



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

**ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA  
TACOMA CON MOTOR 2 400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA**

**Josué Feliciano Montúfar Pérez**

Asesorado por el Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez

Guatemala, enero de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA  
TACOMA CON MOTOR 2400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**JOSUÉ FELICIANO MONTÚFAR PÉREZ**

ASESORADO POR EL ING. CARLOS HUMBERTO PÉREZ RODRÍGUEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, ENERO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Angel Roberto Sic García
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez
EXAMINADOR	Ing. Fredy Mauricio Monroy Peralta
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

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

**ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA  
TACOMA CON MOTOR 2400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con fecha 21 de agosto de 2015.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'José Feliciano Montúfar Pérez', written over a large, stylized circular flourish.

**Josué Feliciano Montúfar Pérez**

Chimaltenango, 9 de noviembre de 2015

Ingeniero  
Roberto Guzmán Ortiz  
Director Escuela Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería  
USAC

Ingeniero Guzmán:

Por medio de la presente le informo que he procedido a revisar el trabajo de graduación elaborado por el estudiante universitario JOSUÉ FELICIANO MONTÚFAR PÉREZ con carné 201021204 de la carrera de Ingeniería Mecánica, cuyo título es: **“ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA TACOMA CON MOTOR 2400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA”**.

Considero que el trabajo presentado por el estudiante Montúfar Pérez, ha sido desarrollado cumpliendo con los reglamentos y siguiendo las recomendaciones de la asesoría, por lo que doy mi aprobación.

Sin otro particular, me suscribo de usted, muy respetuosamente.



*Carlos Humberto Pérez Rodríguez*  
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL  
Colegiado 3071

Ing. Carlos Humberto Pérez Rodríguez  
Colegiado No. 3071  
Asesor



**USAC**

TRICENTENARIA  
Universidad de San Carlos de Guatemala

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ref.E.I.M.345.2015

El Coordinador del Área de Diseño de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA TACOMA CON MOTOR 2400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA** del estudiante **Josué Feliciano Montúfar Pérez**, carné No. **2010-21204** recomienda su aprobación.

**"Id y Enseñad a Todos"**

Ing. Álvaro Antonio Ávila Pinzón  
Coordinador del Área de Diseño  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, noviembre de 2015

/aej

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y con la aprobación del Coordinador del Área de Diseño del trabajo de graduación titulado: **ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA TACOMA CON MOTOR 2 400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA** del estudiante **Josué Feliciano Montúfar Pérez**, carné No. **2010-21204** y luego de haberlo revisado en su totalidad, procede a la autorización del mismo.

**"Id y Enseñad a Todos"**

  
Ing. Roberto Guzmán Ortiz  
Director  
Escuela de Ingeniería Mecánica



Guatemala, enero de 2016

/aej



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al Trabajo de Graduación titulado: **ESTUDIO PARA LA MEJORA DEL DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA PICOP TOYOTA TACOMA CON MOTOR 2400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA**, presentado por el estudiante universitario: **Josué Feliciano Montúfar Pérez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Decano

Guatemala, enero de 2016

/gdech



## **ACTO QUE DEDICO A:**

### **Dios**

Por darme vida y salud, acompañándome en mi vida diaria, sabiendo que Él es la fuente de la sabiduría y la inteligencia.

### **Mis padres**

Feliciano Montúfar Figueroa y María Magdalena Pérez Marroquín, por el apoyo incondicional y por la confianza que tuvieron en mí, haciendo un enorme esfuerzo por alcanzar un sueño que logramos juntos, siendo mi más grande inspiración y ejemplo de cada día.

### **Mis hermanas**

Norma Consuelo y Mildred Seleny Montúfar Pérez, por el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera.

## **AGRADECIMIENTOS A:**

<b>Universidad de San Carlos de Guatemala</b>	Casa de estudios bendecida por Dios que me recibió y me brindó todos los medios para formarme como profesional y hacer de mí una mejor persona, con quien quedo en deuda y completamente agradecido.
<b>Facultad de Ingeniería</b>	Por brindarme los conocimientos necesarios para ser un profesional capaz, a través de sus catedráticos y de sus agradables instalaciones.
<b>Shayla García Marroquín</b>	Por sus consejos, agradable compañía y por el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera.
<b>Mis amigos de la Facultad</b>	Jorge Vargas, Julio Elel, Mynor Aroche, Fernando Joachin, por su amistad, su apoyo, sus consejos y todos esos momentos que compartimos y que hicieron de mi carrera universitaria algo inolvidable.

## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS.....	VII
GLOSARIO.....	IX
RESUMEN.....	XI
OBJETIVOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS.....	1
1.1. Historia.....	1
1.2. Criterios de clasificación y características diferenciadoras.....	6
1.3. Ciclos de trabajo.....	6
1.4. Motores de cuatro tiempos.....	12
1.4.1. Carreras de un motor de cuatro tiempos.....	17
1.4.2. Tipos de motores.....	19
1.5. Factores de funcionamiento.....	27
1.5.1. Rendimiento mecánico.....	27
1.5.2. Trabajo.....	29
1.5.3. Potencia.....	29
1.5.4. Caballo de potencia.....	30
1.5.5. Par de rotación.....	31
2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	35
2.1. Función del cambio en la caja de velocidades.....	35
2.2. Relación de transmisión.....	39
2.3. Clasificación de los cambios de velocidades.....	42

2.3.1.	Cambio manual .....	42
2.3.2.	Cambio automático.....	46
2.4.	Principio de funcionamiento de una caja de velocidades tipo manual .....	64
2.5.	Transmisiones mecánicas .....	71
2.5.1.	Árboles de transmisión .....	71
2.5.2.	Transmisiones longitudinales .....	73
2.5.3.	Equilibrado .....	76
3.	EJE CARDÁN .....	79
3.1.	Características generales.....	79
3.2.	Materiales usados para su fabricación .....	81
3.3.	Diseño del eje .....	84
4.	DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA UN MOTOR DE TOYOTA TACOMA 2 400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA .....	89
4.1.	Esfuerzos a los que se encuentra sometido un eje cardán.....	89
4.2.	Fallas del eje cardán .....	92
4.3.	Correcciones de fallas.....	95
5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE EL EJE EXPERIMENTAL Y EL EJE DISEÑADO .....	97
5.1.	Ventajas del eje cardán reconstruido .....	97
5.2.	Desventajas del eje cardán reconstruido.....	97
5.3.	Ventajas del eje cardán diseñado.....	99
5.4.	Desventajas del eje cardán diseñado.....	99
5.5.	Análisis de resultados entre el eje cardán reconstruido y eje cardán diseñado.....	100

CONCLUSIONES .....	101
RECOMENDACIONES.....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	105
APÉNDICES.....	107
ANEXOS .....	109



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Motor de combustión interna Lenoir .....	2
2.	Ciclo Otto teórico.....	7
3.	Ciclo Diesel teórico .....	9
4.	Ciclo de dos tiempos de un motor de combustión interna .....	12
5.	Relación de compresión de un motor de combustión interna de cuatro tiempos .....	15
6.	Carreras de un motor de combustión interna de cuatro tiempos .....	19
7.	Disposición de cilindros en un motor de combustión interna de cuatro tiempos .....	22
8.	Orden de encendido más común para los tipos de motores de combustión interna.....	25
9.	Motor de combustión interna de aspiración natural y con sobrealimentación .....	27
10.	Curvas características par/potencia .....	33
11.	Relación de transmisión de un engranaje .....	40
12.	Cálculo de velocidades para una caja de velocidades .....	41
13.	Convertidor de par .....	49
14.	Funcionamiento del convertidor de par .....	50
15.	Engranaje planetario .....	51
16.	Funcionamiento del engranaje epicicloidal .....	54
17.	Vista de caja de cambios automática. ....	58
18.	Transmisión del movimiento para la primera velocidad de una caja de velocidades manual.....	67

19.	Transmisión del movimiento para la segunda velocidad de una caja de velocidades manual .....	68
20.	Transmisión del movimiento para la tercera velocidad de una caja de velocidades manual .....	69
21.	Transmisión del movimiento para la cuarta velocidad de una caja de velocidades manual .....	70
22.	Transmisión del movimiento para la marcha atrás de una caja de velocidades manual .....	71
23.	Sección de árboles de transmisión .....	72
24.	Elementos del árbol de transmisión .....	74
25.	Eje de transmisión tipo telescópica .....	74
26.	Unión universal para el árbol de transmisión .....	76
27.	Acoplamiento de la caja de velocidades al puente trasero (diferencial) .....	80
28.	Partes de junta universal para eje cardán .....	81
29.	Picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. ....	85
30.	Vista de caja hidráulica y caja mecánica .....	85
31.	Eje cardán original de caja hidráulica .....	86
32.	Eje cardán reconstruido de caja hidráulica a mecánica .....	86
33.	Adaptación al eje cardán de la caja hidráulica .....	87
34.	Dimensiones del nuevo eje cardán propuesto para la caja mecánica para picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. ....	92
35.	Vista de eje cardán reconstruido fracturado .....	95
36.	Vista de secciones de tubos huecos de proceso .....	98
37.	Picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. ....	100

## **TABLAS**

I.	Propiedades de los aceros estructurales .....	83
----	---	----

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>CV</b>	Caballos de vapor
<b>HP</b>	Caballos de fuerza
<b>cc.</b>	Centímetros cúbicos
<b>4T</b>	Cuatro tiempos
<b>2T</b>	Dos tiempos
<b>°C</b>	Grados centígrados
<b>kg</b>	Kilogramo fuerza
<b>kgm</b>	Kilogramo-metro
<b>km/h</b>	Kilómetros por hora
<b>lb-pie/s</b>	Libra-pie por segundo
<b>MPa</b>	Megapascal
<b>m</b>	Metro
<b>mm</b>	Milímetro
<b>min</b>	Minuto
<b>bhp</b>	Potencia al freno
<b>fhp</b>	Potencia de la fricción
<b>ihp</b>	Potencia indicada
<b>PMS</b>	Punto muerto superior
<b>PMI</b>	Punto muerto inferior
<b>rpm</b>	Revoluciones por minuto
<b>seg</b>	Segundos
<b>4WD</b>	Tracción en cuatro ruedas
<b>2WD</b>	Tracción en dos ruedas



## GLOSARIO

<b>Bancada</b>	Órgano que constituye la parte inferior del motor, sirve de soporte para las piezas rotantes y como pared de contención para el aceite lubricante.
<b>Cardán</b>	Componente mecánico que permite unir dos ejes no colineales.
<b>Cigüeñal</b>	Eje formado con codos y contrapesos presente en ciertas máquinas que, aplicando el principio del mecanismo de biela-manivela, transforma el movimiento rectilíneo alternativo en circular uniforme y viceversa.
<b>Culata</b>	Parte superior de un motor de combustión interna que permite el cierre de las cámaras de combustión.
<b>Diferencial</b>	Elemento mecánico que permite que la rueda derecha e izquierda de un vehículo giren a velocidades diferentes, según este se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro.
<b>Diésel</b>	Motor de combustión interna de alta compresión que funciona con aceites pesados o con gasóleo.

<b>Émbolo</b>	Cilindro metálico que se ajusta y corre en el interior de un cuerpo de bomba o cilindro. También se le llama pistón.
<b>Engranaje epicycloidal</b>	Sistema o tren de engranajes formado por uno o más engranajes externos o satélites que rotan sobre un engranaje central o planeta.
<b><i>Intercooler</i></b>	Radiador aire-aire o aire-agua que se encarga de enfriar el aire comprimido por el turbocompresor de un motor de combustión interna.
<b>Solenoides</b>	Cualquier dispositivo físico capaz de crear un campo magnético sumamente uniforme e intenso en su interior, y muy débil en el exterior.
<b>Tracción</b>	Arrastre de vehículos por medio de una fuerza.
<b>Transmisión automática</b>	Es una caja de cambios de automóviles u otro tipo de vehículos que puede encargarse por sí misma de cambiar la relación de cambio automáticamente a medida que el vehículo se mueve, liberando así al conductor de la tarea de cambiar de marcha manualmente.
<b>Transmisión manual</b>	Caja de cambios que no puede alterar la relación de cambio por sí sola, requiriendo la intervención del conductor para hacer esto.

## RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se describe el diseño de un mecanismo de transmisión adecuado a las condiciones producto de la conversión de un sistema de transmisión de potencia hidráulico a uno manual, de un picop Toyota Tacoma con motor de 2 400 cc. Este se diseñará para acoplarse exactamente a la transmisión de velocidades manual y el diferencial, sin provocar fallas al sistema de transmisión.

En el primer capítulo del trabajo de graduación se determinará el funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos. Se presenta la historia más significativa que ha transcurrido desde su invención hasta la actualidad, los criterios de clasificación, el ciclo bajo el cual trabajan y los factores de funcionamiento más importantes de los motores de combustión interna de cuatro tiempos.

El capítulo dos y tres se refieren al sistema de transmisión de potencia compuesto por la caja de velocidades y eje cardán o árbol de transmisión. Se describe el funcionamiento de la caja de velocidades automotriz, la relación de transmisión de velocidad entre el motor y las ruedas.

El capítulo cuatro consiste en diseño del eje cardán, específicamente para la transmisión de velocidades manual, considerando los esfuerzos a los que será sometido el eje cardan cuando se monte en la transmisión manual, también las fallas que se podrían presentar y las medidas que se tomarán para corregirlas.

Por último, el capítulo cinco trata las ventajas y desventajas que se pueden presentar entre el eje cardán reconstruido y el eje cardán diseñado para la caja de velocidades mecánica.

# OBJETIVOS

## General

Realizar un estudio para la mejora del diseño del eje cardán para picop Toyota Tacoma con un motor 2 400 cc. con caja hidráulica a mecánica.

## Específicos

1. Determinar el funcionamiento de un motor de combustión interna de cuatro tiempos.
2. Conocer el funcionamiento de los componentes del sistema de transmisión de potencia.
3. Diseñar un eje cardán.
4. Análisis de un eje de transmisión mal diseñado, para corregir errores y aplicar los resultados obtenidos en el nuevo diseño
5. Elaborar un análisis comparativo entre el eje anterior y el eje a diseñar.



## INTRODUCCIÓN

El sistema de transmisión es el conjunto de elementos que tiene la misión de conducir la potencia originada en la cámara de combustión del motor hasta el conjunto de las ruedas motrices. El cigüeñal es una de las partes básicas del motor de un automóvil, ya que a través de él se puede convertir el movimiento lineal en uno rotativo, para luego transmitirlo por medio de los componentes del sistema de transmisión hacia las ruedas, estos componentes son: embrague, caja de velocidades, eje cardán, mecanismo diferencial. Este estudio se enfocará en el eje cardán, ya que es el encargado de transmitir el movimiento de la caja de velocidades al conjunto diferencial y se ha detectado que es el principal componente que presenta problema cuando se hace la modificación de transmisión automática a manual en un automóvil.

Al realizar el procedimiento de adaptar una caja de velocidades manual a un sistema diseñado por el fabricante para las características específicas de un sistema con caja de cambio automática, las características no son las mismas en especial la longitud. Las cajas de cambio automáticas tienen un eje de mayor longitud que el de una caja de cambios manual, por lo que se debe hacer una adaptación al eje cardán, ya que no se cubre la longitud del eje de la caja de velocidades junto con el eje cardán al conjunto diferencial.

La adaptación realizada al eje cardán ha sido por medio de soldadura, donde se le acopla la longitud faltante para compensar la diferencia de longitud formada por la caja de velocidades automática.

La adaptación realizada presenta algunos inconvenientes, ya que no se toman todas las consideraciones respectivas. Una de ellas es la metalurgia del eje cardán, ya que este ha sido diseñado para transmitir la potencia de la caja de cambio automáticas, la cual es menor a la que transmite una caja de velocidades manual, provocando problemas como rotura del eje cuando se somete a condiciones extremas.

El objetivo es diseñar un eje cardán que proporcione las condiciones adecuadas para el trabajo, al realizar la modificación de caja de velocidades automática a manual, y que no presente problemas de fallo, como cuando únicamente se hace la adaptación al eje cardán de la caja automática.

# **1. MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE CUATRO TIEMPOS**

## **1.1. Historia**

El motor de combustión interna ha estado al servicio de la humanidad durante casi un siglo, desde 1876, cuando a Nicolaus August Otto se le otorgó la patente de un motor de combustión interna ciclo de cuatro tiempos. En esa época, la máquina de vapor ya tenía 178 años de utilizarse. La máquina de vapor es un motor de combustión externa y hasta finales del siglo pasado era una máquina de gran tamaño que ocupaba demasiado espacio y era difícil de transportar. En comparación con ella, el motor de combustión interna de Otto era pequeño y compacto y, por lo tanto se impuso rápidamente como sustituto del caballo.

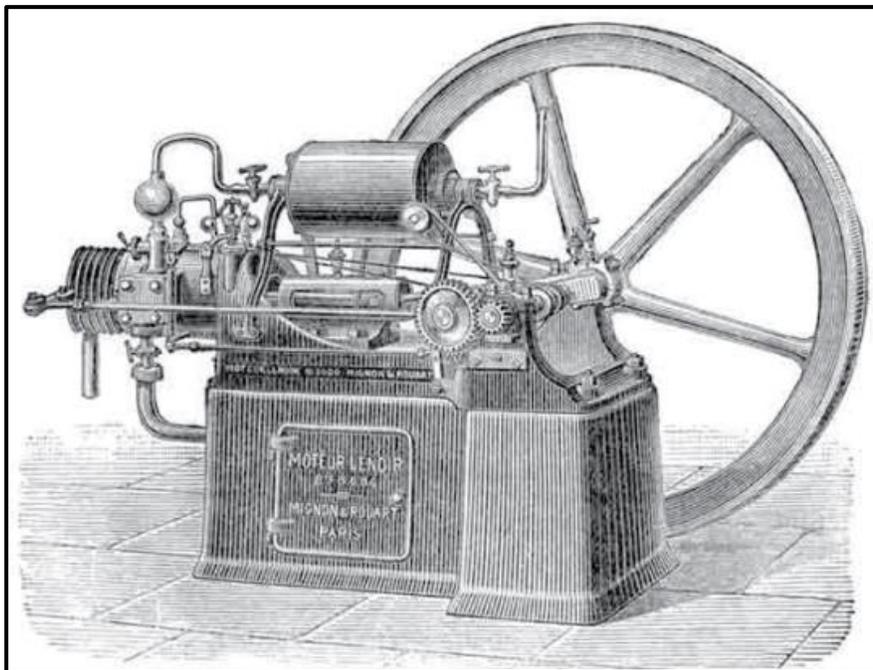
El primer motor de vapor realmente útil fue construido por Thomas Newcomen en 1698. Sin embargo, no llegó a tener una eficiencia aceptable hasta que James Watt perfeccionó y obtuvo la patente correspondiente en 1769.

Con el avance de los estudios de la energía y de las propiedades termodinámicas de los gases, el ingeniero Wilhelm Schmidt pudo establecer en 1816 las condiciones teóricas y los procesos básicos para el funcionamiento de los motores de combustión interna.

En 1854, el presbítero Eugeni Barsanti y Felipe Matteuci presentaron el primer motor de combustión interna que llegaba a operar en forma permanente y práctica que se recuerda en la historia. Entre 1856 y 1862 el ingeniero francés Beau de Rochas realizó varias investigaciones, estableciendo un ciclo teórico de procesos termodinámicos de un gas en un cilindro rígido, el cual sería capaz de producir el funcionamiento de una máquina de combustión interna de cuatro tiempos, funcionando con gas combustible que fuera eficiente.

El ingeniero francés Joseph Etienne Lenoir fabrica en 1859 el primer motor de combustión interna que incluía una bujía para el encendido de la mezcla pero que no era muy eficiente.

Figura 1. **Motor de combustión interna Lenoir**



Fuente: *Mecánica antigua*. <http://media-2.web.britannica.com/eb-media/12/133012-004-96052F21.jpg>. Consulta: 25 de agosto de 2015.

En 1867, el ingeniero alemán Nicolaus August Otto desarrolló un motor de combustión que superaba el de Lenoir, aprovechando el movimiento de un pistón libre para generar trabajo denominado atmosférico, ya que no incluía compresión previa a la mezcla.

Los motores de combustión interna actuales tienen ya más de un siglo de historia. Si hubiera que escoger una fecha que marcara el nacimiento de los motores modernos (tal como se conocen actualmente), eso sería 1876, cuando el alemán Nicolaus Otto construyó el primer motor de cuatro tiempos de la historia, del cual solicitó la patente titulada Gasmotor, pero que fue demandada y denegada la validez en 1884 en Alemania.

Si bien el motor de Otto fue, a buen seguro, resultado de una evolución continua, basada a su vez en numerosos antecedentes, hay que atribuirle el mérito de haber establecido la estrategia de los desarrollos futuros de los motores de combustión interna (MCI) en una dirección, con respecto a la cual iban a existir pocas desviaciones en lo sucesivo.

Los MCI no empiezan (ni terminan) con el motor de Otto, aunque este constituya uno de los hitos más importantes de su historia, ya que creció el interés por mejorar los motores de combustión interna; como ejemplo está George Brayton quien inventó en Inglaterra el motor que lleva su nombre, movido por kerosene. Luego, en 1876, el ingeniero escocés Dugald Clark construye el primer motor de gas de dos tiempos, el cual lleva su nombre.

Una variante del motor de combustión interna, fue presentada por el ingeniero alemán Rudolf Diesel, inventado durante los años 1893 y 1898, el cual consistía en utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada al cilindro, lo que permitió duplicar la eficiencia por encima de otros motores de combustión interna de la época, mediante relaciones de compresión mayores, sin el problema de detonación o golpeteo, lo cual estaba presente en los motores tipo Otto.

En 1897 el ingeniero Rudolf Diesel presento su primer motor práctico, el cual por su gran potencia poco a poco fue ganando terreno. Uno de los más recientes desarrollos ha sido el motor de combustión interna rotativo, el cual fue inventado por el alemán Felix Wankel.

Los primeros antecedentes de los MCI fueron, sin duda, las máquinas de vapor, desarrolladas en el siglo XVIII, durante la primera revolución industrial, de la que, en buena parte, fueron artífices. Las máquinas de vapor se pueden considerar los primeros ingenios capaces de producir, con rendimientos aceptables, energía mecánica no natural, entendiéndose por tal la que no procede del aprovechamiento de energías existentes en la naturaleza, como la hidráulica o eólica.

Todos los motores térmicos actuales se derivan, en mayor o menor medida, de las máquinas de vapor. Los MCI tienen con éstas una de sus principales características, que consiste en ser máquinas volumétricas o de desplazamiento positivo, lo que significa que el fluido de trabajo está contenido dentro de un recinto delimitado por paredes móviles que, al desplazarse, modifican el fluido de la masa de fluido que evoluciona por el motor.

Esa circunstancia confiere a las máquinas volumétricas la propiedad de que su funcionamiento se puede comprender de manera intuitiva, ya que, hasta cierto punto, es sencillo imaginar lo que sucede cuando un gas se expande o se comprime dentro de un cilindro por mediación del movimiento de un émbolo. Esa aproximación intuitiva permitió que las máquinas de vapor (y, en buena medida, también los motores de combustión interna alternativos) se desarrollasen de manera esencialmente empírica, sin la existencia de una base que explicara su funcionamiento con método científico.

En general, un motor se puede considerar como un dispositivo que permite transformar cualquier tipo de energía en energía mecánica. Dentro de ese amplio campo, se encuentra el motor térmico, que se puede definir como el dispositivo que permite obtener energía mecánica a partir de la energía térmica contenida en un fluido compresible.

Cabe la posibilidad de disponer directamente de esa energía, como es el caso de la radiación solar o la energía geotérmica, u obtenerla a partir de otros tipos de energía, como puede ser la energía química almacenada en la materia.

En este último caso, se necesitará transformar esa energía química en energía térmica mediante un proceso adicional, como puede ser un proceso de combustión. Se necesitará además disponer de un fluido de trabajo que sea capaz de variar su energía a partir de la energía térmica y de los elementos mecánicos adecuados para que el fluido pueda transformar su energía en energía mecánica.

## **1.2. Criterios de clasificación y características diferenciadoras**

Los motores alternativos se pueden clasificar de múltiples formas, atendiendo a criterios tan diferentes como: el proceso de combustión, el ciclo de trabajo, la forma en la que se introduce el aire en el cilindro, el tipo de combustible utilizado, el sistema para introducir el combustible, el sistema de control utilizado, el tipo de refrigeración, el número y disposición de los cilindros, entre otros. Ninguna de esas características excluye a las demás, por lo que en una clasificación global existirían tantas categorías distintas de MCI como combinaciones de esas características se pudieran pensar.

## **1.3. Ciclos de trabajo**

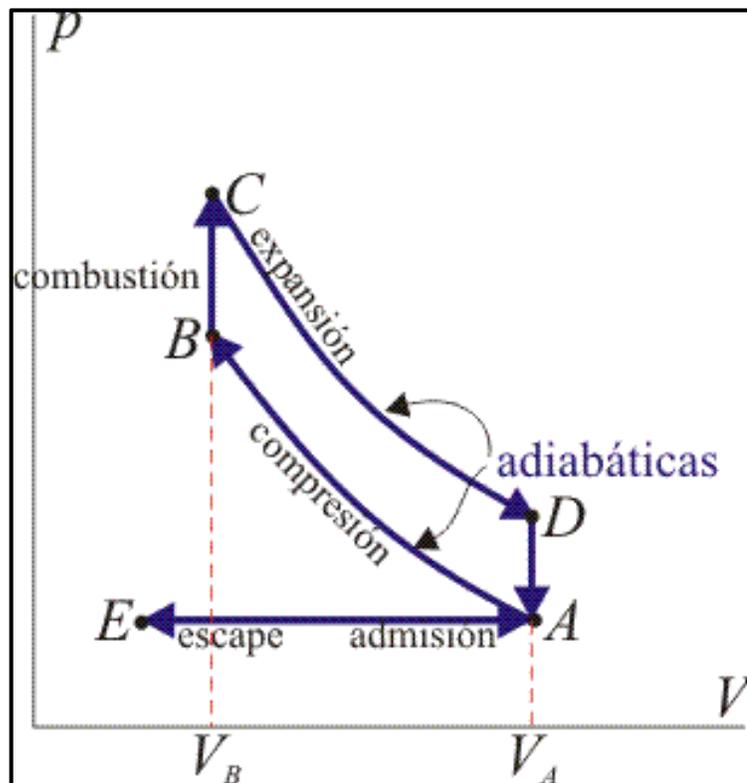
Los motores de combustión interna emplean como ciclos de trabajo principalmente los ciclos termodinámicos Otto y Diesel, llamados así cada uno por su inventor.

- Ciclo Otto

El motor convencional del tipo Otto es de cuatro tiempos (4T), aunque en fuera borda y vehículos de dos ruedas hasta una cierta cilindrada se utilizó mucho el motor de dos tiempos (2T). El rendimiento térmico de los motores Otto modernos se ve limitado por varios factores, entre ellos la pérdida de energía por la fricción y la refrigeración.

La termodinámica dice que el rendimiento de un motor alternativo depende, en primera aproximación, del grado de compresión. Esta relación suele ser de 8 a 1 o 10 a 1, en la mayoría de los motores Otto modernos. Se pueden utilizar proporciones mayores, como de 12 a 1, aumentando así la eficiencia del motor, pero este diseño requiere la utilización de combustibles de alto índice de octano para evitar el fenómeno de la detonación, que puede producir graves daños en el motor. La eficiencia o rendimiento medio de un buen motor Otto es de un 20 a un 25 %; solo la cuarta parte de la energía calorífica se transforma en energía mecánica.

Figura 2. **Ciclo Otto teórico**



Fuente: *Ciclos termodinámicos*. <http://laplace.us.es/wiki/images/7/71/Ciclo-otto.png>. Consulta:

29 de septiembre de 2015.

- Ciclo Diesel

En teoría, el ciclo Diesel difiere del ciclo Otto en que la combustión tiene lugar en este último a volumen constante, en lugar de producirse a una presión constante. La mayoría de los motores diésel son también de los ciclos de cuatro tiempos, salvo los de tamaño muy grande, ferroviarios o marinos, que son de dos tiempos. Los procesos son diferentes a los de los motores de gasolina.

En la primera carrera, la de admisión, el pistón sale hacia y se absorbe aire hacia la cámara de combustión. En la segunda carrera, el proceso de compresión, en que el pistón se acerca, el aire se comprime a una parte de su volumen original, lo cual hace que aumente su temperatura hasta unos 850°C.

Al final del proceso de compresión, se inyecta el combustible a gran presión mediante un inyector de combustible, con lo que se atomiza dentro de la cámara de combustión, produciéndose la inflamación a causa de la alta temperatura del aire.

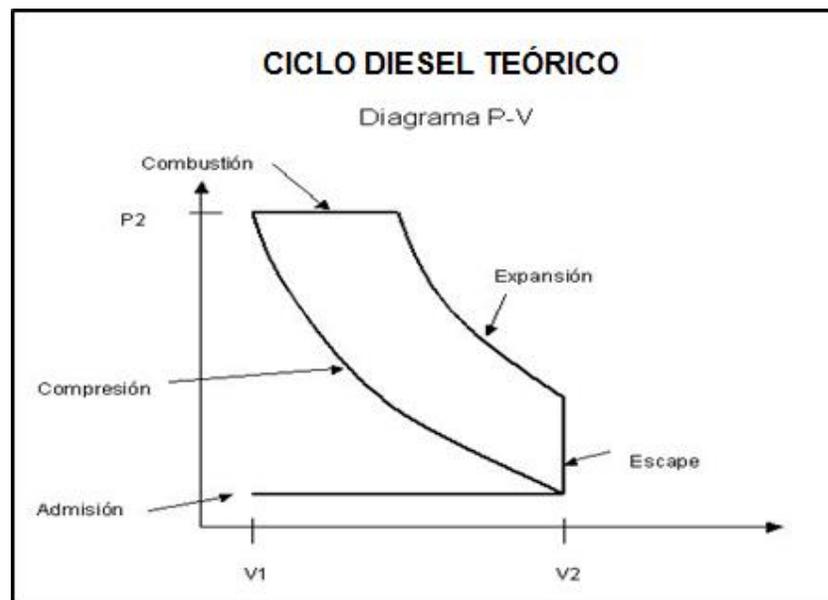
En el proceso de trabajo, la combustión empuja el pistón hacia fuera, transmitiendo la fuerza longitudinal al cigüeñal a través de la biela, transformándose en fuerza de giro par motor. Por último, al igual que en los motores Otto, en el proceso de escape vuelve el pistón hacia dentro.

Algunos motores diésel utilizan un sistema auxiliar de ignición para encender el combustible al arrancar el motor y mientras alcanza la temperatura adecuada.

La eficiencia o rendimiento (proporción de la energía del combustible que se transforma en trabajo y no se pierde como calor) de los motores diésel depende, de los mismos factores que los motores Otto, es decir, de las presiones (y por tanto de las temperaturas) inicial y final de la fase de compresión. Por lo tanto, es mayor que en los motores de gasolina, llegando a superar el 40 % en los grandes motores de dos tiempos de propulsión naval. Este valor se logra con un grado de compresión de 20 a 1 aproximadamente, contra 9 a 1 en los motores de ciclo Otto.

Por ello es necesaria una mayor robustez y los motores diésel son, por lo general, más pesados que los motores Otto. Esta desventaja se compensa con el mayor rendimiento y el hecho de utilizar combustibles más baratos.

Figura 3. **Ciclo Diesel teórico**



Fuente: *Motores de combustión interna.*

[http://imagenes.mailxmail.com/cursos/imagenes/9/8/motor-de-combustion-interna-de-combustion-a-presion-constante-ciclo-diesel\\_6689\\_9\\_1.jpg](http://imagenes.mailxmail.com/cursos/imagenes/9/8/motor-de-combustion-interna-de-combustion-a-presion-constante-ciclo-diesel_6689_9_1.jpg). Consulta: 30 de agosto de 2015.

Los motores diésel grandes de 2T suelen ser motores lentos con velocidades de cigüeñal de 100 a 750 revoluciones por minuto (rpm o r/min), mientras que los motores de 4T trabajan hasta 2 500 rpm (camiones y autobuses) y 5 000 rpm (automóviles).

Los motores de combustión interna se pueden clasificar con base en los procesos que realizan para llevar a cabo un ciclo completo de trabajo, ya sea para motores Otto y para motores diésel, cuya clasificación consiste en motores de cuatro tiempos (4T) y motores de dos tiempos (2T).

Las diferencias entre estos dos tipos de motores tienen que ver básicamente con el proceso de renovación de la carga, es decir, escape y admisión.

El motor de combustión interna de cuatro tiempos, tanto de ciclo Otto como ciclo Diesel, precisa de cuatro carreras del pistón o dos revoluciones completas del cigüeñal para completar el ciclo termodinámico de combustión.

En la siguiente sección se detalla más a fondo sobre el motor de combustión interna de cuatro tiempos, describiendo los tipos, el funcionamiento y el rendimiento de un motor de cuatro tiempos, para hacer las pruebas necesarias en el sistema de transmisión de potencia.

El motor de combustión interna de dos tiempos realiza las cuatro etapas del ciclo termodinámico (admisión, compresión, trabajo y escape) en dos movimientos lineales del pistón o una revolución del cigüeñal.

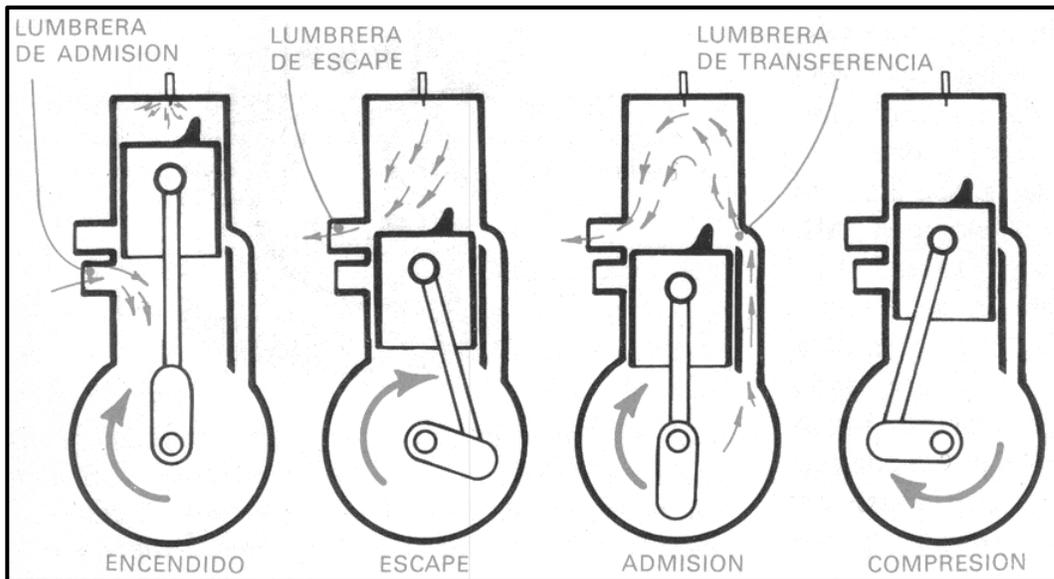
El motor de 2 tiempos produce una explosión por cada vuelta de cigüeñal, mientras que un motor de 4 tiempos produce una explosión por cada dos vueltas de cigüeñal, lo que significa que a misma cilindrada se genera mayor potencia, pero también un mayor consumo de combustible.

En el motor de 2 tiempos el cambio de gases se dirige mediante el pistón y en el motor de 4 tiempos es por válvulas. En el tipo de motor de dos tiempos, el pistón en su movimiento varía las circunstancias de compresión del cárter y el cilindro que completan el ciclo.

- Primer tiempo, compresión y admisión: el pistón ascendente comprime la mezcla de combustible y aire en el cilindro, creando simultáneamente un vacío en el cárter que, al final de la carrera del pistón, deja libre la entrada de mezcla o lumbrera de admisión que llena el cárter con mezcla carburada.
- Segundo tiempo, explosión y escape (barrido): mediante una chispa provocada por la bujía, se incendia la mezcla comprimida, creando una explosión que empuja el pistón con gran fuerza.

En el cárter, la mezcla es precomprimida por el pistón descendente, en el momento preciso, el pistón deja libre de canal de escape o lumbrera de escape en el cilindro, por donde salen los gases de escape y, poco después, la lumbrera de carga que conecta el cárter con el cilindro; por lo que la mezcla precomprimida pasa por este llenando el cilindro y expulsando los últimos restos de los gases de escape, quedando preparado el cilindro para un nuevo ciclo.

Figura 4. **Ciclo de dos tiempos de un motor de combustión interna**



Fuente: *Ciclo de trabajo de 2 tiempos.*

<http://www.reocities.com/MadisonAvenue/6883/trabajos/11motores/Image115.gif>. Consulta: 30 de agosto de 2015.

#### 1.4. **Motores de cuatro tiempos**

El motor Otto de cuatro tiempos tiene un accionamiento por mecanismo cigüeñal que consta de pistón, biela y manivela. El mecanismo de accionamiento por cigüeñal está encerrado en el cuerpo del motor, que a su vez está formado por la culata del cilindro, el cilindro y la caja o cárter del cigüeñal. El pistón se desliza de arriba hacia abajo en el cilindro.

La biela transmite este movimiento del cigüeñal, que está soportado en el cárter correspondiente; de este modo se transforma el movimiento de vaivén en un movimiento de rotación.

Las válvulas, que son accionadas por un árbol de levas, hacen posible la entrada o salida de los gases de los cilindros. El árbol de levas es accionado por el árbol cigüeñal, a través de una cadena o faja y gira con la mitad del número de revoluciones que este segundo árbol, es decir, con una relación de dos a uno. Para la formación de la mezcla combustible-aire, es necesario un carburador o un dispositivo de inyección de combustible. Para provocar la combustión en el cilindro, hace falta además un sistema de encendido.

En un motor de combustión interna de cuatro tiempos, es importante tener definidos términos como:

- Cilindrada de un motor ( $V$ )

Los cilindros son los huecos por donde se desplazan los pistones en su recorrido. La capacidad útil de los cilindros o el volumen en el que se desplaza el pistón en su movimiento entre el punto muerto inferior (PMI) y el punto muerto superior (PMS) es lo que se llama la cilindrada del motor y suele expresarse en centímetros cúbicos (cc.).

- Volumen de la cámara de combustión ( $v$ )

Volumen comprendido entre la cabeza del pistón en la posición PMS y la culata, comúnmente es expresado en centímetros cúbicos.

- Relación de compresión ( $R_c$ )

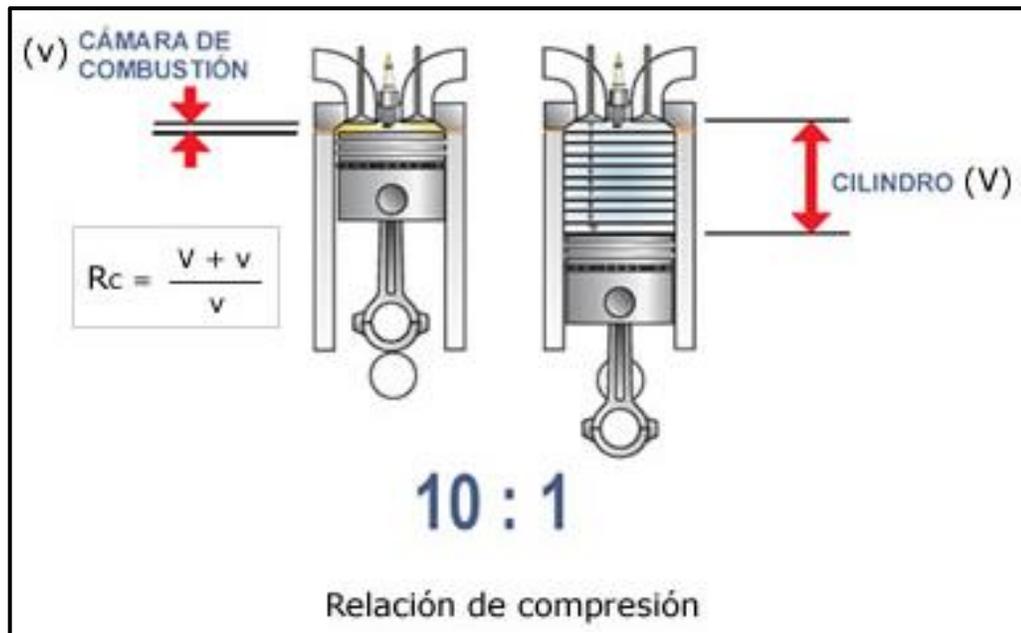
Es la relación que existe entre la suma de volúmenes ( $V + v$ ) y el volumen de la cámara de combustión. La relación de compresión ( $R_c$ ) es un dato que brinda el fabricante, no así el volumen de la cámara de combustión ( $v$ ) que se puede calcular por medio de la fórmula de la ( $R_c$ ).

La  $R_c$  para motores Otto (gasolina) viene a ser del orden de 8 - 11/1. Para motores sobrealimentados la relación de compresión es menor. La  $R_c$  para motores diésel viene a ser del orden de 18 - 22/1.

La figura 5 muestra un ejemplo de la relación de compresión  $R_c$ . Esto indica que el volumen total del cilindro se comprime diez veces para reducirse al tamaño de la cámara de combustión.

Esta característica da una idea de las prestaciones del motor, su eficiencia y su potencia; en la medida que el número de la izquierda sea mayor, la relación será más elevada y las prestaciones superiores dentro de ciertos límites.

Figura 5. **Relación de compresión de un motor de combustión interna de cuatro tiempos**



Fuente: *Relación de compresión.*

<http://www.aficionadosalamecanica.net/imagescursomec/relacion-compresion.jpg>. Consulta: 30 de agosto de 2015.

- Consumo de aire

El trabajo realizado por un motor de combustión interna depende de la cantidad de energía liberada cuando se quema una mezcla de aire y combustible. Pero el aire ocupa un volumen mucho mayor que el del combustible y la inducción de aire dentro del cilindro presenta algunas dificultades.

Si el motor no induce la mayor cantidad posible de aire, será limitado el trabajo producido por él, sin importar que se añada mucho combustible. Después de que ha sido diseñado y construido un motor, es conveniente medir el consumo de aire (en kilogramos por hora o libras por hora) para asegurarse que no haya restricción en los sistemas de admisión y escape que eviten la libre respiración del motor.

- Relación aire-combustible

Es la relación de masa que muestra las porciones de aire y combustible en la cámara de combustión:

$$AF \text{ (relacion aire - combustible)} = \frac{\text{Kilogramos de aire en el tiempo } t}{\text{Kilogramos de combustible en el tiempo } t}$$

En muchos casos, se especifica la recíproca de la relación aire-combustible que es la relación combustible-aire:

$$FA \text{ (relacion combustible - aire)} = \frac{\text{Kilogramos de combustible en el tiempo } t}{\text{Kilogramos de aire en el tiempo } t}$$

El valor ideal o teórico de tal relación es el correspondiente a la relación estequiométrica. Cuando se trata de gasolina comercial, dicha relación está comprendida entre 14,7 y 15,1 (es decir, unos 15 kg de aire por cada kilogramo de gasolina). Pero esto ocurre en condiciones teóricas o ideales, que no considera la mayor o menor rapidez con que se desarrolla efectivamente la combustión.

### **1.4.1. Carreras de un motor de cuatro tiempos**

La carrera de un motor de cuatro tiempos se comprende como la distancia que recorre el pistón desde la línea delimitada por el PMS y el PMI, la cual se efectúa de forma descendente y ascendente sucesivamente durante el funcionamiento del motor.

El PMS es la posición del pistón en la que alcanza el punto máximo de altura antes de empezar a descender y el PMI es la posición más baja del pistón antes de empezar a ascender nuevamente. Para un ciclo de trabajo de un motor de cuatro tiempos, el cigüeñal debe dar dos revoluciones completas, es decir 720 grados, en el cual el pistón pasa por el PMS y el PMI dos veces para cada uno de los puntos.

En un motor de combustión interna Otto, una carrera comprende cada uno de los tiempos o procesos que se llevan a cabo durante el ciclo de trabajo del motor. El motor de cuatro tiempos para realizar un ciclo completo de trabajo lleva a cabo cuatro carreras de pistón, una para cada tiempo, los cuales son: admisión, compresión, expansión o potencia y escape.

La mayoría de los motores de combustión interna utilizan el principio del émbolo reciprocante, según el cual un émbolo se desliza dentro de un cilindro, hacia atrás y hacia adelante y transmite fuerza a la flecha motriz, por lo general, mediante un simple mecanismo de biela manivela.

En 1862, Beau de Rochas propuso la secuencia de funcionamiento para el motor de émbolo reciprocante, que aún hoy en día es típica de la generalidad de los motores encendidos por chispa y que consiste en:

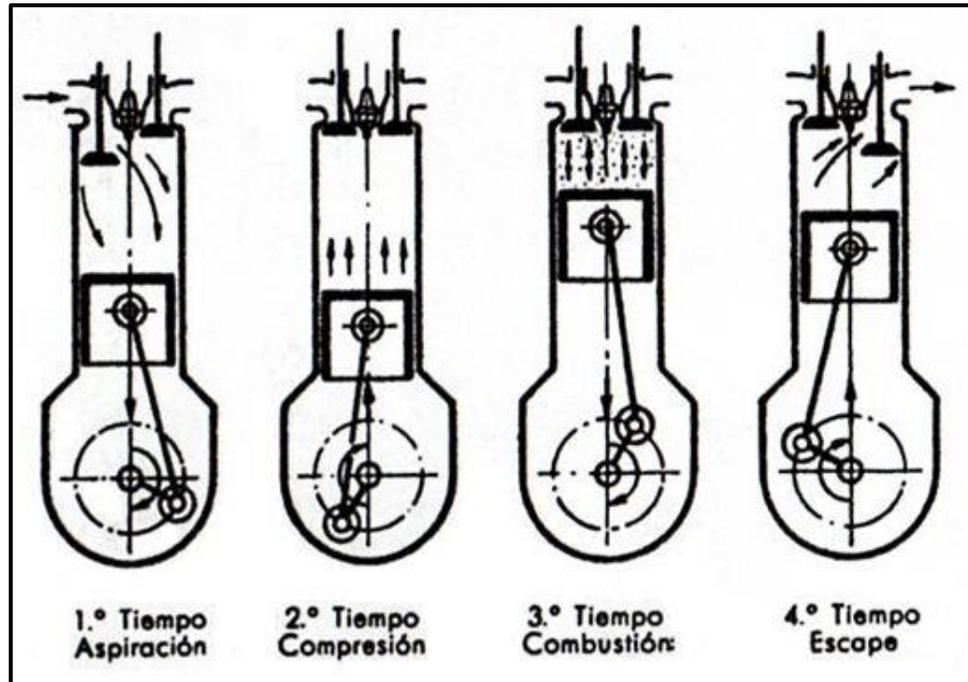
- Carrera de admisión: para inducir una mezcla combustible hacia el interior del cilindro del motor. En esta fase, el descenso del pistón aspira la mezcla aire combustible y la válvula de escape permanece cerrada, mientras que la de admisión está abierta. En el primer tiempo, el cigüeñal gira  $180^{\circ}$ , el árbol de levas  $90^{\circ}$ , la válvula de admisión se encuentra abierta y su carrera es descendente.
- Carrera de compresión: para elevar la temperatura de la mezcla. Al llegar al final de la carrera inferior, la válvula de admisión se cierra, comprimiéndose el gas contenido en la cámara por el ascenso del pistón. En el segundo tiempo el cigüeñal da  $360^{\circ}$ , el árbol de levas  $180^{\circ}$ , ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es ascendente.

Al final de la carrera de compresión ocurre la chispa y el incendio consecuente de la mezcla homogénea, liberando energía que aumenta la temperatura y la presión de los gases. En seguida desciende el émbolo en la carrera de expansión, llamada también carrera de potencia o carrera de combustión. Esta es la única fase en la que se obtiene trabajo.

En este tiempo, el cigüeñal gira  $180^{\circ}$  mientras que el árbol de levas gira  $90^{\circ}$  ambas válvulas se encuentran cerradas y su carrera es descendente.

- Carrera de escape: para barrer al cilindro, dejándolo libre de los gases quemados. En esta fase el pistón empuja, en su movimiento ascendente, los gases de la combustión que salen a través de la válvula de escape que permanece abierta. Al llegar al punto máximo de carrera superior, se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión, reiniciándose el ciclo. En este tiempo el cigüeñal gira  $180^{\circ}$  y el árbol de levas  $90^{\circ}$ .

Figura 6. Carreras de un motor de combustión interna de cuatro tiempos



Fuente: *Motor de combustión interna 4 tiempos.*

[https://www.estrucplan.com.ar/Boletines/0760/gas\\_162.jpg](https://www.estrucplan.com.ar/Boletines/0760/gas_162.jpg). Consulta: 30 de agosto de 2015.

#### 1.4.2. Tipos de motores

En vista de que la velocidad, consecuentemente la potencia, de un motor son limitadas por las fuerzas de inercia originadas al acelerar y desacelerar algunas de sus partes, es conveniente dividir el motor en un cierto número de cilindros individuales y en la forma de disposición de los mismos. Mediante estos recursos, se reducen las fuerzas de inercia por cilindro; incluso, las fuerzas en uno de ellos pueden contrarrestarse, o balancearse, con el acomodo conveniente de los otros.

Las tipos de disposición de los cilindros para un motor de combustión interna son los siguientes:

- Cilindros en línea

El motor en línea es el diseño usual para aplicaciones tanto estacionarias como de transportación, porque ofrece la solución más simple de construcción y mantenimiento. En esta posición los pistones comparten el mismo cigüeñal y el bloque de los cilindros suele estar hecho de una pieza. La desventaja es que no se pueden poner muchos cilindros, ya que afectaría a la longitud del bloque motor.

- Cilindros en V

Un motor con menor longitud que el del tipo en línea y de la misma potencia, es el motor en V, que consiste en dos bancadas de cilindros en línea, colocadas una con respecto a la otra a un cierto ángulo (generalmente 90°) para formar la letra V.

En este caso se sujetan dos bielas a un muñón del cigüeñal. La principal característica es el acortamiento del cigüeñal, así, el bloque de cilindros y el cigüeñal corto mejoran la estabilidad del motor.

- Cilindros en W

Tres filas de cilindros se despliegan con forma de W a partir del cigüeñal único. Esta configuración de cilindros es más ancha que la anterior, en V, aunque para un número elevado de cilindros (10, 12 o más) puede resultar más equilibrado para el motor al contar con el cigüeñal más corto.

- Cilindros opuestos (*boxer*)

Los cilindros se alternan horizontalmente, coincidiendo en el centro del cigüeñal. Los cilindros se mueven de izquierda a derecha como los brazos de un boxeador. La principal característica de esta formación es su centro de gravedad bajo, lo que hace que el bloque motor sea pequeño con más espacio para otros componentes.

- Cilindros rotativos

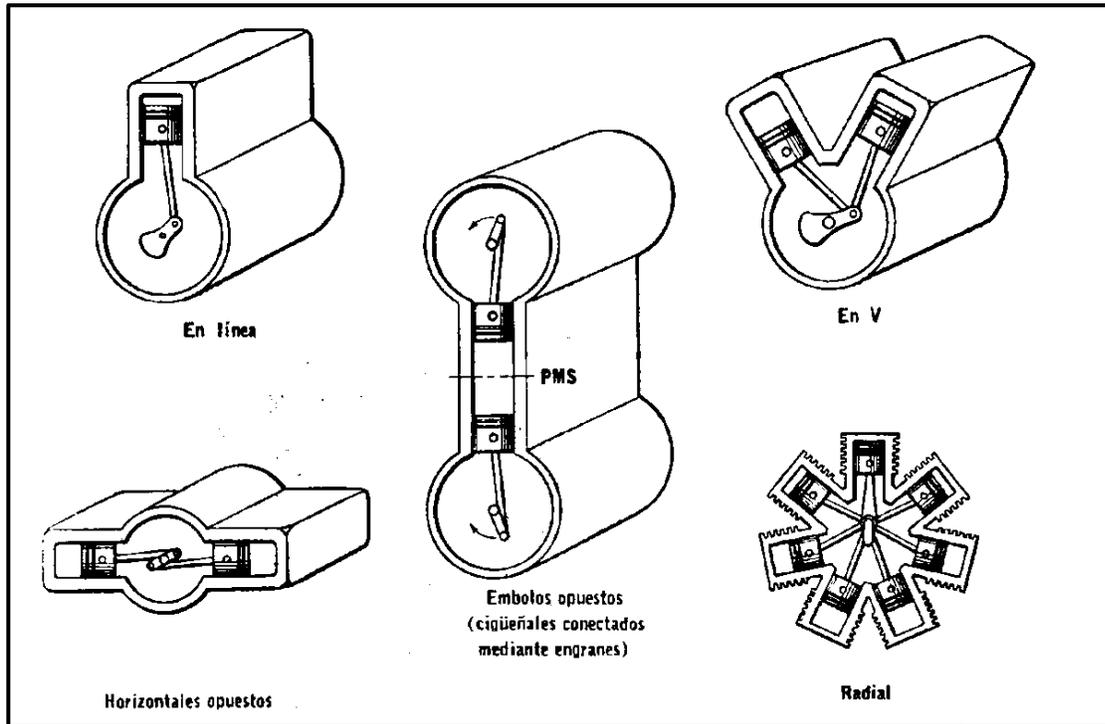
Estos cilindros o mejor dicho, estas cámaras rotativas, hacen los 4 tiempos de un cilindro normal, lo único que le caracteriza es que hace los tiempos mientras rota, es decir, cada movimiento circular completo hace los 4 tiempos. La desventaja de este tipo de motores, aparte de su alto consumo de aceite y gasolina, es que necesita un alto régimen de giro para obtener la misma potencia que otros motores a menor régimen de giro. Estos motores suelen utilizarlos la marca Mazda.

- Cilindros radiales o en estrella

Los motores en estrella, también conocidos como motores radiales, están constituidos por un conjunto de cilindros que se disponen de forma radial al rededor del cigüeñal. Estos surgieron a finales de 1920 y se usaron masivamente en los años posteriores.

Los motores radiales pueden estar constituidos por una estrella o por varias que se van colocando una detrás de otra, pero siempre la estrella posterior se va girando para que los cilindros queden entre los espacios de la estrella anterior, y así conseguir una mejor refrigeración.

Figura 7. **Disposición de cilindros en un motor de combustión interna de cuatro tiempos**



Fuente: *Tipos de motores de combustión interna*. <http://apkfun.co/tipos/tipos-de-motores.html>.  
Consulta: 30 de agosto de 2015.

Los motores de combustión interna pueden tener de uno a varios cilindros. Los motores monocilíndricos son los que tienen un solo cilindro y los motores policilíndricos poseen de dos a más cilindros.

- Numeración de los cilindros

La numeración de los cilindros, en todos los casos constructivos, viene determinada según las normativas UNE10052-72 y DIN 73 21. Se empieza la numeración de los cilindros del motor por el lado opuesto a la toma de fuerza, es decir al lado contrario del volante motor. En los motores en V y en los horizontales (*boxer*), la numeración de los cilindros comienza también por el lado opuesto del volante de inercia y por el bloque de cilindros situado a la izquierda, enumerando a continuación los cilindros situados en el bloque de la derecha y también en el mismo sentido.

- Sentido de giro

Según la normativa DIN 73021 el motor puede girar:

- A la derecha: en el sentido de las agujas del reloj, visto en el lado opuesto al de entrega de fuerza. En inglés: *clockwise* (cw).
- A la izquierda: en el sentido contrario a las agujas del reloj, visto en el lado opuesto al de entrega de fuerza. En inglés: *counter clockwise* (ccw).

- Disposición del cigüeñal

La disposición de los muñones del cigüeñal, o codos de unión de las bielas de cada cilindro con el mismo, está en función del número de cilindros del motor, ya que para cada ciclo de funcionamiento se realizan tantos impulsos motrices (explosiones) como el número de cilindros posean.

Por lo tanto, los muñones tienen que estar dispuestas de forma tal que los impulsos motrices se equilibren con respecto al círculo de rotación que describe el cigüeñal.

En motores de 4 tiempos, como cada ciclo de funcionamiento se realiza en 2 vueltas del cigüeñal que equivale a  $720^\circ$ , la separación de los codos del cigüeñal o distancia entre encendidos, corresponderá a un ángulo de giro determinado por la división de  $720^\circ$  entre el número de cilindros.

$$\text{ángulo de encendido} = \frac{720^\circ}{\text{número de cilindros } (N)}$$

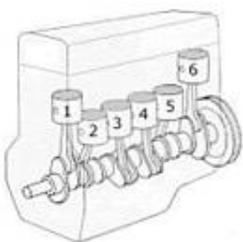
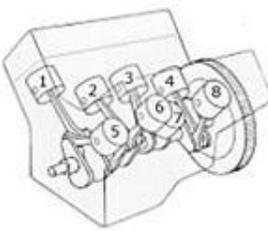
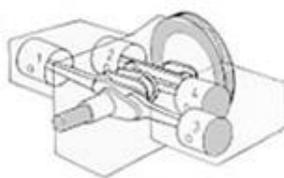
- Orden de encendido

El orden de encendido está relacionado directamente con el tiempo de combustión, en donde se genera la energía que el motor va a entregar a fin de mover el automóvil, es este orden el que indica cual es el siguiente cilindro en llegar al tiempo o proceso de combustión.

Entonces, contando desde el frente del vehículo en un motor longitudinal, o bien desde el frente de la distribución en un motor transversal de cuatro cilindros en línea, estos se enumeran consecutivamente 1-2-3-4. Esto no significa que el motor tendrá el mismo orden para generar energía.

La forma que se encuentran como el orden de encendido más usado es 1-3-4-2. Esto significa que después que el cilindro número 1 termina el proceso de combustión, el siguiente en producir energía será el número 3, después el 4 y por último el 2. Una vez terminado este, volverá a repetirse la cadena empezando por el cilindro 1.

Figura 8. Orden de encendido más común para los tipos de motores de combustión interna

Forma constructiva	Número de cilindros	Orden de encendido habitual
	4	1 3 4 2 o 1 2 4 3
	5	1 2 4 5 3
	6	1 5 3 6 2 4 1 2 4 6 5 3 1 4 2 6 3 5 1 4 5 6 3 2
	8	1 6 2 5 8 3 7 4 1 3 6 8 4 2 7 5 1 4 7 3 8 5 2 6 1 3 2 5 8 6 7 4
	4	1 3 2 4
	6	1 2 5 6 4 3 1 4 5 6 2 3
	8	1 6 3 5 4 7 2 8 1 5 4 8 6 3 7 2 1 8 3 6 4 5 2 7
	4	1 4 3 2

www.aficionado.salamecanica.com

Fuente: *Tipos de motores de combustión interna.*

<http://www.aficionadosalamecanica.net/imagescursomec/orden-encendido-multiple.jpg>.

Consulta: 30 de agosto de 2015.

Otro tipo de clasificación de los motores de combustión interna es según la presión de admisión, entre los cuales están:

- Motores de aspiración natural

La presión del aire cuando entra al cilindro es aproximadamente la atmosférica o inferior, el cual aspira aire de la atmósfera directamente por el filtro.

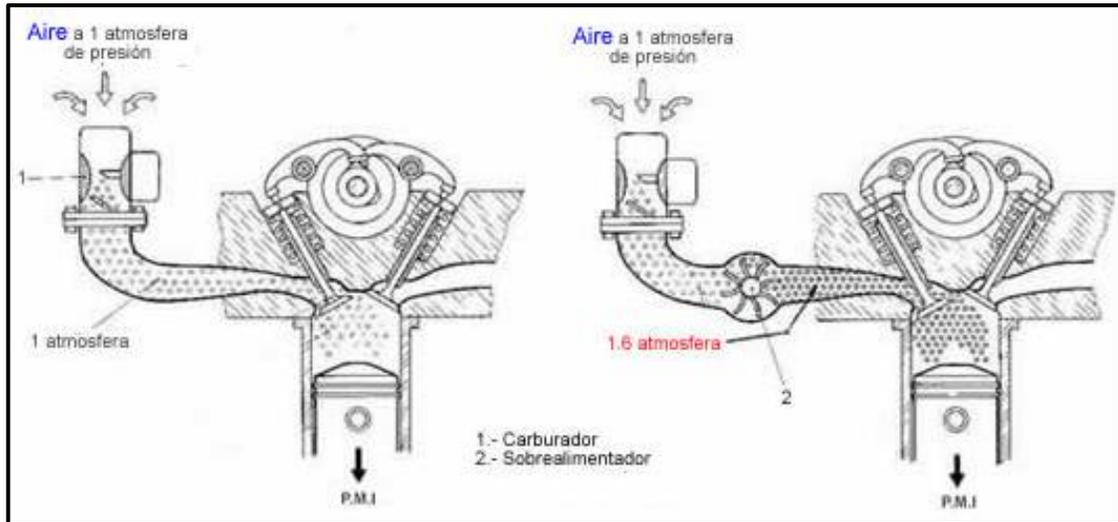
- Motores sobrealimentados

Son aquellos en los que el aire entra a presión en el cilindro, la cual es superior a la atmosférica. Esto hace que la masa de aire introducida en el motor sea mayor que en aspiración natural, se puede quemar más combustible (más potencia).

Esta sobrealimentación suele ser por turbina de escape, que se basa en aprovechar los gases de escape para mover una turbina que al mover su eje acciona un compresor por el que pasa el aire limpio y se comprime antes de entrar al motor.

El aire comprimido puede ser enfriado mediante un componente llamado *intercooler*, para aumentar la densidad del aire antes de entrar al motor y obtener ventajas mayores con este tipo de aspiración.

Figura 9. **Motor de combustión interna de aspiración natural y con sobrealimentación**



Fuente: *Turbo cargadores*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/imagesturbo/turbo-funcion.jpg>. Consulta: 30 de agosto de 2015.

## 1.5. Factores de funcionamiento

A continuación se presentaran los factores de funcionamiento que se deben de tomar en consideración para el diseño de un motor de combustión interna.

### 1.5.1. Rendimiento mecánico

La potencia obtenida de un motor es llamada comúnmente la potencia al freno ( $b_{hp}$ ) y algunas veces potencia en la flecha o simplemente caballos producidos. La potencia general desarrollada sobre el émbolo del motor se llama la potencia indicada ( $i_{hp}$ ).

Una parte de la potencia indicada desarrollada al quemarse el combustible y el aire no aparece como potencia al freno, ya que se emplea para vencer la fricción en los cojinetes, émbolos y otras partes mecánicas del motor, además de la inducción de la carga de aire-combustible y en la expulsión de los gases de escape.

La potencia para realizar esas tareas se llama potencia perdida en las fricciones o potencia de la fricción ( $f_{hp}$ ). La potencia al freno es menor que la indicada, en una cantidad igual a la potencia consumida en las fricciones del motor:

$$i_{hp} = h_{bp} + f_{hp}$$

La potencia perdida en las fricciones es difícil de determinar experimentalmente, por no haber un método directo para medirla y sí haber variaciones entre las condiciones de funcionamiento y de prueba del motor.

Una aproximación para los motores de alta velocidad es moverlo mediante un dinamómetro eléctrico (el motor no encendido) y considerar que los  $f_{hp}$  sean iguales a la potencia requerida por el dinamómetro para condiciones particulares del motor: temperatura del aceite, posición del acelerador, revoluciones por minuto, entre otras.

La relación entre la potencia producida por el motor ( $b_{hp}$ ) y la potencia total desarrollada dentro de él ( $i_{hp}$ ) se conoce como rendimiento mecánico  $n_m$ .

$$n_m = 1 - \frac{f_{hp}}{i_{hp}}$$

### **1.5.2. Trabajo**

La energía química del combustible se transforma en energía mecánica al empujar los pistones dentro del motor. La energía mecánica o trabajo mecánico es el producto de multiplicar una fuerza por el espacio recorrido.

De lo anterior se deduce que el trabajo es producto de fuerza por distancia; de modo que también se puede definir por una fórmula:

$$W = F \times d$$

Donde W es el trabajo, F la fuerza y d la distancia recorrida. La distancia se expresa generalmente en metro (m) y la fuerza en kilogramos (kg). Su producto, el trabajo (W), resulta por consiguiente en kilogramos-metro.

### **1.5.3. Potencia**

Expresa la cantidad de trabajo realizado por unidad de tiempo y se describe como la rapidez con que se efectúa trabajo.

La potencia desarrollada por un motor depende, por lo tanto, de la relación de compresión y de la cilindrada, ya que a mayores valores de estas, corresponde mayor explosión y más fuerza aplicada al pistón; también depende de la carrera, del número de cilindros y de las revoluciones por minuto a las que gira el motor.

Puesto que la potencia es una medida del trabajo realizado en un cierto tiempo, lo anterior puede expresarse con una fórmula:

$$P = W/t$$

$$P = (F \times d) / t$$

Donde P es potencia, W trabajo y t tiempo (expresado generalmente en segundos).

#### **1.5.4. Caballos de potencia**

La potencia de salida de la mayor parte de los motores se mide en caballos de potencia, unidad ideada por James Watt, el escocés inventor del motor de vapor. Watt halló que un caballo de tipo medio, trabajando a un ritmo constante, podría realizar cerca de 550 pies-libra de trabajo por segundo, es decir, 33 000 pies-libra por minuto.

Con base en lo anterior, se definió la unidad caballo de potencia (HP, del inglés *horsepower*), de manera que 1 HP = 550 pies-libra por segundo, o bien, 1 HP = 33 000 pies-libra por minuto. En el sistema métrico se ha definido análogamente el caballo métrico o caballo de vapor:

$$1 \text{ CV} = 75 \text{ kgm/seg}$$

O bien,

$$1 \text{ CV} = 4\,500 \text{ kgm/min}$$

### 1.5.5. Par de rotación

Hasta ahora se ha descrito la potencia considerando un movimiento rectilíneo, es decir, cuando la fuerza y el movimiento (o desplazamiento) son en línea recta. Sin embargo, muy frecuentemente la potencia es rotacional, como en el caso del cigüeñal de un motor. Cuando la fuerza se aplica de modo que produzca un movimiento rotatorio o de torsión para hacer girar un eje de máquina, a tal efecto se le llama par de rotación (o par motor). La fuerza se aplica siempre a una cierta distancia del centro del eje.

En la fórmula del par de rotación (llamado torque, en inglés) interviene la distancia del punto donde se aplica la fuerza al centro de rotación y se llama brazo de palanca. Tal fórmula del par motor es:

$$T = r \times F$$

Donde T es la magnitud del par (llamada momento), r el radio o brazo de palanca y F la fuerza. El par se expresa generalmente en metros-kilogramo, puesto que es también el producto de una fuerza (en kilogramos) aplicada a una cierta distancia del centro de rotación.

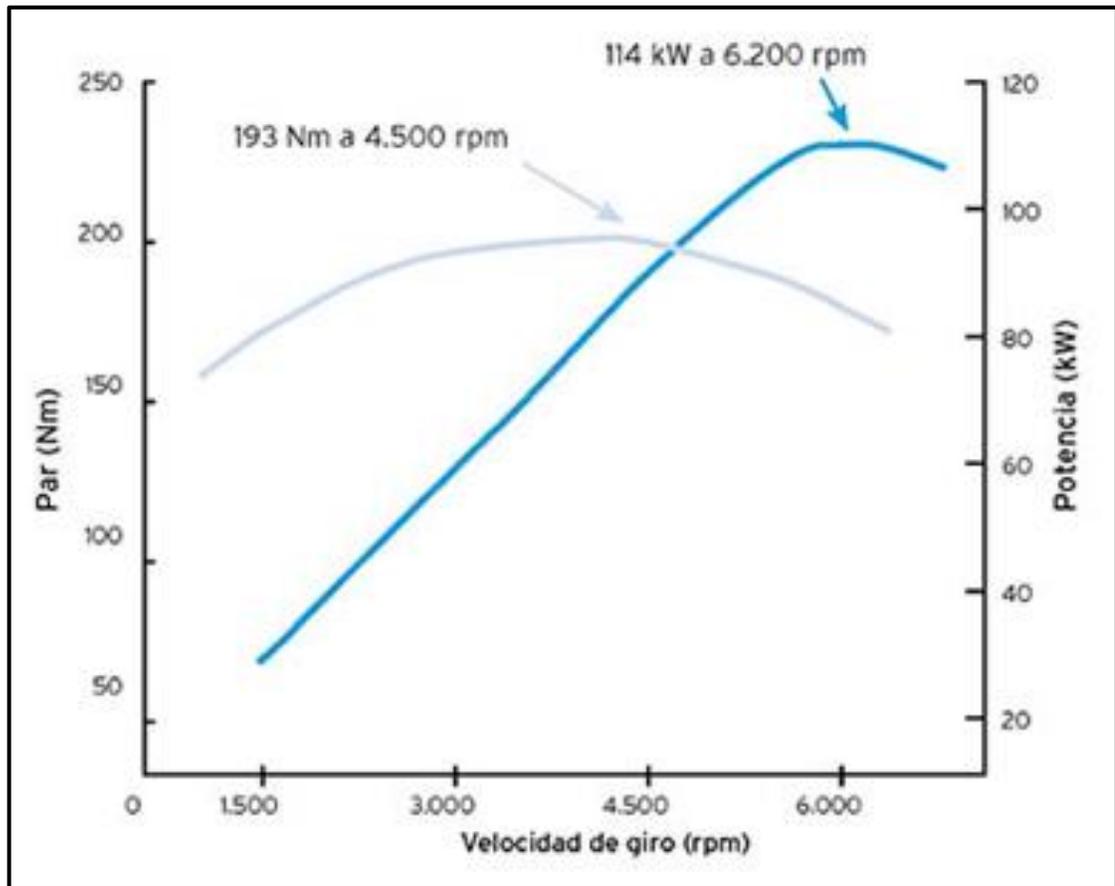
De lo anterior se determina que el valor del par es el producto de la fuerza aplicada sobre el pistón y de la longitud del codo del cigüeñal. La fuerza que actúa sobre el pistón es proporcional a la presión media efectiva durante la carrera de explosión y expansión. El valor de esta presión media depende del grado de llenado de los cilindros y de la eficacia con que se desarrolla la combustión.

- Curvas características par motor

El valor máximo de potencia no coincide con las mismas revoluciones que el par motor, ya que si bien, este último va en aumento a medida que lo hace el número de revoluciones, llega un momento en que al crecer la velocidad de rotación del motor, los cilindros se llenan de menor cantidad de mezcla, como consecuencia del menor tiempo que está abierta la válvula de admisión. Por lo tanto, la explosión es menor y el par va disminuyendo a partir de un cierto régimen.

Sin embargo, con la potencia no ocurre exactamente igual, ya que al aumentar el número de revoluciones hasta un cierto valor, aunque las explosiones sean menores, se producen en mayor cantidad al girar el motor con más revoluciones y, en consecuencia, aumenta la potencia hasta un límite de régimen del motor más alto que en el par motor.

Figura 10. **Curvas características par/potencia**



Fuente: *Curso de mecánica*. [http://www.aficionadosalamecanica.net/cur\\_mec\\_cilindrada.htm](http://www.aficionadosalamecanica.net/cur_mec_cilindrada.htm).

Consulta: 2 de septiembre de 2015.



## **2. SISTEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA**

### **2.1. Función del cambio en la caja de velocidades**

El valor del par motor en los motores alternativos está determinado por el valor de la fuerza de expansión de los gases multiplicado por la distancia entre el eje de la biela y el del cigüeñal.

El valor del par motor depende, pues, de la fuerza expansiva de la combustión, independientemente del número de revoluciones, si bien al disponer de un mayor par, también se podrá realizar un mayor trabajo por unidad de tiempo. El producto del par por el número de revoluciones representa la potencia.

Por lo tanto, para aumentar la potencia es preciso aumentar el par o la velocidad de rotación del motor. Es también factible mantener la potencia aumentando el valor del par y disminuyendo las revoluciones; esto se consigue a través del cambio de velocidades.

El par máximo se alcanza a un determinado régimen del motor, a partir del cual su valor disminuye, como consecuencia de disminuir el rendimiento volumétrico, y al aumentar las pérdidas por rozamiento, lo que determina el rendimiento mecánico.

A partir del par máximo, el valor de este disminuye a pesar de aumentar el número de revoluciones, pero el valor de la potencia aumenta hasta un determinado valor a partir del cual disminuye.

Para que se aproveche al máximo el rendimiento del motor, es preciso que su giro se realice entre los valores comprendidos de par máximo y potencia máxima.

Un motor es elástico cuando su par aumenta al disminuir el régimen de rotación, ya que al encontrar el motor una resistencia, su velocidad disminuye y a la vez aumenta su par. Por ello, es preciso que la relación entre par máximo y potencia máxima sea lo más amplia posible, así, un motor elástico requiere un número de velocidades menor.

La velocidad de régimen es el régimen de giro del motor comprendido entre el máximo par y la máxima potencia, franja en la cual el rendimiento del motor se aprovecha al máximo. Cuando el vehículo sube una cuesta su velocidad tiende a disminuir, si disminuye su velocidad también lo hace la potencia desarrollada por el motor, con lo que el vehículo tiende a pararse.

Debe disponerse pues un mecanismo que permita girar al motor a la velocidad de régimen, sin que ello signifique necesariamente un aumento de velocidad del vehículo, ya que lo que se pretende es aprovechar al máximo la energía desarrollada por el motor. Para ello se dispone del cambio de velocidades.

El cambio de velocidades es el elemento de transmisión que se interpone entre el motor y el resto de los elementos de transmisión en un vehículo, para modificar el número de revoluciones en las ruedas e invertir el sentido de giro cuando lo requieran las necesidades de circulación (la marcha atrás).

Como el par motor y las revoluciones de este se transmiten a las ruedas originando en ellas una fuerza de impulsión capaz de vencer la resistencia del vehículo al movimiento, la potencia transmitida en todo momento deberá ser igual al par resistente en las ruedas y la velocidad de estas. Si no se dispusiera de la caja de velocidades, el número de revoluciones del motor se transmitiría íntegramente a las ruedas, con lo que el par desarrollado por el motor debería ser igual al par resistente en las ruedas.

Con las cajas de velocidades se logra mantener, dentro de unas condiciones favorables, la potencia desarrollada por el motor. Actúan, pues, como transformador de velocidad y convertidor mecánico de par, además de inversor de giro.

Las cajas de velocidades en sí son parte de la transmisión del automóvil y juegan un papel muy importante para establecer la fuerza de tracción apropiada y así adaptarse a las necesidades del camino o la carga. La cantidad de etapas de cambio dependerá del campo de utilización del automóvil y de la elasticidad del motor.

La caja de velocidades es un elemento de transmisión que se interpone entre el motor y las ruedas para modificar el número de revoluciones de las mismas e invertir el sentido de giro de las ruedas cuando las necesidades de la marcha así lo requieran. Esta caja de velocidades se acopla directamente al motor, a través de un embrague mecánico, hidráulico o de un convertidor de torque o convertidor de par.

En esencia, la caja de velocidades está constituida de tres ejes principales, esta es la constitución más común:

- Eje primario: el cual, a través del embrague, transmite el giro del motor mediante un piñón, engranado constantemente con otro que mueve un eje denominado intermediario.
- Eje intermediario: en el que hay varios engranajes, con distintos tamaños fijos a él, que transmiten el movimiento a otros situados en el eje secundario, de manera que nunca haya más de una pareja actuando simultáneamente.
- Eje secundario: estriado en toda su longitud sobre el que pueden deslizarse engranajes, en cuyo centro llevan un manguito estriado cuyas estrías coinciden con las del eje secundario, con lo que entre ambos solo hay un grado de libertad y el usuario los puede mover adelante y atrás con la palanca de mando del cambio. Dichos engranajes forman parejas de transmisión con los del eje intermediario. A la relación entre el radio del engranaje del intermediario y el del secundario se le llama relación de transmisión, si se hace engranar el engranaje de mayor diámetro del eje secundario con el menor del eje intermediario, la combinación se llama primera velocidad.

Si la pareja de engranajes que se conectan es la de siguiente tamaño del engranaje del intermediario, lo cual se consigue accionando la palanca del cambio, con su correspondiente del secundario, la combinación sería la segunda velocidad.

Combinando adecuadamente las parejas de engranajes correspondientes del eje intermediario y del secundario se obtienen las diferentes combinaciones de velocidades hacia delante de la caja de cambios.

Para moverse hacia atrás, se emplea un engranaje intermedio, que invierte el giro del eje secundario y con él el de las ruedas. A esta combinación se llama marcha atrás. Hay una posición de los engranajes en la que no se transmite movimiento desde el eje intermediario al secundario. Esta combinación se llama punto muerto o neutral.

## **2.2. Relación de transmisión**

El par desarrollado por el motor es inversamente proporcional al número de revoluciones de este, asimismo, el par resistente de las ruedas lo es al número de revoluciones de estas.

Por lo tanto, el número de revoluciones del motor partido por el número de revoluciones en las ruedas será la desmultiplicación que ha de aplicarse en el cambio de velocidades para obtener el par necesario en las ruedas, que está en función del diámetro o el número de dientes de los elementos engranados entre sí.

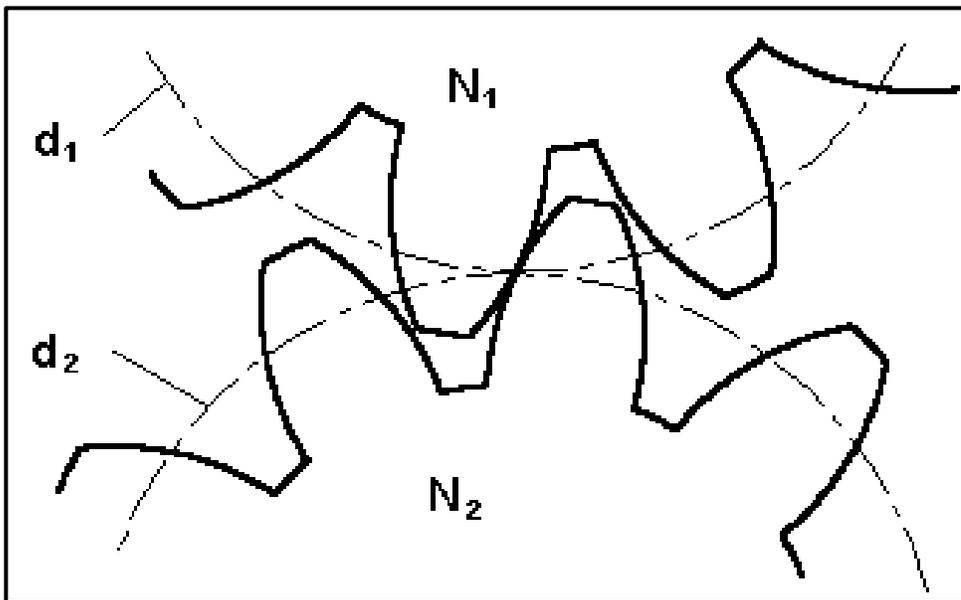
Las distintas relaciones de desmultiplicación que han de acoplarse en un cambio de velocidades se establecen en función del par máximo transmitido por el motor y el número máximo de revoluciones del motor. Con ello se determina que se transmite a las ruedas y la velocidad máxima a la que puedan girar.

La relación de transmisión será, entonces, la relación existente entre la velocidad del eje de salida (ruedas) y la velocidad del motor, la cual se expresa mediante la ecuación:

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_2}{Z_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

Dónde  $N$  es el número de revoluciones por minuto,  $d$  es el diámetro primitivo de las rueda dentada y  $Z$  el número de dientes del engranaje

Figura 11. **Relación de transmisión de un engranaje**



Fuente: *Curso de mecánica*. [http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/imagenes/engra\\_3.gif](http://polamalu.50webs.com/OF1/mecanica/imagenes/engra_3.gif).

Consulta: 5 de septiembre de 2015.

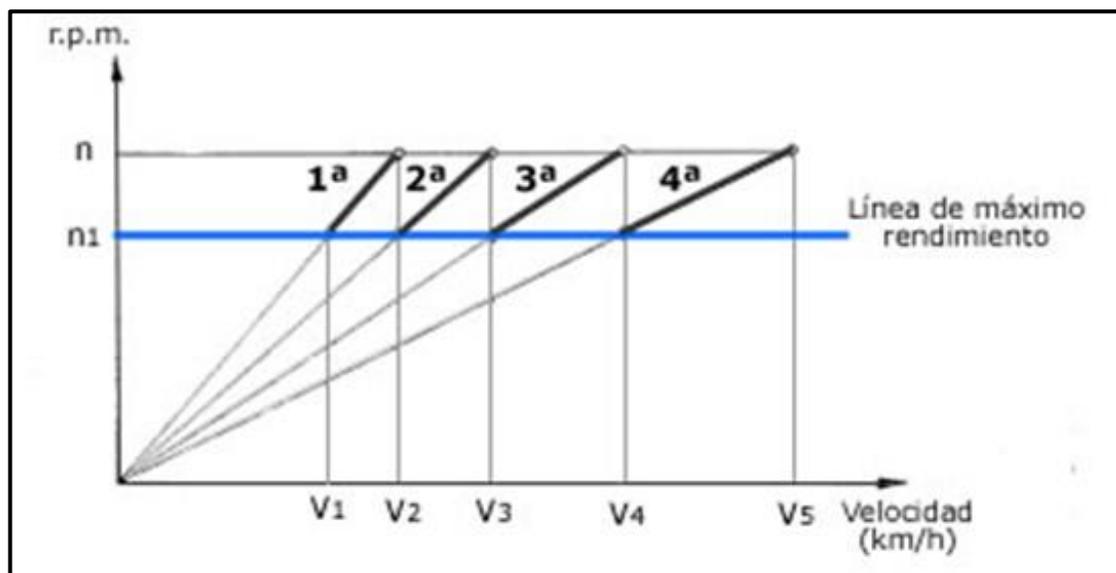
- Cálculo de velocidades para una caja de velocidades

Para calcular las distintas relaciones de desmultiplicación que se pueden obtener en una caja de cambios, hay que partir del par máximo transmitido por el motor, ya que dentro de este régimen es donde se obtiene la mayor fuerza de impulsión en las ruedas. Para ello, se representa en un sistema de ejes coordenados las revoluciones máximas del motor que están relacionadas directamente con la velocidad obtenida en las ruedas, en función de su diámetro.

Siendo  $n$ , el número de revoluciones máximas del motor y  $n_1$  el número de revoluciones al cual se obtiene el par de transmisión máximo del motor (par motor máximo), dentro de ese régimen deben establecerse las sucesivas desmultiplicaciones en la caja de cambios.

Entre estos dos límites ( $n$  y  $n_1$ ) se obtiene el régimen máximo y mínimo en cada desmultiplicación para un funcionamiento del motor a pleno rendimiento.

Figura 12. **Cálculo de velocidades para una caja de velocidades**



Fuente: *Curso cajas mecánicas*. <http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/1000/1104/html/grafico.jpg>. Consulta: 6 de septiembre de 2015.

## **2.3. Clasificación de los cambios de velocidades**

Los cambios de velocidades se pueden clasificar en tres grupos:

- Cambios de velocidades mecánicos con selección manual
- Cambios semiautomáticos
- Transmisiones automáticas

La gran mayoría de los cambios en los vehículos industriales pertenecen al primer grupo, aunque en los últimos años han aparecido con fuerza los semiautomáticos, debido, en gran parte, al avance de la electrónica. Finalmente, las transmisiones automáticas prácticamente son inexistentes y son más propias de vehículos destinados a la ciudad y vehículos para el transporte de personas (autobuses).

### **2.3.1. Cambio manual**

El cambio manual puede tener la piñonería interna con el dentado de dos tipos principales:

- Dentado recto
- Dentado helicoidal

A su vez, la introducción de las velocidades puede ser de dos tipos:

- Sin sincronizar
- Sincronizada

Otro de los elementos diferenciadores lo podría constituir el tipo o sistema de sincronización para igualar el giro de los diferentes ejes a la hora de seleccionar una velocidad, así como el sistema de enclavamiento de la velocidad seleccionada.

El sistema de cambio de marchas manual ha evolucionado notablemente desde los primeros mecanismos de caja de velocidades de marchas manuales sin dispositivos de sincronización, hasta las actuales cajas de cambio sincronizadas de dos ejes.

Los componentes principales de la caja de velocidades manual son los siguientes:

- Eje primario: recibe el movimiento a la misma velocidad de giro que el motor, mediante el embrague, habitualmente lleva un piñón conductor en las cajas longitudinales para tracción trasera o delantera.
- Eje intermediario: es el árbol opuesto o contra eje, consta de un piñón corona conducido que engrana con el eje primario y de varios piñones que pueden engranar con el árbol secundario en función de la marcha seleccionada
- Eje secundario: consta de varios engranajes conducidos que están montados sueltos en el eje pero que se pueden hacer solidarios con el mismo mediante un sistema de desplazables.

- Eje de marcha atrás: en el engranaje para marcha atrás normalmente se utiliza un dentado recto en lugar de un dentado helicoidal, el cual es más sencillo de fabricar. Asimismo, cuando el piñón se interpone, cierra dos contactos eléctricos de un conmutador que enciende la luz o luces de marcha atrás y al soltarlo vuelve abrir dichos contactos, apagando la luz.
- Anillo sincronizador: este anillo conecta con un engranaje en el eje de salida que gira libremente. La fuerza de fricción resultante causa la rotación de los engranajes parejas.
- Piñones: son los engranajes encargados de transmitir el movimiento del par primario al eje secundario, multiplicando o desmultiplicando a la vez el par motor.
- Buje desplazable: hace que el piñón loco y su eje sean solidarios en rotación, el anillo de sincronización lleva el desplazable y el piñón loco a la misma velocidad.
- Piñón loco: también se le conoce por el nombre de piñón de reversa, y tiene la función de cambiar el sentido de rotación proveniente del eje fijo al eje móvil, para así poner marcha atrás.
- Horquillas: se encargan de desplazar al conjunto mecánico de los sincronizadores para elegir una velocidad determinada.
- Rodamientos: soportan los piñones arrastrados, transmiten el movimiento al puente a través del piñón de salida.

Independientemente de la disposición transversal o longitudinal y delantera o trasera, las actuales cajas de cambios manuales son principalmente de dos tipos:

- Tres ejes: un eje primario recibe el par del motor a través del embrague y lo transmite a un eje intermediario. Este, a su vez, lo transmite a un eje secundario de salida, coaxial con el eje primario, que acciona el grupo diferencial.
- Dos ejes: un eje primario recibe el par del motor y lo transmite, de forma directa, a uno secundario de salida de par que acciona el grupo diferencial.

En ambos tipos de cajas manuales, los piñones utilizados actualmente en los ejes son de dentado helicoidal, el cual presenta la ventaja de que la transmisión de par se realiza a través de dos dientes simultáneamente en lugar de uno, como ocurre con el dentado recto tradicional, siendo además la longitud de engrane y la capacidad de carga mayor.

Esta mayor suavidad en la transmisión de esfuerzo entre piñones se traduce en un menor ruido global de la caja de velocidades. En la marcha atrás se pueden utilizar piñones de dentado recto, ya que a pesar de soportar peor la carga su utilización es menor y además tienen un coste más reducido.

En la actualidad, el engrane de las distintas marchas se realiza mediante dispositivos de sincronización, o sincronizadores que igualan la velocidad periférica de los ejes con la velocidad interna de los piñones de forma que se consiga un perfecto engrane de la marcha sin ruido y sin peligro de posibles roturas de dentado.

Es decir, las ruedas o piñones están permanentemente engranados entre sí de forma que una gira libremente sobre uno de los ejes que es el que tiene que engranar y el otro es solidario en su movimiento al otro eje.

El sincronizador tiene, por tanto, la función de un embrague de fricción progresivo entre el eje y el piñón que gira libremente sobre él.

Los sincronizadores suelen ir dispuestos en cualquiera de los ejes de forma que el volumen total ocupado por la caja de velocidades sea el más reducido posible. Existen varios tipos de sincronizadores, entre los cuales destacan: sincronizadores con cono y esfera de sincronización, sincronizadores con cono y cerrojo de sincronismo, sincronizadores con anillo elástico, entre otros.

El accionamiento de los sincronizadores se efectúa mediante un varillaje de cambio que actúa mediante horquillas sobre los sincronizadores, desplazándolos axialmente a través del eje y embragando en cada momento la marcha correspondiente. Los dispositivos de accionamiento de las distintas marchas dependen del tipo de cambio y de la ubicación de la palanca de cambio.

La situación de la caja de velocidades en el vehículo dependerá de la colocación del motor y del tipo de transmisión, ya sea está delantera o trasera.

### **2.3.2. Cambio automático**

El cambio automático es un sistema de transmisión que es capaz, por sí mismo, de seleccionar todas las marchas o relaciones sin la necesidad de la intervención directa del conductor.

El cambio de una relación a otra se produce en función tanto de la velocidad del vehículo, como del régimen de giro del motor; por lo que el conductor no necesita ni de pedal de embrague ni de palanca de cambios. El simple hecho de pisar el pedal del acelerador provoca el cambio de relación conforme el motor varía de régimen de giro.

El resultado que aprecia el conductor es el de un cambio cómodo que no produce tirones y que le permite prestar toda su atención al tráfico. Por lo tanto el cambio automático no solo proporciona más confort, sino que aporta al vehículo mayor seguridad activa.

Los elementos fundamentales que componen la mayoría de los cambios automáticos actuales son:

- Un convertidor hidráulico de par que varía y ajusta de forma automática su par de salida, al par que necesita la transmisión.
- Un tren epicicloidal, o una combinación de ellos, que establecen las distintas relaciones del cambio.
- Un mecanismo de mando que selecciona automáticamente las relaciones de los trenes epicicloidales. Este sistema de mando puede ser tanto mecánico como hidráulico, electrónico o una combinación de ellos.

Precisamente el control electrónico es la mayor innovación que disponen los cambios automáticos actuales, dando al conductor la posibilidad de elegir entre varios programas de conducción (económico, deportivo, invierno) mediante una palanca de selección, llegando actualmente a existir sistemas de control que pueden seleccionar automáticamente el programa de cambio de marchas más idóneo a cada situación concreta de conducción.

Entre los datos que utilizan estos sistemas para sus cálculos se encuentran, la frecuencia con que el conductor pisa el freno, la pendiente de la carretera, el número de curvas de la misma, entre otras.

Los elementos fundamentales de una caja de velocidades automáticas se describen a continuación.

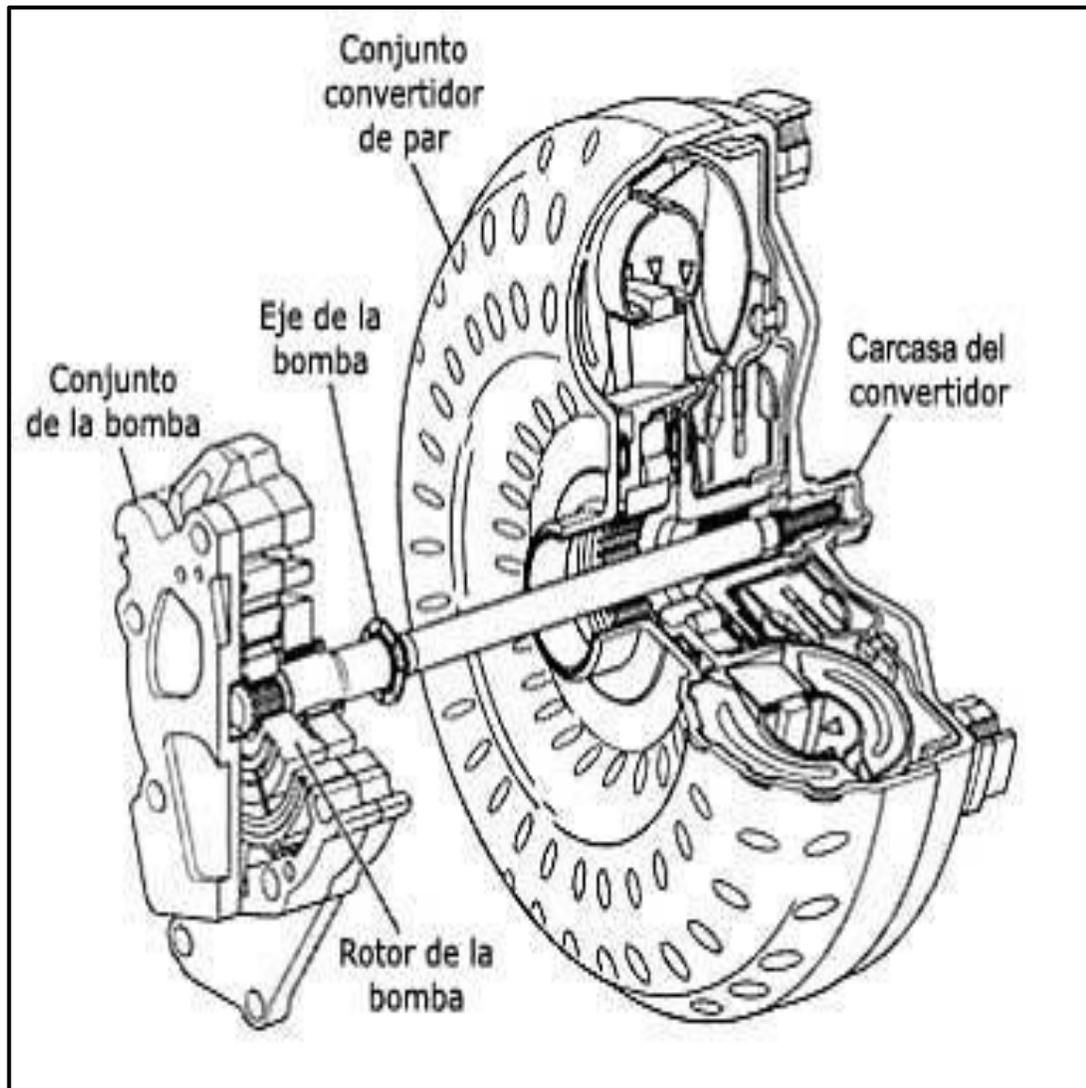
- Convertidor de par

Tiene la función de aumentar por sí solo el par del motor y transmitirlo.

En la figura 13 se muestra un esquema de los componentes del convertidor hidráulico. El convertidor de par dispone de un elemento intermedio denominado reactor o rueda directriz. La rueda de la bomba está accionada directamente por el motor mientras que la turbina acciona el eje primario de la caja de velocidades.

El reactor tiene un funcionamiento de rueda libre y está apoyado en un árbol hueco unido a la carcasa de la caja de cambios. Tanto la bomba como la turbina y el reactor tienen alabes curvados que se encargan de conducir el aceite de forma adecuada.

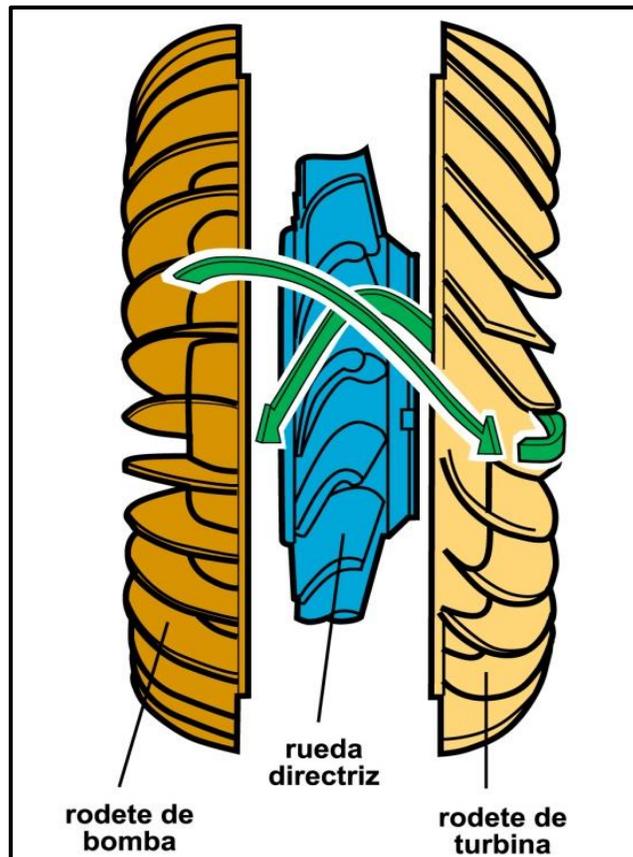
Figura 13. **Convertidor de par**



Fuente: *Curso cajas automáticas.*

[http://www.brasilautomatico.com.br/imagens/materias/CTA4\\_fig01\\_esp.jpg](http://www.brasilautomatico.com.br/imagens/materias/CTA4_fig01_esp.jpg). Consulta: 7 de septiembre de 2015.

Figura 14. **Funcionamiento del convertidor de par**



Fuente: *Curso funcionamiento de cajas automáticas.*

[http://www.cambiosytransfers.es/archivos/informacion/120924165535\\_convertidor\\_de\\_par\\_funcionamiento.jpg](http://www.cambiosytransfers.es/archivos/informacion/120924165535_convertidor_de_par_funcionamiento.jpg). Consulta: 8 de septiembre de 2015.

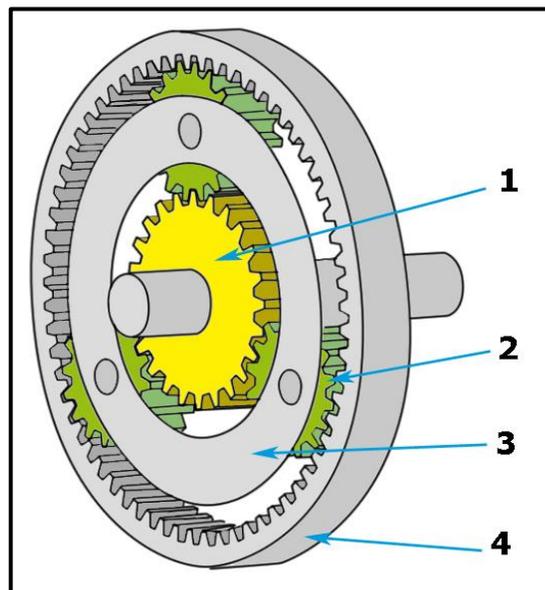
El rodete de bomba es accionado por el motor del vehículo a un número de revoluciones directo. Por acción de la fuerza centrífuga, el aceite es impulsado hacia fuera entre las paletas del rodete de la bomba. En la pared interior de la caja es conducido al rodete de turbina. Esta energía cinética la absorben las paletas, las cuales hacen girar el rodete de la turbina. La energía cinética se convierte en movimiento giratorio mecánico.

- Engranaje planetario

También llamado engranaje epicicloidal, es utilizado por las cajas de cambio automáticas. Estos engranajes están accionados mediante sistemas de mando normalmente hidráulicos o electrónicos que accionan frenos y embragues que controlan los movimientos de los distintos elementos de los engranajes.

La ventaja fundamental de los engranajes planetarios frente a los engranajes utilizados por las cajas de cambio manuales es que su forma es más compacta y permiten un reparto de par en distintos puntos a través de los satélites, pudiendo transmitir pares más elevados.

Figura 15. **Engranaje planetario**



Fuente: *Curso sistema de engranes.*

[http://www.cambiosytransfers.es/archivos/informacion/120926164522\\_sistemaplanetario.jpg](http://www.cambiosytransfers.es/archivos/informacion/120926164522_sistemaplanetario.jpg).

Consulta: 9 de septiembre de 2015.

El engrane planetario está formado por:

- Engranaje central o planeta (1)
- Satélite (2)
- Corona (3)
- Porta satélites (4)

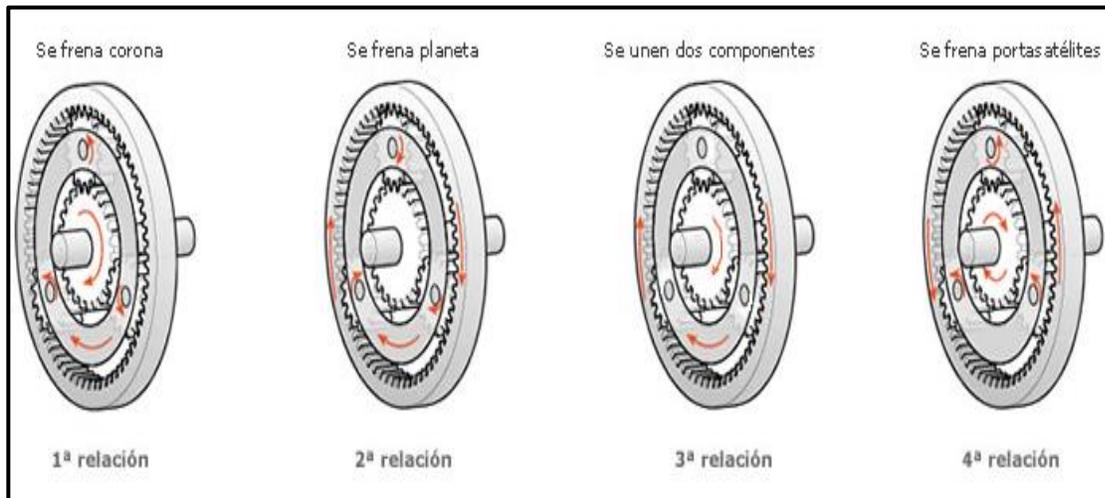
Estos tres componentes (planeta o engranaje central, satélites y corona) del tren epicicloidal pueden moverse libremente sin transmitir movimiento alguno, pero si se bloquea uno de los componentes, los restantes pueden girar, transmitiéndose el movimiento con la relación de transmisión resultante según la relación existente entre sus piñones. Si se bloquean dos de los componentes, el conjunto queda bloqueado, moviéndose todo el sistema a la velocidad de rotación recibida por el motor.

Las relaciones que se pueden obtener en un tren epicicloidal dependen de si ante una entrada o giro de uno de sus elementos, existe otro que haga de reacción.

En función de la elección del elemento que hace de entrada o que hace de reacción se obtienen cuatro relaciones distintas que se pueden identificar con tres posibles marchas y una marcha invertida. El funcionamiento de un tren epicicloidal es el siguiente:

- Primera relación: si el movimiento entra por el planetario y se frena la corona, los satélites se ven arrastrados por su engrane con el planetario rodando por el interior de la corona fija. Esto produce el movimiento del porta satélites. El resultado es una desmultiplicación del giro de forma que el porta satélites se mueve de forma mucho más lenta que el planetario o entrada.
- Segunda relación: si el movimiento entra por la corona y se frena el planetario, los satélites se ven arrastrados rodando sobre el planetario por el movimiento de la corona. El efecto es el movimiento del porta satélites con una desmultiplicación menor que en el caso anterior.
- Tercera relación: si el movimiento entra por el planetario y la corona o el porta satélites se hace solidario en su movimiento al planetario mediante un embrague, entonces todo el conjunto gira simultáneamente produciéndose una transmisión directa girando todo el conjunto a la misma velocidad que el motor.
- Cuarta relación: si el movimiento entra por el planetario y se frena el porta satélites, se provoca el giro de los planetarios sobre su propio eje y a su vez, estos producen el movimiento de la corona en sentido contrario, invirtiéndose el sentido de giro y produciéndose una desmultiplicación grande.

Figura 16. **Funcionamiento del engranaje epicicloidal**



Fuente: *Cajas de cambios automáticas*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-caja-cambios/epicicloidal-funcionamiento.jpg>. Consulta: 9 septiembre de 2015.

Invirtiendo la entrada y la salida en las relaciones de desmultiplicación se obtendrían relaciones de multiplicación.

Estas relaciones se podrían identificar con las típicas marchas de un cambio manual, sin embargo se necesitaría para ello distintos árboles motrices, por lo que, en la aplicación de un tren epicicloidal a un automóvil, las posibilidades se reducen a dos marchas hacia delante y una hacia atrás.

La entrada del par motor se realizaría por el planetario y la salida por el porta satélites o la corona. La primera relación descrita y la tercera serían la primera marcha y la directa, respectivamente, la cuarta relación sería la marcha atrás.

- Sistema de mando para el cambio de velocidades automático

El sistema de control del cambio automático en la caja de velocidades está formado por un circuito hidráulico y una serie de elementos situados en el interior del cárter de la caja de cambios, que realizan las operaciones de cambio automático para las distintas velocidades, sin que tenga que intervenir el conductor. Hay dos elementos principales que se encargan de frenar uno o varios de los componentes del tren epicicloidal para conseguir las diferentes reducciones de velocidad, estos elementos son: la cinta de freno y el embrague.

- Cinta de freno: consiste en una cinta que rodea un tambor metálico. Este tambor puede estar fijado al piñón planeta o puede ser la superficie exterior de la corona de engrane interior. Cuando la cinta de freno esta aplicada, queda inmovilizado el piñón planeta y el engranaje epicicloidal actúa como un reductor de velocidad. La corona interior estará girando, pues está montada sobre el eje de entrada. Esta disposición hace que giren los piñones satélites, a la vez que circunden el piñón planeta, arrastrando consigo al porta satélites, el cual girará animado de una velocidad de rotación inferior a la de la corona interior.
- Embrague: consiste en una serie de placas, la mitad de las cuales están fijadas en el anillo exterior, llamado tambor de embrague, que es solidario con el planeta, la otra mitad lo están al porta satélites. Cuando la presión del aceite aprieta entre si los dos juegos de placas del embrague, este estará conectado.

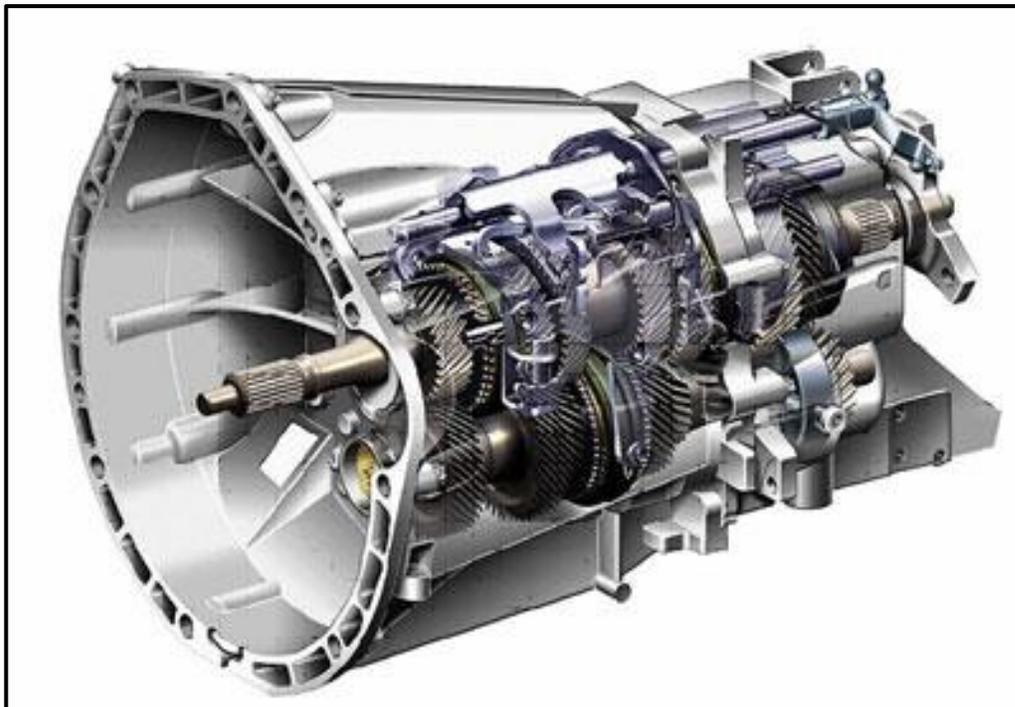
La caja de velocidades automática tiene además otros componentes que constituyen el mecanismo de cambio de velocidades, los cuales son:

- Bomba de aceite: actúa como el corazón de la transmisión automática ya que genera la presión del fluido y alimenta de fluido a todos los componentes de la transmisión. Las más comunes son las bombas de engranajes o de paletas. Su función es la de generar unos 12 kilogramos de presión para la caja de cambios. Es muy importante controlar el estado de la bomba de aceite para evitar las fugas de presión.
- Bandas: son flejes metálicos con fibra por dentro, anclados de distintos modos y accionados por servo.
- Gobernador: válvula que regula presión y fuerza centrífuga del eje de salida en contacto con la caja de válvulas. Hoy, la mayoría son electrónicas y simplifican mucho este sistema.
- Caja de solenoides: hay dos tipos de solenoides (electroimanes), los que realizan algunas o todas las marchas y los que regulan la presión dentro de la caja, y por eso se llaman actuadores. Los solenoides y los sensores están en contacto directo con el aceite hidráulico.
- Sensor: hay de velocidad de entrada, de salida y de temperatura. Los sensores informan a la computadora qué tienen que hacer los actuadores (solenoides) en la caja de válvulas.

- Computadora: componente electrónico que hace de nexo entre los sensores y actuadores de las cajas automáticas. Las partes eléctricas en las cajas automáticas simplificaron mucho las cajas de válvulas y gobernadoras, además de ofrecer una confiabilidad superior.
- Cuerpo de válvulas: Aloja a las válvulas que controlan la dirección del fluido o que proporcionan la regulación de la presión del fluido. El cuerpo de válvulas también aloja varios solenoides que son usados para controlar los cambios de velocidad de la presión del fluido. Tienen cuerpos de aluminio o, en algunos casos, de fundición. La mayoría de las válvulas son de acero y accionan todo el funcionamiento de la caja.
- Electroválvulas: en el cuerpo de válvulas del cambio automático están contenidas válvulas electromagnéticas. Sus funciones para los cambios de las marchas son gestionadas por la unidad de control del cambio automático. Se pueden catalogar en dos diferentes tipos en lo que se refiere a su modo de funcionar.
- Válvulas sí/no: Estas pueden abrir o cerrar un conducto de aceite, siempre al máximo, no existen etapas intermedias. Están destinadas para efectuar los cambios de las marchas. Si se avería cualquiera de estas electroválvulas, la unidad de control del cambio pasa a la función de emergencia.

- Válvulas de modulación: estas válvulas no solo adoptan las posiciones abierta al máximo y cerrada al máximo; se pueden ajustar sin escalonamientos. Se encargan de regular la presión principal del aceite en función de las condiciones de la marcha, para establecer el correcto funcionamiento del cambio automático en su conjunto. De esa forma contribuyen un funcionamiento uniforme del vehículo y a que las marchas cambien sin tirones. En caso de avería, se deja de regular la presión principal del aceite, produciéndose por ello cambios secos, también deja de funcionar el desacoplamiento en parado.

Figura 17. **Vista de caja de cambios automática**



Fuente: *Caja de cambios automática*. [http://3.bp.blogspot.com/-qioKzvctF2g/UYLxG4\\_fH-I/AAAAAAAAAGo/k7X134WzexY/s1600/ca.JPG](http://3.bp.blogspot.com/-qioKzvctF2g/UYLxG4_fH-I/AAAAAAAAAGo/k7X134WzexY/s1600/ca.JPG). Consulta: 12 de septiembre de 2015.

Existen diversos tipos de cajas automáticas, las cuales varían en la cantidad de cambios que pueden hacer, entre los principales están:

- Caja de velocidades automática Hydramatics

Esta caja cuenta con cuatro velocidades y marcha atrás, está formada por un embrague hidráulico o convertidor de par y tres trenes de engranajes epicicloidales (I-II-III), que comunican movimiento del motor al árbol de transmisión de forma automática y progresiva, según la velocidad del vehículo.

- Caja de velocidades automática Tiptronic

Esta caja de cambios de 5 marchas está adaptada para vehículos con el motor montado en posición transversal. Es utilizada por vehículos de la marca Audi, Mazda, Volkswagen, entre otras.

Por la escasez de espacio en el motor, se dispone de tres engranajes planetarios a dos niveles. En el árbol de salida del convertidor de par están dispuestos directamente los engranajes planetarios I y II, debajo se encuentra el engranaje planetario III en un árbol por separado.

Los engranajes planetarios I y II están comunicados con el engranaje planetario III a través de los piñones cilíndricos A y B. La salida de par se realiza siempre a través del piñón de salida sobre el árbol del engranaje planetario III. A partir del piñón de salida, el par se transmite hacia el grupo diferencial y los semiejes.

Este cambio se caracteriza por los siguientes componentes y funciones:

- Cambio automático de las cinco marchas mediante programas de conducción supeditados al conductor y a las condiciones de la marcha.
  - Un programa de conducción en función de la resistencia que se opone a la marcha (detecta resistencias a la marcha, tales como subidas y bajadas, conducción con remolque y viento contrario).
  - Tiptronic.
  - Indicador de las marchas en el cuadro de instrumentos.
  - Bloqueo antiextracción de la llave de contacto.
  - Convertidor de par con embrague anulador del convertidor de par.
  - Desacoplamiento en parado.
- Caja de velocidades automática Multitronic

Se trata de una transmisión CVT (*continuously variable transmission*), en la cual se duplica la frontera de los 15 kg-m de par, situándolo en los 30 kg-m. El Multitronic no monta una correa metálica sino una cadena, cuya configuración rompe por completo con las correas utilizadas hasta el momento. La cadena funciona en tensión en un baño de aceite entre dos pares de ruedas cónicas de diámetro variable.

El diseño y el peso reducido de este cambio reducen el consumo de combustible. Al igual que en el cambio Tiptronic de 5 velocidades, está disponible el modo de selección de marcha manual, pudiéndose seleccionar hasta seis etapas de marcha simuladas.

El modo automático del Multitronic calcula la relación de transmisión óptima con ayuda de un programa de regulación dinámico (DRP), según la carga del motor, las preferencias del conductor y las condiciones de marcha.

Una ventaja básica del variador en el sistema Multitronic es la amplia relación de transmisión entre la mayor y la menor desmultiplicación (1: 2,1 hasta 1:12,7) siendo, de este modo, superior a 6, lo cual representa casi un caso ideal para la transmisión que hasta ahora apenas sobrepasaba un valor de 5.

Gracias a esta característica, por una parte, se puede acelerar de forma deportiva y dinámica, debido a la mayor desmultiplicación posible y, por otra parte, se puede aprovechar completamente la menor desmultiplicación para potenciar el ahorro del combustible.

Las características de este cambio permiten un doble manejo:

- Automático: se ha desarrollado una gestión con cierta capacidad adaptativa. Reconoce la forma de conducir y el perfil de la carretera, escogiendo los desarrollos más adecuados en cada momento. Audi lo llama DRP (programa dinámico de regulación).
- Secuencial: mediante palanca tradicional o con mandos al volante. Para ello se fijan seis posiciones concretas de las poleas del variador.

- Caja de velocidades automática (*direct shift gearbox*, DSG)

Este tipo de caja de velocidades automática fue desarrollado por la marca Volkswagen, la cual emplea doble embrague y permite cambios de velocidad mucho más rápidos, más suaves y con menor gasto energético. Su manejo es una simbiosis de la facilidad de uso de una caja de cambios automática secuencial y el placer de conducción de una caja de cambios manual de seis relaciones.

Una característica significativa que diferencia al DSG de las cajas automáticas convencionales es que el nuevo sistema no utiliza el convertidor de par.

La caja DSG tiene ventajas apreciables en términos de prestaciones y ahorro de combustible. Con idéntica aceleración y velocidad punta, cambia con la misma suavidad que la caja automática y, adicionalmente, se pueden cambiar las marchas manualmente a través de la función Tiptronic.

El cambio se realiza de forma más rápida y directa de lo que era posible hasta ahora con cualquier tipo de caja, manual o automática. Los tiempos de aceleración son menores que los obtenidos con la caja de cambios manual.

Una característica de diseño destacable de la caja de cambios (montada de forma transversal) son los dos embragues en baño de aceite, con control hidráulico de presión. El primer embrague mueve las marchas impares, más la marcha atrás, y el segundo embrague las pares. Por lo tanto, a todos los efectos, debe hablarse de dos cajas de cambio paralelas.

Como consecuencia de esta elaborada gestión de embrague, durante el cambio de marcha no hay interrupción alguna de la fuerza de tracción, una acción típica de una transmisión manual automatizada. Por ello, se produce un cambio de marchas de máximo dinamismo con un alto nivel de confort. La eficiencia de esta caja de cambios es comparable a la de una transmisión manual.

Los dos embragues con ejes de entrada y de salida, están gestionados por el Mechatronic, un control inteligente hidráulico y electrónico. Esta interconexión permite que la marcha siguiente siempre esté colocada y lista para ser activada de forma inmediata.

Como ejemplo, mientras el coche circula en tercera marcha, la cuarta velocidad ya está engranada, aunque no activada. En el momento en que se alcanza el régimen de cambio, el embrague de la tercera marcha se abre, mientras que el otro se cierra, activando la cuarta marcha. El proceso de apertura y cierre de los embragues es totalmente coincidente, lo que produce el cambio directo y suave ya mencionado. Todo este proceso se realiza en centésimas de segundo.

Las características específicas del cambio automático DSG son:

- Seis marchas adelante y una marcha atrás.
- Programa de conducción normal “D”, programa de conducción deportiva “S”, así como conmutador Tiptronic en la palanca selectora y en el volante de dirección.
- Mechatronic: es una unidad de control electrónica y electrohidráulica, constituye una sola unidad alojada en el cambio.

- Función de retención en pendientes *hillholder*; si el vehículo parado con el freno accionado solo levemente tiende a desplazarse, el sistema aumenta la presión en el embrague y retiene el vehículo en parado.
- Regulación *creep* de la fuga lenta, esto permite que el vehículo se mueva en marcha lentísima.
- Un programa de marcha de emergencia. Con la función de emergencia y según el tipo de fallo que haya ocurrido, ya solo se puede circular en 1ª y 3ª marchas o solamente en 2ª marcha.

#### **2.4. Principio de funcionamiento de una caja de velocidades tipo manual**

El par motor es transmitido al eje primario de la caja, constituido en tren de engranajes intermediario, y es cedido mediante el correspondiente engranaje acoplado, al eje de salida del par, llamado secundario.

Los engranajes helicoidales (de mayor capacidad de transmisión de par y más silenciosos que los engranajes rectos) del eje secundario, se encuentran constantemente acoplados con los engranajes correspondientes del primario. Así, el primer engranaje, el más pequeño del eje primario se encuentra constantemente engranado con el de mayor diámetro del secundario, constituyendo esta primera relación de transmisión la primera velocidad y de igual modo, de forma correlativa, el resto de pares de engranajes.

A pesar de esta toma constante entre los engranajes del eje primario y secundario, solo se consigue la transmisión de par en el eje de salida cuando se selecciona una velocidad mediante unos manguitos y cubos sincronizadores que giran solidarios con el secundario, pues los engranajes helicoidales lo hacen libremente sobre este eje.

Al seleccionar una velocidad superior, el engranaje del eje primario gira a mayor velocidad, movido por el motor a pesar de haber desacoplado el embrague, que el manguito y el cubo sincronizador movidos por el eje secundario.

Después de desacoplarse de su posición centrada y al accionar la palanca selectora, el manguito sincronizador es desplazado hacia el engranaje del secundario de la velocidad que se vaya a seleccionar. El aro, mediante la horquilla y la barra bloqueadora, empuja el manguito sobre el cono del engranaje.

El cono de fricción del manguito hace que la velocidad del engranaje gire más rápido, que quedará reducida a la del eje secundario, permitiendo así la selección de la velocidad mediante el acoplamiento del dentado del manguito con el dentado del engranaje del secundario.

Cuando se selecciona una velocidad inferior, el efecto se produce al revés, acelerando, mediante el sincronizador, el engranaje de giro más lento. El engranaje de marcha atrás en el eje primario tiene dientes rectos e impulsa un engranaje montado sobre el manguito de primera/segunda del eje secundario mediante la interposición entre ellos de un engranaje loco.

Esta relación se produce con dientes rectos porque, al no ser de toma constante, no producen rumorosidad alguna en condiciones normales de marcha; además, no necesita estar sincronizada ya que se supone que el vehículo se ha detenido antes de realizar la maniobra de inversión de marcha.

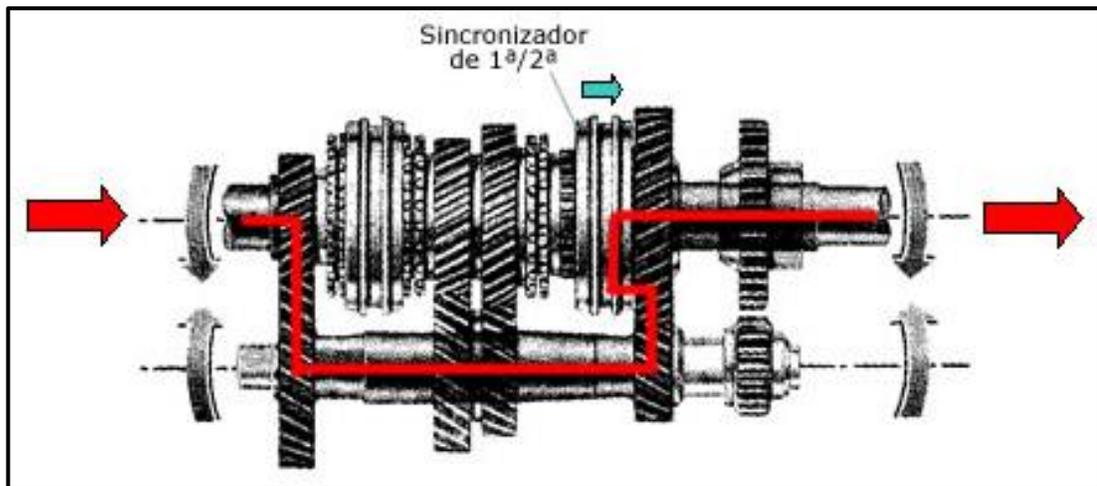
Los movimientos radiales y axiales que se imprimen a la palanca selectora son transmitidos mediante un eje de control a un bloque selector en el interior de la caja. Al desplazar las horquillas, montadas sobre sus ejes guía, mediante el movimiento axial o radial del eje de control, se consigue el acoplamiento del engranaje requerido.

El engranaje, una vez se ha realizado el acoplamiento, puede trabarse mediante un elemento de bloqueo situado en el selector o en los ejes guía de las horquillas, con el fin de que no se salgan las marchas en movimiento.

El procedimiento para una caja de cuatro velocidades y marcha atrás se describe a continuación:

- Primera velocidad: se desplaza el sincronizador de 1ª/2ª hacia la derecha, lo cual provoca el enclavamiento del piñón loco del eje secundario que se acopla con este eje. Con esto, el giro se transmite desde el eje primario hasta el eje secundario con una reducción de la velocidad. En esta posición se obtiene la máxima reducción del giro o la mínima velocidad e inversamente el máximo par.

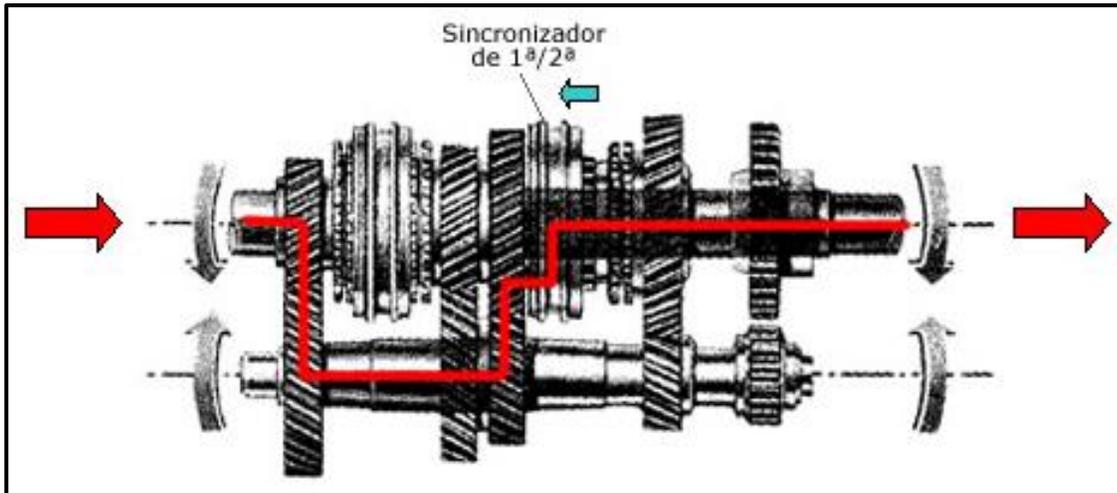
Figura 18. **Transmisión del movimiento para la primera velocidad de una caja de velocidades manual**



Fuente: *Cajas de cambios manual*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/images-caja-cambios/caja-1-velocidad.jpg>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

- Segunda velocidad: se desplaza el sincronizador de 1ª/2ª hacia la izquierda, provocando el enclavamiento del piñón loco del eje secundario y acoplándolo con este eje. El giro es transmitido en este caso desde el eje primario hacia el secundario con la respectiva reducción de velocidad, para este caso, la reducción del giro es menor que en la 1ª velocidad, aumenta la velocidad y disminuye el par.

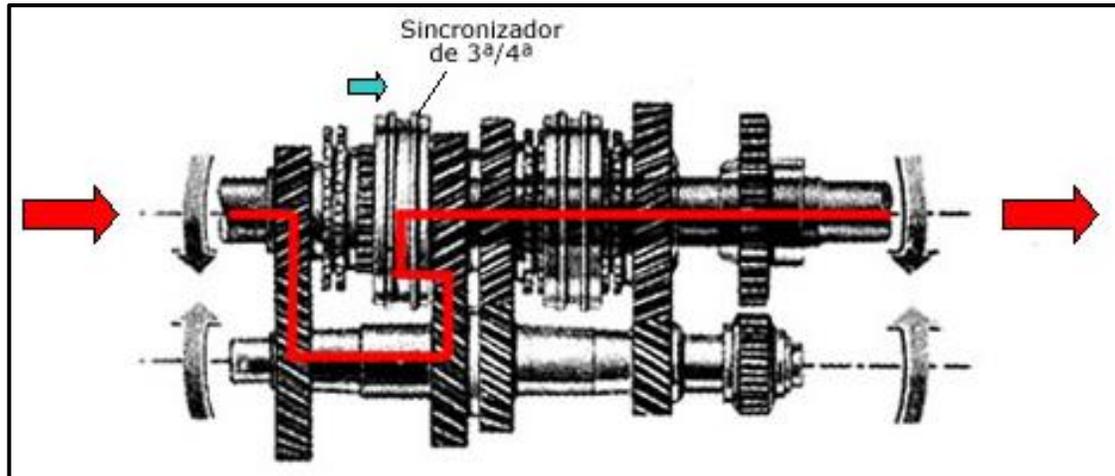
Figura 19. **Transmisión del movimiento para la segunda velocidad de una caja de velocidades manual**



Fuente: *Cajas de cambios manual*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/images-caja-cambios/caja-2-velocidad.jpg>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

- Tercera velocidad: se desplaza el sincronizador de 3ª/2ª hacia la derecha, provocando su enclavamiento con el piñón loco del eje secundario, acoplándolo con este eje. El giro se transmite desde el eje primario hacia el eje secundario, reduciendo el giro, con lo cual se aumenta la velocidad, pero el par disminuye.

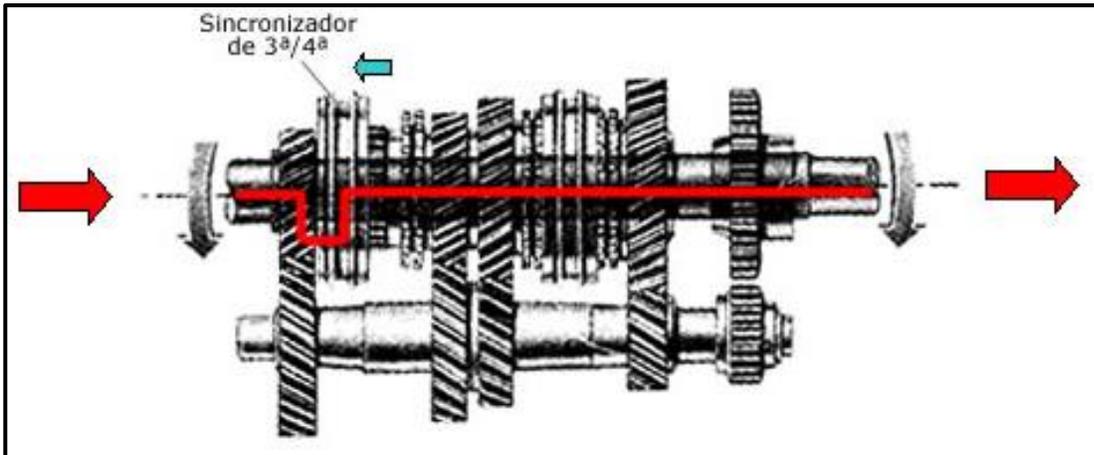
Figura 20. **Transmisión del movimiento para la tercera velocidad de una caja de velocidades manual**



Fuente: *Caja de cambios manual*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/images-caja-cambios/caja-3-velocidad.jpg>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

- Cuarta velocidad: se desplaza el sincronizado de 3ª/4ª hacia la izquierda, para que se produzca el enclavamiento del piñón de arrastre o toma constante del eje primario, acoplándolo con el eje secundario, sin la intervención del eje intermedio. El giro se transmite desde el eje primario hasta el secundario directamente, sin reducción de la velocidad. En este caso, la velocidad de giro del motor es igual a la que sale de la caja de velocidades, pero el par obtenido es el mínimo.

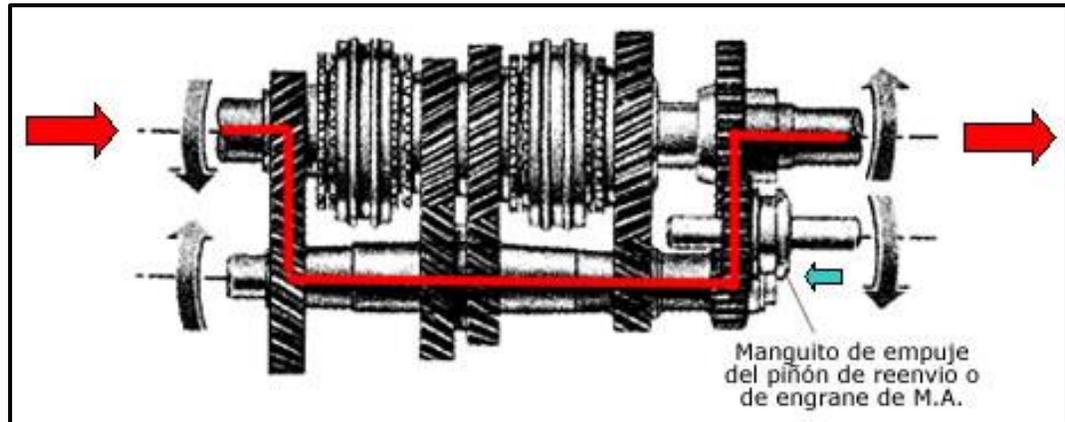
Figura 21. **Transmisión del movimiento para la cuarta velocidad de una caja de velocidades manual**



Fuente: *Caja de cambios manual*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/images-caja-cambios/caja-4-velocidad.jpg>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

- **Marcha atrás:** para la selección de esta velocidad se desplaza el piñón de reenvío, por medio del manguito. El piñón de reenvío, engrana con los piñones rectos del eje intermedio y secundario. Esto permite una la relación de inversión del giro del eje secundario con respecto al primario. La reducción del giro depende de los dos engranajes rectos, ya que el piñón de reenvío actúa únicamente para invertir el giro.

Figura 22. **Transmisión del movimiento para la marcha atrás de una caja de velocidades manual**



Fuente: *Caja de cambios manual*. <http://www.aficionadosalamecanica.com/images-caja-cambios/caja-m-a-velocidad.jpg>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

## 2.5. Transmisiones mecánicas

A continuación se presentan las partes más importantes de una transmisión mecánica.

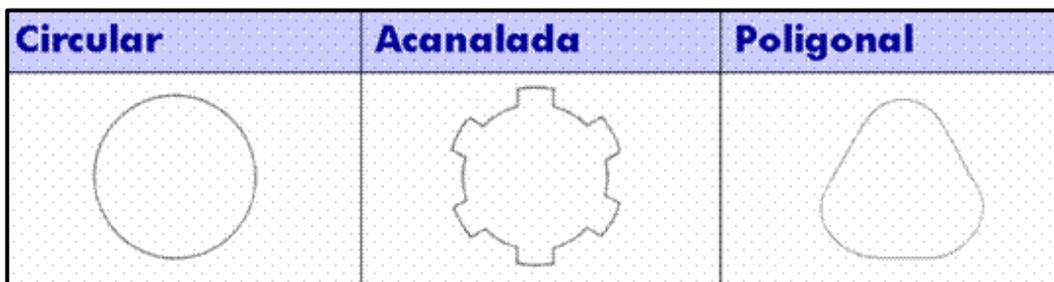
### 2.5.1. Árboles de transmisión

Los árboles de transmisión son elementos de máquinas animados de movimiento de rotación que sirven para transmitir un momento de giro, estando sometidos a torsión, o bien a flexión y torsión simultáneas. También se les llama ejes de transmisión, o por simplificación ejes, aunque esta última denominación es más correcta para los elementos que no transmiten momento de giro.

La sección de un árbol de transmisión suele ser circular (maciza o hueca), aunque en ocasiones tiene otras formas como acanalada o poligonal. La forma circular exige el uso de algún elemento de retención circunferencial para evitar el giro de las poleas o engranajes montadas sobre el eje.

Las formas acanalada o poligonal permiten obviar el uso de estos elementos, ya que proporcionan la retención circunferencial por su propia forma.

Figura 23. **Sección de árboles de transmisión**



Fuente: *Curso de mecánica*. [http://www.mecapedia.uji.es/images/arbol\\_de\\_transmision.2.gif](http://www.mecapedia.uji.es/images/arbol_de_transmision.2.gif).

Consulta: 16 de septiembre de 2015.

En los vehículos, para hacer llegar el movimiento de rotación desde la salida de la caja de velocidades hasta las ruedas, se emplean ejes de transmisión. En el caso de tratarse de cambio de velocidad que han de trasladar el giro hasta el diferencial del puente trasero, se llaman transmisiones longitudinales. En el caso de que el movimiento tenga que realizarse desde el diferencial a las ruedas, se llaman semiejes o palieres (tracción trasera o delantera con puente rígido).

### **2.5.2. Transmisiones longitudinales**

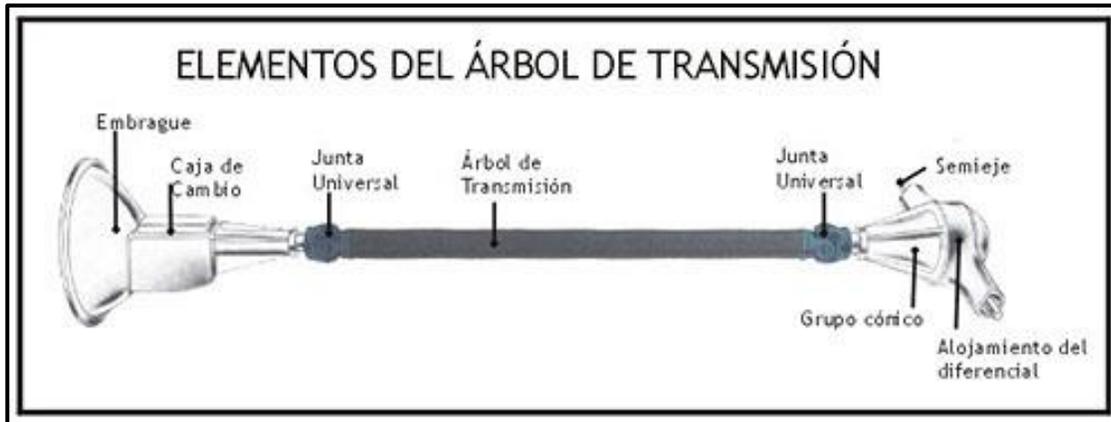
El eje de transmisión longitudinal es un tubo largo de acero, que debe ser liviano y lo suficientemente fuerte para resistir la torsión, es utilizado para transmitir la energía de la caja de velocidades al diferencial trasero, en vehículo con tracción en las 4 ruedas (4WD), de la caja de velocidades al diferencial delantero.

Desde que los vehículos pueden adquirirse tanto con 2WD y 4WD, y en diversas combinaciones (modelos de dos y cuatro puertas), se han de emplear diversos tipos de ejes de transmisión. Algunos modelos estarán equipados con un eje de transmisión trasero de una pieza, mientras que otros modelos tienen un eje de transmisión trasero de dos piezas que utiliza un cojinete de soporte central.

La mayoría de los vehículos 4WD están equipados con un eje delantero que es de tipo telescópico de dos piezas con estrías internas. Esta unión permite cambiar la longitud axial del eje, así como el ángulo con el eje de salida de la caja de transmisión y con el diferencial, cuando el vehículo se conduce sobre baches o cuando varía la carga del vehículo.

Esta disposición, además de reducir el peso, impide que se produzcan vibraciones por flexiones peligrosas y se evita el árbol de transmisión de una sola pieza que requeriría un diámetro demasiado grande. Lleva un soporte intermedio para el árbol de transmisión que va anclado a la carrocería por medio de un sistema elástico.

Figura 24. Elementos del árbol de transmisión

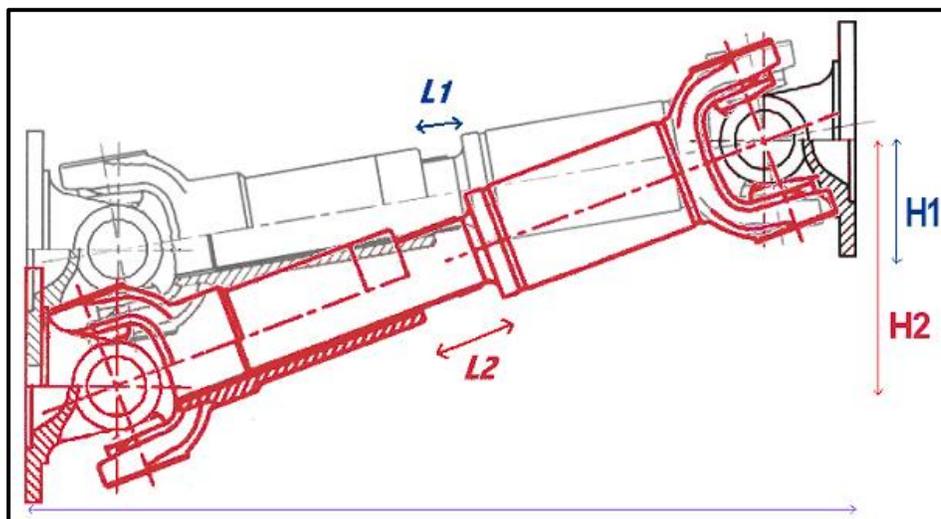


Fuente: *Curso de árbol de transmisión.*

<http://motorgiga.com/cargadatos/fotos2/diccionario/transmision/800px/arb-ol-de-transmision.jpg>.

Consulta: 16 de septiembre de 2015.

Figura 25. Eje de transmisión tipo telescópica



Fuente: *Tipos de ejes de transmisión.* <http://www.automotriz.net/tecnica/images/conocimientos-basicos/38/configuracion-arbol-propulsion.gif>. Consulta: 16 de septiembre de 2015.

Para evitar vibraciones nefastas y desagradables (carga de fatiga) sobre los árboles y los palieres, la transmisión debe ser homocinética (lo que significa que la velocidad de rotación entre la caja de transmisión y el puente debe ser la misma) y esto a pesar de los movimientos relativos.

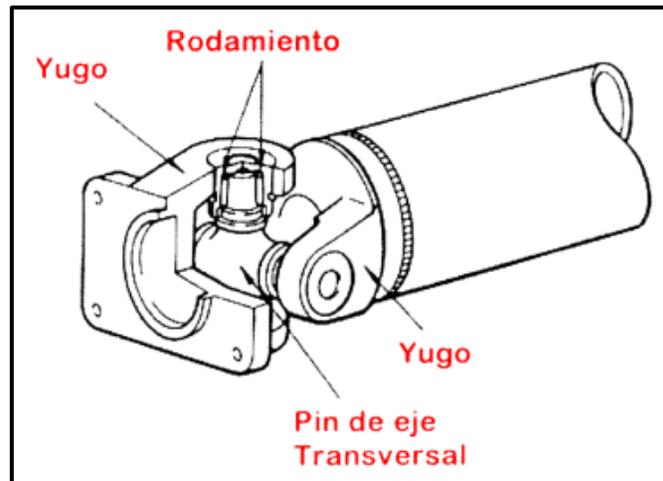
En los extremos del tubo o de los tubos se encuentran las horquillas de fijación de la cruceta a las juntas cardánicas o las bridas de unión a las juntas elásticas, o bien, un simple perno estriado para el acoplamiento con un manguito que permite pequeños movimientos axiales.

- Unión universal

Localizada en ambos extremos del eje de transmisión hay una junta universal (junta U), que esta ideada para transmitir energía de torsión a muchos ángulos diferentes (dentro de los límites proyectados) para dar movimiento al eje trasero. Lo más cerca posible de la transmisión o de la caja de transferencia, la junta U tiene acoplada una junta deslizante.

El eje está diseñado con horquillas de articulación en cada extremo, que están mutuamente en línea para producir la marcha del eje lo más suave posible.

Figura 26. **Unión universal para el árbol de transmisión**



Fuente: MAYS ACOSTA, Edgar. *La transmisión*.

<http://www.automotriz.net/tecnica/images/conocimientos-basicos/38/configuracion-union-universal.gif>. Consulta: 17 de septiembre de 2015.

### 2.5.3. **Equilibrado**

El árbol de transmisión gira con un número de vueltas siempre más elevado que el de las ruedas (de tres a cinco veces), pero es más lento que el cigüeñal en 1ª, 2ª y 3ª velocidad; en 4ª y en directa es cuando el número de vueltas es igual al del cigüeñal (esta condición se produce siempre y cuando el cambio esté acoplado al diferencial). Con la 4ª o la 5ª velocidad, el árbol de transmisión gira en un número de vueltas mayor que el correspondiente al cigüeñal.

Por consiguiente, el árbol siempre deberá estar perfectamente equilibrado, para evitar vibraciones, ruidos y alejar las frecuencias propias del árbol de transmisión de las del resto del vehículo, para evitar efectos de resonancias.

El árbol de transmisión debe de ser capaz de transmitir el par motor y a la vez debe ser ligero, para reducir la inercia, así como las sollicitaciones derivadas de las aceleraciones y de las sacudidas.

Cuando las dimensiones del tubo son capaces de impedir que se produzcan vibraciones por flexión, son también más que suficientes para transmitir el par motor.

Al instalar el árbol de transmisión se debe respetar su posición adecuada para conservar el equilibrio diseñado por el fabricante, lo cual evitará vibraciones, como en las ruedas.



### **3. EJE CARDÁN**

#### **3.1. Características generales**

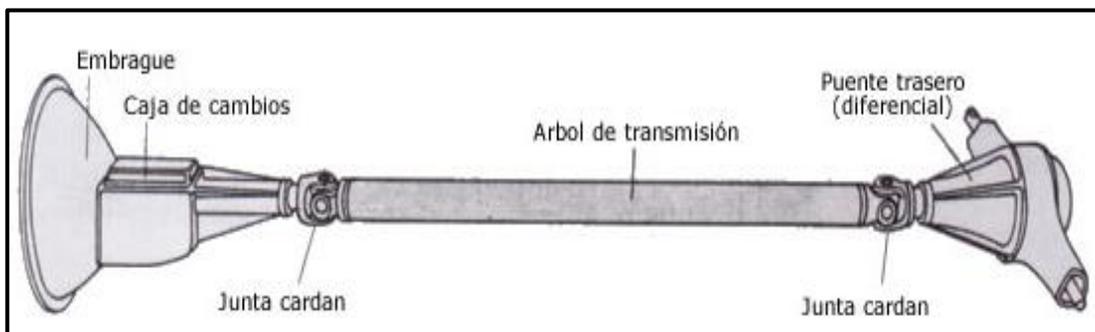
El eje cardán es el encargado de transmitir el par motor desde la caja de velocidades hasta el mecanismo diferencial. Debido a que los ejes cardán están sometidos a esfuerzos constantes de torsión, se deben fabricar de materiales elásticos que contrarresten estos esfuerzos y deben soportar el máximo de revoluciones sin deformarse.

El eje cardán se fabrica como un tubo de sección circular hueca, el cual debe estar equilibrado para no producir esfuerzos en ningún punto del eje. Además del esfuerzo de torsión, el eje cardán está sometido a oscilaciones alrededor de su centro fijo de rotación que modifica continuamente la longitud entre las uniones de la caja de velocidades y del diferencial.

El eje cardán se acopla a la caja de velocidades mediante la junta universal cardán, formada por una horquilla, también llamada yugo, soldada a uno de los extremos del eje hueco, la cual se acopla con otra horquilla por medio de las crucetas. El extremo de la otra horquilla posee una junta deslizante, permitiendo la variación de longitud entre la caja de velocidades y el diferencial, la junta deslizante se acopla a el eje secundario de la caja de velocidades por medio de un estriado interno en la punta de la junta.

En el otro extremo del eje cardán se encuentra una junta con soporte elástico, la cual, mediante tornillos y arandelas, se atornilla al bastidor del automóvil, la junta elástica soporta el eje cardán y se acopla a otra horquilla que se une al eje con el puente trasero (diferencial). En este extremo del eje se encuentra un conector fijo que se ensambla con la horquilla o yugo por medio de estriado en ambos elementos y sujetos por una tuerca y una arandela. La horquilla del eje se acopla a la horquilla del diferencial por medio de las crucetas.

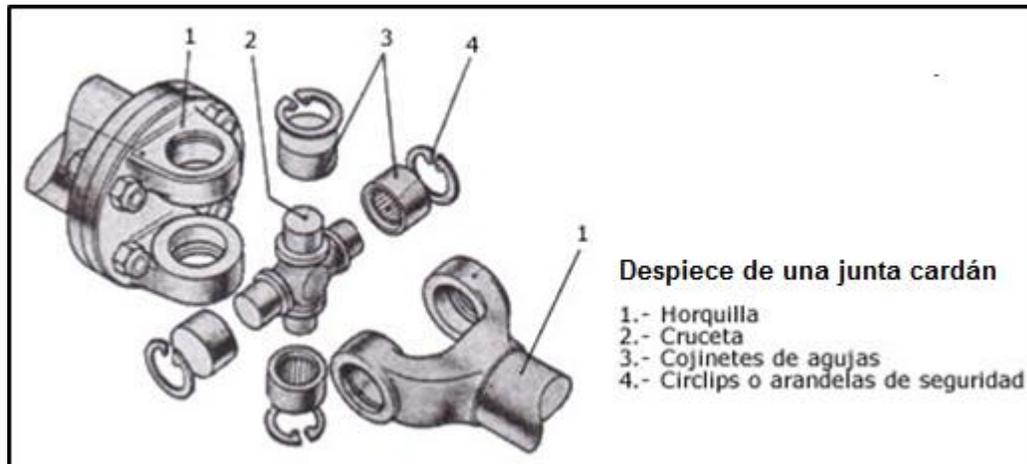
Figura 27. **Acoplamiento de la caja de velocidades al puente trasero (diferencial)**



Fuente: *Curso de ejes de transmisión*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-transmision/acoplamiento-caja-diferencial.jpg>. Consulta: 17 de septiembre de 2015.

Las juntas universales acopladas al eje cardán permiten transmitir el par motor con un desplazamiento angular de 15 hasta 25°. Las juntas están compuesta por una horquilla soldada al extremos del eje cardán, una cruceta encargada del acoplamiento entre las dos horquillas, cojinetes de aguja y sus respectivas arandelas de seguridad.

Figura 28. **Partes de junta universal para eje cardán**



Fuente: *Curso ejes de transmisión*. <http://www.aficionadosalamecanica.net/images-transmision/cardan-despiece.jpg>. Consulta: 19 de septiembre de 2015.

### 3.2. **Materiales usados para su fabricación**

Los materiales para la fabricación del eje cardán se deben seleccionar para que soporten los esfuerzos a los que será sometido cuando se encuentre trabajando. Estos materiales deben ofrecer una capacidad de carga elevada, para transmitir la potencia de la caja de velocidades al diferencial sin fracturarse o doblarse.

Los materiales que cumplen estas características son los aceros, los cuales contiene hierro como componente principal, aleados con carbono en un porcentaje comprendido entre 0,05 hasta 1,7 %, silicio y manganeso como elementos adicionales principalmente, además de elementos considerados como impurezas por la dificultad que presentan el excluirlos totalmente de la composición del acero, los cuales son azufre, fósforo, oxígeno e hidrógeno.

En los aceros, el aumento del contenido de carbono mejora su resistencia a la tracción, incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. El acero combina una alta resistencia, gran rigidez y maleabilidad convirtiéndolo en un material idóneo para la fabricación de piezas y maquinarias industriales a un precio accesible.

Además, el acero tiene excelentes propiedades de soldabilidad, debido a su composición química, lo que permite una buena fusión entre el metal base y el material de aporte, sin la formación de grietas o imperfecciones en la soldadura.

Existen diversos tipos de aceros, los cuales varían principalmente por el contenido de carbono, uno de estos tipos es el acero al carbón, también conocido en la industria como acero de construcción, el cual se emplea para construcciones de elementos mecánicos que pueden soportar grandes esfuerzos como los de torsión presentes en los ejes de transmisión.

El acero al carbón puede tener una composición de aproximadamente 95 % de hierro, de 0,05 a 0,25 % de carbono, manganeso de 0,5 a 1,7 % y silicio de 0,1 a 0,4 % de la composición principal del material.

El acero al carbón para construcciones mecánicas se produce específicamente en la industria para aplicaciones como máquinas, partes móviles de automóviles o camiones como ejes, transmisores, tensores y para piezas regularmente cargadas. Este acero tiene la forma, composición química y características específicas para estas aplicaciones.

Estos parámetros de los aceros se regulan mediante estándares particulares, uno de los principales son las normas ASTM (American Society for Testing and Materials), las cuales determinan la aplicación o ámbito de empleo de los tipos de materiales. Otras de las normas son las SAE (Society of Automotive Engineers), las cuales clasifican los materiales según su composición química.

Tabla I. **Propiedades de los aceros estructurales**

Designación del material (número ASTM)	Grado, producto o espesor	Resistencia a la tensión		Resistencia de fluencia		Ductilidad (porcentaje de elongación en 2 pulgadas)
		(ksi)	(MPa)	(ksi)	(MPa)	
A36	$t \leq 8$ pulg	58	400	36	250	21
A242	$t \leq 3/4$ pulg	70	480	50	345	21
A242	$t \leq 1\frac{1}{2}$ pulg	67	460	46	315	21
A242	$t \leq 4$ pulg	63	435	42	290	21
A500	Tubo estructural formado en frío, redondo o de otras formas					
	Redondo, grado A	45	310	33	228	25
	Redondo, grado B	58	400	42	290	23
	Redondo, grado C	62	427	46	317	21
	Otra forma, grado A	45	310	39	269	25
	Otra forma, grado B	58	400	46	317	23
	Otra forma, grado C	62	427	50	345	21
A501	Tubo estructural formado en caliente, redondo o de otras formas	58	400	36	250	23
A514	Templado y revenido, $t \leq 2\frac{1}{2}$ pulg	110-130	760-895	100	690	18%
A572	42, $t \leq 6$ pulg	60	415	42	290	24
A572	50, $t \leq 4$ pulg	65	450	50	345	21
A572	60, $t \leq 1\frac{1}{2}$ pulg	75	520	60	415	18
A572	65, $t \leq 1\frac{1}{2}$ pulg	80	550	65	450	17
A588	$t \leq 4$ pulg	70	485	50	345	21
A992	Perfiles W	65	450	50	345	21

*Nota:* ASTM A572 es uno de los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA), y sus propiedades son similares a las del acero SAE J410b, especificadas por la SAE.

Fuente: MOTT, Robert. *Diseño de elemento de máquinas*. p. 450.

Con base en la tabla anterior y por el tipo de aplicación, en este caso, un eje para transmitir potencia, el tipo de acero que se ajusta a las características de trabajo es el ASTM A501, el cual es para un tipo de tubo estructural de acero al carbono, forjado en caliente, pudiendo ser con o sin costura, con un perfil circular hueco.

Según la tabla de propiedades de los aceros estructurales este tipo de acero tiene una resistencia a la fluencia ( $S_y$ ) de 250 MPa y una resistencia a la tensión de 400 MPa.

La composición química del acero ASTM A501 es de un porcentaje de carbono máximo de 0,25 %. Con estas características del material se trabajará el diseño del eje cardán para el picop Toyota Tacoma de 2 400 cc.

### **3.3. Diseño del eje**

Para conocer el diseño del eje cardán para el picop Toyota Tacoma de 2 400 cc. se procedió a desmontar y revisar el eje cardán reconstruido de la caja hidráulica a mecánica, encontrando lo siguiente.

Figura 29. **Picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc.**



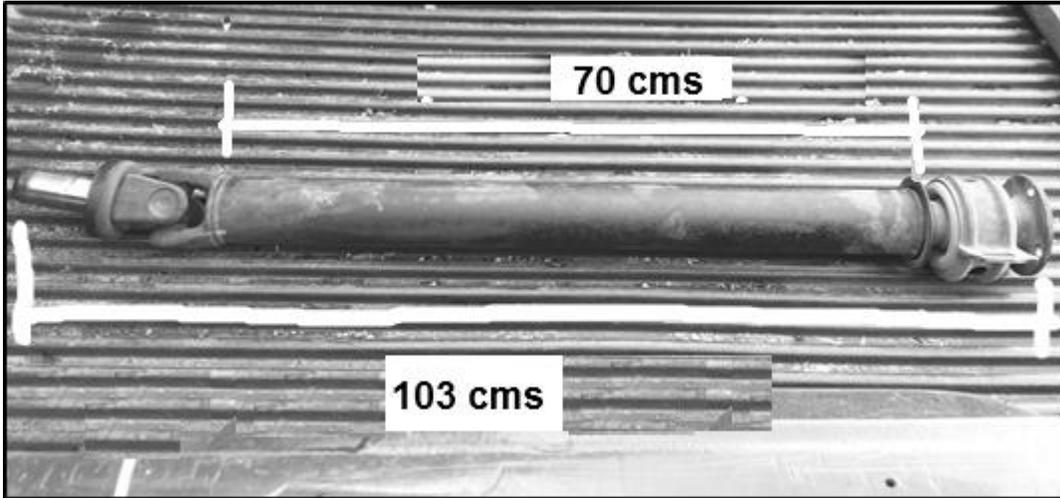
Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

Figura 30. **Vista de caja hidráulica y caja mecánica**



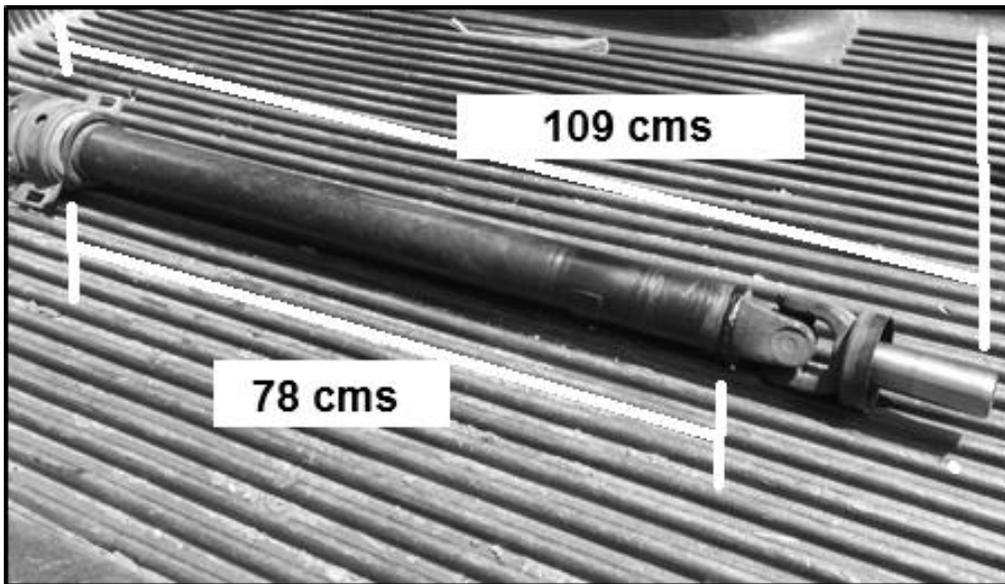
Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

Figura 31. Eje cardán original de caja hidráulica



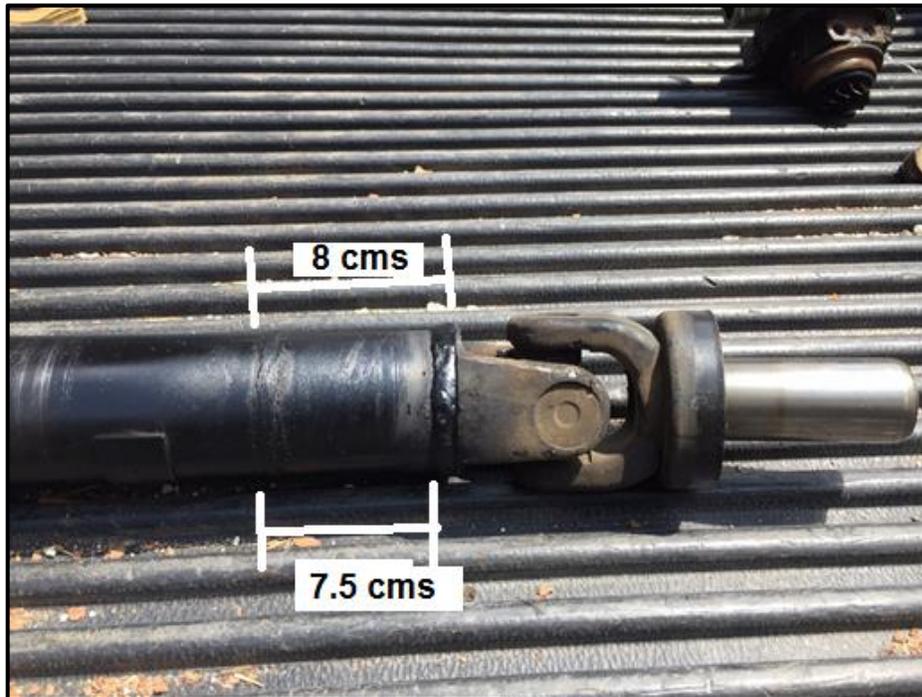
Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

Figura 32. Eje cardán reconstruido de caja hidráulica a mecánica



Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

Figura 33. **Adaptación al eje cardán de la caja hidráulica**



Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

Con base en el estudio de las piezas desmontadas, medidas tomadas a los ejes y entrevistas al personal del taller mecánico San Jorge, se descubre y evidencia la falla en el eje cardán reconstruido utilizado para para la conversión de caja hidráulica a mecánica del picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. encontrando lo siguiente.

- En el momento de realizar la conversión de la caja hidráulica a mecánica, los propietarios de los vehículos picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., optan por añadirle al eje cardán de la caja hidráulica un tubo de proceso liso de 2,5" de diámetro y 1/8" de grosor con 7,5 cm de largo, por ser la opción más económica. (Ver figura 33).

- Se tuvo una entrevista verbal con el encargado del torno, persona que debe realizar la soldadura de las 2 piezas de tubo para formar el nuevo eje cardán adaptado, evidenciando que utiliza un electrodo punto café E6013 de 1/8" para el proceso de soldadura.
- El valor de fabricación del nuevo eje cardán para la caja mecánica oscila entre los Q 450,00 a Q 650,00.
- Es evidente que no se cuenta en el mercado guatemalteco con repuestos del eje cardán para la caja mecánica para el picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. Por lo tanto se opta por este tipo de proceso de reconstrucción del eje cardán de la caja hidráulica, lo cual se ha convertido en una práctica muy común en los propietarios de este tipo de vehículos en el departamento de Chimaltenango.
- Se realizó una entrevista verbal al propietario del picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., el cual fue analizado y desmontado, comentando que ha tenido problemas de transmisión de potencia, vibración y ruidos extraños en la parte trasera del eje al momento de movilizar sus hortalizas de la ciudad de Chimaltenango hacia la central de mayoreo Cenma, zona 12 de la ciudad capital de Guatemala.

## 4. DISEÑO DEL EJE CARDÁN PARA UN MOTOR DE TOYOTA TACOMA 2 400 CC. CON CAJA HIDRÁULICA A MECÁNICA

### 4.1. Esfuerzos a los que se encuentra sometido un eje cardán

A continuación, se procede a efectuar el cálculo matemático de los esfuerzos máximos a los que se encuentra sometido un eje cardán para el picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., dichos resultados servirán para analizar y diseñar estructuralmente un eje cardán óptimo y funcional para dicho vehículo, cumpliendo con las cargas de torsión a las que este eje esta sometido.

Para los cálculos de diseño y fabricación del nuevo eje cardán propuesto se elige el material ASTM A501, el cual deberá ser un tubo circular hueco redondo de acero ASTM A501, con un  $S_y = 250$  MPa y  $n = 12$ . (Ver tabla I).

Con base en la bibliografía consultada, las fórmulas que se presentan en los siguientes cálculos fueron tomadas del libro titulado *Diseño de elementos de máquinas*, del autor Robert Mott.

- Cálculos de los esfuerzos y diámetro interior
  - Esfuerzo de diseño bajo la condición más crítica,

$$\tau = S_y / n;$$

$$\tau = 250 / 12;$$

$$\tau = 20,83 \text{ MPa}$$

- Con las revoluciones máximas se debe encontrar el torque aplicado

$$P = T \times n / 63\,000$$

Datos según manual de fabricante de Toyota Tacoma motor 2 400 cc.

$$N = 5\,200 \text{ RPM}$$

$$P = 142 \text{ HP}$$

Sustituyendo valores para encontrar T

$$142 \text{ HP} = T \times 5\,200 \text{ RPM} / 63\,000$$

$$T = (142 \text{ HP} \times 63\,000) / 5\,200 \text{ RPM}$$

$$T = 1720,38 \text{ lb.in}$$

Convirtiendo al Sistema Internacional;

$$T = 194\,402,94 \text{ Nmm}$$

- Bajo las condiciones de diseño más crítico y torque aplicado, encontrar el diámetro interior

$$\tau = T \times C / J$$

$$\tau = (T \times de/2) / (\pi/32de^4 - di^4)$$

Donde:

$\tau$  = esfuerzo de diseño en la condición más crítica.

T = torque aplicado al eje por el motor.

de = diámetro exterior, este dato se obtiene de la medición del eje cardán para la caja hidráulica, siendo una medida de 64 mm.

di = diámetro interior.

Sustituyendo valores, se procede a resolver

$$20,83 \text{ MPa} = (194\,402,94 \text{ Nmm} \times 64/2) / (\pi/32(64)^4 - di^4)$$

$$3\,4309\,079,02 - 2,04498 di^4 = 6\,220\,894,08$$

$$di^4 = 13\,735\,188,09$$

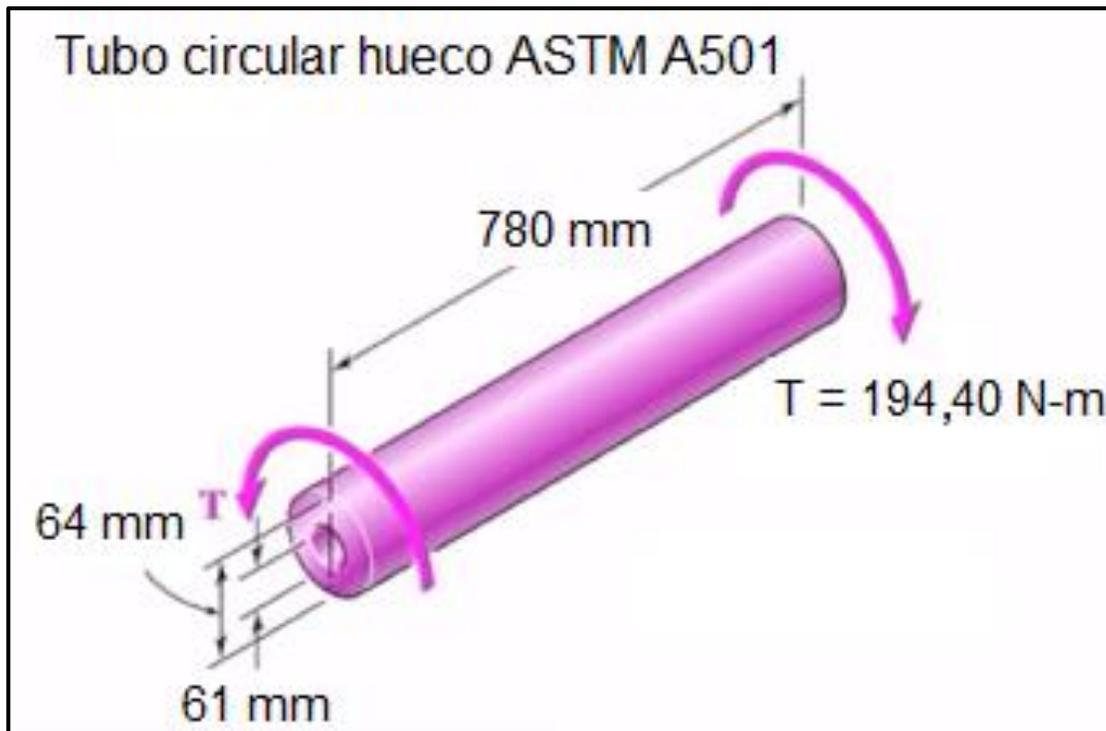
$$di = 60,88 \text{ mm aproximado a } 61 \text{ mm}$$

$$e = de - di$$

$$\text{Espesor} = 3,12 \text{ mm}$$

Las normas ASTM indican los requisitos para el acero A501 para un tubo circular hueco en diámetros van de 1/2" hasta las 24", en la cual se especifica que el tubo debe tener un espesor de pared (nominal) de 2,8 hasta 25,4 mm, por lo cual el espesor de diseño es 3,12 mm cumpliendo con la Norma.

Figura 34. Dimensiones del nuevo eje cardán propuesto para la caja mecánica para picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc.



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.

#### 4.2. Fallas del eje cardán

Las principales fallas que se determinaron en el eje cardán son productos de la adaptación del eje cardán de la caja hidráulica para la caja de velocidades mecánica para el Toyota Tacoma, el cual está fabricado con una caja de velocidades automática, ya que a nuestro país no ingresan este tipo de vehículos con caja de velocidades manual, estos se traen rodados de los Estados Unidos, los cuales cuentan con caja de velocidades automática.

Al realizar la adaptación de la caja de velocidades manual se produce el inconveniente de que la caja de velocidades hidráulica tiene una longitud mayor que la manual, por lo que al montar la caja de velocidades mecánica, el eje cardán anterior de la caja de velocidades hidráulica resulta ser corto, por lo que no se ajusta para acoplar la caja de velocidades con el diferencial.

Por este motivo, al eje cardán se le realiza una adaptación, para que logre acoplar la caja de velocidades con el diferencial, la cual consiste en unirle mediante soldadura un segmento de tubo al eje cardán de la caja de velocidades hidráulica que cumpla con la nueva longitud entre la caja de velocidades mecánica y el diferencial.

En los vehículos de este tipo, los cuales son adaptados con la caja de velocidades mecánica, los dueños tienen el inconveniente de que el vehículo tiende a fallar, principalmente cuando el motor alcanza altas revoluciones y cuando el vehículo se sobrecarga.

En estos casos, las fallas más comunes que se han determinado son las de la rotura de la soldadura, lo cual es provocado por una soldadura incorrecta de la unión adicional del tubo que se le realiza al eje y de la soldadura de la horquillas y del conector fijo estriado en los extremos del eje. La soldadura incorrecta se puede deber al proceso de soldadura, si no se cumple con las condiciones mínimas para que se realice una fusión eficaz de los materiales, de la elección de un electrodo inadecuado y de su respectivo amperaje empleados en el proceso de soldadura.

Otro factor que produce la soldadura incorrecta en el eje es el tipo de material que se utiliza para alargar el eje, el cual se determinó que no es el mismo material que el resto del eje cardán.

Estos factores provocan que durante el proceso de soldadura queden fisuras y grietas, las cuales al momento de aplicar el torque en el eje terminan por fracturar la soldadura del eje cardán o cuando el eje recibe golpes estando el vehículo sobrecargado.

Por el tipo de material del tubo añadido, si este no tiene la misma resistencia del material del resto del eje, se puede doblar el eje cardán en la sección que se ha añadido, cuando se produce un torque excesivo en el mismo por conducir en terrenos inapropiados o cuando se produce un arranque repentino y con fuerza.

El eje cardán reconstruido, al que se le adhiere un segmento del tubo, no queda equilibrado totalmente, debido a que el tubo que se le suelda no tiene las mismas propiedades del resto del eje, lo cual provoca vibraciones y zumbidos. Las vibraciones en el eje cardán provocan que las crucetas se desgasten con mayor frecuencia y el cambio continuo de estas piezas representa un gasto excesivos para el dueño del vehículo.

En el conector fijo al diferencial, la vibración provoca que el estriado del conector y el yugo se desgasten, evitando se transmita todo el movimiento del eje cardan al diferencial.

Figura 35. **Vista de eje cardán reconstruido fracturado**



Fuente: taller de mecánica San Jorge, Chimaltenango, Chimaltenango.

#### **4.3. Correcciones de fallas**

Con base en el estudio y diagnóstico realizado al picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., la corrección de fallas en el eje de transmisión derivado de la implementación del eje cardán reconstruido para la caja mecánica se hace reemplazando el eje reconstruido por el eje de diseño propuesto en el inciso 4.1 de este trabajo de graduación.

Para garantizar la funcionalidad del eje transmisión propuesto y solucionar todas las fallas que ha producido el eje cardán reconstruido, el eje cardán proyectado debe diseñarse bajo los parámetros propuestos.

## **5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS ENTRE EL EJE EXPERIMENTAL Y EL EJE DISEÑADO**

### **5.1. Ventajas del eje cardán reconstruido**

La única ventaja del eje cardán reconstruido es el costo y uso final para el propietario del vehículo, la añadidura de 7,5 cm de tubo de proceso al eje cardán original de la caja hidráulica, ya que resulta ser más económico que fabricar un eje cardán completo que cumpla las especificaciones técnicas del fabricante. Además, se realiza en un menor tiempo, ya que la reconstrucción del eje cardán se efectúa empleando materiales y técnicas de diseño de máquinas no aptas para este tipo de aplicación.

### **5.2. Desventajas del eje cardán reconstruido**

La principal desventaja del eje cardán reconstruido es el tipo de soldadura que se emplea en la fusión de las 2 secciones diferentes de los tubos huecos a unir. La soldadura llega a fracturarse y luego a romperse cuando se carga el vehículo o cuando el motor alcanza su torque máximo a altas revoluciones, por la incompatibilidad de los materiales al momento de la fusión con el electrodo.

La instalación del eje cardán reconstruido ocasiona desbalanceo y vibración en el eje de transmisión, debido al proceso de cortado y fusión de las secciones de los tubos huecos.

Otra de las de las desventajas se debe a que la sección del tubo hueco adaptado no es del mismo material con el eje cardán original de la caja hidráulica, teniendo los dos materiales resistencias diferentes, por lo que puede fallar el material, doblándose el eje en la parte del tubo más débil.

Figura 36. **Vista de secciones de tubos huecos de proceso**



Fuente: torno La Unión, Chimaltenango, Chimaltenango.

### **5.3. Ventajas del eje cardán diseñado**

El eje diseñado tendrá las características apropiadas para soportar los esfuerzos a los que es sometido el sistema de transmisión de potencia del picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., con la caja de velocidades manual, sin fallar bajo condiciones de operación normales.

Entre estas características se encuentran el tipo de material, el cual será el mismo para toda la sección del tubo, por lo tanto, se tendrá la misma resistencia a lo largo de todo el eje. La sección tendrá las mismas características, permitiendo que el tubo no tenga problemas de balanceo y desalineación, en caso de ser necesario se le podría aplicar técnicas de balanceo y alineación al eje.

### **5.4. Desventajas del eje cardán diseñado**

Una de las desventajas del eje cardan diseñado puede ser el costo para fabricarlo, el cual representa el comprar material adecuado y llevar a cabo el proceso de soldadura, este es un costo mayor que reconstruir el eje.

El tiempo para llevar a cabo la fabricación es otra de las desventajas, ya que depende de la disponibilidad del material en las fábricas y tiendas de distribución, así como del proceso de soldadura para la unión de los yugos en los extremos del eje cardán diseñado, ya que se debe contar con una persona experta y con el conocimiento adecuado de la soldaduras de piezas mecánicas, para este caso, entre el eje carda diseñado y los yugos que van en los extremos del mismo.

## **5.5. Análisis de resultados entre el eje cardán reconstruido y eje cardán diseñado**

Del estudio realizado en el desarrollo de los capítulos anteriores para el diseño de un eje cardán apropiado para el picop Toyota Tacoma con motor de 2 400 cc. Para convertir el sistema de transmisión hidráulico a mecánico. Se determinó mediante entrevistas a los propietarios de los vehículos que los ejes reconstruidos fallaban luego de un tiempo de trabajar con el vehículo. Con el análisis de las fallas más comunes del eje cardán reconstruido, de sus ventajas y ventajas, se determinó que al final el costo-beneficio de reconstruir el eje cardán no es el adecuado, ya que, al final, la falla del eje se hará cada vez más frecuente. La mejor opción para el propietario del vehículo es la de fabricar el eje cardán, con base en el diseño que se realizó, el cual cumple con las características físicas, técnicas y de funcionamiento para garantizar de manera eficiente la transmisión del par de la caja de velocidades mecánica al diferencial.

**Figura 37. Picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc.**



Fuente: Importadora de vehículos Montúfar, Chimaltenango, Chimaltenango.

## CONCLUSIONES

1. Se determinó que el motor de combustión interna de cuatro tiempos trabaja bajo el principio de émbolo recíprocante, en el cual el émbolo transmite el movimiento alternativo del pistón hacia el cigüeñal por un mecanismo de biela-manivela. Para desarrollar un ciclo completo de trabajo se necesita de dos revoluciones del cigüeñal o un giro de 720 grados, durante el cual se llevan a cabo las cuatro etapas o procesos conocidos como admisión, compresión, expansión o potencia y escape. La potencia de salida producida por los motores se mide en caballos de potencia.
2. Se estudió el sistema de transmisión de potencia, el cual se compone de la caja de velocidades que es la encargada de modificar el par obtenido del cigüeñal, aumentando o disminuyendo las revoluciones, además de invertir el sentido de giro de transmisión, lo que permite el aumento o disminución de la velocidad. El eje de transmisión es otro de los componentes del sistema de transmisión, el cual se encarga de transmitir el par de la caja de velocidades al diferencial, debiendo resistir la torsión a la que es sometida.
3. Se analizó el eje cardán reconstruido, el cual es utilizado por varios vehículos en el departamento de Chimaltenango, identificando los tipos de fallas que presenta al momento de aplicar el torque máximo del motor de combustión interna de 4 tiempos de 2 400 cc. del vehículo tipo picop marca Toyota línea Tacoma.

4. Se diseñó un eje cardán óptimo para corregir las fallas que presenta el eje cardán reconstruido, siendo este un eje cardán de material ASTM A501, producto de tubo estructural formado en caliente, redondo, hueco de 78 cm de largo, diámetros exterior e interior de 64 mm y 61 mm, respectivamente.
5. Se realizó el cálculo de los esfuerzos máximos de torsión a los que se encuentra sometido un eje de transmisión tipo cardán para un picop Toyota Tacoma con motor de combustión interna de 2 400 cc. para caja mecánica.
6. Se realizó un análisis entre el eje cardán reconstruido y el eje cardán diseñado, estableciendo las condiciones de operación, ventajas y desventajas para la mejora del sistema de transmisión de un picop Toyota Tacoma con motor 2 400 cc. con caja hidráulica a caja mecánica.

## RECOMENDACIONES

1. Exclusivamente la nueva propuesta del diseño del eje es para la fabricación del eje cardán para el picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc., debido a que el diseño del eje en la presente investigación se efectuó con base en las características propias de este vehículo, que puede fallar en condiciones normales de operación si se emplea en otros tipos de vehículos.
2. El propietario del vehículo debe buscar un fabricante que cumpla con los estándares para la fabricación de aceros, que brinde garantías sobre la calidad del acero ASTM A501, para que el mismo no falle cuando se encuentre en operación.
3. Apoyarse en los manuales del fabricante para tener las dimensiones adecuadas del eje, así como de las condiciones de operación del eje cardán y la rutina de mantenimiento preventivo que recomienda el mismo.
4. El propietario del vehículo debe mandar a revisar el sistema de transmisión de potencia con cierta frecuencia para buscar posibles fallas del eje cardán y de la caja de velocidades, además, debe cumplir con las rutinas de mantenimiento establecidas por el fabricante del vehículo, respetando los periodos en que se efectúa el mantenimiento, las recomendaciones y procedimientos establecidas para realizar el mismo.

5. No reparar el eje cardán si este falla por sobrecarga del vehículo, conducción a altas revoluciones o paradas y arranques bruscos. Para este caso, lo mejor es la fabricación de un nuevo eje cardán con las mismas características y el mismo material.
6. El dueño del vehículo debe revisar el balanceado y alineado del eje cardán que se fabricó con base en el diseño propuesto antes de montarlo en el vehículo.
7. Para soldar el yugo y el conector fijo a los extremos del eje cardán fabricado se debe usar un electrodo E-6013, punto café de 1/8”.

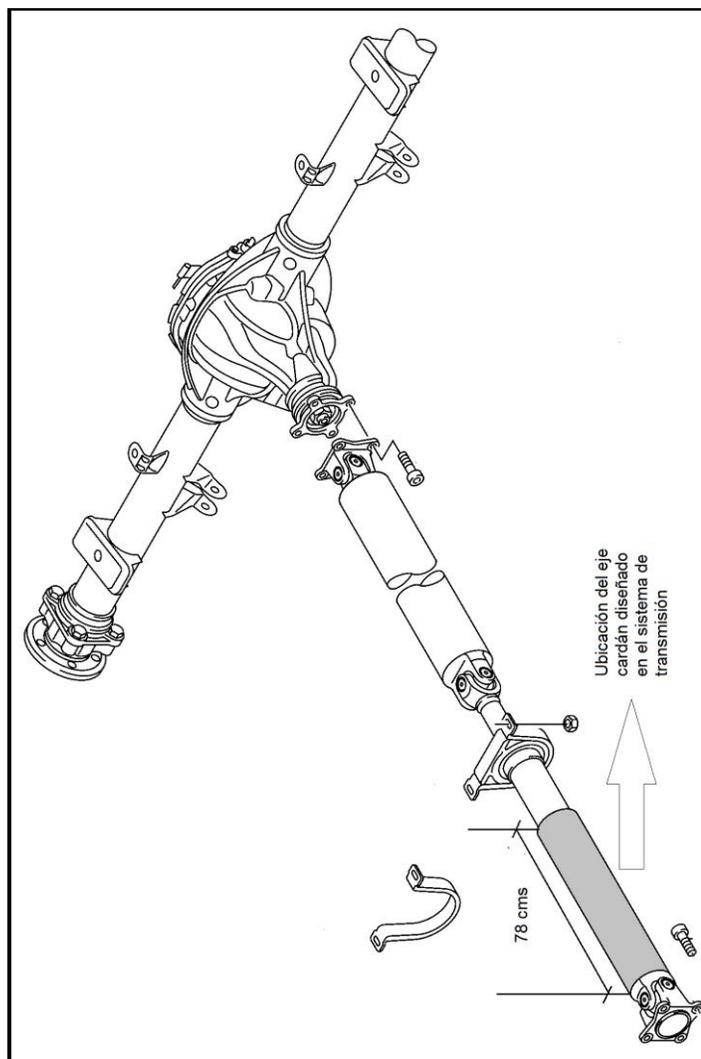
## BIBLIOGRAFÍA

1. BETETA JERÉZ, Mario Enrique. *Análisis, modelación y diseño de elementos de máquinas sometidos a concentración de esfuerzos: métodos computacionales*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2001. 198 p.
2. CHICOL CABRERA, Carlos Enrique. *Metalización en frío como una actividad en la ingeniería de mantenimiento*. Trabajo de graduación de Ing. Mecánico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 33 p.
3. MOTT, Robert L. *Diseño de elementos de máquinas*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2006. 550 p.
4. NORTON, Robert L. *Diseño de máquinas: un enfoque integrado*. 4a ed. México: Pearson Educación, 2011. 979 p.
5. TOYOTA MOTOR COMPANY. *Manual del propietario Toyota Tacoma 2002*. EUA: Toyota, 2002. 525 p.



## APÉNDICES

Apéndice 1. **Vista del sistema de transmisión de potencia del picop  
Toyota Tacoma motor 2 400 cc.**

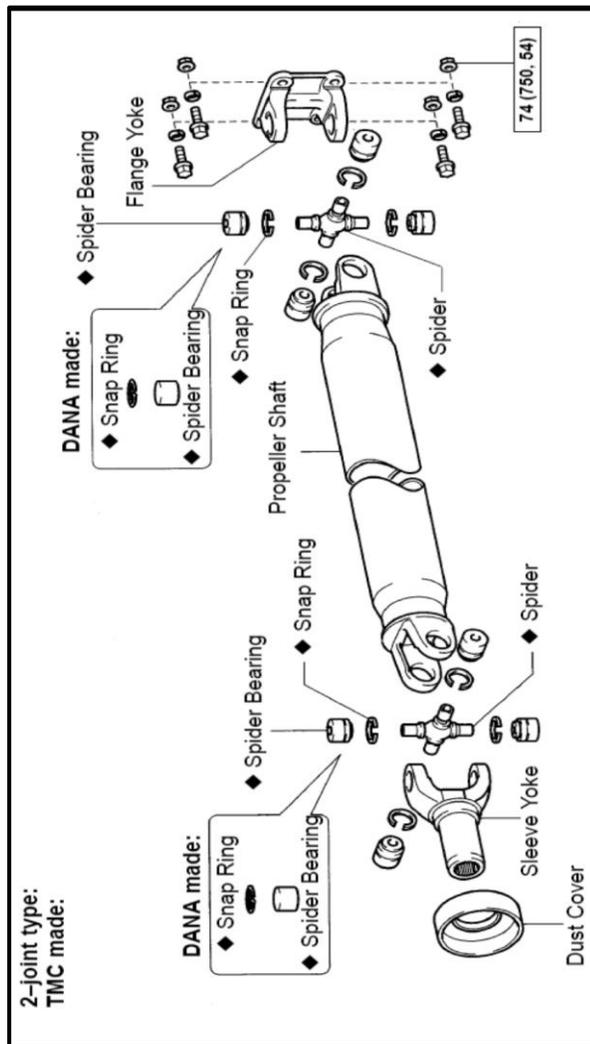


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD 2014.



## ANEXOS

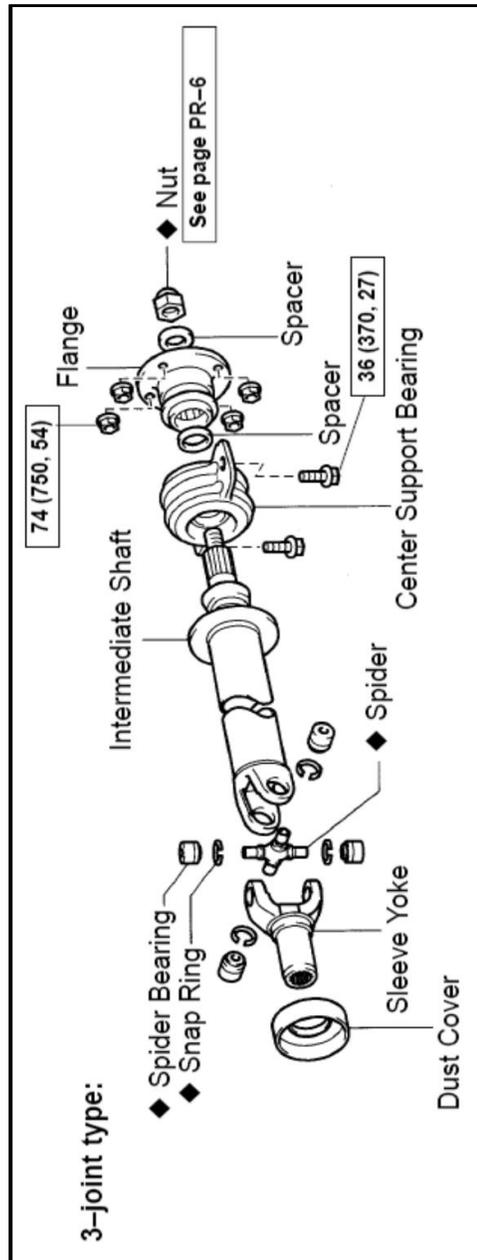
Anexo 1. Vista de ensamble del eje de transmisión principal de potencia para Picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. para caja mecánica



Fuente: Toyota Motor Company, *Manual del fabricante*. p. 78.

Anexo 2.

**Vista de ensamble del eje de transmisión intermedio de potencia para picop Toyota Tacoma motor 2 400 cc. para caja mecánica**



Fuente: Toyota Motor Company, *Manual del fabricante*. p. 79.