crea un diferencial de presión que empuja algunos de los gases de escape hacia fuera de los cilindros y equilibra las presiones.

6) *Cuarto tiempo: Escape.* Cuando el pistón llega al BDC la cámara ya se encuentra a presión atmosférica, pero llena de gases. El pistón, entonces, empuja estos gases hacia fuera de los cilindros mientras viaja hacia el TDC (la válvula de escape está todavía abierta). El único volumen que queda dentro del cilindro es el de huelgo. Cerca del TDC, la válvula de admisión se abre nuevamente para iniciar otro ciclo. En este punto, ocurre un traslape de válvulas de admisión y escape, ambas están abiertas al mismo tiempo.

**b. Motores encendidos por compresión.** Es similar al de los motores encendidos por chispa, con las siguientes diferencias:

1) En la carrera de admisión se succiona aire sin combustible.

2) Sólo aire es comprimido en esta carrera, por lo que se permite un valor más alto en temperatura y presión. Casi al final de la carrera, el combustible es inyectado directamente a la cámara de combustión donde se mezcla con el aire caliente. Esto hace que el combustible se evapore y se auto encienda, iniciando la combustión.

3) La combustión se desarrolla completamente muy cerca del TDC y continúa a presión casi constante hasta que la inyección de combustible cesa y el pistón comienza a viajar hacia el BDC.

4) La carrera de potencia continúa mientras que el pistón viaja hacia el BDC.

Figura No. 7

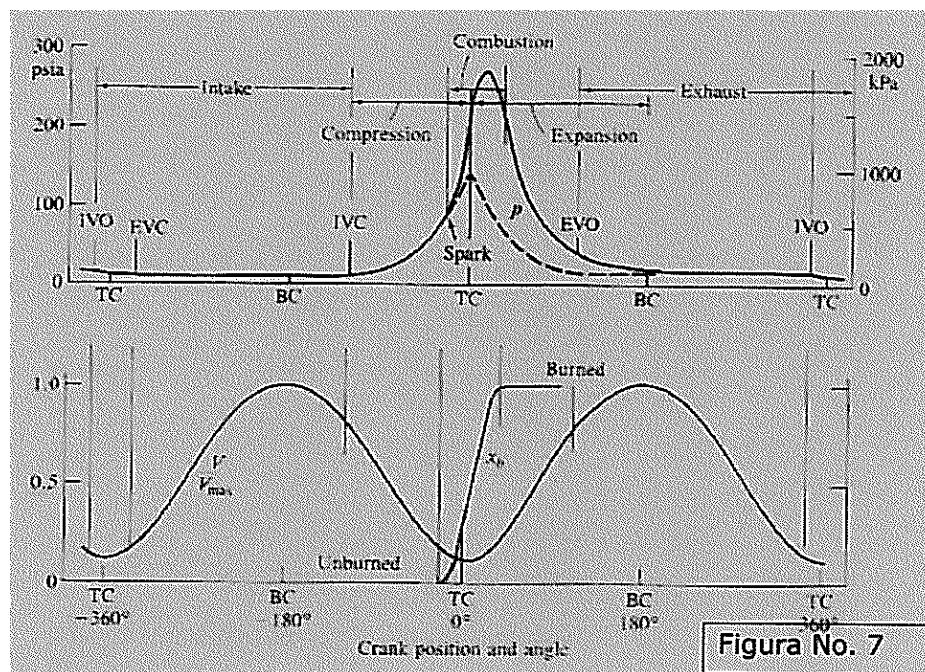


Figura No. 7

## 2. Ciclo de dos tiempos

### a. Motores encendidos por chispa.

1) *Combustión*. Con el pistón en el TDC, la combustión tiene lugar muy rápido elevando la temperatura y presión a valores máximos, casi a volumen constante.

2) *Primer tiempo: Expansión*. La alta presión y temperatura creada por la combustión hace al pistón viajar del TDC hacia el BDC produciendo trabajo útil y disminuyendo los valores de presión y temperatura debidos al incremento del volumen.

3) *Inicio del escape*. La válvula de escape se abre 750 antes del BDC creando un diferencial de presión que impulsa un poco de gases hacia fuera de la cámara e igualando la presión con la de los alrededores. La válvula puede ser también un puerto de escape localizado en el lado de la pared del cilindro que es descubierto por el pistón a medida que viaja hacia el BDC.

4) *Admisión y barrido*. Cuando el inicio del escape está casi completado, cerca de 50° antes del BDC, el puerto de admisión es descubierto por el pistón y la mezcla de aire-combustible entra a la cámara bajo presión. Esta mezcla impulsa muchos de los gases de escape hacia fuera y llena la cámara con una mezcla fresca. El pistón pasa el BDC para luego cubrir nuevamente el puerto de admisión y finalmente el de escape (o la válvula de escape se cierra). La presión a la cual el aire entra a la cámara se establece de una de dos formas: por medio de un supercargador o por compresión a través del cárter.

5) *Segundo Tiempo: Compresión*. Con todas las válvulas (o puertos) cerradas, el pistón viaja hacia el TDC y comprime la mezcla a una alta presión y temperatura. Cerca del final de esta carrera se enciende la bujía para que cuando el pistón llegue al TDC la combustión tenga lugar y comience el siguiente ciclo.

**b. Motores encendidos por compresión.** El ciclo es muy similar al de los encendidos por chispa, excepto por dos cambios:

1) No se agrega combustible al aire que ingresa, por lo que la compresión es realizada sólo con aire.

2) Se localiza un inyector en vez de una bujía que inyecta el combustible cerca del final de la carrera de compresión. Al entrar en la cámara caliente y comprimida, éste se mezcla con el aire y se auto enciende, iniciando la combustión.

## **C. CARACTERÍSTICAS IMPORTANTES DE UN MOTOR RECIPROCANTE**

Algunas de las relaciones geométricas básicas que caracterizan la operación y desarrollo de un motor, y que a su vez son los factores más importantes que un usuario busca en un motor son:

- Su funcionamiento en el intervalo operativo.
- El combustible consumido en su intervalo operativo y el costo del combustible requerido.
- El ruido y las emisiones contaminantes producidas por el motor en el intervalo operativo.
- El costo inicial del motor y su instalación.
- La rentabilidad y durabilidad del motor, los requerimientos de mantenimiento y en qué forma estos afectan los costos operativos y disponibilidad del motor.

La ejecución de un motor está mejor definida por:

- La potencia máxima (o el máximo torque) disponible a cada velocidad con el rango operativo más útil del motor.
- El rango de velocidad y de potencia es satisfactorio.

Algunas de las definiciones que nos ayudan a entender los parámetros de operación de un motor son:

- **Razón de Potencia Máxima.** Es la máxima potencia que un motor puede desarrollar en períodos cortos de operación.

- **Razón de Potencia Normal.** La potencia máxima que un motor puede desarrollar en operación continua.

- **Razón de velocidad.** Es la velocidad rotacional del cigüeñal a la cual se desarrolla la razón de potencia.

## 1. Propiedades geométricas de los motores reciprocantes.

Los pistones barren un volumen máximo y uno mínimo, al espacio que queda sin ser barrido se le llama volumen de huelgo ( $V_c$ ) el cual define la razón de compresión de un motor recíprocante, siendo  $V_d$  el volumen total desplazado tenemos:

$$r_c = \frac{\text{volumen máximo en el cilindro}}{\text{volumen mínimo en el cilindro}} = \frac{V_d + V_c}{V_c}$$

Otros parámetros importantes son:

a. Razón de la longitud de la biela respecto al radio del cigüeñal:

$$R = \frac{l}{a}$$

b. Razón del diámetro del cilindro respecto a la carrera del pistón:

$$R_{bs} = \frac{B}{L}$$

Para este trabajo es de mucha utilidad saber que los parámetros típicos para esas razones son:

Tabla No. 1

	<b>rc</b>	<b>B/L</b>	<b>R</b>
Motores SI	8 - 12		
Motores CI	12 - 24		
Motores Pequeños		0.8 - 1.2	3 - 4
Motores Grandes CI		0.5	5 - 9

El volumen del cilindro en cualquier posición angular del cigüeñal es:

$$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s)$$

Donde s es:

$$S = a \cos \theta + (l^2 - a^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$$

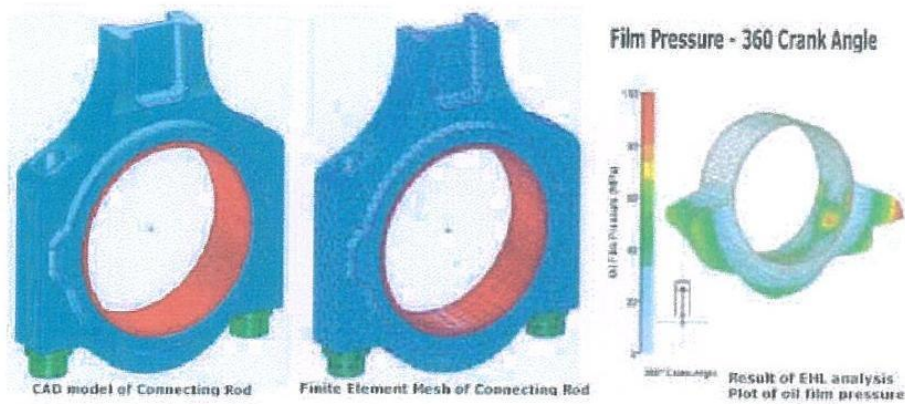
#### **D. DISEÑO DE LA BIELA**

El diseño de la biela implica ciertas consideraciones muy prácticas, tales como el largo de la biela. Se ha acostumbrado hacerlo lo mas largo posible, para evitar fuerzas secundarias y que en teoría el llenado del cilindro sea más eficiente. En la práctica se ha probado que es posible reducir la longitud de la biela desde 3.8 hasta 4.5 veces el radio del cigüeñal aunque sea más formalmente preferido 3.5 -3.75 sin ningún efecto adverso.

El diámetro del "muñón" del cigüeñal también sigue esta misma tendencia, los valores están alrededor de 0.58 -0.60 veces el diámetro del pistón para motores de gasolina y 0.65 para motores diesel. En los motores diesel turbo-cargados grandes estos valores tienden a ser más grandes, a veces arriba de 0.7. Los cojinetes están determinados por programas específicamente elaborados por los fabricantes, sin embargo estos valores nos dan una idea de las proporciones reales de los motores actuales.

**1. Cálculos de Esfuerzos.** El perfil en I es la más utilizada para las bielas, a excepción de algunos motores de dos tiempos con muy poco esfuerzo, el cual tiene una sección ovalada.

Figura No. 8



El corte transversal del perfil debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las cargas de compresión aplicada por la presión de combustión sobre el cilindro y las fuerzas de tensión resultado de la inercia de los pistones y el pasador, al mismo tiempo que debe ser lo suficientemente fuerte para soportar las cargas de pandeo y prevenir las deflexiones excesivas en ambos extremos. Los diseñadores tienden a usar las técnicas de esfuerzo comparativo para diseñar la nueva biela, ya que la mayor parte de la forma de la biela esta dictada por las dimensiones básicas y por su manufactura. Se utilizan algunas formulas como:

$$\text{Esfuerzo de compresión} = \frac{\text{Presión del gas} * \text{área del pistón}}{\text{área de sección transversal del perfil}}$$

$$\text{Esfuerzo de tensión} = \frac{Y * \omega^2 * a * W}{12g}$$

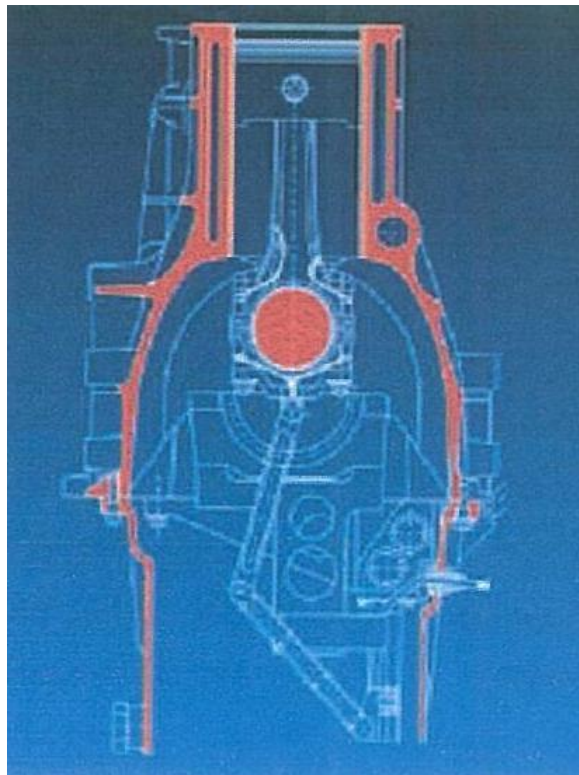
En los motores de carreras, la carga de la inercia es el factor limitante. En los motores diesel, la presión del gas puede exceder los valores nominales, por lo tanto se recomienda que la presión del

cilindro no exceda en 50% sobre los valores normales que se deben usar cuando se calculan los esfuerzos de tensión.

Para mejores resultados, el extremo grande de la biela debe partirse perpendicularmente al eje del cilindro, algunas otras particiones suelen hacerse pero los resultados no son tan buenos.

Por ejemplo Vandervell Products ha instalado un aparejo especial en cual se pueden medir las deflexiones y evaluar la rigidez. Si el ojo se distorsiona demasiado, puede provocar fatiga del material o que la chumacera se juegue (para lo que convendría una cuna ovalada).

Figura No. 9



Dado que la mejor forma para que la biela abrace el muñón del cigüeñal es partiendo el ojo de la biela a la mitad, perpendicular al eje del pistón. Esta partición usualmente está sujeta con tornillo y tuerca aunque tradicionalmente se hace dentada la unión, se ha

demostrado que no se logra contacto uniforme en toda la superficie, sin embargo le proporciona rigidez que es deseable para un motor de larga duración. Los pernos se pueden hacer de acero de alta tensión En 16T, los cuales deben estar lo suficientemente apretados para que la carga logre abrazar los cojinetes y sobreponerse a la fuerza de inercia del pistón y la biela. Para tener valores consistentes de torque, la superficie de la tuerca y la cabeza del perno deben estar pulidos, así como las protuberancias que las fijan ser lo suficientemente fuertes para que no se distorsionen con la carga.

**2. Manufactura.** Usualmente las bielas están hechas de acero forjado pero la tendencia en motores de gasolina es usar fundiciones de acero o forjas sinterizadas maleables o de grafito esferoidal (SG). Materiales como el acero En 155 o En 16T tienden a hacer los más usados en esas forjas, sin embargo, el En 24 es usado en muchos motores de carreras y las aleaciones de titanio son utilizadas en algunos casos.

En la producción en volumen, tienen muchas ventajas en el uso de piezas forjadas, ambos en parte al costo y al control de proveedores. El extremo del ojo grande debe estar formado para permitir que la biela pueda ser maquinada y la partición de la biela debe estar formado con una costilla de refuerzo. Sin embargo, el ángulo mínimo que permiten las forjas esta alrededor de 7 grados.

Se debe tomar en cuenta las variaciones de la forja en el extremo pequeño de la biela, debe ser formado como un ovalo con un radio entre 1.5 a 2 mm mas pequeño. El perfil debe coincidir suavemente con ambos extremos, por resistencia y por facilidad de manufactura.

Generalmente se colocan pequeños lóbulos en los extremos de la biela, los cuales son maquinados automáticamente para lograr balancear la biela.

En la parte superior de la biela se le hace una protuberancia, la cual es luego maquinada, haciéndole un orificio el cual sirve como embudo para la lubricación de sacudida, que es generalmente usada en ese lugar.

En el diseño de las chumaceras para las bielas se toman en cuenta las cargas que se obtienen a través de un diagrama polar, pero lo que es importante es que la capa de aceite se mantenga sobre un área lo suficientemente grande para mantener la carga.

Por ejemplo, tenemos que para un fabricante Vandervell las capacidades de sus productos son:

Tabla No. 2

			<b>Cobre-Plomo con cubierta de Plomo-Indio</b>	
Babbit	Micro-Babbit	Aluminio/estaño	VP1	VP2
13.5 MN/m <sup>2</sup>	13.5 MN/m <sup>2</sup>	28 MN/m <sup>2</sup>	62 MN/m <sup>2</sup>	41-45 MN/m <sup>2</sup>

Las dimensiones precisas son derivadas de programas de computadoras basados en el estudio de la película de aceite, y el criterio de resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión y adherencia.

Un problema que afecta todos materiales en los motores, es la alta temperatura. La temperatura cerca de los 170°C la viscosidad de

los aceites es bastante baja y la lubricación de los cojinetes se vuelve precaria, además es importante hacer notar que la temperatura en el extremo grande de la biela es más alta, 30°C o 40°C más que en la aceitera. Por lo tanto, si la temperatura en el bulbo llega a 130°C es muy probable que los cojinetes fallen prematuramente.

Con el incremento del uso de turbocargadores, las cargas en los cojinetes son aun mayores, y debido a ello se recomienda el uso de cojinetes de aluminio-silicio por sus propiedades superiores de alta resistencia al desgaste y a la fatiga. Un material típico contiene 11% de silicio y 1% de cobre, el resto es aluminio con una película de 0.013 - 0.020 mm de plomo.

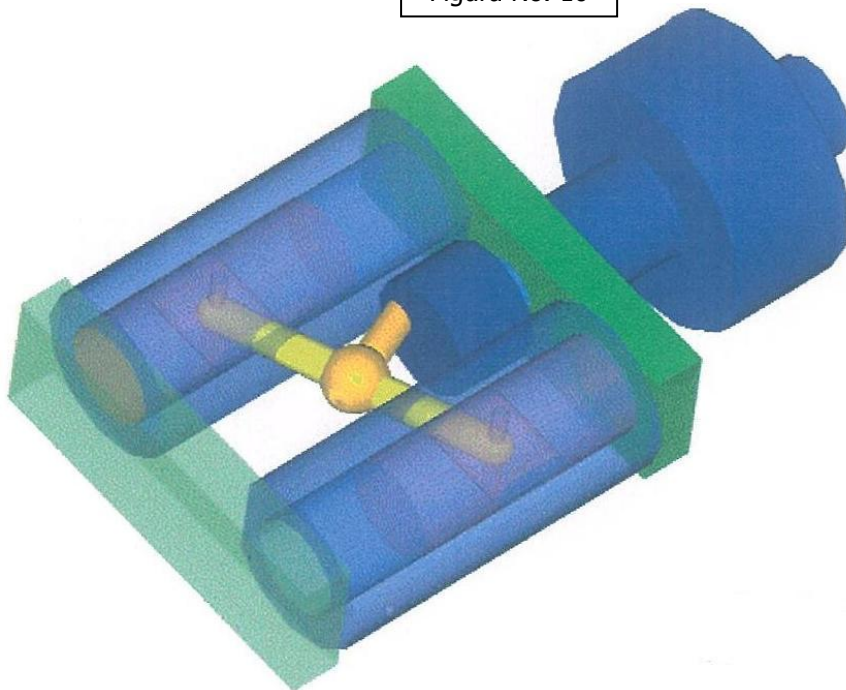
# III. MARCO OPERATIVO

## A. DESARROLLO DEL CONCEPTO

El concepto se basa en una idea muy personal. La idea surgió al analizar el mecanismo de motores con cilindros opuestos. Se estimó que se podría aprovechar mejor la energía de la cantidad de movimiento (momentun lineal), al eliminar los esfuerzos perpendiculares de los pistones y el cigüeñal que disipan energía innecesariamente, pues deben compensarse en le siguiente ciclo de potencia. Se pensó que una menor cantidad de bielas y un mecanismo diferente harían un motor más eficiente y menos complicado.

La abstracción de que un movimiento rectilíneo puede transformarse de un movimiento rotatorio por medio de un mecanismo en forma de T pivoteado, hizo posible construir un modelo que demostró que, efectivamente, el mecanismo funciona.

Figura No. 10



## **1. Comparación del comportamiento funcional.**

Para entender cómo funciona el concepto se presenta una serie de diagramas donde se compara la actuación del mecanismo con la de un motor con cigüeñal convencional en un ciclo de cuatro tiempos, cuatro cilindros encendido por chispa.

Figura No. 11

## COMPARACIÓN DEL CICLO DE CUARTO TIEMPOS ENCENDIDO POR CHISPA

De un motor con cigüeñal y del modelo respecto al cilindro No. 1.

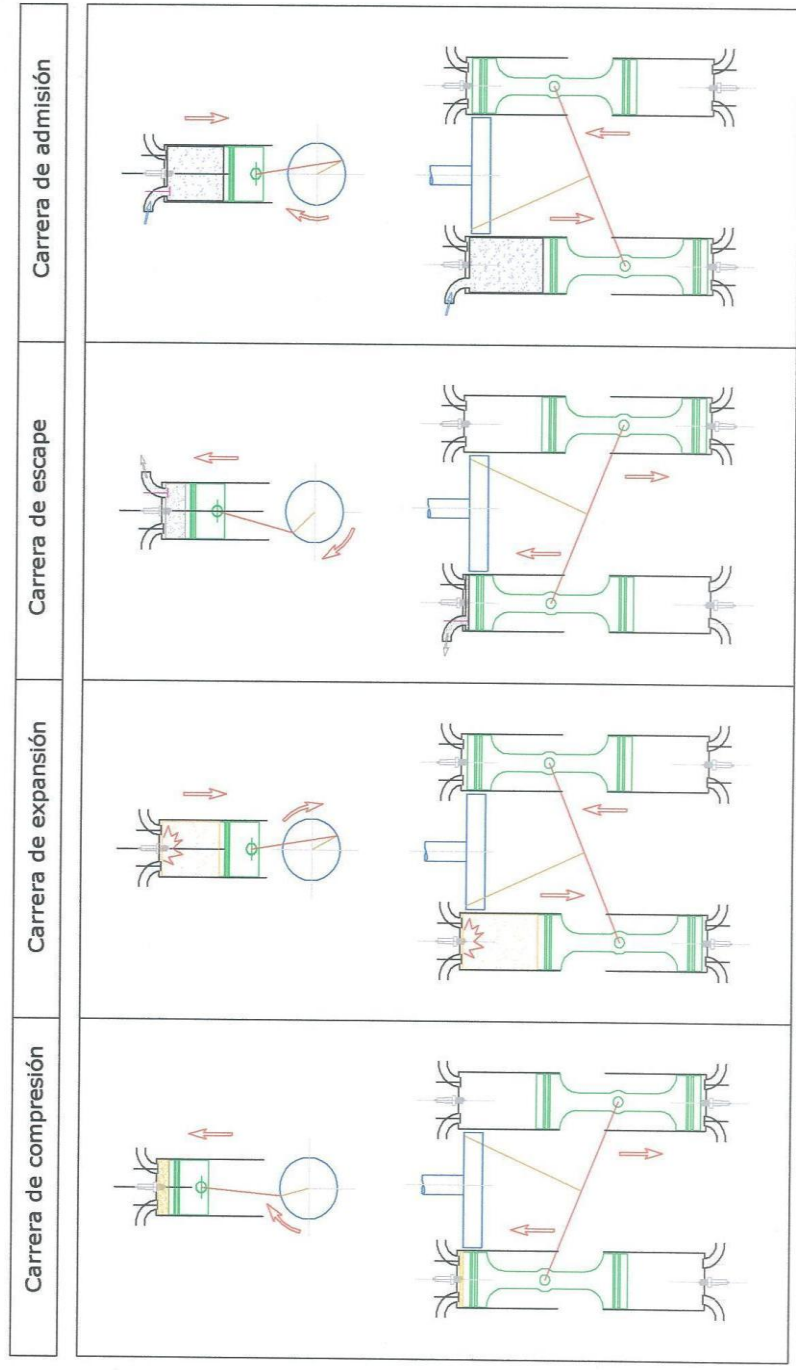
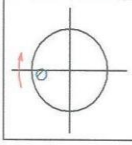
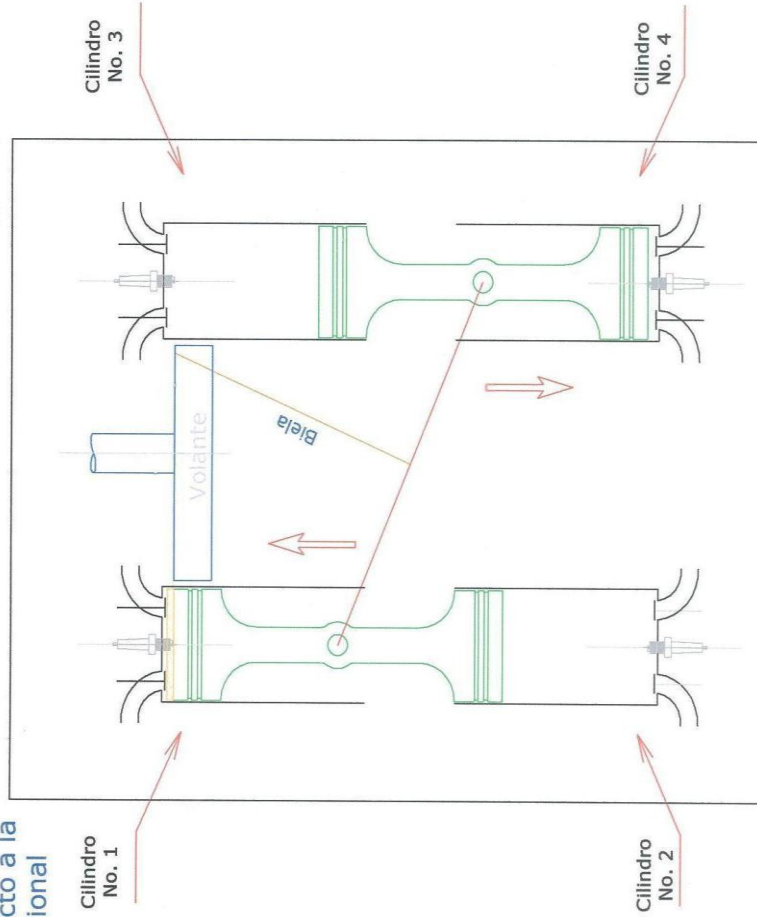
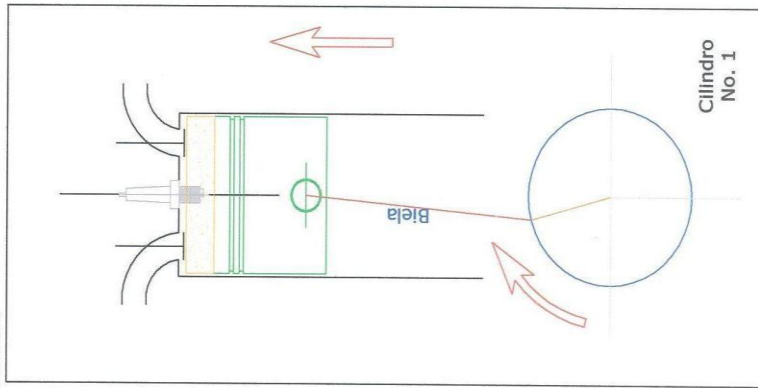
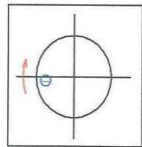


Figura No. 12

### CARRERA DE COMPRESIÓN CILINDRO No.1

Rotación del volante respecto a la biela de un motor convencional con cigüeñal.



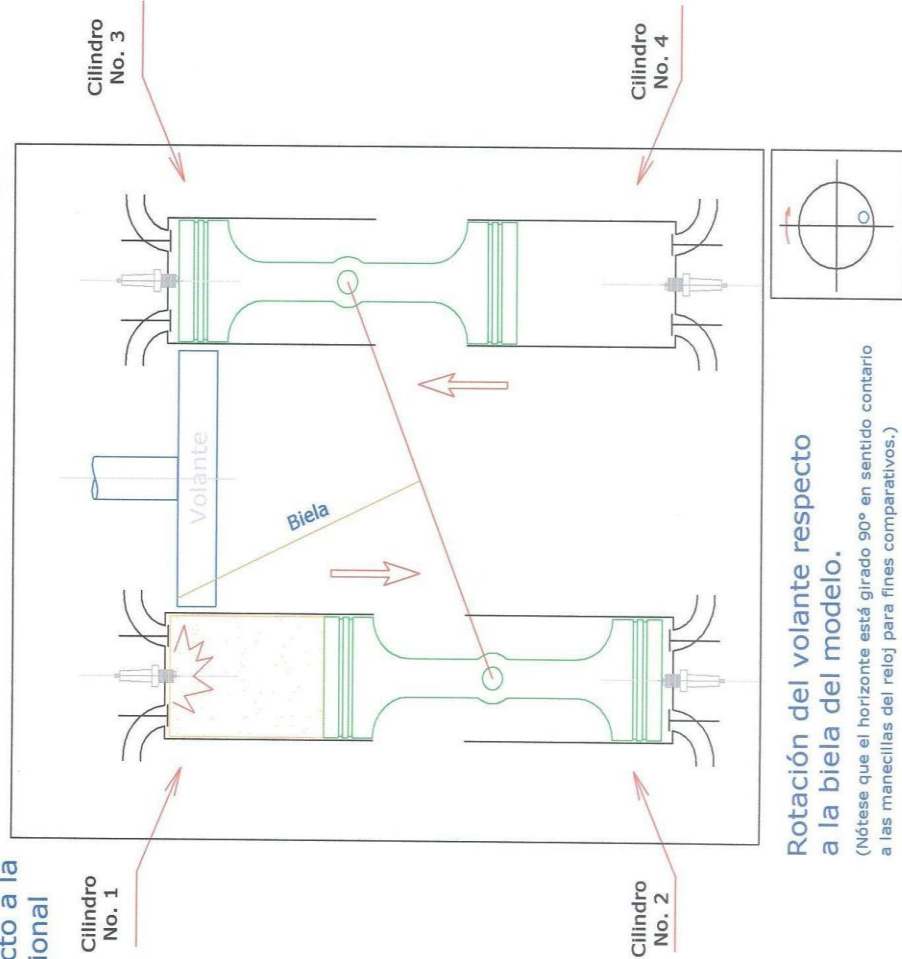
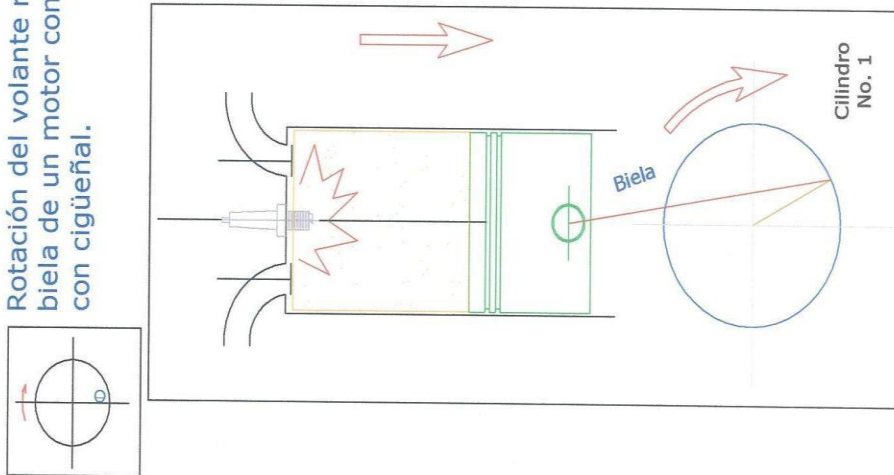
Rotación del volante respecto a la biela del modelo.

(Nótese que el horizonte está girado 90° en sentido contrario a las manecillas del reloj para fines comparativos.)

Figura No. 13

### CARRERA DE EXPANSIÓN CILINDRO No.1

Rotación del volante respecto a la biela de un motor convencional con cigüeñal.



Rotación del volante respecto a la biela del modelo.  
(Nótese que el horizonte está girado 90° en sentido contrario a las manecillas del reloj para fines comparativos.)

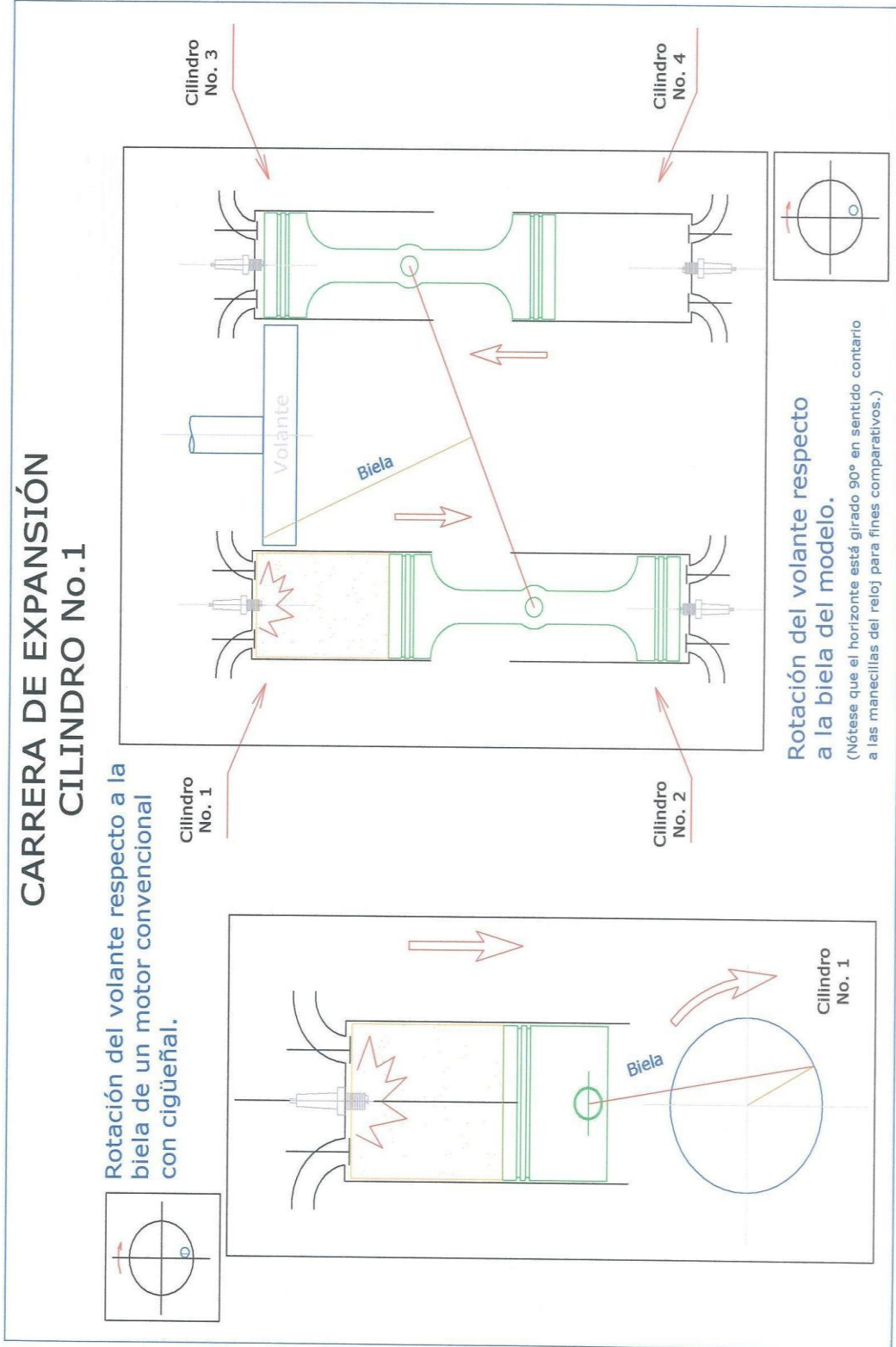
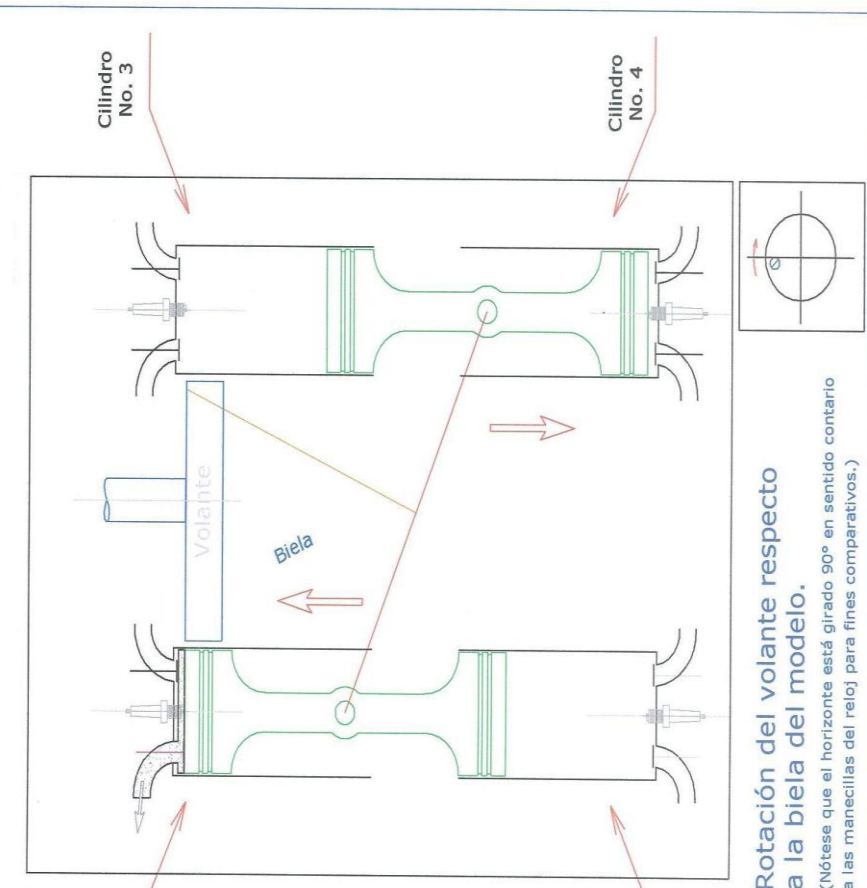
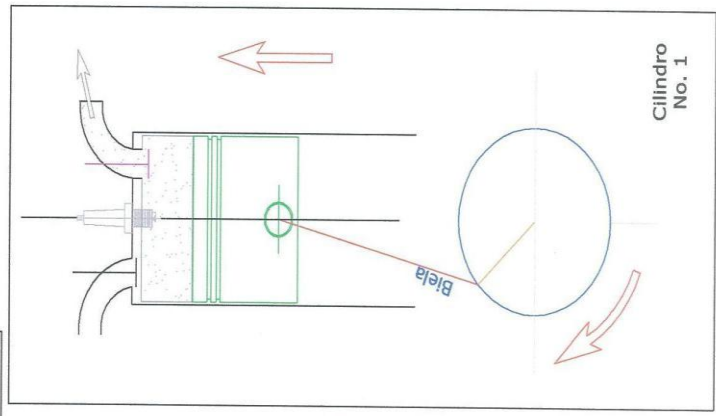
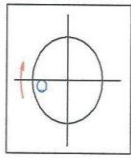


Figura No. 14

### CARRERA DE ESCAPE CILINDRO No.1

Rotación del volante respecto a la biela de un motor convencional con cigüeñal.



Rotación del volante respecto a la biela del modelo.

(Nótese que el horizonte está girado 90° en sentido contrario a las manecillas del reloj para fines comparativos.)

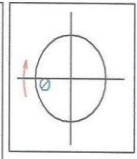
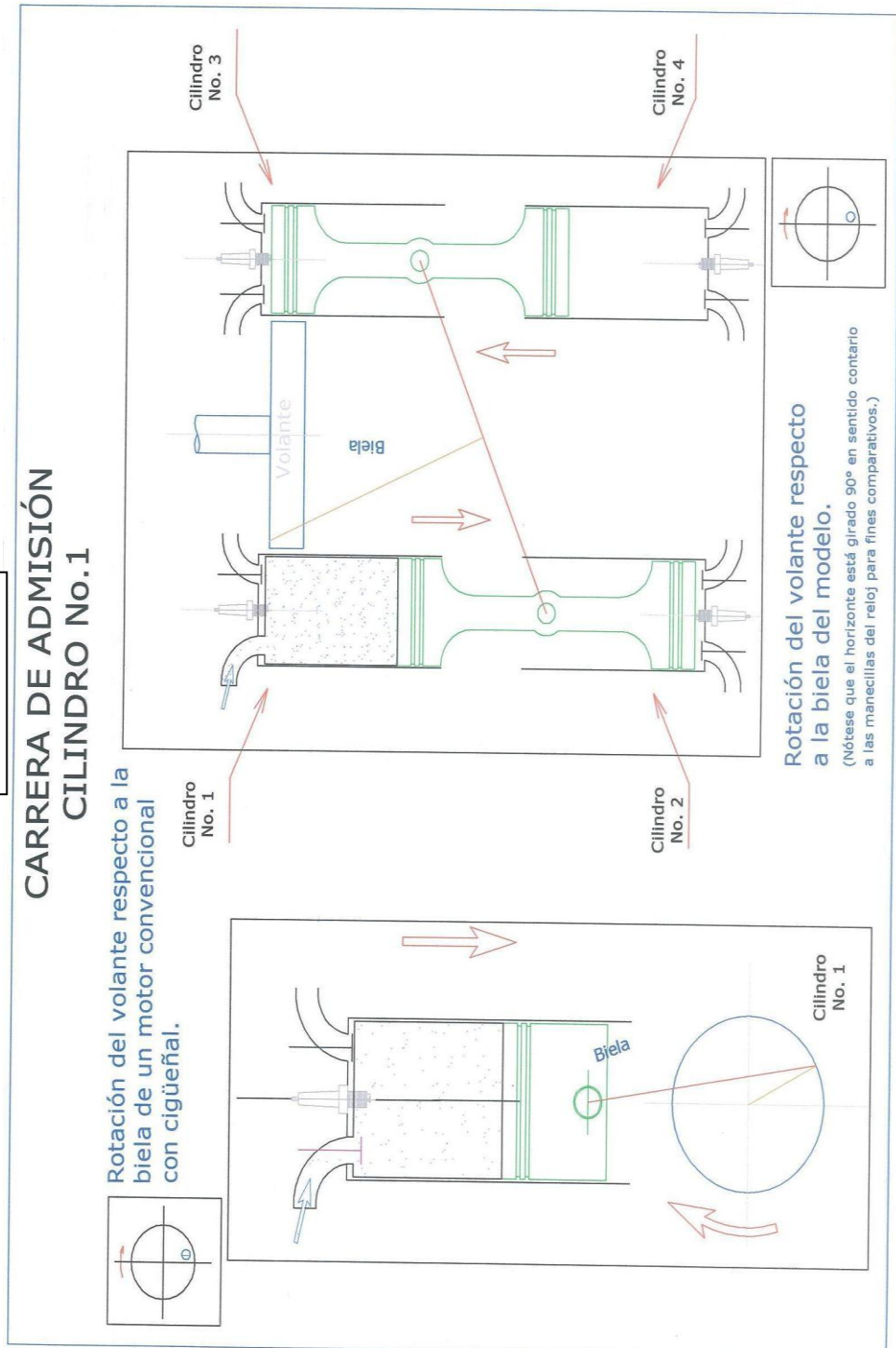


Figura No. 15

### CARRERA DE ADMISIÓN CILINDRO No.1



## B. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO FUNCIONAL

Por el momento solo se ha estimado desarrollar el modelo de cuatro cilindros, no se descarta la posibilidad de hacerlo con una cantidad mayor o menor de cilindros, muy probablemente el modelo de dos cilindros sea más sencillo.

También se compara el desplazamiento angular del volante del modelo (no del cigüeñal, porque no existe) respecto al cigüeñal del motor convencional, encontrando que ambos efectúan dos revoluciones completas por cada ciclo de potencia.

El comportamiento funcional y cinemático en ambos motores es exactamente el mismo (motores de cuatro cilindros y cuatro tiempos) aunque se deben hacer las consideraciones siguientes:

- Como no existe un cigüeñal como tal se debe calcular un radio aparente de cigüeñal.
- Así mismo se calcula una longitud aparente de biela.

Para completar el análisis de la comparación de los motores se hizo una serie de suposiciones, comprensibles desde el punto de vista práctico, ya que una investigación a fondo debería contar con una exhaustiva información adicional, recursos financieros, tecnológicos y de tiempo mucho mayores a los que realmente se tuvo acceso.

**1. Cálculo del radio aparente de cigüeñal.** Dado que por cada ciclo de potencia el volante realiza dos revoluciones, se puede decir que la palanca que realiza la biela sobre el volante es en sí la longitud del radio aparente de cigüeñal ( $a_a$ ).

De la misma manera la longitud de la biela es la relación 1:1 de la distancia de la biela desde el pivote hasta el cigüeñal como la distancia del pivote hacia los pistones. Si esa distancia se modifica, ocurren interesantes relaciones en cuanto a la transmisión de potencia:

**a.** Si la longitud de la biela y de la manivela son iguales, entonces las relaciones de transmisión de potencia, son equivalentes que las de un motor convencional con cigüeñal.

**b.** Si la longitud de la biela hacia el pivote es más larga que la longitud de la manivela hacia el pivote, entonces la velocidad del volante aumenta en relación directa, pero el par es inversamente proporcional.

**c.** Si la longitud de la biela hacia el pivote es más corta que la longitud de la manivela hacia el pivote, entonces la velocidad del volante disminuirá en relación directa, y el par es inversamente proporcional.

Este tipo de relaciones hacen que el diseño del motor posea cualidades únicas en comparación con los motores de cigüeñal.

Además es posible hacer una variación en la distancia entre el pivote y el acople con el volante, lo que nos da una variación en la longitud de la carrera de los pistones, esto hace que el modelo tenga la particularidad de poder adaptarle un mecanismo de variación en la razón de compresión.

Esta variación en la razón de compresión, hace que el diseño tenga la cualidad de que, de acuerdo a los materiales empleados, pudiera utilizar diferentes tipos de combustible y/o responder mejor a las variaciones en los regímenes de carga de operación.

## 1. Propiedades geométricas del modelo

Tabla No. 3

Parámetros	Valores
$r_c$	Variable
B	19.000 mm
S	20.393 mm
$V_t$	5.782 cm <sup>3</sup>
Largo total	160 mm (apx.)
Ancho total	82 mm (apx.)
Altura total	63 mm (apx.)

A continuación se muestran una vista del modelo y un análisis de las fuerzas involucradas en el funcionamiento del mecanismo:

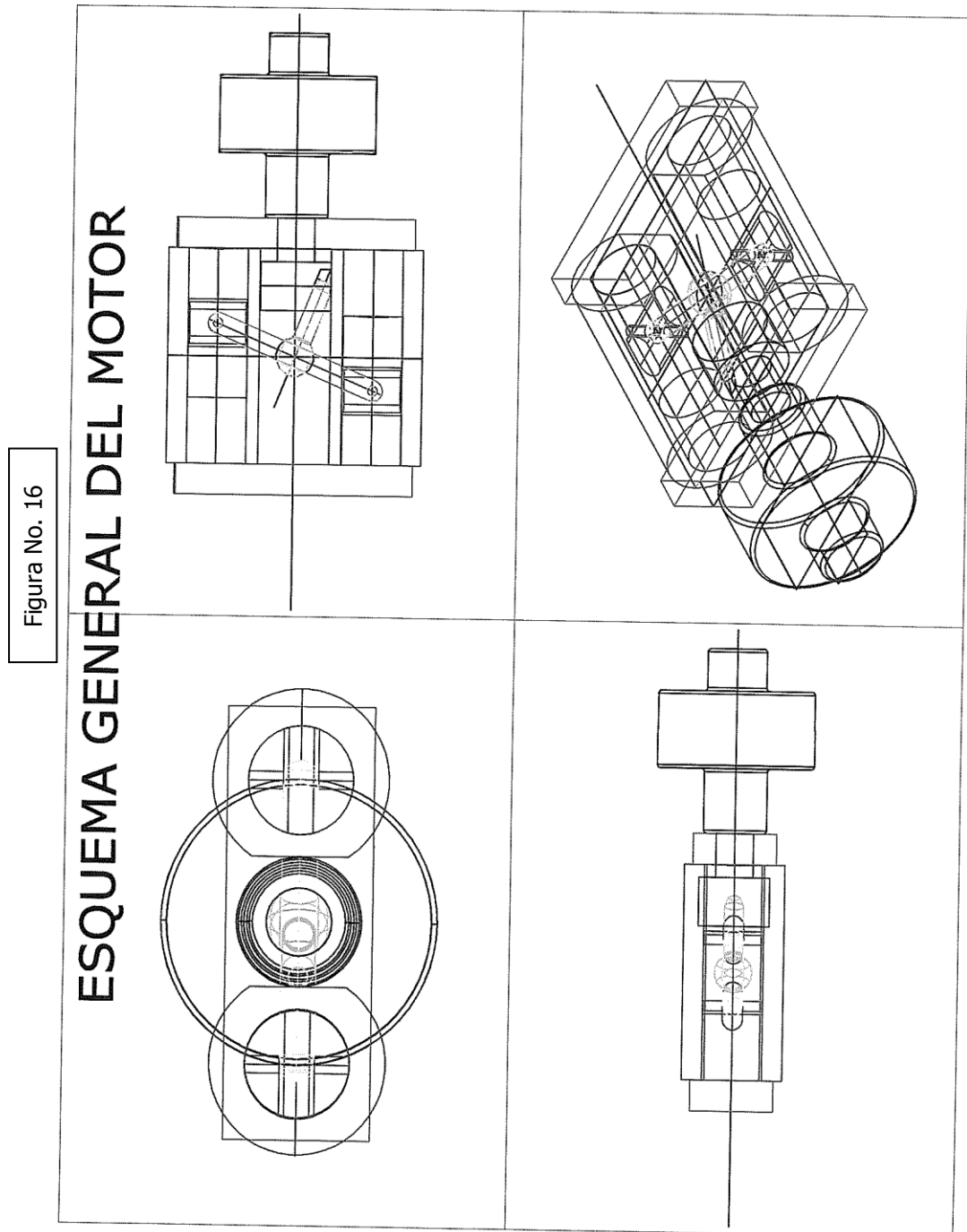


Figura No. 17

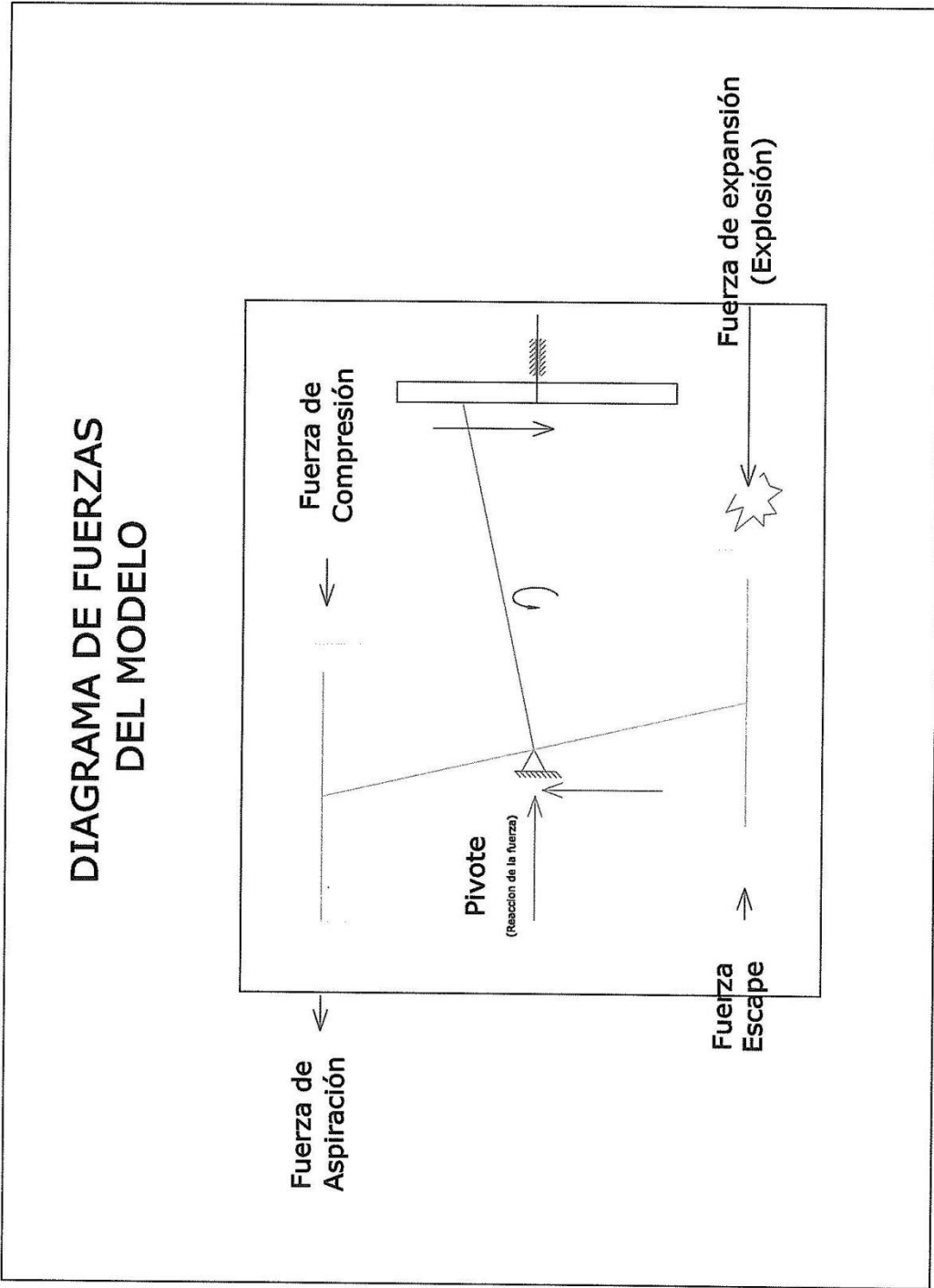


Figura No. 18

# Simplificación de Fuerzas

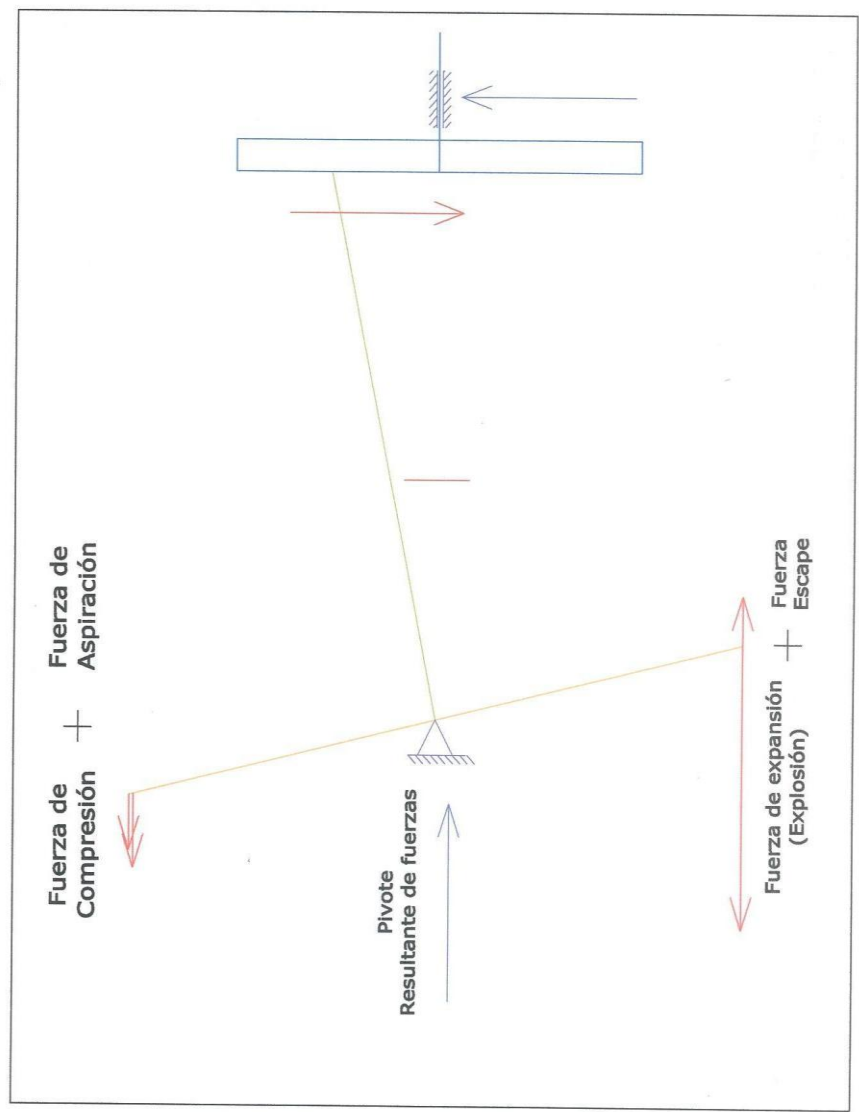


Figura No. 19

## Deformación esperada por las cargas sobre el modelo de fuerzas

(Las deformaciones se exageraron para hacerlas más claras)

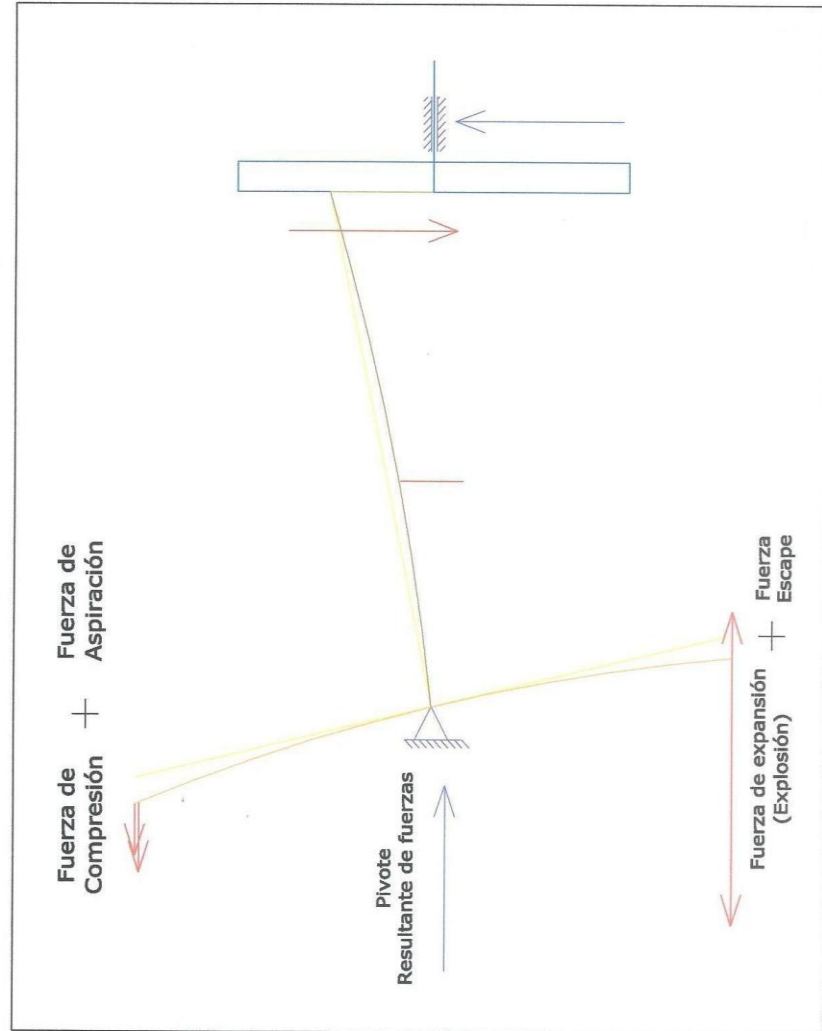
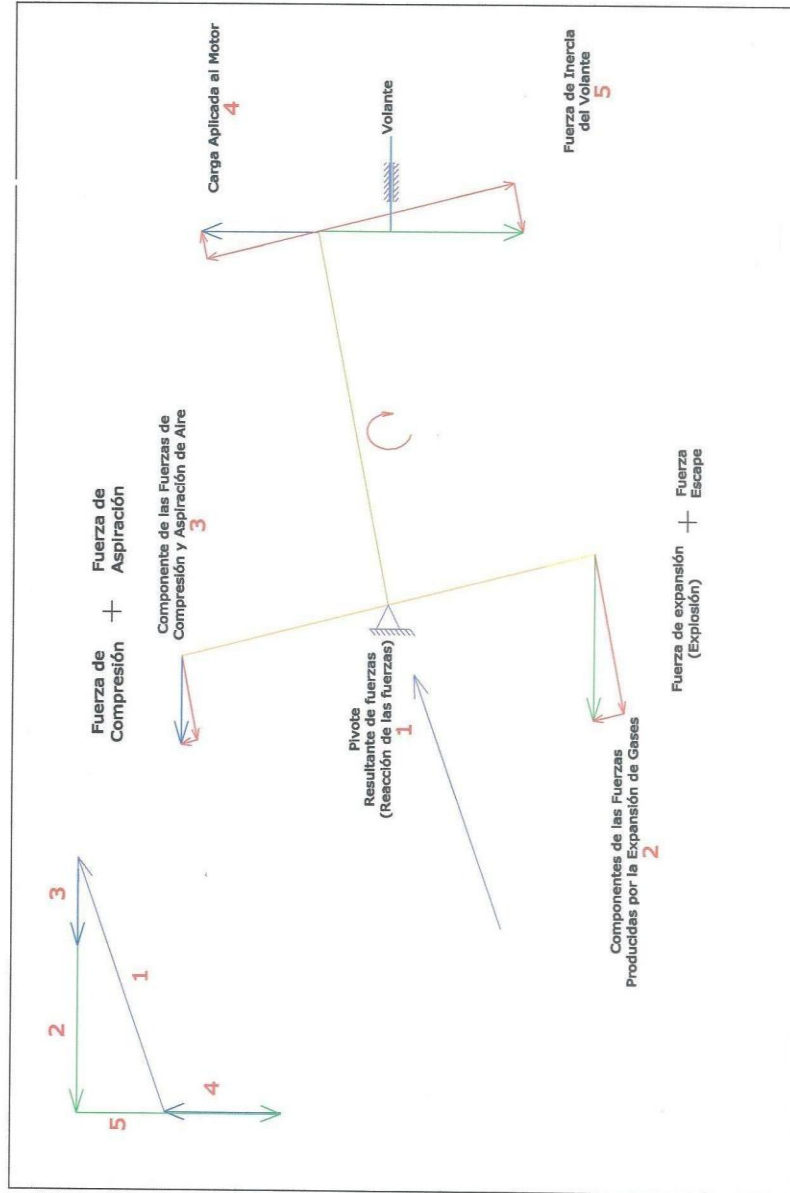


Figura No. 20

# Sumatoria de fuerzas del modelo



## C. CONSTRUCCIÓN DEL MODELO

Las piezas del modelo fueron maquinadas en acero inoxidable y aluminio. Se buscó durabilidad, además de resistencia mecánica y a la corrosión ya que el modelo iba a estar expuesto al aire sin lubricación continua. El modelo fue torneado y fresado de manera convencional, por lo que existen algunas imperfecciones en su acabado, especialmente en la parte central del mecanismo que es la biela, la cual requeriría que fuera una esfera mejor terminada. A continuación, se hace una breve descripción de los componentes del modelo. El modelo consta de:

Tabla No. 4

Cantidad	Material	Pieza	Fotografía	Descripción de la pieza
1	Acero inoxidable	BIELA		Transmite la potencia de la manivela al volante y pivotea en un eje central.
1	Acero inoxidable	MANIVIELA		Transmite la potencia de los pistones a la manivela.
2	Acero inoxidable	PISTONES		Transmite la potencia generada por la combustión.
2	Aluminio y Bronce	CULATAS		Se ubican en los extremos de los cilindros.
2	Aluminio	CILINDROS		Son dos cilindros que realmente funcionan como 4 cilindros opuestos.
2	Bronce	PASADORES		Son la unión entre cilindros y la manivela.
3	Cold Rolled	VOLANTE		Es básico, ya que hace posible la conservación de momentum angular.
1	Aluminio y Bronce	BASE DEL PIVOTE CENTRAL		Es el punto crítico y más importante del motor, ya que es soporte de las reacciones de propulsión e inercia del motor.

**1. Una vista general.** Una simple inspección de los componentes del modelo pone en evidencia que se trata de piezas relativamente sencillas en poca cantidad y de líneas simples, las cuales fueron maquinadas en un torno fresador de 15cm de volteo y 50cm de bancada. Nótese que en ambas fotografías se muestra la longitud total de un Vernier abierto en la posición de 10mm (un vernier de 6 pulgadas).

Figura No. 21

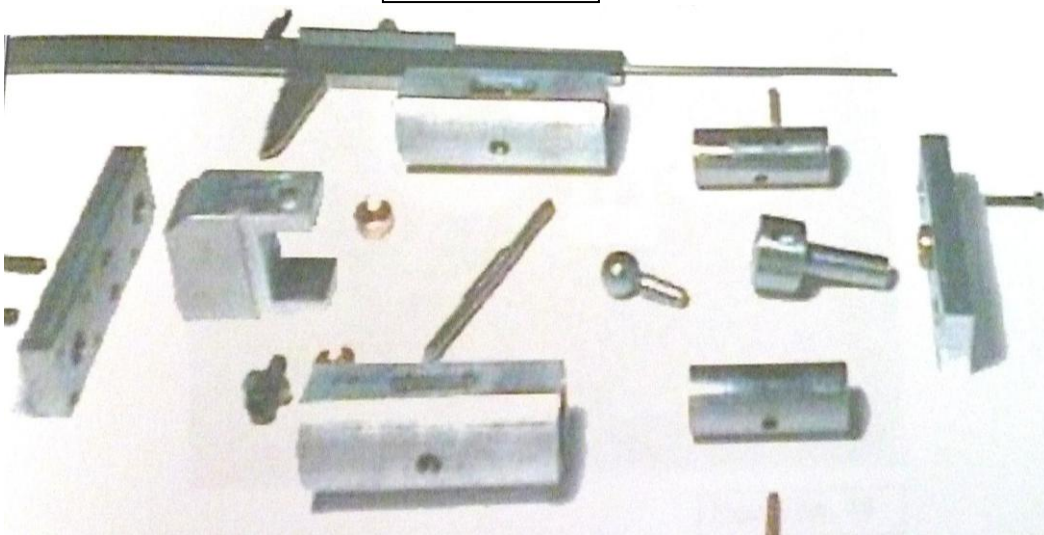


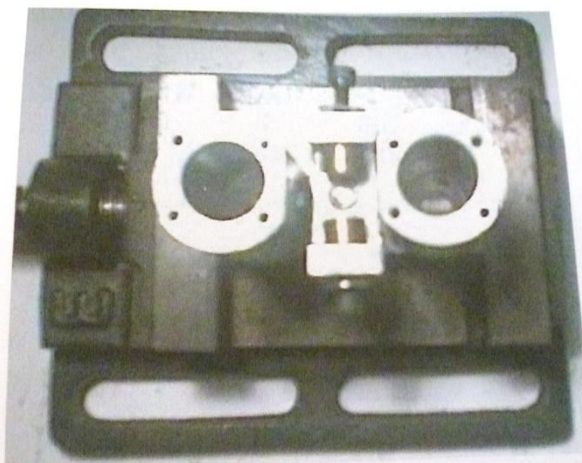
Figura No. 22



**2. Ensamble del modelo.** El modelo debe armarse en un orden específico, lo cual es muy importante, ya que si bien las piezas son sencillas la configuración geométrica no lo es tanto, tiene una secuencia lógica de armado. A continuación, la historia gráfica de cómo se arma el modelo.

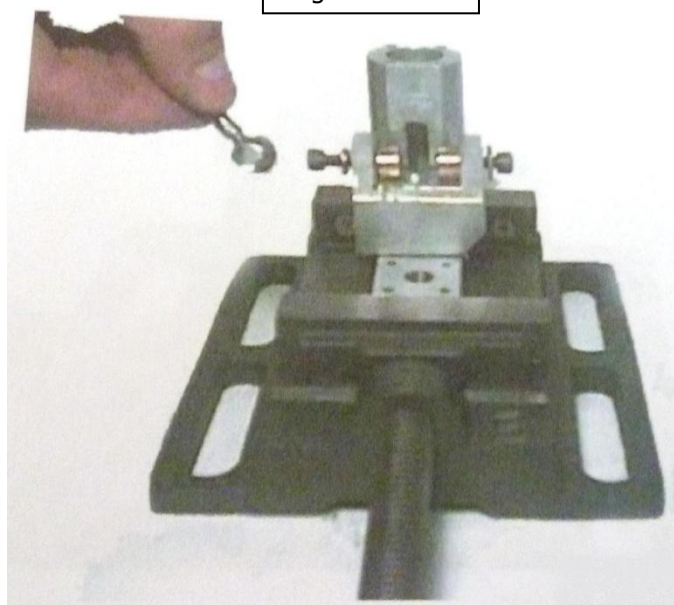
Un cilindro y la culata posterior previamente ensamblados se fijan en una prensa procediéndose a armar la base del pivote, sus cojinetes y la biela.

Figura No. 23



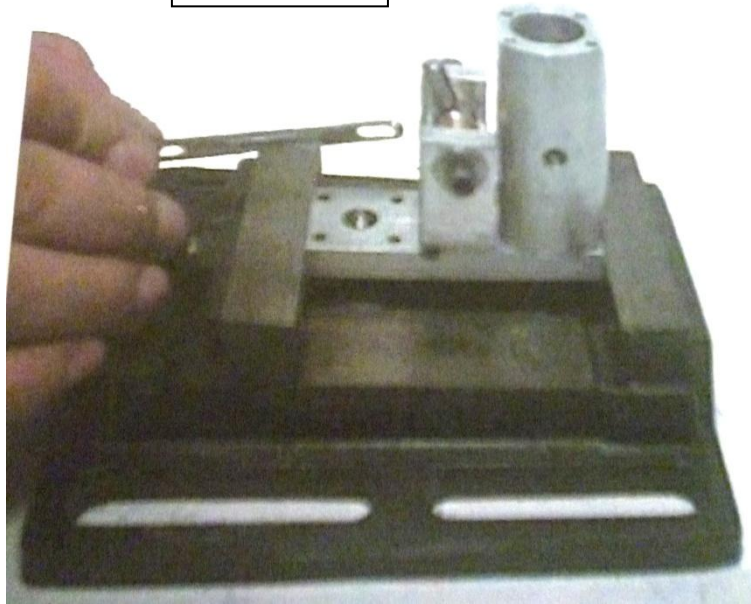
Luego, se inserta la manivela en la biela:

Figura No. 24



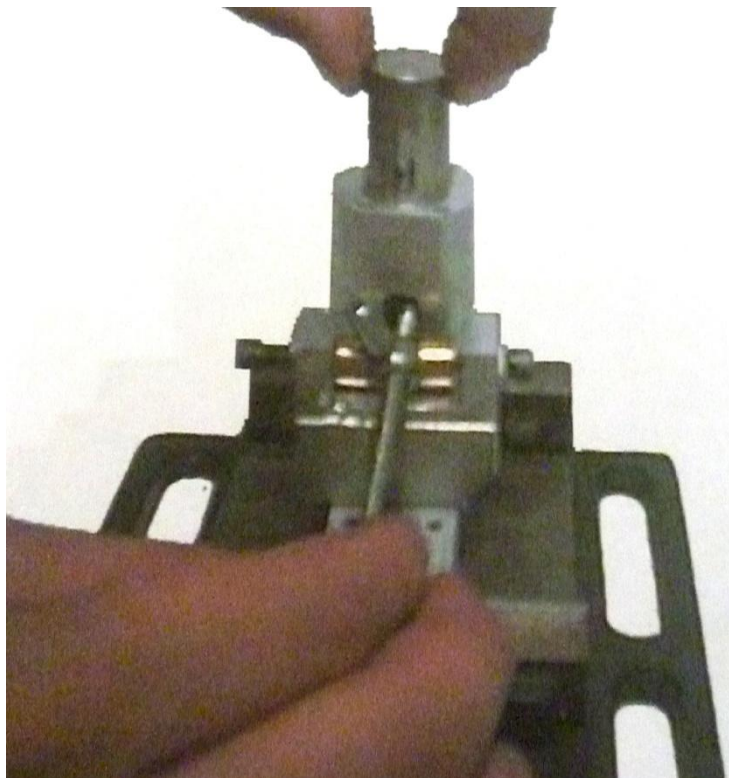
Seguido de ello, se insertan los pistones con sus respectivos pasadores:

Figura No. 25



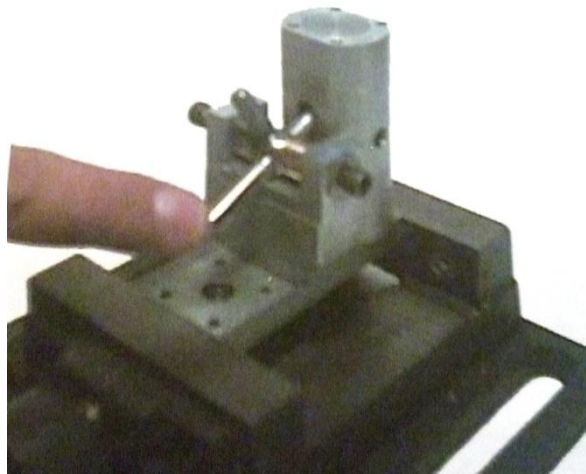
Paso siguiente, se verifica la movilidad del pistón con el accionar de la manivela:

Figura No. 26



De esta manera, se fija el cilindro restante y se ensambla el otro pistón, debiendo verificar que el movimiento de los pistones sea libre:

Figura No. 27



Se verifica que el movimiento de la biela sea libre.

Figura No. 28



Se inserta el volante en la biela.

Figura No. 29



La culata posterior es ensamblada de último, fijándola a los pistones.

Figura No. 30

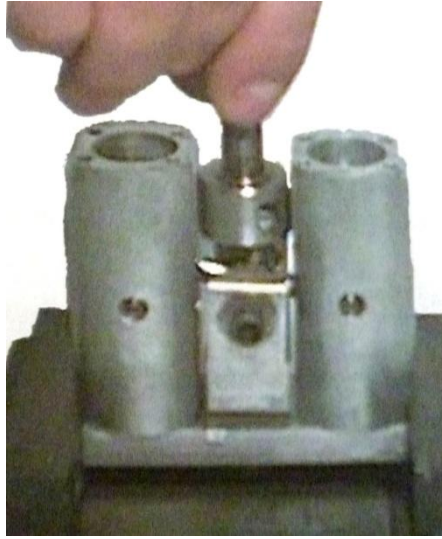


Figura No. 31



## **IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se demostró plenamente que el modelo construido se comportaba cinemáticamente igual que un motor de cuatro tiempos con cigüeñal.

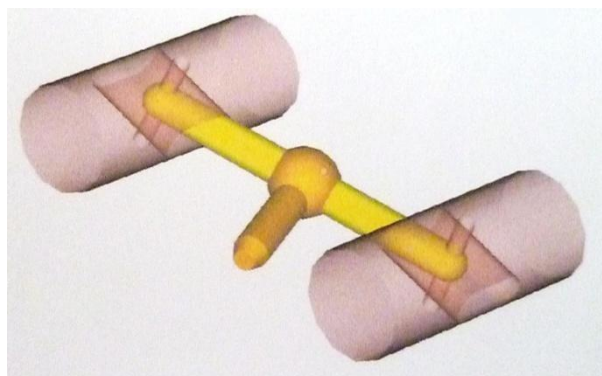
Es difícil evaluar la eficiencia del modelo respecto a los motores convencionales, ya que se hubiera requerido mucho más recursos en financiamiento, materiales, equipo de investigación, etc.

Lo ideal hubiera sido construir un modelo de motor a escala real que cumpliera con los estándares internacionales de calidad en acabado y materiales como los que actualmente se usa.

Fueron evidentes las deficiencias del modelo en cuanto a su manufactura ya que fue de construcción artesanal, en comparación con los modelos fabricados con máquinas de alta precisión.

Una de las mayores desventajas del modelo radica en la elevada fuerza de reacción que debe ejercer el pivote central que lo hace susceptible a fatiga y desgaste prematuro de materiales, así como el alto par ejercido por la manivela sobre la biela, la cual podría provocar que la esfera del pivote se rompiera.

Figura No. 32



Por lo anterior también es lógico pensar que el soporte del pivote debe ser lo suficientemente fuerte para compensar las reacciones.

Si se llegase a resolver de manera satisfactoria, con materiales óptimos, la sujeción de la bola del pivote, y se encontrara experimentalmente la longitud ideal del mecanismo de la biela y manivela, el modelo podría proponer una *variación* muy interesante en la *razón de compresión*.

Por otra parte se comprobó que un mecanismo consagrado por el uso durante mucho tiempo es susceptible de ser mejorado, cambiado o modificado obteniendo mejores resultados a partir de una idea sencilla.

Se deja la inquietud para un estudio posterior a fin de experimentar con motores de mayor o menor cantidad de cilindros que teóricamente son posibles y no por fuerza mucho más complicados.

## V. BIBLIOGRAFÍA

- Deutschmann, *DISEÑO DE MÁQUINAS, Teoría y Práctica*. Compañía Editorial Continental S.A. DE CV México.
- Marshek Juvinall, *FUNDAMENTALS OF MACHINE COMPONENTS DESIGN*. Tercera edición, John Willey & Sons, Inc. USA, 2000.
- Heywood, John B., *INTERNAL COMBUSTION ENGINE FUNDAMENTALS*. McGraw-Hill Book Company, Singapur, 1988.
- Pulkrabek, Willard, *INTERNAL COMBUSTION ENGINE*. Prentice Hall, USA 1997.
- Mabie, Hamilton. *MECHANISMS AND DYNAMICS OF MACHINERY*. John Wiley and Sons, Inc. 1957.
- Holman, J. P. *TRANSFERENCIA DE CALOR*. Mc Graw Hill, España 1998.