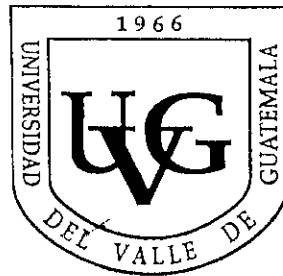
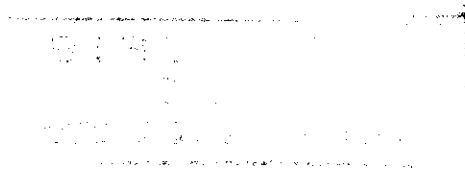


UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES



Diseño Económico de un Banco de Pruebas para la
Optimización de Potencia de Motores de
Combustión Interna para Aeronave de Radio
Control

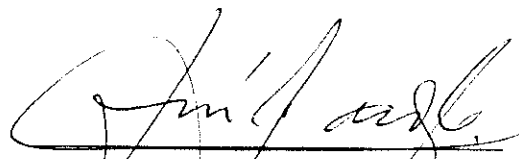


Trabajo de Investigación presentado por Juan José Recinos Roca
para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica.

Guatemala, 2002.

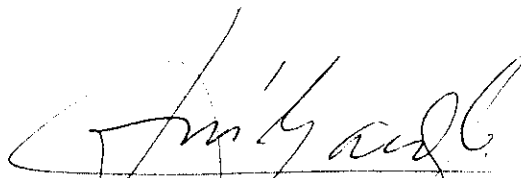
Diseño Económico de un Banco de Pruebas
para la Optimización de Potencia de Motores de
Combustión Interna para Aeronave de Radio
Control.

Vo. Bo.

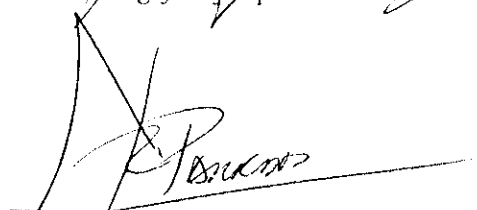


José Joaquín Garoz
Asesor

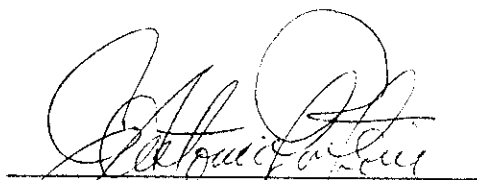
Tribunal:



Ing. José Joaquín Garoz



Ing. Carlos Paredes de la Vega



Ing. Carlos Poitevin

Fecha de aprobación: 13 de septiembre de 2002.

Esta tesis quiero dedicarla a la Santísima Trinidad y la Virgen María, por ser la razón de mi existir y el amor que alimenta mi esperanza; a mis queridos papás Cothy y Horacio, y a mis hermanos Horacio y Renato, por todo su amor y apoyo incondicional; Finalmente, a Anilú, por su amor, apoyo y comprensión durante todos estos años.

RESUMEN

El proyecto consistió en el diseño y elaboración de un banco de pruebas (dinamómetro) para motores de modelos de radio control. Con él, se midió el empuje (mediante el par-motor) proporcionado por diferentes motores en prueba y con diferentes condiciones de operación, como distintos tipos de combustible y diversas clases de hélices. De esa manera, se tuvo el desempeño del mismo a diversos regímenes de velocidad y pudo observarse dónde ocurría el funcionamiento óptimo con esas características.

Las pruebas se hicieron con motores diferentes y cada uno con características de operación variadas. Luego de las mismas, se contó con una base de datos de cada motor y en ella pudo encontrarse su desempeño con el tipo de combustible y diseño de hélice que se deseaba. De esa forma, se escogió la combinación que optimiza el rendimiento.

Finalmente, con los datos obtenidos y la operación óptima determinada para cada motor, se elaboró una guía para los modelistas, con el fin de establecer en qué rango desean que opere su motor dadas las características de funcionamiento.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN	iv
CONTENIDO	v
LISTA DE TABLAS	vi
LISTA DE ILUSTRACIONES	vii
LISTA DE GRAFICAS	viii
INTRODUCCION	1
Marco Teórico	
Capítulo I: Motores de Combustión Interna	3
A. Introducción	3
B. Ciclos Básicos de motores	8
C. Motores de modelos a escala	11
D. Características de operación	13
E. Combustibles en motores de bajo desplazamiento	19
Capítulo II. Principios Físicos	21
Capítulo III. Aeromodelismo	22
Marco Operativo	
Capítulo IV. Diseño del Banco de Pruebas para Motores de Radio Control	26
A. Diseño	26
B. Construcción	29
Capítulo V. Pruebas de los Motores en el Banco Diseñado	36
A. Toma de datos en el campo de vuelo	36
B. Análisis de la información con el uso de hoja electrónica	36
C. Elaboración de una guía práctica.....	44
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	45
BIBLIOGRAFIA	49
ANEXO	50

LISTA DE TABLAS

Tabla	Página
1. Parámetros de operación típicos.....	14
2. Hoja de Tabulación de datos. Campo de vuelo	37
3. Par-motor y potencia para el motor OS .40 FP con 10% nitrometano	38
4. Par-motor y potencia para el motor OS .40 FP con 15% nitrometano	38
5. Par-motor y potencia para el motor Thunder Tiger .46 Pro con 10% nitrometano	39
6. Par-motor y potencia para el motor Thunder Tiger .46 Pro con 15% nitrometano	39

LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura	Página
1. Sección Transversal de un motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por chispa mostrando sus componentes.	5
2. Ciclo de 4 tiempos	9
3. Ciclo de 2 tiempos	10
4. Corte de perfil de un motor de 4 tiempos	11
5. Detalle del cigüeñal de un motor de 4 tiempos	11
6. Detalle de las válvulas. Motor de 4 tiempos	11
7. Vista frontal. Motor de 4 tiempos	11
8. Partes de un motor de 4 tiempos para un modelo de radio control	12
9. Corte seccional. Motor de 2 tiempos	12
10. Partes de un motor de 2 tiempos para un modelo de radio control	13
11. Hélice de aeromodelismo típica	23
12. Bosquejo del dinamómetro de reacción	27
13. Diseño a escala del banco de pruebas	28
14. Hélices usadas en las pruebas de los motores	30
15. Tacómetro utilizado para la medición del régimen	30
16. Proceso de conformado del banco de pruebas	32
17. Ensamble Superior del Banco de pruebas	33
18. Lije con cojinetes para el banco de pruebas	33
19. Arreglo Banco-Bastidor del dinamómetro	34
20. Balanza para la medición del par de reacción	34
21. Ensamble completo del dinamómetro	35
22. Elementos amortiguadores de la vibración del motor	46
23. Elemento amortiguador de la balanza	47
24. Elemento amortiguador de vibración de la varilla de aceleración	47

LISTA DE GRAFICAS

Gráfica	Página
1. Par-motor OS .40 FP 10% nitrometano	40
2. Potencia OS .40 FP 10% nitrometano	40
3. Par-motor OS .40 FP 15% nitrometano	41
4. Potencia OS .40 FP 15% nitrometano	41
5. Par-motor Thunder Tiger .46 Pro 10% nitrometano	42
6. Potencia Thunder Tiger .46 Pro 10% nitrometano	42
7. Par-motor Thunder Tiger .46 Pro 15% nitrometano	43
8. Potencia Thunder Tiger .46 Pro 15% nitrometano	43

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna son una pieza importante en la elaboración de aviones a escala pues ellos proporcionan la potencia necesaria para impulsarlos. Se pueden encontrar en diversos tamaños y diseños, cada uno con características propias de desempeño, pero con una en común: la potencia transmitida depende del tipo de combustible empleado, del tamaño de la hélice que se instale en el eje y del régimen de revoluciones por minuto (RPM) del motor. Esta característica especial ha dado lugar a muchos mitos y suposiciones (algunos reales y otros ficticios) entre los modelistas que indican que diversas combinaciones entre estos dos parámetros resultan en un desempeño mejor o peor que otras.

Con el fin de despejar tales mitos se realizó la presente investigación, pues cada motor se comportará de diferente manera al variar las condiciones de operación; además, es necesario contar con evidencia experimental que proporcione datos veraces en cuanto al desempeño de los motores y que pueda ser utilizada por los modelistas, ya que en los clubes de aeromodelismo de Guatemala no se cuenta con dicha información. Ésta aportaría mucho para evaluar el uso de un motor específico, dependiendo de las características y desempeño que se demanden de él.

Los objetivos planteados para la solución del problema consistieron en comprobar la relación existente entre los parámetros combustible, tipo de hélice y régimen RPM con el parámetro empuje (representado por el par-motor del motor), mediante el diseño de un dispositivo que pueda relacionarlos: el dinamómetro, de una manera económica. Asimismo, elaborar una guía práctica para los modelistas en la que puedan verificar el desempeño de los motores con diversas características de operación.

El proyecto fue realizado en varias fases. La primera consistió en la recolección de información acerca de los temas de ingeniería necesarios para comprender el comportamiento de los motores y poder efectuar el diseño del banco de pruebas. Para ello se utilizó la búsqueda bibliográfica y la Internet.

La segunda consistió en la construcción del banco de pruebas (dinamómetro). Para ello se hizo la selección de materiales dependiendo de los requerimientos de resistencia, así como del diseño final, el cual se basó en la manera más adecuada de medir la potencia proporcionada por el motor. Luego se procedió a su construcción utilizando herramientas comunes de taller (sierras, sargentos, barreno, prensas, etc.)

La tercera fue la realización de las pruebas, las cuales se llevaron a cabo haciendo uso de motores de diferente tamaño. Luego se procedió al análisis de los datos obtenidos mediante el uso de una hoja electrónica para obtener las curvas (par-motor y potencia) de cada motor analizado.

Los resultados del proyecto mostraron aspectos interesantes como la mínima diferencia en potencia desarrollada por un motor con combustible de 10% y 15% de nitrometano, la validez de algunas suposiciones con respecto al desempeño de las hélices y formas alternas de llevar a cabo la medición del par de reacción del motor. Adicionalmente, se organizaron los datos para elaborar una guía práctica, para que cualquier persona pueda evaluar el desempeño de un motor, si se tienen las curvas del mismo.

CAPÍTULO I: MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

A. Introducción

El motor de combustión interna es una máquina que convierte la energía química de un combustible en energía mecánica, la cual usualmente se hace disponible mediante un eje rotativo.

La energía química del combustible es convertida en energía térmica mediante la combustión u oxidación con aire en el interior del motor. Esta energía térmica eleva la temperatura y presión de los gases dentro de éste, lo que hace que dicho gas se expanda contra los mecanismos internos del mismo. Esta expansión es transformada por los eslabonamientos mecánicos del eje cigüeñal del motor, el cual constituye la salida del mismo. Dicho eje cigüeñal, en movimiento rotacional, es conectado a una transmisión o tren de engranajes para transmitir la energía mecánica para su uso final. En los vehículos, dicha energía consiste en su propulsión, mientras que en motores estacionarios por ejemplo, la constituyen generadores o bombas.

La mayoría de motores de combustión interna son de movimiento alternativo, con uno o más pistones alternando su movimiento dentro de cilindros ubicados en su interior (éstos constituyen el tipo de motor que se tendrán en estudio en la presente investigación). Pueden tener diversos arreglos o configuraciones geométricas e ir desde tamaños muy pequeños como los motores de aeronaves de radio control hasta grandes motores estacionarios multicilíndricos que producen altas potencias por cilindro.

1. Clasificación de motores. Los motores de combustión interna pueden clasificarse por sus diferentes características:
 - a. Tipo de encendido
 - 1) **Motores encendidos por chispa.** Son aquellos en los que la combustión es iniciada por medio de una bujía. Ella proporciona una descarga eléctrica de alto voltaje entre dos electrodos que encienden la mezcla de aire-combustible en la cámara de combustión.
 - 2) **Motores encendidos por compresión.** La combustión en un motor encendido por compresión comienza cuando la mezcla se auto enciende producto de la alta temperatura en la cámara de combustión causada por la alta compresión.
 - b. Ciclo del motor
 - 1) **Motor de ciclo de cuatro tiempos.** Un ciclo de cuatro tiempos experimenta cuatro movimientos de pistón en dos revoluciones del eje cigüeñal por cada ciclo.
 - 2) **Motor de ciclo de dos tiempos.** Un ciclo de dos tiempos experimenta dos movimientos del pistón en una revolución del eje cigüeñal (motor) por cada ciclo.

- c. Localización de las válvulas
 - 1) **Motor de válvulas a la culata**, también llamado con culata en I.
 - 2) **Motor de válvulas en el bloque**, también llamado con culata en L.
 - 3) **Motor con culata en F** que posee una válvula en la culata y la otra en el bloque; es poco común.

- d. Diseño básico
 - 1) **Motor de movimiento alternativo**. El motor tiene uno o más cilindros en los cuales los pistones tienen movimiento alternativo. La cámara de combustión está localizada en el punto más alto del cilindro. La potencia es suministrada a un eje cigüeñal rotativo por medio de eslabonamientos mecánicos con los pistones.
 - 2) **Rotativos**. El motor es fabricado a partir de un estátor construido alrededor de un rotor y eje cigüeñal no concéntrico. Las cámaras de combustión se localizan en el bloque estático.

- e. Posición y número de cilindros de los motores de movimiento alternativo
 - 1) **Motor de cilindro único**. Un solo pistón conectado al eje cigüeñal.
 - 2) **Motor en línea**. Varios cilindros posicionados en línea recta.
 - 3) **Motor en V**. Dos bancos de cilindros con un ángulo entre ellos a lo largo del eje cigüeñal.
 - 4) **Motor de Cilindros opuestos**. Un motor en V con un ángulo de 180° entre los cilindros opuestos.
 - 5) **Motor en W**. Igual al motor en V, sólo que con tres bancos de cilindros.
 - 6) **Motor de pistones opuestos**. Dos pistones en cada cilindro con la cámara de combustión en el centro, en medio de los pistones.
 - 7) **Motor Radial**. En él, los cilindros se posicionan en un plano circular alrededor del eje central. Las bielas de los pistones están conectadas al eje cigüeñal. El banco de cilindros generalmente consiste de un número impar, variando de 3 a 13 o más. La operación es muy suave debido a sus características.

- f. Proceso de toma de aire
 - 1) **Motor naturalmente aspirado**. No hay sistema de compresión.
 - 2) **Motor supercargado**. Aspiración mediante un compresor accionado por el eje cigüeñal.
 - 3) **Motor turbocargado**. Aspiración mediante un arreglo turbina-compresor accionado por los gases de escape.
 - 4) **Motor de aire de admisión comprimido en el bloque**. Sistema usado en motores de dos tiempos que utiliza el bloque como el compresor del aire de admisión.

- g. Método de entrada del combustible
 - 1) **Motor carburado.** Utiliza un carburador.
 - 2) **Motor inyectado.** Los inyectores realizan la tarea de introducir el combustible.
- h. Tipo de combustible
 - 1) **Motor a Gasolina.**
 - 2) **Motor a Diesel.**
 - 3) **Motor a Gas.**
 - 4) **Otros.**
- i. Tipo de enfriamiento
 - 1) **Motor enfriado por aire.**
 - 2) **Motor enfriado por agua u otro líquido.**

Varias de estas clasificaciones pueden utilizarse al mismo tiempo para identificar un motor en particular.

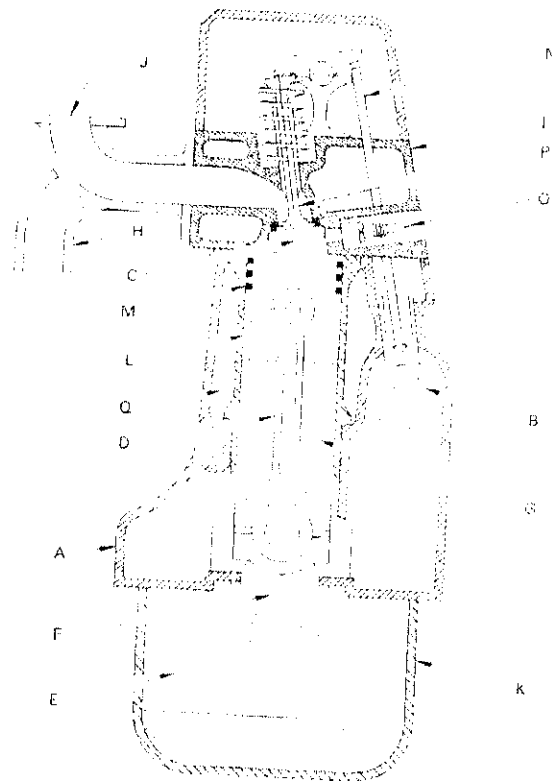


Figura 1. Sección transversal de un motor de combustión interna de 4 tiempos encendido por chispa mostrando sus componentes. A Bloque; B Eje de levas; C Cámara de combustión; D Biela; E Cáster; F Eje cigüeñal; G Cilindro; H Múltiple de escape; I Culata; J Múltiple de admisión; K Aceitera; L Pistón; M Anillos de pistón; N Varillas de empuje; O Candela; P Válvula; Q Camisa de enfriamiento.

2. **Componentes del motor.** La figura 1 muestra un corte seccional de un motor típico. En ella se ilustran los diferentes componentes del motor de combustión interna.

Las diferentes partes que componen un motor de combustión interna de movimiento alternativo se listan a continuación:

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

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

Carburador. Dispositivo de flujo de Venturi (ver glosario). Éste dosifica la cantidad apropiada de combustible en el flujo de aire de admisión mediante un diferencial de presión.

Cámara de Combustión. El espacio del cilindro entre la cabeza del pistón y la culata donde ocurre la combustión. Su tamaño varía desde un mínimo cuando el pistón está en el punto muerto superior hasta un máximo cuando el pistón está en el punto muerto inferior.

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

Aletas de Enfriamiento. Aletas metálicas en la superficie externa de los cilindros y culata de un motor enfriado por aire. Enfían los cilindros por medio de transferencia de calor por conducción y convección.

Cárter. Parte del bloque del motor que rodea al eje cigüeñal.

Eje Cigüeñal. Eje rotativo a través del cual el trabajo realizado por el motor es suministrado a los sistemas externos. Está conectado al bloque del motor por medio de bujes que permiten su rotación cuando los pistones ejercen fuerza sobre él por medio de las bielas que están conectadas a desfase en el mismo. La mayoría son fabricados de acero forjado o hierro fundido.

Cilindros. Partes del bloque del motor donde los pistones realizan su movimiento alternativo. Sus paredes son muy duras y altamente pulidas. Pueden ser maquinados directamente en el bloque, o una camisa de metal duro puede ser presionada en el mismo para formar cada cilindro. Las camisas pueden ser secas, sin contacto con el agua de enfriamiento o húmedas, formando parte del sistema de enfriamiento.

Múltiple de escape. Sistema de tubería que acarrea los gases de escape lejos del motor, usualmente hecho de hierro fundido.

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

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

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

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

Anillos de pistón. Anillos metálicos que se posicionan en surcos circunferenciales alrededor del pistón y forman una superficie deslizante contra las paredes del cilindro. Cerca de la parte alta del pistón se posicionan dos o más anillos de compresión. Su propósito es formar un sello entre el pistón y las paredes del cilindro, así como restringir el paso de los gases de combustión hacia el cárter. Bajo los anillos de compresión se sitúa otro anillo de lubricación, el cual asiste la lubricación de las paredes y reduce el consumo de aceite.

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

Radiador. Intercambiador líquido-aire que remueve el calor del líquido de enfriamiento del motor luego de que éste ha cumplido su misión de enfriar el bloque.

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

B. Ciclos básicos de motores

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

1. Ciclo de cuatro tiempos

a. Motores encendidos por chispa

- 1) **Primer Tiempo: Admisión.** El pistón viaja del punto muerto superior (TDC por sus iniciales en inglés) hacia el punto muerto inferior (BDC por sus iniciales en inglés) con la válvula de admisión abierta y la de escape cerrada. El efecto de este movimiento es la creación de un vacío que produce una presión diferencial que hace que el aire viaje hacia el interior de la cámara de combustión por medio del múltiple de admisión. A medida que el aire viaja por el sistema, se agrega el combustible en la cantidad adecuada ya sea por medio de inyectores o mediante un carburador.
- 2) **Segundo Tiempo: Compresión.** Cuando el pistón alcanza el BDC, la válvula de admisión se cierra y el pistón vuelve a viajar al TDC con todas las válvulas cerradas. Esto comprime la mezcla de aire-combustible incrementando su presión y temperatura. El tiempo finito requerido para cerrar la válvula de admisión significa que la compresión no empieza sino hasta un tiempo transcurrido el BDC. Cerca del final de la carrera de compresión, la bujía es accionada y la combustión se inicia.
- 3) **Combustión.** La combustión de la mezcla ocurre en un corto tiempo, con el pistón cerca del TDC. Comienza cerca del final de la carrera de compresión y se alarga hasta un poco pasado el TDC en la carrera de potencia. La temperatura y presión de la cámara aumenta como consecuencia del cambio de composición química de la mezcla a gases de combustión.
- 4) **Tercer Tiempo: Expansión o carrera de potencia.** Con todas las válvulas cerradas, la alta presión creada por el proceso de combustión empuja el pistón hacia abajo, produciendo trabajo útil en el ciclo. Como consecuencia del incremento de volumen, la presión y temperatura disminuyen.
- 5) **Resople de escape (*exhaust blowdown*).** Casi al final de la carrera de potencia, la válvula de escape se abre. La presión y temperatura de la cámara son aún un poco más altas que las de los alrededores, lo cual crea un diferencial de presión que empuja algunos de los gases de escape hacia fuera de los cilindros y equilibra las presiones.
- 6) **Cuarto Tiempo: Escape.** Cuando el pistón llega al BDC la cámara ya se encuentra a presión atmosférica, pero llena de gases. El pistón, entonces, empuja estos gases hacia fuera de los cilindros mientras viaja hacia el TDC (la válvula de escape está todavía abierta). El único volumen que queda dentro del cilindro es el de huelgo. Cerca del TDC, la válvula de admisión se abre nuevamente para

iniciar otro ciclo. En este punto, ocurre un traslape de válvulas de admisión y escape, ambas están abiertas al mismo tiempo.

b. Motores encendidos por compresión

Es similar al de los motores encendidos por chispa, con las siguientes diferencias:

- 1) En la carrera de admisión se succiona aire sin combustible.
- 2) Sólo aire es comprimido en esta carrera, por lo que se permite un valor más alto en temperatura y presión. Casi al final de la carrera, el combustible es inyectado directamente a la cámara de combustión donde se mezcla con el aire caliente. Esto hace que el combustible se evapore y se auto encienda, iniciando la combustión.
- 3) La combustión se desarrolla completamente muy cerca del TDC y continúa a presión casi constante hasta que la inyección de combustible cesa y el pistón comienza a viajar hacia el BDC.
- 4) La carrera de potencia continúa mientras que el pistón viaja hacia el BDC.

La figura 2 muestra un diagrama esquemático del ciclo de cuatro tiempos para un motor de combustión interna.

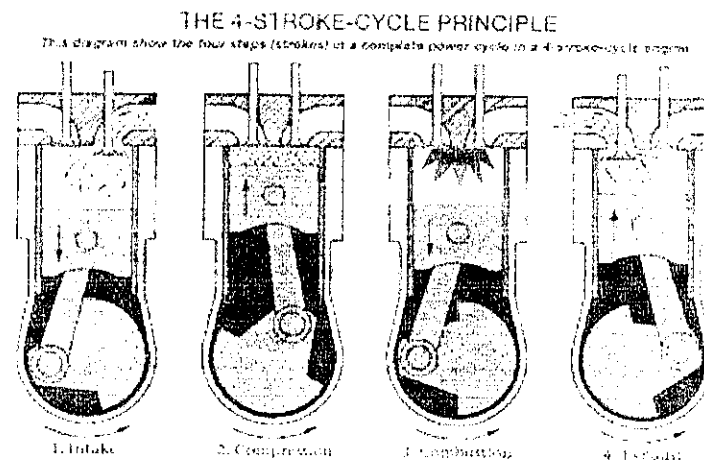


Figura 2. Ciclo de cuatro tiempos.

2. Ciclo de dos tiempos

a. Motores encendidos por Chispa

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

- 2) **Primer Tiempo: Expansión.** La alta presión y temperatura creada por la combustión hace al pistón viajar del TDC hacia el BDC produciendo trabajo útil y disminuyendo los valores de presión y temperatura debido al incremento del volumen.
- 3) **Inicio del escape.** La válvula de escape se abre 75° antes del BDC creando un diferencial de presión que impulsa un poco de gases hacia fuera de la cámara e igualando la presión con la de los alrededores. La válvula puede ser también un puerto de escape localizado en el lado de la pared del cilindro que es descubierto por el pistón a medida que viaja hacia el BDC.
- 4) **Admisión y Barrido.** Cuando el inicio del escape está casi completado, cerca de 50° antes del BDC, el puerto de admisión es descubierto por el pistón y la mezcla de aire combustible entra a la cámara bajo presión. Esta mezcla impulsa muchos de los gases de escape hacia fuera y llena la cámara con una mezcla fresca. El pistón pasa el BDC para luego cubrir nuevamente el puerto de admisión y finalmente el de escape (o la válvula de escape se cierra). La presión a la cual el aire entra a la cámara se establece de una de dos formas: por medio de un súper cargador o por compresión a través del cárter.
- 5) **Segundo Tiempo: Compresión.** Con todas las válvulas (o puertos) cerradas, el pistón viaja hacia el TDC y comprime la mezcla a una alta presión y temperatura. Cerca del final de esta carrera se enciende la bujía para que cuando el pistón llegue al TDC la combustión tenga lugar y comience el siguiente ciclo.

b. Motores encendidos por compresión

El ciclo es muy similar al de los encendidos por chispa, excepto por dos cambios:

- 1) No se agrega combustible al aire que ingresa, por lo que la compresión es realizada sólo con aire.
- 2) Se localiza un inyector en vez de una bujía que inyecta el combustible cerca del final de la carrera de compresión. Al entrar en la cámara caliente y comprimida, éste se mezcla con el aire y se auto enciende, iniciando la combustión.

La figura 3 muestra un diagrama esquemático del ciclo de dos tiempos para un motor de combustión interna.

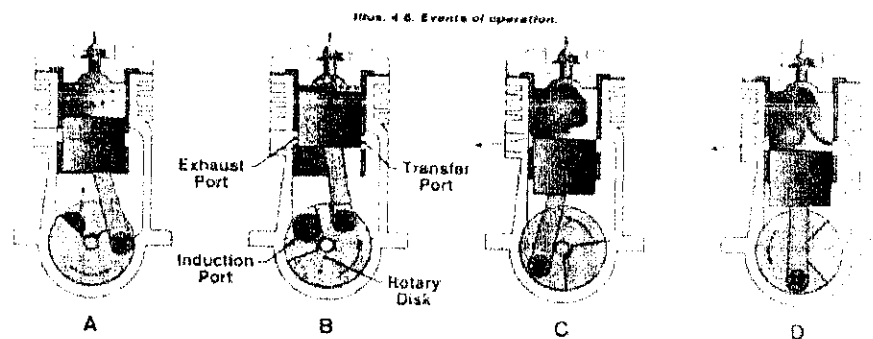


Figura 3. Ciclo de dos tiempos.

C. Motores de modelos a escala

Los motores de modelos a escala existen en ciclos de dos y cuatro tiempos y son enfriados por aire. A continuación se presentan cortes seccionales de ellos y luego se indican sus partes.

1. Motor de cuatro tiempos:

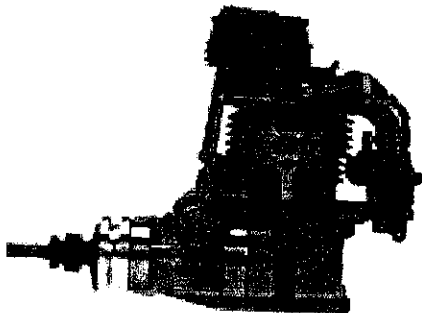


Figura 4. Corte de perfil de un motor de cuatro tiempos.

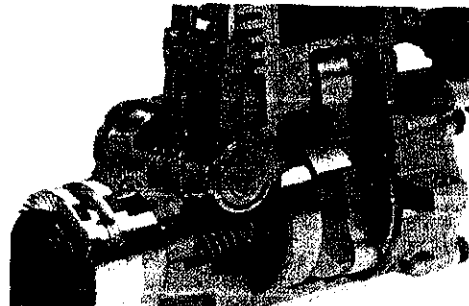


Figura 5. Detalle del cigüeñal de un motor de cuatro tiempos.

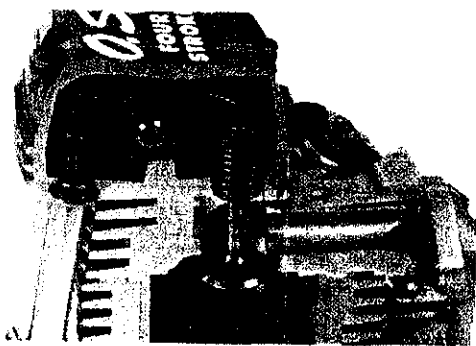


Figura 6. Detalle de las válvulas.
Motor de cuatro tiempos.

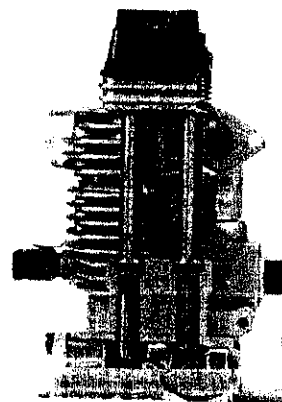


Figura 7. Vista frontal. Motor de cuatro tiempos.

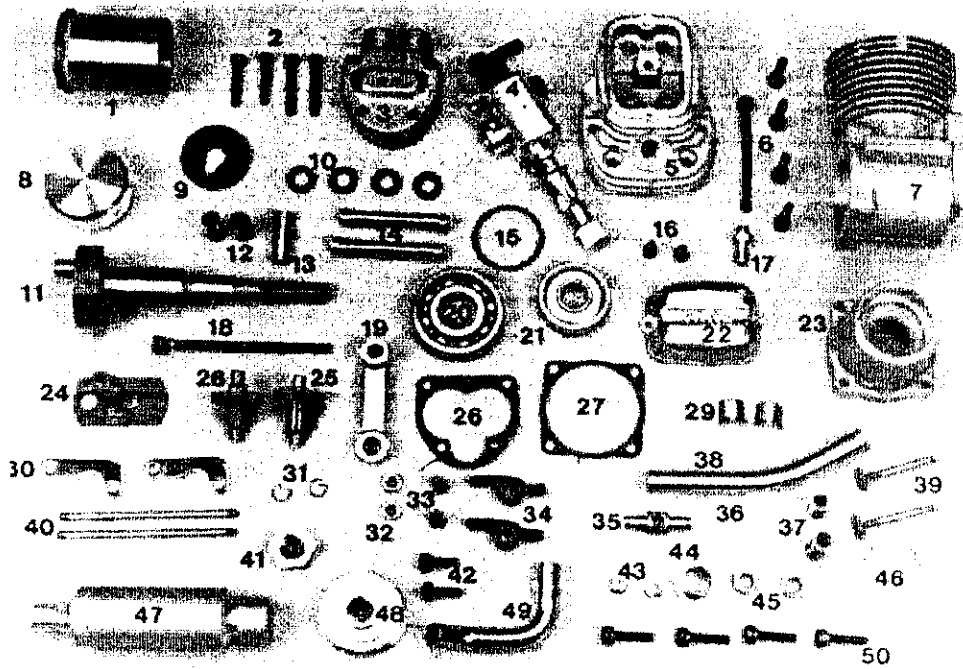


Figura 8. Partes de un motor de cuatro tiempos para un modelo de radio control.

2. Motor de dos tiempos:

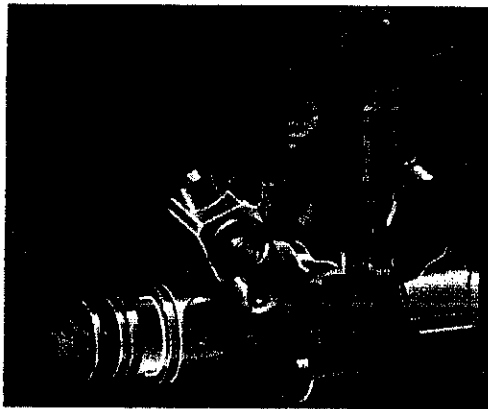


Figura 9. Corte seccional. Motor de dos tiempos.

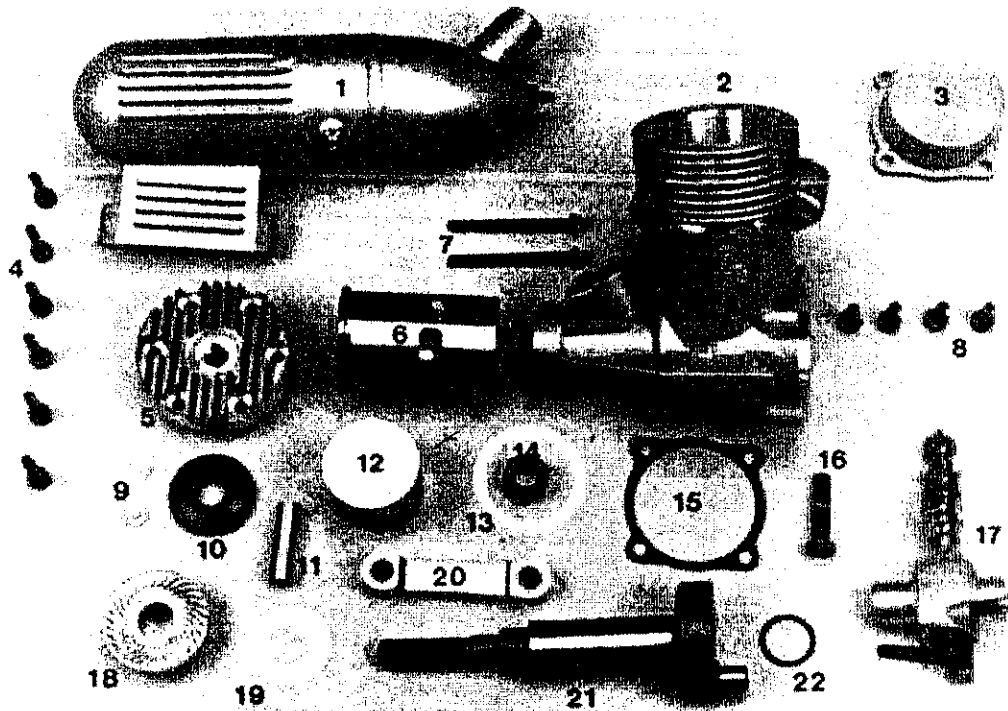


Figura 10. Partes de un motor de dos tiempos para un modelo de radio control.

D. Características de operación

Las características de operación de los motores de combustión interna incluyen parámetros mecánicos de salida como trabajo, par-motor y potencia; las entradas requeridas como aire, combustible y combustión; y eficiencias, entre otros.

1. Parámetros del motor. Para un motor con pistón de diámetro B , radio de manivela a , carrera S , funcionando a una velocidad N , se tiene:

$$S = 2a \quad U_p = 2SN$$

Donde U_p constituye la velocidad promedio del pistón en metros por segundo (m/s). N está dada en RPM; B , a y S en metros (m) o centímetros (cm).

La velocidad promedio del pistón para todos los motores se sitúa normalmente en el rango de 5 a 15 m/s; las razones principales son dos. Primero, los límites de seguridad dados por los materiales utilizados en la construcción de los mismos. Las velocidades muy altas darían lugar a peligro de falla de los pistones y bielas a medida que aceleran y deceleran en un ciclo. Este rango da como resultado valores aceptables de velocidades de

operación (régimen RPM), dependiendo del tamaño del motor; de hecho, existe una alta correlación inversa entre el tamaño del motor y la velocidad de operación.

Para los motores de modelos de aeronaves, con diámetros del pistón del orden de 1 cm por ejemplo, se tiene una operación a velocidades de 12,000 RPM o mayores. La tabla 1 ilustra valores representativos de velocidades del motor y otras variables de operación para motores de diversos tamaños.

Tabla 1. Parámetros de operación típicos.

	Modelos a escala	Automóvil	Gran Estacionario
	Motor de dos tiempos	Motor de cuatro tiempos	Motor de dos tiempos
Diámetro de cabeza. cm	2.00	9.42	50.0
Carrera. cm	2.04	9.89	161
Desplazamiento. L	0.0066	0.69	316
Velocidad. RPM	13,000	5,200	125
Potencia/cilindro. KW	0.72	35	311
Veloc. Prom. Pistón. m/s	8.84	17.1	6.71
Potencia/desplazam. KW/l.	109	50.7	0.98
Presión media efectiva al freno. KPa	503	1170	472

La segunda razón constituye el límite impuesto por el flujo de los gases que entran y salen de los cilindros. La velocidad del pistón determina la tasa de flujo instantánea de mezcla o de gases que entran o salen de los cilindros, respectivamente. Velocidades mayores requerirían válvulas más grandes para permitir la entrada de un flujo mayor. En la mayoría de los motores las válvulas están a tamaño máximo, sin lugar para agrandarlas.

Los diámetros del pistón varían de 0.5 m a 0.5 cm, con una razón del diámetro usualmente entre 0.8 a 1.2 veces la carrera. Los motores pequeños usualmente tienen una razón menor o igual que la unidad (diámetro mayor que la carrera), mientras que los grandes generalmente tienen el diámetro menor que la carrera.

El desplazamiento o volumen desplazado V_d , es el volumen que el pistón desplaza a medida que corre del BDC al TDC:

$$V_d = V_{BDC} - V_{TDC}$$

Este desplazamiento puede estar dado para un cilindro o para todos en litros(L), metros cúbicos (m^3), centímetros cúbicos (cm^3), o pulgadas cúbicas (in^3).

Para un cilindro:

$$V_d = (\pi/4)B^2S$$

Para N_c cilindros:

$$V_d = N_c (\pi/4)B^2S$$

Los valores típicos de desplazamiento varían de 0.1 cm³ para modelos a escala hasta 8 l. para automóviles grandes, con valores todavía más altos para motores de gran tamaño.

El volumen mínimo tiene lugar cuando el pistón está en el TDC y es llamado volumen de huelgo V_c .

$$V_c = V_{TDC}$$

$$V_{BDC} = V_c + V_d$$

La relación de compresión de un motor se define como:

$$R_c = V_{BDC}/V_{TDC} = (V_c + V_d)/V_c$$

Los motores encendidos por chispa tienen relaciones de compresión que varían de 8 a 11, mientras que los encendidos por compresión incluyen valores que van desde 12 hasta 24. Los límites de compresión son impuestos principalmente por las propiedades del combustible y fuerzas límite permitidas como en los motores pequeños de altas revoluciones (modelos a escala).

2. Trabajo. El trabajo útil es la salida de cualquier motor, el cual es generado por los gases en la cámara de combustión del cilindro. El trabajo es el resultado de la actuación de una fuerza en una distancia definida. En el motor, esta fuerza es generada por la presión de los gases y transmitida al pistón.

$$W = \int F dx = \int P A_p dx$$

En donde P es la presión en la cámara de combustión; A_p es el área en la cual actúa la presión (cara del pistón) y x es la distancia que el pistón se mueve. Además

$$A_p dx = dV \quad W = \int P dV = P \Delta V$$

Dado que comúnmente los motores son multicilíndricos, es conveniente analizar el trabajo de cada ciclo por unidad de masa de gas m dentro del cilindro. De esa manera, el volumen se reemplaza por volumen específico y el trabajo por trabajo específico:

$$w = \int P dv$$

Si P representa la presión dentro de la cámara de combustión, al trabajo encontrado con ella se le llama trabajo indicado (W_i). El trabajo útil o de salida es menor que este trabajo, debido a la fricción y a cargas parásitas del motor y se denomina trabajo al freno (W_b). Entre las cargas parásitas se incluyen la bomba de aceite, el supercargador, alternador, etc. y se denotan por W_f .

De esa manera: $W_b = W_i - W_f$

El trabajo indicado constituye el trabajo neto proporcionado por el motor, el cual es el resultado del trabajo positivo generado en las carreras de compresión y potencia (trabajo burdo) menos el trabajo de bombeo utilizado en las carreras de admisión y escape (W_{bomb}).

$$W_{net} = W_{bur} - W_{bomb}$$

La razón de trabajo al freno con respecto al trabajo indicada define la eficiencia mecánica del motor:

$$\eta_m = W_b/W_i$$

Su valor quedará en el rango del 75% al 95% a plena marcha y disminuirá con la velocidad hasta el valor de cero en funcionamiento mínimo, donde no se toma ni se genera trabajo de salida en el motor.

a. Presión media efectiva. Dado que la presión cambia constantemente en un ciclo, es necesario definir un valor que sea representativa de tal variación (un valor promedio). La presión media efectiva se define como:

$$W = p_{me} \Delta V \quad \text{o} \quad p_{me} = W/\Delta V = W/V_d \quad \Delta V = V_{TDC} - V_{BDC}$$

Donde W es el trabajo para un ciclo (o por unidad de masa w) y V_d es el desplazamiento.

La presión media efectiva es un muy buen parámetro para comparar motores porque es independiente de su tamaño o velocidad. El par-motor o la potencia harán que un motor grande siempre luzca mejor.

Pueden definirse varias presiones medias efectivas, dependiendo de cuál trabajo se utilice para calcularla. Si se utiliza el trabajo al freno, se tiene la presión media efectiva al freno; si se utiliza el trabajo indicado, se tiene entonces la presión media efectiva indicada. De la misma manera, se pueden definir presiones medias burdas, de bombeo y de fricción. Los valores típicos de presión media efectiva al freno varían dentro del rango de 850 a 1050 kilopascas (KPa), es decir 120 a 150 libras por pulgada cuadrada (psi), para motores encendidos por chispa naturalmente aspirados. Para motores encendidos por compresión, los valores van desde 700 a 900 KPa (100 a 130 psi)

3. Par-motor y potencia. El par-motor es un buen indicador de la habilidad de un motor para hacer trabajo. Se relacionan mediante la expresión:

$$2\pi\tau = W_b = p_{meb} V_d/n$$

en donde W_b es el trabajo al freno para una revolución, V_d es el volumen desplazado y n es el número de revoluciones por ciclo.

Ciclo de dos tiempos:

$$\tau = p_{meb} V_d/2\pi \quad \text{pues toma 1 revolución por ciclo}$$

Ciclo de cuatro tiempos:

$$\tau = p_{meb} V_d/4\pi \quad \text{pues toma 2 revoluciones por ciclo}$$

Se toma presión media al freno y trabajo al freno debido a que el par-motor se mide en la salida del motor.

La potencia se define como la razón de trabajo del motor. De esa forma se tiene:

$$P = WN/n \qquad P = 2\pi N\tau$$

Donde n toma valor de 2 para motores de cuatro tiempos y 1 para motores de dos tiempos.

Dependiendo de qué definición de trabajo se utilice, puede encontrarse potencia indicada, al freno, burda, de bombeo, etc. También

$$P_b = \eta_m P_i \qquad \eta_m: \text{Eficiencia mecánica}$$

Tanto el par-motor como la potencia son funciones de la velocidad del motor. A baja velocidad, el par-motor se incrementa a medida que la velocidad también lo hace, hasta que llega un punto donde alcanza su máximo valor y luego disminuye, si la velocidad continúa aumentando. La razón está en que el motor no es capaz de aspirar una carga completa de aire a altas revoluciones. La potencia indicada se incrementa con la velocidad, mientras que la potencia al freno llega a un máximo y luego disminuye a altas velocidades. La razón está en que la fricción se incrementa también con la velocidad y se vuelve un factor dominante a un régimen alto.

Otras maneras de medir y clasificar el rendimiento de los motores se muestran a continuación:

Potencia específica:	$PE = P_b/A_p$	
Potencia por desplazamiento:	$OPD = P_b/V_d$	(por sus iniciales en inglés)
Volumen específico:	$VE = V_d/P_b$	
Peso específico:	$SW = (\text{peso del motor})/P_b$	(por sus iniciales en inglés)

Donde P_b es la potencia al freno, A_p es el área de la cara del pistón y V_d es el desplazamiento.

Estos parámetros se hacen importantes para vehículos de transporte como botes, carros y especialmente aviones, donde se debe mantener el peso en el mínimo necesario. Para motores estacionarios el peso no es importante.

4. **Dinamómetros.** Los dinamómetros son utilizados para medir el par-motor y la potencia dentro del rango de operación del motor mediante el uso de varios métodos que básicamente, absorben su energía. Existen varios tipos como los Prony que absorben la energía por medio de fricción, pero no son muy precisos. Existen también los de reacción, hidráulicos, magnéticos y los eléctricos, cada uno con diversas formas de efectuar la medición.

5. Relación aire-combustible. La energía que utiliza un motor proviene del combustible, la cual se extrae por medio de una reacción química con el oxígeno del aire. Es por ello que tanto el combustible como el aire deben estar presentes en cantidades adecuadas relativas una a la otra. La relación aire-combustible o combustible-aire son parámetros que indican la razón de mezcla entre estos dos componentes.

Relación aire-combustible: $AC = m_a/m_c$

Relación combustible-aire: $CA = m_c/m_a$

El valor ideal de AC para varios combustibles es muy cercano a 15:1 con valores para que se dé la combustión en el rango de 6 a 19. Un valor de AC menor a 6 es muy rico para sostener la combustión y uno mayor a 19 es muy pobre; es por ello que el sistema de admisión debe ser capaz de suministrar la cantidad correcta de mezcla para cualquier flujo de aire que entre al motor.

Los motores encendidos por compresión tienen una AC en el intervalo de 18 a 70, lo cual hace parecer imposible la combustión. Ellos operan en este intervalo debido a que la combustión ocurre con una mezcla no homogénea en el cilindro, existiendo regiones ricas y pobres en la cámara.

La relación de equivalencia se define como la relación AC real con la químicamente ideal o la relación CA químicamente ideal con la real

$$\phi = AC \text{ ideal}/AC \text{ real} = CA \text{ real}/CA \text{ ideal}$$

6. Eficiencias. En la sección de trabajo fue mencionada la eficiencia mecánica, pero ella no es la única inherente del motor de combustión interna. Dado que la combustión dentro del ciclo es muy corta, no todas las moléculas de combustible reaccionarán con las de aire y se tendrá una fracción de combustible sin quemar en los gases de escape. De esta forma se define la eficiencia de combustión que se utiliza para medir la cantidad de moléculas de combustible que se queman. Típicamente tiene valores de 0.95 a 0.98 cuando un motor opera adecuadamente. Para un ciclo, el calor agregado es:

$$Q_{ent} = m_c Q_c \eta_f \quad Q_c = \text{poder calorífico del combustible}$$

$$Q'_{ent} = m_c' Q_c' \eta_f$$

La eficiencia térmica es

$$\eta_t = W/Q_{ent} = P/Q'_{ent} = P / m_c' Q_c' \eta_f$$

Y puede ser indicada o al freno, dependiendo de si se utiliza potencia indicada o al freno. También se obtiene el siguiente resultado para la eficiencia mecánica:

$$\eta_m = \eta_{tb}/\eta_{ti}$$

Las eficiencias térmicas indicadas varían del 50% al 60% con eficiencias al freno del orden del 30%.

La eficiencia de conversión de combustible se define como:

$$\eta_c = W/mcQ_c = P/mc'Q_c$$

Eficiencia volumétrica. Uno de los procesos más importantes que gobierna cuánta potencia y desempeño pueden ser obtenidos del motor es la obtención de la mayor cantidad de aire dentro del cilindro durante cada ciclo. Más aire significa que más combustible puede ser quemado y más energía convertida en trabajo útil. Idealmente una masa de aire igual al volumen desplazado por la densidad del aire debería ser aspirado por cada ciclo; sin embargo, dado el corto tiempo disponible y las restricciones de admisión, menos de esta cantidad entra a los cilindros. La eficiencia volumétrica se define como:

$$\eta_v = ma/\rho_a V_d$$
$$\eta_v = nma'/\rho_a V_d N$$

donde ma es la masa de aire, ρ_a es la densidad y n es el número de revoluciones por ciclo.

En condiciones estándar $\rho_a = 1.181 \text{ Kg/m}^3 = 0.0739 \text{ lbm/ft}^3$. Los valores típicos de eficiencia volumétrica varían de 0.75 a 0.90 a plena marcha, bajando a valores mucho menores a medida que la aceleración disminuye.

E. Combustibles en motores de bajo desplazamiento

Los combustibles utilizados en motores de combustión interna constituyen una amplia gama de productos que van desde aplicaciones a gran escala como los generadores eléctricos (bunker, gas dulce, diesel), motores de automóviles (gasolina, metanol) hasta motores para aeromodelismo de muy bajos volúmenes desplazados.

En aeromodelismo, los combustibles constituyen una mezcla entre el componente que aporta la energía interna (nitrometano, metanol), aceites y productos que tienen la función de lubricar y proteger las paredes y partes del motor. Dado que son motores que trabajan a alto régimen RPM, es necesaria esta combinación, pues el tiempo para proteger y lubricar es muy corto.

1. Combustibles para motores de cuatro tiempos. El combustible para motores de cuatro tiempos consiste en una mezcla de entre el 10% y 20% de nitrometano con aceite sintético en un porcentaje de entre el 18% y el 20%. Ambos, sobre una base de metanol. Estos porcentajes se basan en el hecho de que los combustibles para motores de cuatro tiempos de bajo desplazamiento (modelos de aeronaves de radio control) deben llenar mayores requisitos de lubricación que los de motores de dos tiempos. Dichos requisitos son:

Primero - Los motores de bajo desplazamiento no cuentan con un depósito de aceite que lubrique internamente al motor. De hecho, es el combustible el que debe portar dicho lubricante para proveer al motor de la cantidad adecuada de aceite.

Segundo - Los motores de cuatro tiempos tienen mayor cantidad de piezas móviles. De forma distinta a un motor de dos tiempos, uno de cuatro no tiene el beneficio de llenar su cárter con combustible fresco para lubricar. De hecho, un motor de cuatro tiempos introduce su combustible desde la parte alta del cilindro en el tiempo de admisión. La lubricación se lleva a cabo por resople (*blow by*) en el BDC y escurrimiento de aceite. Este aceite debe migrar también hacia los cojinetes, por lo que la cantidad suministrada es esencial.

Tercero - El paquete de lubricación se recomienda que sea completamente sintético. El uso de aceite sintético es importante para evitar el barnizado y pulido de los componentes y la formación de residuos en las válvulas. El uso de aceite de origen no sintético (aceite de ricino) producirá estos efectos que, con el tiempo, ocasionarán el endurecimiento de las válvulas y afectará el desempeño de las mismas; adicionalmente, se tendrán más altas temperaturas en los gases de escape. El aceite sintético reduce estos efectos e incluso, minimiza la formación de carbón en el puerto de escape.

Por todo lo anterior, el contenido en volumen de aceite en el combustible debe ser el adecuado para proporcionar suficiente lubricación en todas las partes del motor.

2. Combustibles para motores de dos tiempos. Los combustibles para motores de dos tiempos de bajo desplazamiento tienen la misma composición que los de cuatro tiempos, variando únicamente el contenido de aceite y el tipo empleado. En ellos, la lubricación se promueve ya que el cárter del motor sirve de compresor para la mezcla fresca que proviene del carburador; de esa forma, el aceite lubricante y los aditivos del combustible pueden lubricar adecuadamente todas las regiones del motor.

El contenido de nitrometano en estos combustibles varía también entre el 10% y el 20%, mientras que el porcentaje de aceite se mantiene por abajo o igual al 18%. Dicho aceite se compone de una mezcla de aceite de ricino y aceite sintético, en proporciones que están en el intervalo del 80% sintético, 20% aceite de ricino hasta 100% sintético o 100% aceite de ricino. Las razones de utilizar uno de ambos componentes radica en las características de desempeño que se deseen. El aceite sintético proporciona mayor protección (como ya fue mencionado), mientras que el aceite de ricino permite altas potencias, pero con el tiempo desarrolla una película de barniz pulido como consecuencia del uso.

Para los modelistas de modelos de aeronaves son muy comunes las pugnas entre el combustible con 10% y 15% de nitrometano, pues se dice que la potencia de salida con 15% es mucho mayor que con 10%.

Capítulo II. Principios Físicos

Los motores de combustión interna constituyen una pieza de ingeniería que implica el conocimiento amplio de varias leyes y principios de la física y la mecánica. Es importante mencionar, entonces, las bases sobre las cuales parte el desarrollo de la tecnología que ha permitido su desarrollo.

El estudio de la mecánica básica descansa sobre los siguientes principios fundamentales basados en evidencias experimentales

A. El principio de Transmisibilidad.

Este principio establece que la condición de equilibrio o de movimiento de un cuerpo rígido permanecerá inalterada si una fuerza que actúa en un punto dado se reemplaza por una fuerza de la misma magnitud y dirección, pero que actúa en un punto distinto, siempre y cuando ambas fuerzas tengan la misma línea de acción.

B. Leyes Fundamentales de Newton.

Formuladas por Sir Isaac Newton al final del siglo XVII, estas leyes pueden enunciarse como sigue:

Primera Ley. Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula es cero, la partícula permanecerá en reposo (si originalmente estaba en reposo) o se moverá con velocidad constante en una línea recta (si originalmente estaba en movimiento).

Segunda Ley. Si la fuerza resultante que actúa sobre una partícula no es cero, la partícula tendrá una aceleración proporcional a la magnitud de la resultante y en la misma dirección que esta última. Puede enunciarse como

$$F = ma$$

Donde F , m y a representan, respectivamente, la fuerza resultante que actúa sobre la partícula, la masa de la partícula y la aceleración de la partícula expresadas en un sistema consistente de unidades.

Tercera Ley. Las fuerzas de acción y reacción entre cuerpos en contacto tienen la misma magnitud, la misma línea de acción y sentidos opuestos.

Capítulo III. Aeromodelismo

El aeromodelismo es una rama del modelismo de radio control que trata del diseño y construcción de modelos a escala de aeronaves que existen en la realidad. Específicamente, el aeromodelismo se especializa en la construcción y vuelo de modelos de aviones, helicópteros y otro tipo de aeronaves como los dirigibles. Sus orígenes se remontan a más de cuarenta años, tiempo durante el cual se ha desarrollado excepcionalmente, tal vez, al mismo grado que la tecnología automotriz.

Para la construcción de aviones se utilizan diferentes materiales y dispositivos, tanto mecánicos como electrónicos. Entre ellos puede contarse el motor del avión, que es el que proporciona la energía necesaria para el vuelo. Generalmente consiste en un motor de combustión interna (ya sea de dos o cuatro tiempos) que opera con combustible especial, o uno eléctrico acoplado a un sistema reductor de velocidad que utiliza una batería para su funcionamiento.

Adicionalmente a la fuente de energía - como el combustible, del cual ya se habló con anterioridad - los motores de los aviones necesitan un dispositivo por medio del cual se entregue la potencia para su uso final. Este dispositivo lo constituye la hélice del motor, la cual tiene características propias que es necesario enumerar.

1. Hélices utilizadas en modelos de radio control. Las hélices son una parte muy importante en los aviones, ya que proveen del empuje necesario para el vuelo. En términos simples, una hélice es una superficie de sustentación que se mueve en una trayectoria circular, con un ángulo de ataque positivo relativo al aire entrante, para producir empuje.

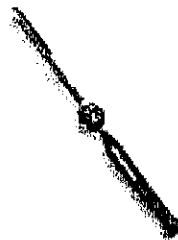


Figura 11. Hélice de aeromodelismo típica.

Si se examina detenidamente una hélice, se encontrará que es un dispositivo con un perfil que posee un borde de ataque, un borde de salida y un ángulo de hélice. Como en un ala típica, se encuentran torbellinos o vórtices en las puntas de las aspas, donde el área de alta presión de la parte plana de la hélice trata de invadir la parte curva de la misma. La hélice rotante causa que la presión estática del aire enfrente de ella sea menor que la de la parte trasera, lo que resulta en una fuerza horizontal hacia adelante que empuja el avión. Cuando se toma en consideración la eficiencia de un aspa de hélice, es sólo del orden del 60% al 90% del radio lo que toma una parte efectiva en la producción de dicho empuje. Entonces, cuando un ángulo de aspa (o paso) es listado, se hace a una distancia igual al 75% del radio.

a. Materiales usados en su fabricación. Los materiales utilizados en la fabricación de hélices para modelos de radio control incluyen la madera, el nylon, la fibra de vidrio y la fibra de carbono, principalmente. Cada uno tiene ventajas y desventajas limitando su aplicación por las características propias de cada material.

El proceso de manufactura puede ser por inyección en moldes, conformado por medio de tecnología de control numérico por computadora (CNC por sus iniciales en inglés, ver glosario), o por construcción manual, dependiendo del material que se utilice.

b. Tipos de hélices. Existen diversos tipos de hélices, cada una con diferente desempeño dependiendo del tipo de perfil utilizado en su manufactura. No obstante, el paso y el diámetro juegan un papel muy importante en la nomenclatura.

Los fabricantes han determinado cuáles tipos de hélices son más adecuados para cada tipo y tamaño de motor, dependiendo de las características de éste. A continuación se lista una tabla con los tamaños y pasos sugeridos para diversos tamaños y tipos de motores.

Motores de dos tiempos

.049 - .051 = 5.5x4, 5.5x4.5, 6x3, 6x3.5, 6x4	.71 - .80 = 12x6, 12x8, 13x6, 13x8, 13x10, 14x8
.09 - .10 = 7x3, 7x4, 7x5, 7x6	.90 = 13x6, 13x8, 13x10, 14x6, 14x8
.15 = 7x6, 8x3, 8x4, 8x5, 8x6, 8x7	1.08 = 14x8, 15x8, 16x6
.20 - .25 = 8x6, 8x7, 9x4, 9x5	1.20 = 14x8, 15x8, 16x6
.29 - .35 = 9x6, 9x7, 9x8, 9.5x6, 10x4, 10x5, 10x6	1.5 = 16x8, 16x10, 18x6, 18x8
.40 = 9.5x6, 10x4, 10x5, 10x6, 10x7, 10x8, 10x9	1.8 = 18x8, 18x10, 20x6, 20x8
.45 - .50 = 10x7, 10x8, 11x4, 11x5, 11x6, 11x7	2.1 = 20x8, 20x10
.60 = 11x5, 11x6, 11x7, 11x7.5, 11x8, 11x9, 11x10	2.7 - 3.5 = 22x8, 22x10, 22x12, 24x8, 24x10, 24x12

Motores de 4 tiempos

.20 - .25 = 9x4, 9x5, 9x6, 9x7	.90 = 12x8, 13x8, 14x6
.40 = 11x6, 12x6	2.10 = 14x8, 15x8, 15x10, 16x8
.60 = 11x8, 11x9, 12x6, 13x6	

c. Características. El desempeño de la hélice es afectado por varios factores, entre ellos el diámetro de la hélice, el régimen RPM, el área del aspa relativa a la absorción de potencia y el paso de la misma. El diámetro se mide usualmente en pulgadas de punta a punta de las aspas.

El paso se define como el avance teórico de una hélice en una revolución (medido usualmente en pulgadas) y define la velocidad y características de maniobrabilidad del vuelo. Por ejemplo, una hélice 10x6 describe un diámetro de 10 pulgadas y un paso de 6 pulgadas, o un movimiento de 6 pulgadas por revolución (en sistema métrico esto sería 30x15).

Se profundizará más en el paso. Supóngase que se da vueltas a una hélice de paso 6 en un tubo con un fluido como la mantequilla. Ella debería avanzar 6 pulgadas por cada vuelta alrededor de su eje; naturalmente, cuanto más rápido se dé vuelta a la hélice, más rápido avanzará.

Las hélices de modelos de aeronaves tienen un límite práctico de velocidad máxima permitida (RPM) basado en la curva de potencia del motor y del diámetro de la misma. Otro límite práctico lo constituye el ruido que produce. El límite de velocidad de las puntas de las aspas debe estar entre 600 a 650 pies por segundo (ft/s).

Bajas velocidades, acrobacia, buenos despegues y aterrizajes pueden alcanzarse con hélices de paso bajo. Valores de paso más altos conllevan menor maniobrabilidad pero un vuelo más rápido. Dado que este factor no es variable en las hélices de modelos a escala, puede seleccionarse un paso basado en cómo se desea que sea el vuelo, o comprometer la velocidad y maniobrabilidad con un paso intermedio – alrededor del 65% al 70% del diámetro de la hélice. Un factor que disminuye la eficiencia de la hélice es el caballaje del motor y el arrastre del avión – un paso alto no puede hacer al avión más rápido de lo que es capaz de ser, y uno muy pequeño puede resultar en una relación potencia/empuje baja. Debe recordarse que los estándares indican que el paso es medido al 75% del radio.

El empuje se refiere a la fuerza ejercida por la hélice en la dirección de movimiento del aeroplano. Éste es todo el propósito de la misma, convertir la potencia del motor que aparece como una fuerza rotativa, o par-motor, en un movimiento lineal para impulsar el avión. El empuje se mide usualmente en libras y es función de la densidad del aire, las RPM, diámetro, razón de avance y el número de Reynolds (Ver Glosario). El proceso es un poco complicado, pero debe tenerse en mente que el empuje es distinto para cada perfil de hélice y cambia con las condiciones de vuelo.

La absorción de potencia se refiere a la curva de potencia de salida del motor. Potencia es el producto del par-motor por el régimen (RPM). A medida que este último se incrementa, un motor produce menos par-motor porque la relación aire-combustible no es tan buena a altas velocidades (como fue mencionado anteriormente). Esta es la razón por la que la curva de potencia se vuelve plana o disminuye a altas velocidades, y significa que la hélice más eficiente es aquella que permite al motor operar en su punto óptimo dentro de su curva.

Un punto interesante para entender la absorción de potencia consiste en que la potencia de la hélice varía con el cubo de la velocidad (RPM); consecuentemente, el doble de velocidad requiere de 8 veces la potencia.

Potencia = $H \cdot V^3$ donde H es una constante de proporcionalidad y V es el régimen RPM

La velocidad de las puntas de las aspas se mide en ft/s; una fórmula se provee a continuación para encontrarla. Para propósitos de modelos de aviones, la velocidad óptima por requerimientos de eficiencia y ruido es de 600 ft/s. Esto se debe a pérdidas de compresibilidad y el hecho de que perfiles subsónicos no trabajan bien en velocidades transónicas/sónicas con requerimientos de sonido apropiados.

$$V \text{ (ft/s)} = \text{RPM} \times \text{diámetro en pulgadas} \times 0.00436$$

Para encontrar el diámetro correcto a 600 ft/s:

$$\text{Diámetro en pulgadas} = 138,000 / \text{RPM}$$

Para ambas fórmulas, úsese las RPM que optimizan la potencia del motor.

Límites de Operación. Una de las diferencias entre las hélices de madera y las de nylon-fibra de vidrio es que éstas últimas tienen un intervalo de RPM sugerido por consideraciones mecánicas y que variará dependiendo del diámetro. Para hélices de nylon-fibra de vidrio, por ejemplo, se sugiere la fórmula

$$\text{RPM límite} = 160,000 / \text{diámetro en pulgadas.}$$

CAPÍTULO IV. DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE RADIO CONTROL

A. Diseño

Para poder llevar a cabo la determinación de las características de operación de un motor de radio control y aclarar los mitos entre las variables en cuestión (tipo de combustible, de hélice y régimen) era necesario crear un dispositivo que permitiera la interacción de cada una de ellas para poder evaluarlas durante su funcionamiento. Por ello, se pensó en diseñar y construir un dinamómetro adecuado para la determinación de las características de velocidad y potencia de estos pequeños motores de combustión interna y tomar datos experimentales con ellos.

El dinamómetro a diseñar debía ser simple en su construcción y en su uso, con la capacidad de medir con la mayor precisión posible, el par-motor de salida del motor bajo las condiciones reales de funcionamiento. El constituyente la salida de éste, es el resultado de la conversión de energía química; es la energía mecánica.

El dinamómetro de absorción que se utiliza generalmente para este tipo de motores no puede usarse, debido al tamaño y las características de operación de los motores de radio control; por ello se pensó en uno de reacción, el cual era fácilmente adaptable para los requerimientos de las pruebas, permitía el funcionamiento con la carga real (la hélice) y proporciona una determinación sensible del par-motor.

Para la medición de la velocidad del motor se pensó en la utilización de un tacómetro, el cual permite realizarla mediante la reflexión de la luz sin introducir ningún error de cálculo en la determinación de la potencia.

El problema de la selección de materiales, equipo y herramientas de construcción e instrumentos fue resuelto fácilmente, pues la mayoría de ellos se encuentran disponibles en cualquier ferretería o taller.

1. Principios

La fórmula de potencia para el motor es: $HP = 2\pi \cdot T \cdot N / 33,000$ Par-motor: $T = F \cdot L$

Donde T representa el par-motor en libras pie (lb-ft), N representa el régimen en RPM, F la fuerza en onzas (oz) actuante respecto a un eje y L su brazo de palanca en pulgadas (in). Tales variables deben medirse a distintas condiciones de operación para obtener una base con la cual se puedan calcular las curvas de desempeño del motor.

En esta prueba se diseñó y construyó un dinamómetro de reacción para medir el par-motor. El principio era mejor, en este caso, que el sistema usual de absorción de la potencia de salida del motor como en un dinamómetro de Prony (de fricción) u otro, dado que éstos no son adaptables para altas velocidades y que la absorción del par-motor habría requerido el uso de un volante, más que la hélice que normalmente va montada en el motor. Esta carga es indeseable, ya que dicho motor no estaría operando en condiciones normales y no tendría un enfriamiento adecuado. El dinamómetro de reacción mide el par de reacción, el cual según la Tercera Ley de Newton es exactamente igual y opuesto al par de salida. La forma de determinación del par-motor en el dinamómetro diseñado se explica con la ayuda de la figura 12A:

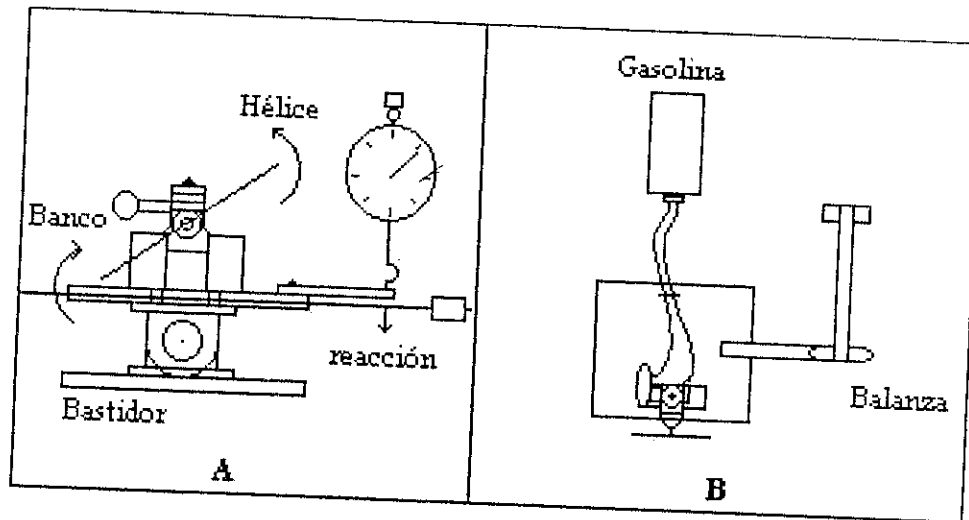


Figura 12. Bosquejo del dinamómetro de reacción. A Vista de frente. B Vista de planta.

Los motores fueron fijados en un banco ajustable de madera y la unidad completa fue pivotada alrededor de cojinetes como se muestra en la figura 12A. Un contrapeso de balance en un alambre de acero con brazo de palanca de 18" y un diámetro de 5/32" fue colocado en el banco con el fin de que rotara con éste (como en un arreglo de collarín). El sistema se balanceó en condiciones estáticas utilizando dicho contrapeso. También se contó con una balanza que tenía el fin de medir la fuerza de reacción que igualaba al par-motor producido por el motor. La misma se calibraba a cero cuando el banco se encontraba ya balanceado para que, al momento de encenderlo y tomar las mediciones, ella marcara la fuerza de restitución requerida a una distancia conocida L para igualar el par-motor de salida. Dicha distancia fue medida con una regla de metal y junto con la lectura de la balanza, proporcionó el valor del par.

Los cojinetes alrededor de los cuales rotó el banco eran de bolas con un ligero desalineamiento entre los anillos interior y exterior, el cual permitía la absorción de la carga axial producida por el funcionamiento del motor. El cableado y las líneas de suministro de combustible tenían que estar flojas y fueron introducidas al arreglo cerca del pivote posterior para evitar la introducción de errores en el cálculo del par-motor (figura 12B).

El diseño a escala en perspectiva del banco sin la mesa de pruebas ni la balanza se muestra en la figura 13.

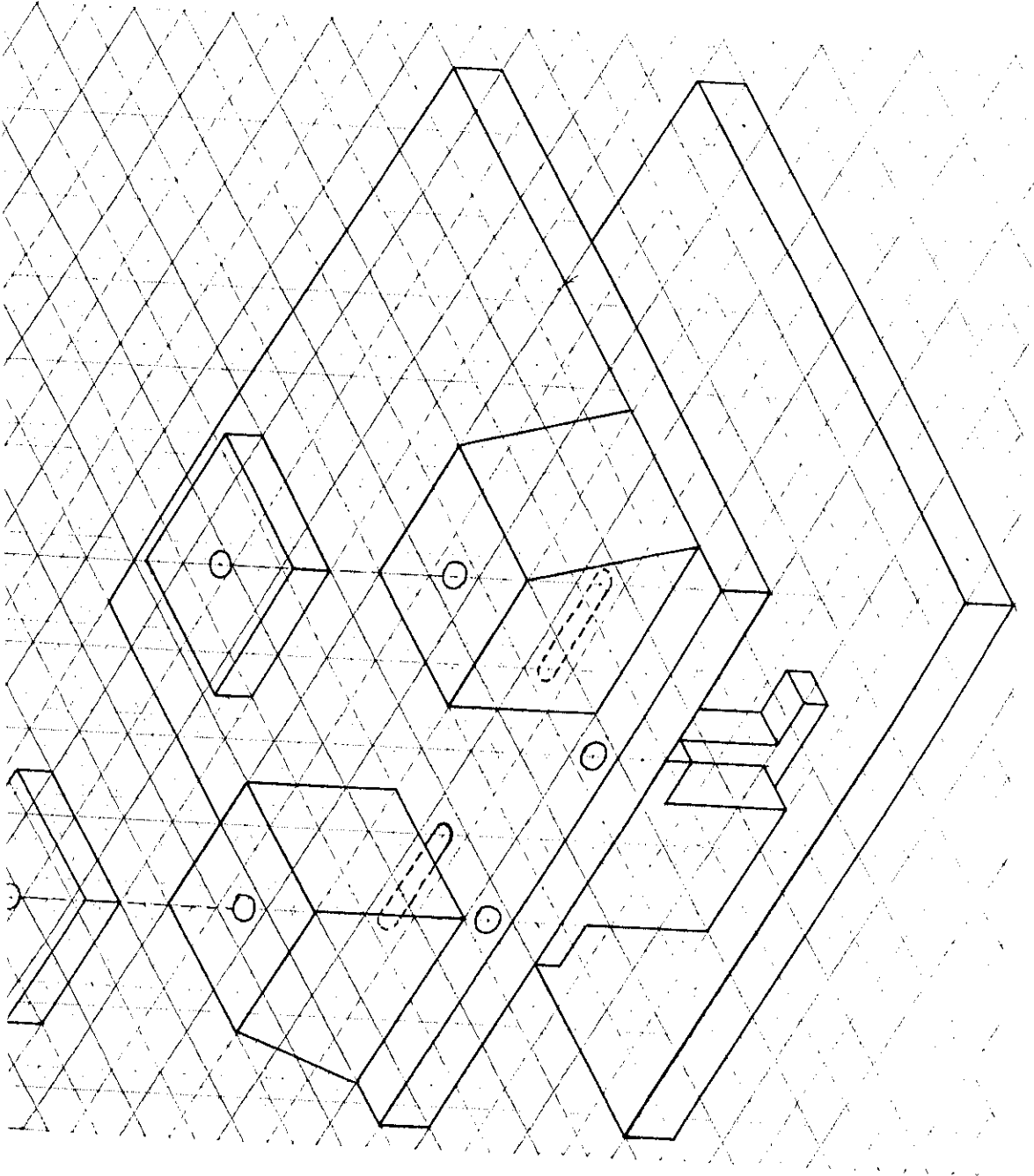


Figura 13. Diseño a escala del banco de pruebas. Escala 1/4.

Existe un error en este tipo de dinamómetro causado por la inercia de rotación del aire cuando la hélice lo empuja, ya que reacciona en contra del motor y el banco, resultando en una medida imprecisa del par-motor. Los factores involucrados en la corrección de este error son: el diámetro, el paso, número de aspas y velocidad de la hélice utilizada, forma del motor y diseño del banco de pruebas. Tal corrección es obviamente difícil de determinar en forma precisa. Si el error es considerado lo suficientemente grande como para requerir corrección, el problema puede ser resuelto interponiendo un panel en forma de panal de abejas o rejilla entre la hélice y el motor, en vez de calcular el factor de corrección para el caso en cuestión. Dado que este error tiene influencia en el proyecto, su efecto se consideró pequeño y, por la limitante del tiempo, fue enteramente ignorado.

El tacómetro utilizado para la determinación de la velocidad permitió la medición sin la imposición de ninguna carga extra al motor, lo cual no introdujo ningún error en los resultados. El tacómetro es un instrumento eléctrico que básicamente utiliza una fotocelda que mide el número de veces que el aspa o aspas de la hélice cruzan entre el sensor y la luz del sol; de esa manera, se obtiene la velocidad rotacional del motor (RPM).

B. Construcción

1. Aparatos utilizados

✓ Motores de dos y cuatro tiempos para aviones de radio control:

a) **Thunder Tiger** PRO 0.46 in³ (dos tiempos)

Desplazamiento: 7.46 cc (0.46 in³)

Diámetro Pistón: 21.8 mm (.853 in)

Carrera: 20.0 mm (0.7874 in)

Potencia máxima: 1.43BHP @ 16000 RPM

Intervalo Práctico de velocidad: 2500 - 14000 RPM

Peso (con mofle): 482 g (17.01 oz.)

b) **OSFP** 0.40 in³.

Desplazamiento: 6.49 cc (0.396 in³)

Diámetro Pistón: 21.2 mm (0.8346 in)

Carrera: 18.4 mm (0.7244 in)

Potencia máxima: 1 BHP @ 15000 RPM

Intervalo Práctico de velocidad: 2500 - 16000 RPM

Peso (sin mofle): 248 g (8.75 oz.)

Todos con el sistema de ignición y hélices de diversos tamaños, los cuales se listan a continuación:

✓ Sistema de ignición mediante *glow plug* de 12 V y 2 A con arrancador de 12 V.

✓ Hélices

10X6

11X6

10X7

11X7

10X9

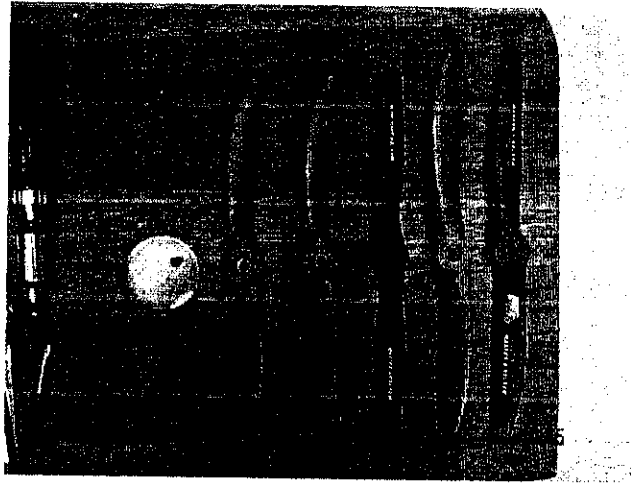


Figura 14. Hélices utilizadas en las pruebas de los motores.

✓ Tacómetro marca *Hobbico* para hélices de 2 y 3 aspas, con intervalo de velocidades de 0 a 32,000 RPM. Medición a una distancia de 4" a 12" de la hélice.



Figura 15. Tacómetro utilizado para la medición del régimen de la hélice.

2. Materiales de construcción para el dinamómetro:

Piezas de madera:

Mesa de pruebas de tamaño mediano

2 Tablas de 6" x 6½" de ½" de grosor

2 Tapaderas cuadradas de 1½" de lado por ¼" de grosor

2 Tronquitos de 1½" x 1½" x 2"

1 Regla de ½" x ½" de 6" de largo

1 Regla de 5/8" x 1¼" de 20" de largo

1 Regla de 5/8" x 1¼" de 7¼" de largo

1 Regla de 5/8" x 1¼" de 6" de largo

3 Tronquitos de 5/8" x 1¼" de 2" de largo (1 dividido por la mitad para formar dos triángulos)

Piezas diversas:

2 Tornillos de ¼" de diámetro de 3" de largo con tuercas de mariposa, rondanas de ajuste y resortes de contrapresión.

6 Tornillos para lámina #8 de 1" de largo

2 Tornillos para lámina #8 de 2" de largo

8 tornillos de fijación de 3/16" de diámetro de 1¼" de largo con tuerca

2 Cojinetes FAG 7102 B de anillo interior de 12 mm y anillo exterior de 32 mm

2 Porta cojinetes de acero con resorte de retención

2 Porta eje con castigador para eliminar el movimiento axial

Eje de acero de 12 mm de diámetro y 6½" de largo

Contrapeso de acero de 2" de diámetro con agujero de 5/32" en el interior; peso de 7 oz.

Varilla de acero plata de 5/32" de diámetro de 36" de largo

2 anillos de retención de 30 mm de diámetro

4 Collarines de 5/32" de diámetro interior

2 Bandas de nylon de 5/32" de diámetro interior con tornillos

Balanza de 20 lb. con divisiones cada onza

Tanque de combustible de 8 oz.

Tubería de silicón de 3/32" de diámetro

Esponja amortiguadora de vibración

Caucho natural amortiguador de vibración de ¼" de espesor de ¾" x 1½"

Caucho natural amortiguador de vibración de 1/16" de espesor de 5/8" x 1½"

2 Armellas abiertas

2 Armellas cerradas

Equipo de construcción y herramientas:

Vernier
Torno
Fresadora
Barreno de banco
Barreno de pistola
Brocas de diversos grosores
Sierras para corte de madera y metal
Balanza analítica
Pinza de anillos de retención
Martillo, lija, pegamento, destornilladores, llaves de cola, cinta métrica, etc

3. Procedimiento

El primer paso, luego del diseño del sistema, fue la construcción del dinamómetro. La base en la cual se formaría el banco fue elaborada con las tablas de madera y los tronquitos. Primero se agujereó una de ellas para poder formar un canal de $\frac{1}{4}$ in de espesor a $1\frac{1}{4}$ in del borde anterior, donde pudieran deslizarse los tornillos de retención de los tronquitos. Seguidamente, con el barreno de banco se procedió a hacer los agujeros en el centro de los tronquitos y las tapaderas cuadradas para que los tornillos de 3 in pudieran traspasar por completo las piezas. Luego, se ensambló el sistema como se muestra en la figura 16 utilizando ambos tronquitos, la tabla con las ranuras, las tapaderas y los tornillos con sus rondanas, tuercas y resortes de contrapresión (ver figura 17).

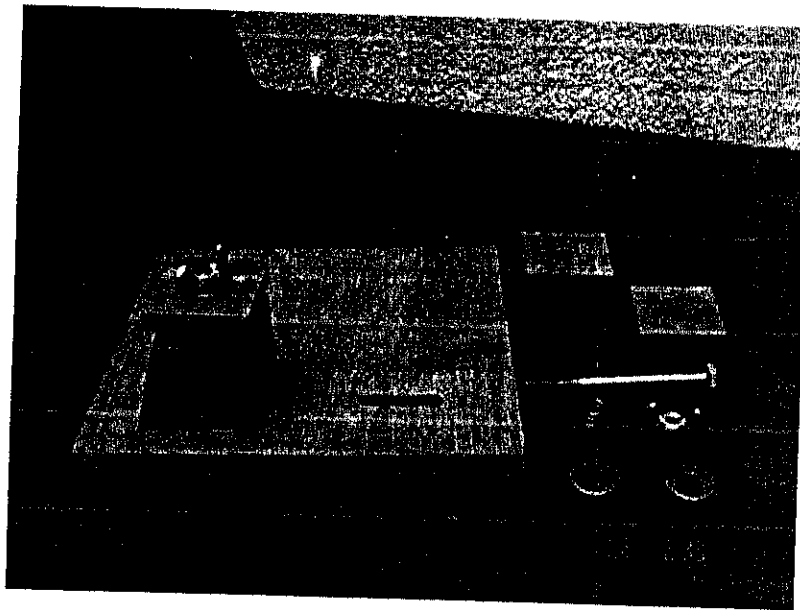


Figura 16. Proceso de maquinado del banco de pruebas

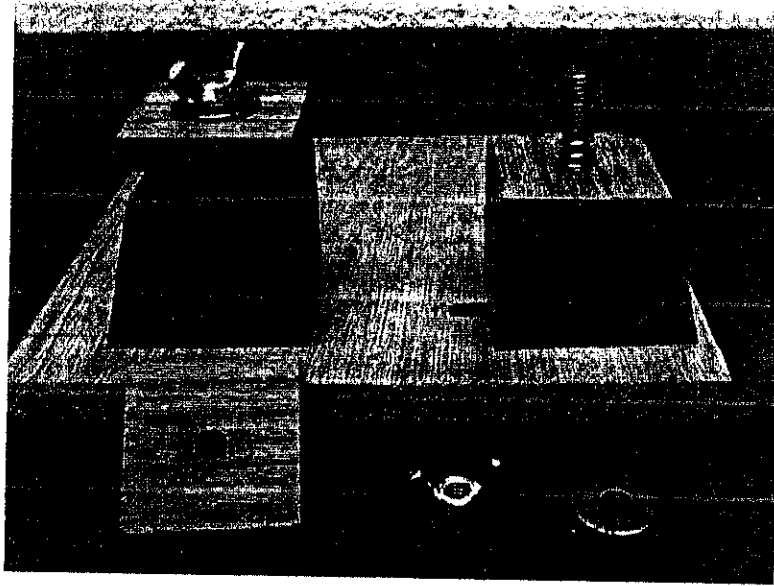


Figura 17. Ensamble superior del banco de pruebas.

Después de tener la parte superior terminada, se procedió a construir el bastidor de la misma, para lo cual se utilizaron los dos portacojinetes y los dos porta eje. Se instalaron los cojinetes en sus respectivos lugares y se aseguraron con los retenedores. Seguidamente, se procedió a ajustar el eje en los anillos interiores para luego ajustar los portaeje en ambos extremos del mismo, a una distancia de $5 \frac{7}{8}$ " entre sí. Finalmente, se apretaron los prisioneros de los portaeje para terminar el ajuste (ver figura 18).

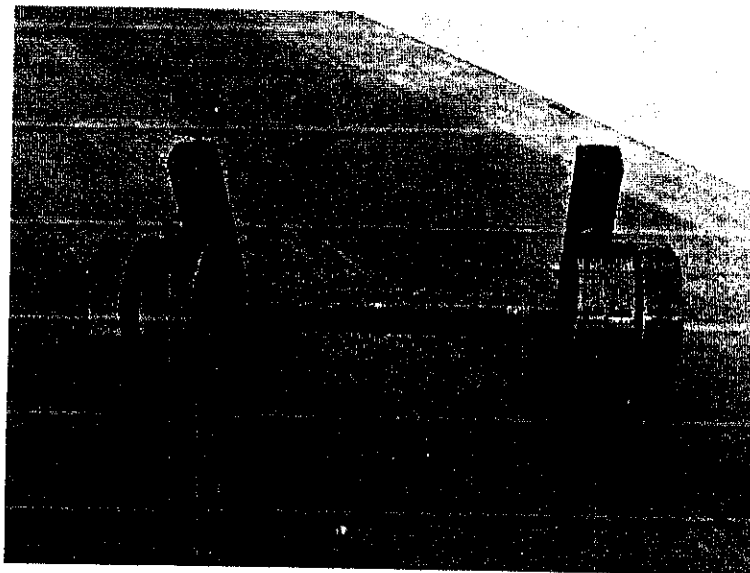


Figura 18. Eje con cojinetes para el banco de pruebas.

Seguidamente se armó el bastidor y se unió al banco previamente construido para dar como resultado el arreglo de la figura 19.

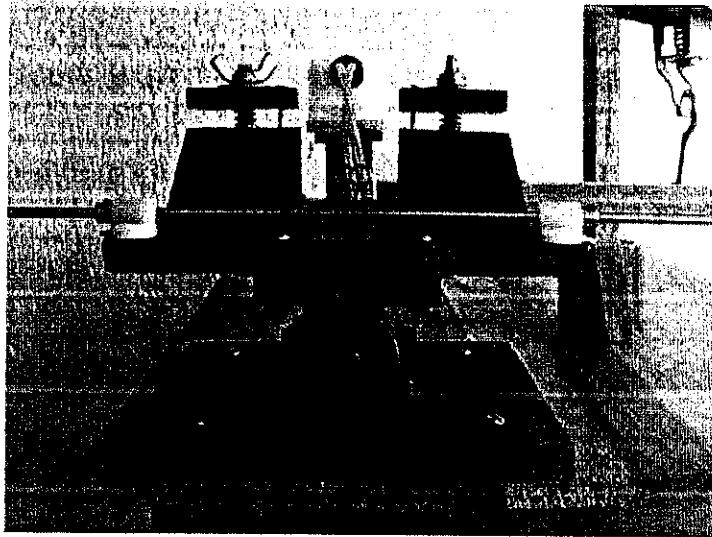


Figura 19. Arreglo de banco-bastidor del dinamómetro.



Figura 20. Balanza para la medición del par de reacción.

Luego de armar el banco, se procedió a la colocación del contrapeso para equilibrar el desbalance del conjunto. Para hacerlo se colocó una varilla de 36" en el centro del banco, alineada con el borde de la tabla superior y sostenida por bandas de nylon con tornillos y collarines, donde luego se hizo deslizar un trozo de acero con una masa de siete onzas. Este contrapeso podía moverse libremente y fijarse también con collarines para ajustar el par-motor requerido que equilibraría los momentos cuando se instala cada motor. De esa forma, una amplia gama de motores de diferente tamaño pueden ser probados sin necesidad de modificar el diseño básico (figura 19).

La balanza fue colocada en un gancho elaborado con las reglas de madera de 20", 7¼", 6" y los tronquitos de 2". El arreglo se unió con los tornillos para lámina #8 de 1" y 2" y en la punta superior se colocó una armella para sostener a la balanza en posición (ver figura 20).

Finalmente, se procedió a colocar el banco en la mesa de pruebas, junto con la balanza y el tanque de combustible, con el fin de poder medir el par-motor de reacción con el motor en funcionamiento.

La figura 21 muestra el ensamble completo. En ella se muestran los accesorios de medición como la balanza, así como el depósito de combustible (éste se muestra en un arreglo de madera para elevarlo a la altura del motor para facilitar el flujo de combustible hacia el carburador).

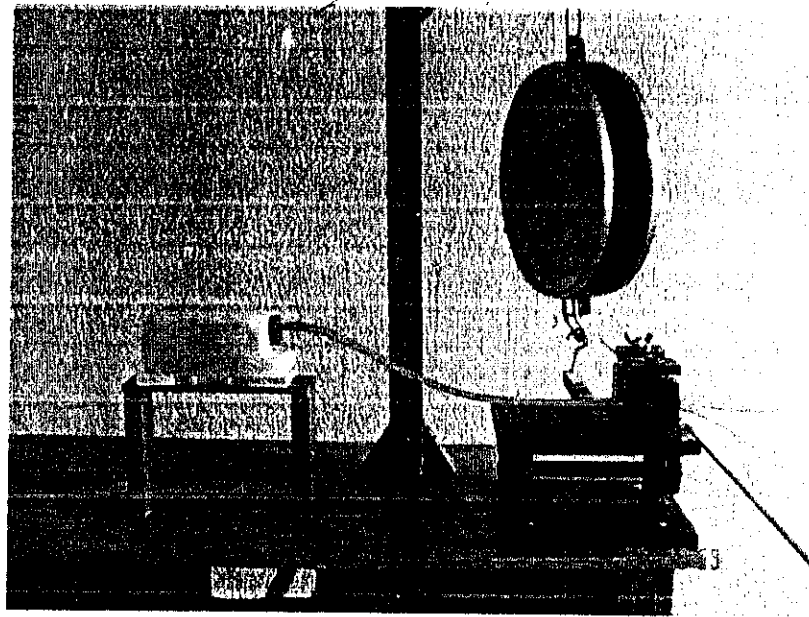


Figura 21. Ensamble completo del banco de pruebas (dinamómetro).

CAPÍTULO V. PRUEBAS DE LOS MOTORES EN EL BANCO DISEÑADO.

A. Toma de datos en el campo de vuelo

Con el fin de ilustrar el procedimiento de toma de datos, se realizaron pruebas con los dos motores ya mencionados (*Thunder Tiger 0.46 Pro* y *OS 0.40 FP*). Para cada uno se efectuó la misma rutina, la cual es válida para cualquier otro motor de cualquier tamaño y marca.

Los motores fueron arrancados en dos series; la primera con combustible de 10% nitrometano y la otra con combustible de 15% nitrometano. Asimismo, cada una de ellas fue realizada con cada tipo de hélice en prueba. Se registró la distancia del gancho de la balanza al punto de pivote (donde se encuentran los cojinetes), la velocidad del motor con el tacómetro y la fuerza indicada por la balanza en cada corrida.

Antes de ejecutar cada prueba, se ajustaron primero las agujas de inyección para asegurar un valor de velocidad máximo a plena marcha y obtener de esa manera, el mayor rendimiento del motor.

Cada prueba consistió en la toma de varias posiciones del acelerador del motor: marcha mínima o "idle" (aproximadamente 2500 RPM), 4000 RPM, 6000 RPM, 8000 RPM, 10000 RPM, 12000 RPM (en algunos casos) y plena marcha. Para cada motor, los valores de dichas posiciones no se encuentran específicamente en un intervalo de velocidad, por lo que cada gráfica tiene sus propios valores. La hoja de tabulación utilizada en el campo de vuelo se muestra en la tabla 2.

B. Análisis de la información con el uso de hoja electrónica

Para llevar a cabo el análisis de los datos obtenidos en el campo de vuelo, debía compararse el desempeño del motor en las diferentes pruebas para de esa manera ilustrar los cambios que tuvieron lugar al variar las condiciones de funcionamiento.

La forma de llevar a cabo el análisis consistió en la superposición de las gráficas velocidad con par-motor y velocidad con potencia de cada prueba con diferente hélice y con un mismo tipo de combustible. De esa forma, se obtuvieron cuatro namogramas para cada motor - dos por cada combustible empleado - en los cuales se encuentran las curvas de par-motor y potencia para cada hélice. Así, se pudo observar qué par se tiene para cada una y cuál de ellas produce la potencia más alta en el motor y a qué régimen.

Los datos se muestran en las tablas 3 a la 6 y las gráficas de par-motor y potencia se muestran luego de ellas. Es necesario aclarar que para una mejor visualización de la fuerza en la balanza, ésta fue medida en onzas en vez de libras. Esto da como resultado un par-motor en unidades oz-in en vez de lb-ft. Para efectuar el cálculo de la potencia es necesario emplear la conversión apropiada a las unidades correspondientes.

Tabla 2. Hoja de Tabulación de datos para el campo de vuelo.

***Campo de vuelo
Datos***

Motor: _____

Combustible: 10% 15%

Hélice: _____

Aceleración	RPM	L (pulg.)	F. (oz.)	Par (oz-in)
Idle				
¼ acelerador				
½ acelerador				
Plena marcha				

Rango RPM: _____

Tabla 3. Motor OS 0.40 FP
 Combustible 10% nitrometano

Régimen	10x6		10x7		10x9		11x6		11x7	
RPM	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp
2700	2.75	0.01	2.75	0.01	2.75	0.01	2.75	0.01	3.85	0.01
4000	5.5	0.02	6.6	0.03	8.25	0.03	8.25	0.03	8.25	0.03
6000	8.25	0.05	11	0.07	13.75	0.08	13.75	0.08	13.75	0.08
8000	13.75	0.11	15.125	0.12	19.25	0.15	19.25	0.15	24.75	0.20
9500							30.25	0.28	30.25	0.28
10000	24.75	0.25	27.5	0.27	30.25	0.30				
10500			30.25	0.31						
11100	30.25	0.33								

Tabla 4. Motor OS 0.40 FP
 Combustible 15% nitrometano

Régimen	10x6		10x7		10x9		11x6		11x7	
RPM	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp
2500	2.75	0.01	2.75	0.01	2.75	0.01	3.85	0.01	3.85	0.01
4000	5.5	0.02	5.5	0.02	8.25	0.03	8.25	0.03	8.25	0.03
6000	8.25	0.05	11	0.07	11	0.07	13.75	0.08	13.75	0.08
8000	13.75	0.11	15.125	0.12	20.625	0.16	22	0.17	24.75	0.20
9800					30.25	0.29	33	0.32		
10000	24.75	0.25	27.5	0.27					34.1	0.34
10200			30.25	0.31						
11300	30.25	0.34								

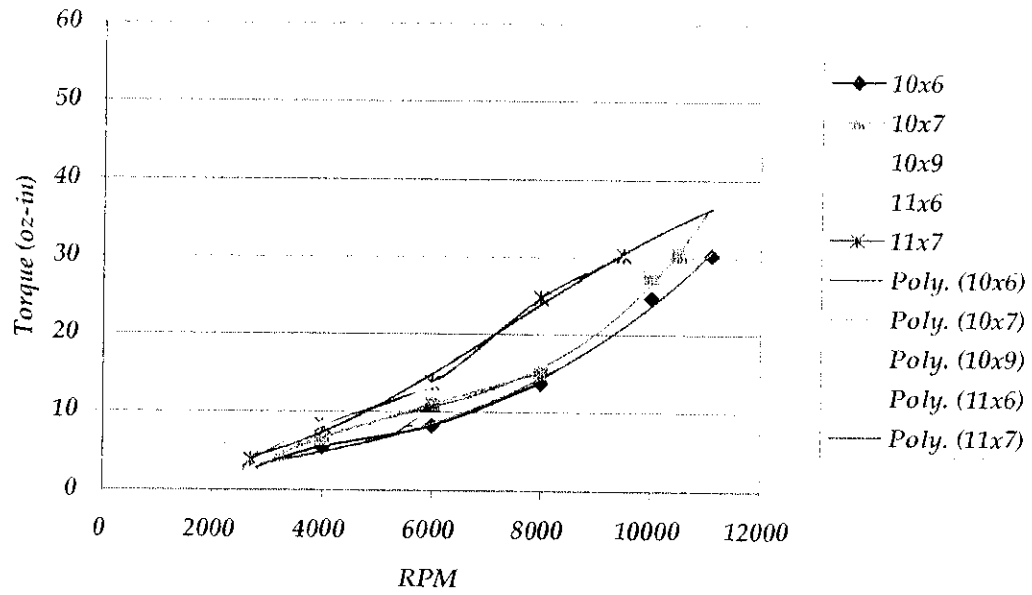
Tabla 5. Motor Thunder Tiger 0.46 Pro
Combustible 10% nitrometano

Régimen RPM	10x6		10x7		10x9		11x6		11x7	
	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp
2500	3.85	0.01	3.3	0.01	3.85	0.01	3.85	0.01	4.4	0.01
4000	5.5	0.02	5.5	0.02	7.15	0.03	8.25	0.03	6.6	0.03
6000	8.25	0.05	8.25	0.05	11	0.07	13.75	0.08	11.55	0.07
8000	13.75	0.11	16.5	0.13	19.25	0.15	22	0.17	22	0.17
10000	16.5	0.16	24.75	0.25	30.25	0.30	33	0.33	33	0.33
10700					35.75	0.38	38.5	0.41	44	0.47
11500			38.5	0.44						
12000	30.25	0.36								
13600	38.5	0.52								

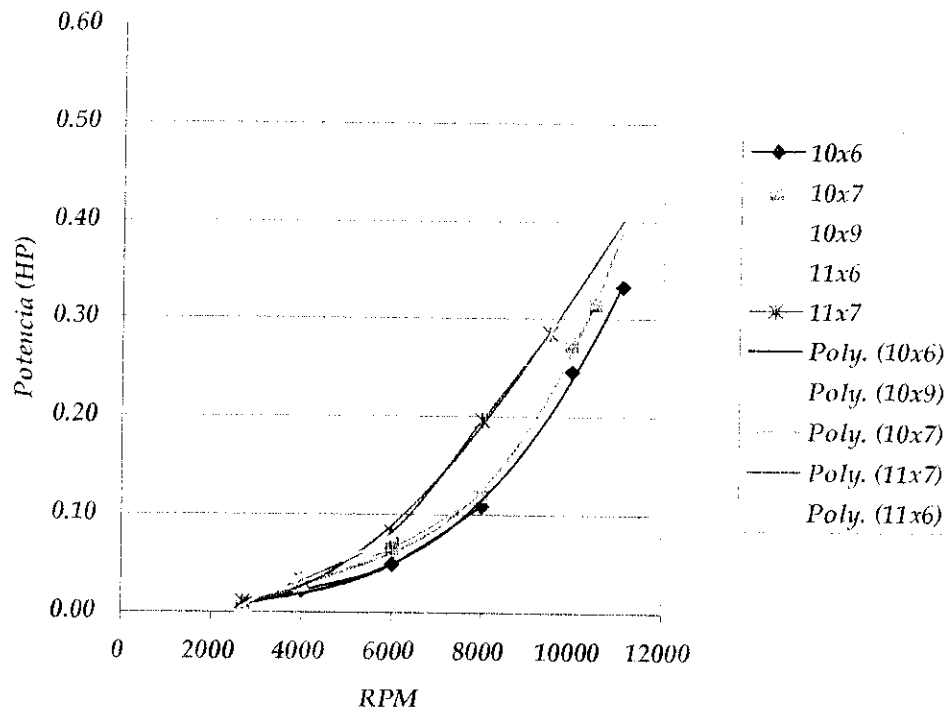
Tabla 6. Motor Thunder Tiger 0.46 Pro
Combustible 15% nitrometano

Régimen RPM	10x6		10x7		10x9		11x6		11x7	
	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp	oz - in	hp
2500	3.85	0.01	3.85	0.01	3.85	0.01	3.85	0.01	3.85	0.01
4000	5.50	0.02	6.60	0.03	8.25	0.03	8.25	0.03	8.25	0.03
6000	8.25	0.05	11.00	0.07	13.75	0.08	13.75	0.08	12.65	0.08
8000	13.75	0.11	19.25	0.15	20.90	0.17	24.75	0.20	19.25	0.15
10000	19.25	0.19	30.25	0.30	30.25	0.30	35.75	0.35	35.75	0.35
10500							41.25	0.43		
10600									41.25	0.43
11200					38.50	0.43				
11500			41.25	0.47						
12000	30.25	0.36								
13900	38.50	0.53								

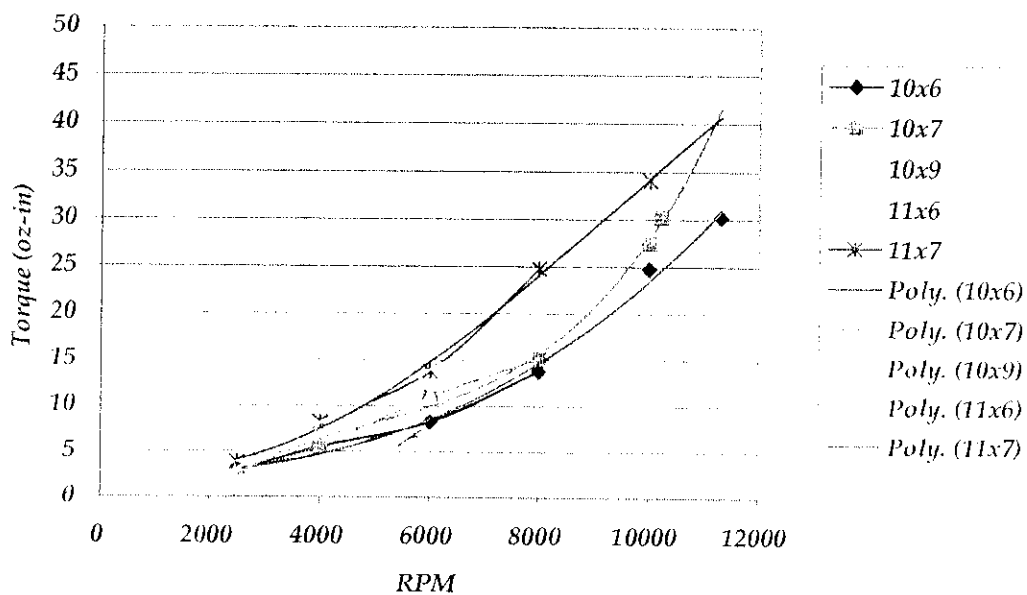
Gráfica 1. Par-motor OS .40 FP 10% Nitrometano



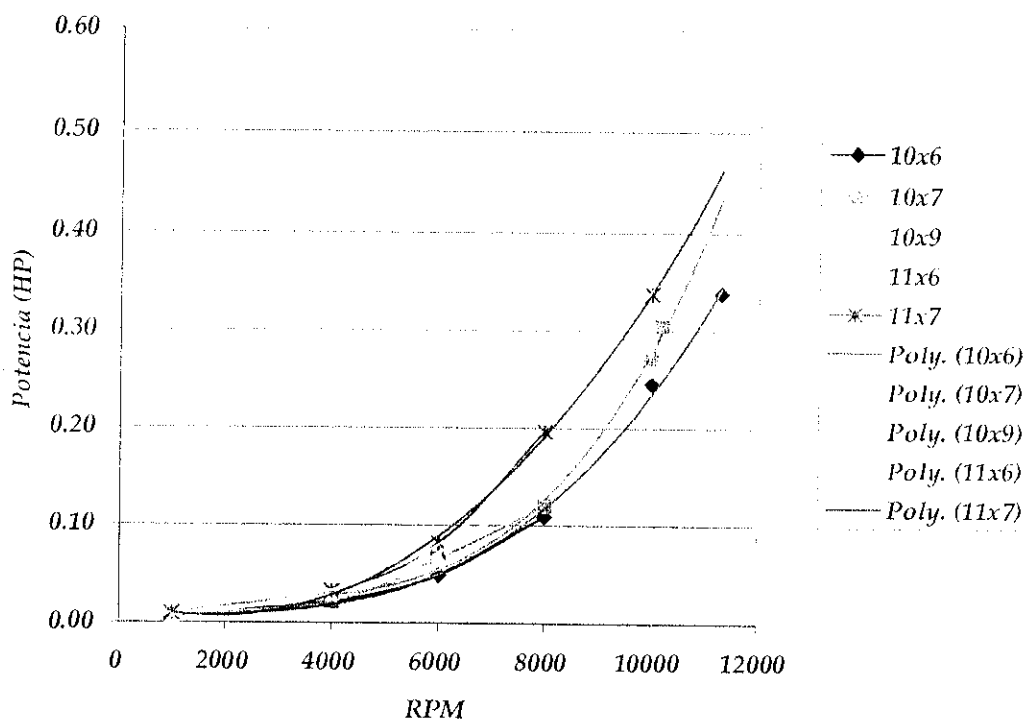
Gráfica 2. Potencia OS .40 FP 10% Nitrometano



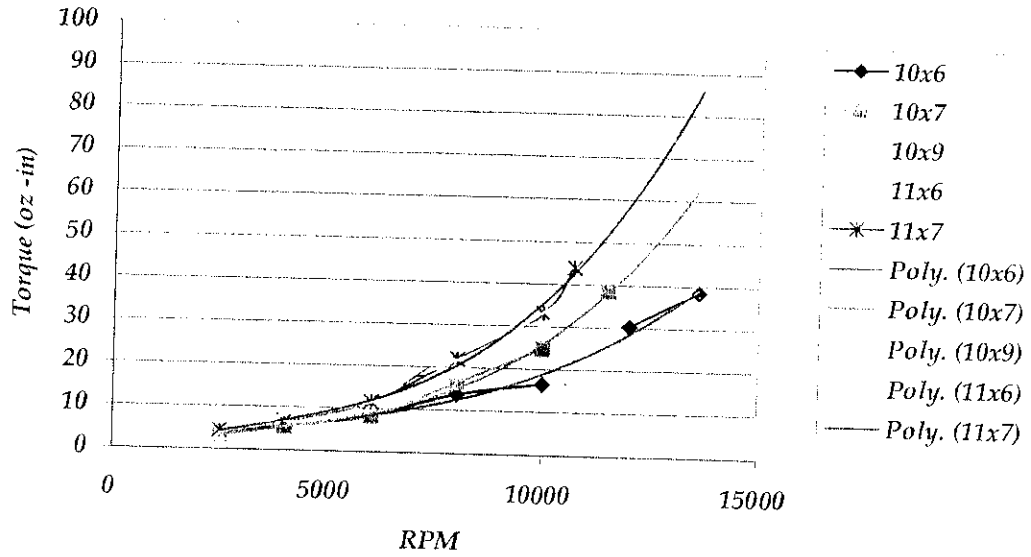
Gráfica 3. Par-motor OS .40 FP 15% Nitrometano



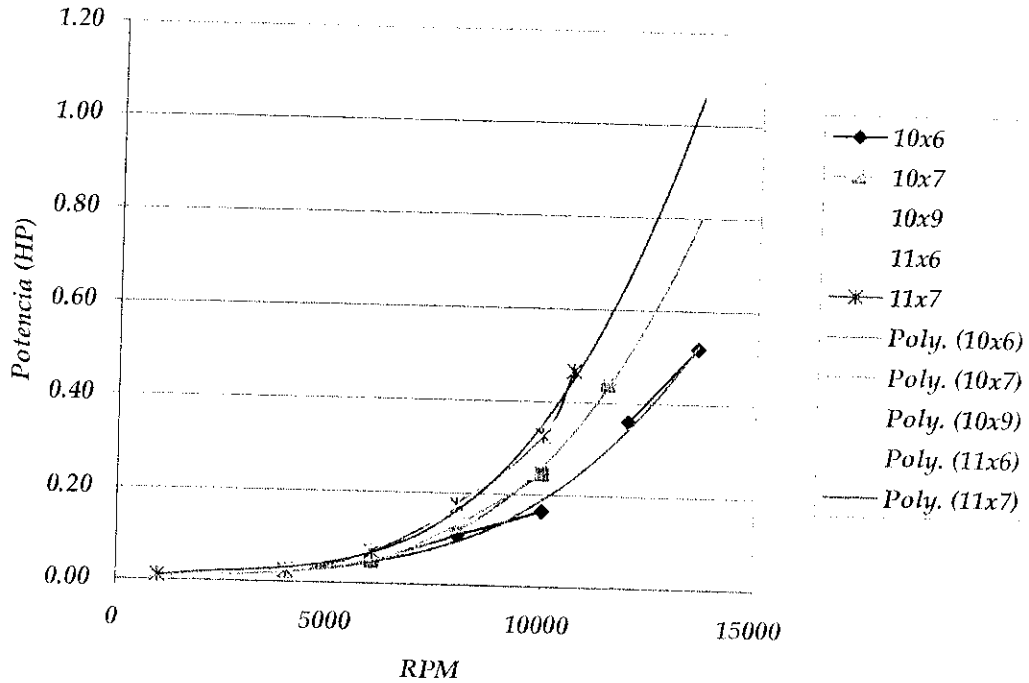
Gráfica 4. Potencia OS .40 FP 15% Nitrometano



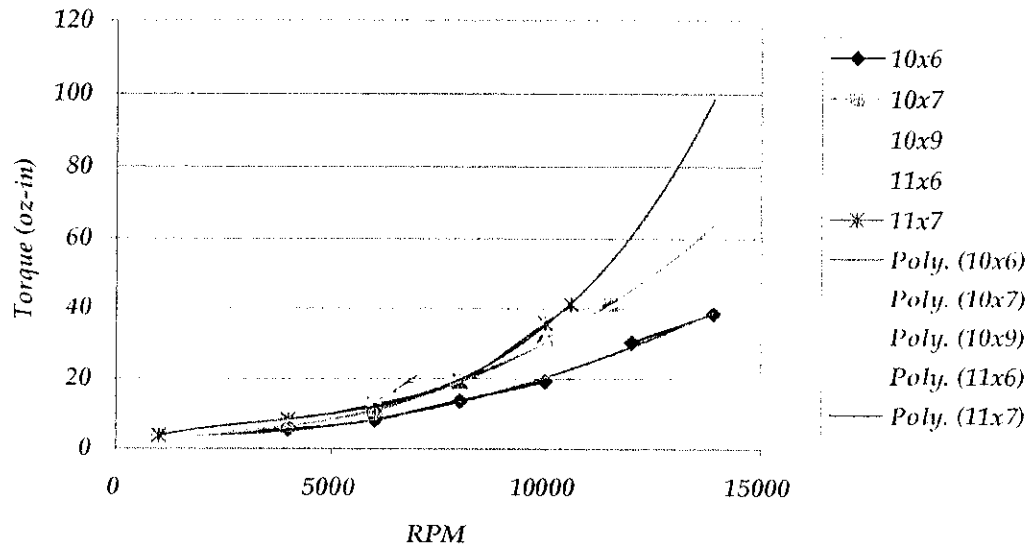
Gráfica 5. Par-motor Thunder Tiger .46 Pro 10% Nitrometano



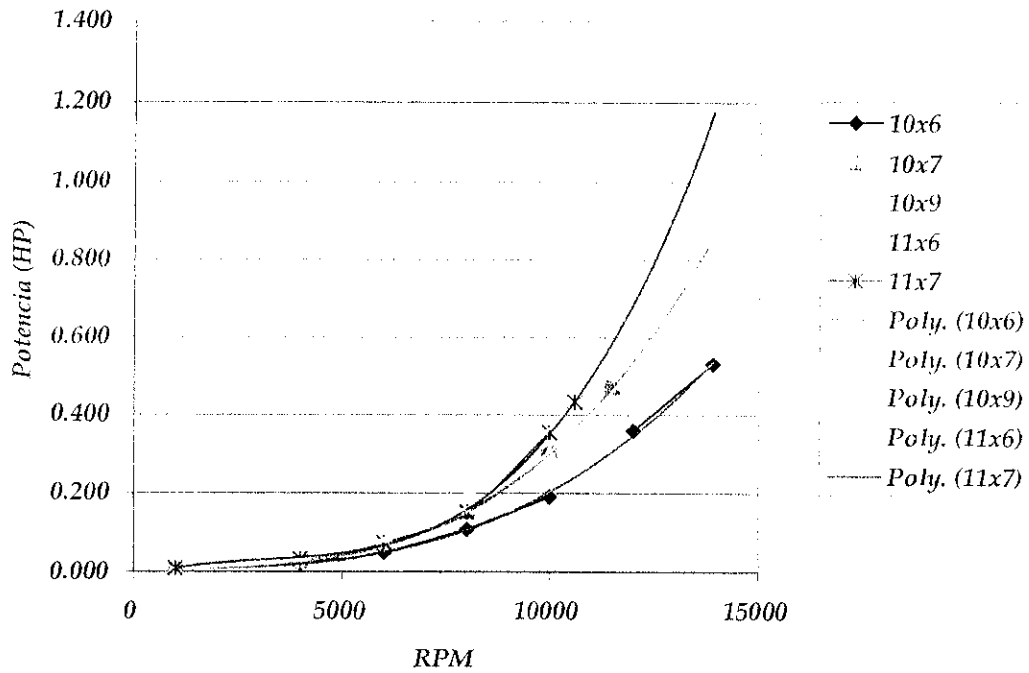
Gráfica 6. Potencia Thunder Tiger .46 Pro 10% Nitrometano



Gráfica 7. Par-motor Thunder Tiger .46 Pro 15% Nitrometano



Gráfica 8. Potencia Thunder Tiger .46 Pro 15% Nitrometano



C. Elaboración de una guía práctica

Las gráficas de potencia y par-motor constituyen un mapa de posibilidades de funcionamiento para cada motor en cuestión. Al ejecutar las pruebas con hélices diversas y superponer las curvas se tiene un nomograma (ver glosario) que facilita la visualización del desempeño con diferentes condiciones.

Al contar con estas cartas para cada combustible y para diversas hélices, un modelista puede saber exactamente qué par-motor y qué potencia está entregando su motor para un arreglo específico de velocidad, hélice, combustible. Con esto en mente, puede saber qué maniobrabilidad y rapidez se podrá esperar del avión al cual se desea instalar dicho motor y poder predecir qué tipo de hélice es la que mejor se ajusta a sus características de vuelo. Es por eso que estas cartas constituyen una guía para el modelista, quien al tenerlas, leerlas y ponerlas en práctica puede estar seguro de que obtendrá un mejor desempeño de su avión.

La duda consiste en saber cuál hélice es mejor o peor para un motor determinado, o mejor dicho, cómo deben usarse las gráficas para escoger la hélice que mejor se adapta al motor. El procedimiento es sencillo pues se desea obtener el mejor desempeño del motor al instalar una hélice determinada. Con esto en mente, es de esperarse que éste debe operar cerca de su valor de velocidad en el que tiene el par-motor máximo sin dejar de lado la potencia. Con las cartas, se busca el valor del par-motor mayor para el motor y luego se ajusta un valor de operación de aproximadamente un 10% menos que dicho máximo, ya que en el vuelo, estos motores tienden a incrementar un poco su velocidad debido a la altura y el efecto del movimiento. Al hacer dicha aproximación, debe tomarse en cuenta que la mayoría de motores deben operar por encima de las 10,000 RPM dado que a velocidades menores se presentan problemas de sobrecalentamiento o un mal funcionamiento.

Ya con el valor de velocidad escogido (10% por debajo del par máximo y por encima de 10,000 RPM) se buscan las hélices que tengan un máximo de potencia cerca de ese valor de velocidad. Así, se tendrá un buen funcionamiento del motor con un valor alto de par-motor, y operando a la potencia máxima suministrada por la hélice escogida.

De lo anterior se desprende que no es importante operar en la potencia máxima sino que es mejor una hélice más grande que opere a velocidades más bajas con un par-motor más alto, ya que ella proveerá del empuje más adecuado al avión. De la misma manera, dicho avión tendrá un mejor desempeño aerodinámico si se le instala un motor con la hélice adecuada.

Al ejecutar pruebas con un número mayor de hélices se tendrá el desempeño del motor a velocidades más altas y con una mayor variedad de condiciones. Para el caso en estudio, se tomaron las hélices más comunes para los motores utilizados, pues son las que normalmente utilizan los modelistas. No obstante, debe destacarse que no se obtuvo el desempeño en el intervalo completo de operación de los motores en prueba.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados de las pruebas muestran que una hélice más larga absorbe un valor de potencia a una velocidad más baja que una hélice más pequeña. Las curvas de velocidad muestran que la potencia absorbida por la hélice es aproximadamente proporcional al cubo de la velocidad de una hélice cualquiera para ambos motores.

El valor de potencia más alto para el motor OS .40 FP fue de 0.34 HP a 11,300 RPM con combustible de 15% de nitrometano y de 0.33 HP a 11,100 RPM con el de 10%; ambos resultados con las hélices 11X7 y 10X6, respectivamente. Asimismo, el valor de par-motor más alto fue de 34.1 oz-in con la hélice 11X7 y de 30.25 oz-in para la hélice 10X6. Dicho motor funcionó satisfactoriamente, con un nivel alto de vibración a bajas velocidades; no se tuvieron problemas ni en el arranque ni en el ajuste de la mezcla. Las curvas, por consiguiente, ilustran el intervalo normal de operación del motor con esas hélices.

Para el motor Thunder Tiger .46 Pro, el valor de potencia más alto fue de 0.53 HP a 13,900 RPM con la hélice 10X6 y combustible con 15% de nitrometano. Asimismo, el valor máximo de potencia para combustible con 10% de nitrometano fue de 0.52 HP a 13,600 RPM con la hélice 10X6. El valor de par-motor más alto fue de 44 oz-in con la hélice 11X7. Dicho motor también funcionó satisfactoriamente, tampoco se tuvieron problemas en el arranque y sólo presentó un pequeño retardo en el ajuste de la mezcla. También presentó problemas de vibración alta en el intervalo de 6,000 a 9,000 RPM. Las curvas ilustran su intervalo normal de operación con dichas hélices.

Tomando en cuenta los datos anteriores, puede notarse que no existe diferencia apreciable en el desempeño al variar el porcentaje de nitrometano en el combustible. Sólo se incrementa un poco el valor máximo de velocidad que se ve reflejado en un incremento mínimo en la potencia. El mito tradicional de "más nitrometano es mayor potencia" es cierto sólo desde ciertos valores como un 25% o un 20%. El incremento de potencia entre un 10% y un 15%, entonces, no es notable.

Por otro lado, las suposiciones de que la hélice 10X6 es la más común y adecuada para los motores del intervalo de 0.40 -0.46 in³. son realmente ciertas, dado que su desempeño muestra un buen valor de par-motor máximo y una potencia aceptable, tomando en cuenta el valor de velocidad al que operan (arriba de 10,000 RPM). Cuando se utiliza la relación polinómica de la línea de tendencia de los datos de caballaje (ver glosario), se encuentra que los números de las pruebas concuerdan con los datos técnicos de los fabricantes de cada motor. En el motor OS, por ejemplo, se tiene una potencia de 0.31 HP a 10,500 RPM y, si se utiliza la relación cúbica, se obtiene una potencia de 0.9 HP a 15,000 RPM, un valor muy cercano al dado en la ficha técnica. Igualmente para el Thunder Tiger, una potencia de 0.47 HP a 11,500 RPM da un valor de 1.3 HP a 16,000 RPM. No son los valores exactos para los motores, pero considerando las imprecisiones ocasionadas por la vibración y por el tipo de balanza, son bastante cercanos.

No obstante, los números están muy lejos de llegar a las especificaciones de fábrica (el valor de HHP o 1.43 HP respectivamente). El llegar a ellos implicaría el uso de una hélice muy pequeña que botaría los valores de par-motor a unos inaceptables.

En cuanto al dinamómetro, en el desarrollo de las pruebas se presentaron algunos inconvenientes, los cuales tenían su origen en la alta vibración producida por el funcionamiento del motor. La lectura en la balanza era virtualmente imposible debido al movimiento intermitente de la aguja, mientras que mantener la velocidad del motor constante era algo complicado, pues la varilla de empuje del acelerador vibraba constantemente.

Ambos problemas fueron resueltos adicionando trozos de hule tanto en las mordazas del banco como en la unión de éste con la balanza, y esponja amortiguadora en la varilla de aceleración (ver figuras 22 a 24). De esa forma disminuyeron los niveles de vibración a un nivel no aceptable, pero sí suficiente para poder realizar mediciones y mantener la velocidad del motor en un valor determinado para su lectura. Los resultados, por consiguiente, dan una idea del intervalo de operación del motor, pero no deben considerarse del todo precisos, por las razones ya expuestas.



Figura 22. Elementos amortiguadores de vibración del motor

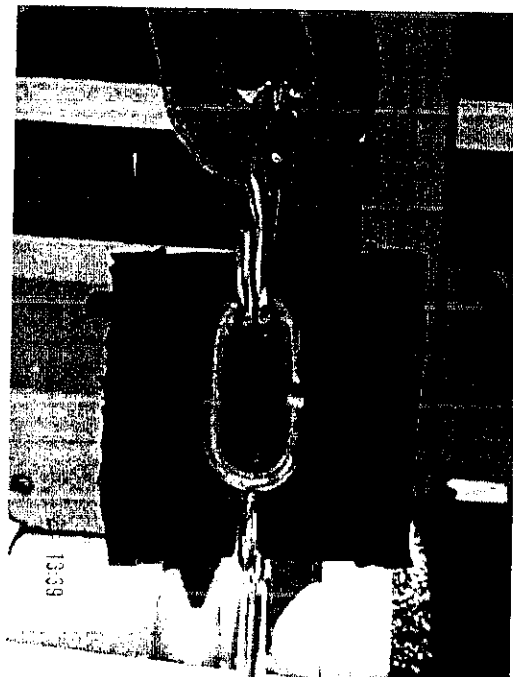


Figura 23. Elemento amortiguador de vibración de la balanza.

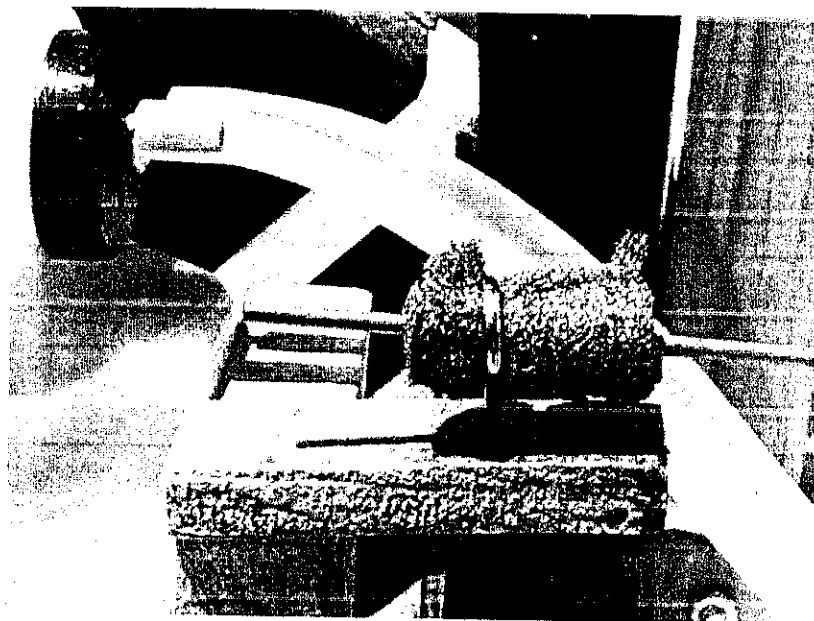


Figura 24. Elemento amortiguador de vibración en la varilla de aceleración.

En cuanto al tacómetro no se tuvo ningún inconveniente. Su desempeño fue excelente a pesar de que no estuvo fijo en una sola posición con respecto al banco para medir la velocidad.

Finalmente, pueden hacerse las siguientes recomendaciones en cuanto al diseño para su futura aplicación:

- Utilizar una balanza analítica, de preferencia digital, para realizar las mediciones. Esto minimizará el efecto de la vibración y permitirá la medición en décimos o centésimos de onza, lo cual producirá mejores valores de fuerza de reacción.
- Agregar amortiguadores de vibración al bastidor del banco, con el fin de reducir la transmisibilidad de movimiento a la mesa de pruebas; esto reducirá el efecto vibrante de la balanza y mejorará las lecturas de fuerza.
- En caso de no contar con una balanza analítica, puede hacerse la medición por medio de contrapesos y equilibrar momentos con respecto al eje de rotación del banco. Este método también dará buenos resultados y es independiente de la vibración, pues consiste en una masa que se desplaza de la misma forma que el contrapeso y equilibra el par-motor producido por el motor. El valor de dicho par se obtiene multiplicando el peso de la masa por el brazo de palanca entre el eje y su centro de masa.
- El problema de la vibración de la varilla de aceleración puede eliminarse utilizando un servomotor que realice la tarea de moverla. Al hacerlo, proporciona una fuerza de empuje constante que la mantiene en su lugar y, a la vez, permite el mando a distancia con el uso de un radio receptor operado por un control remoto. En este caso, debe proveerse de la amortiguación necesaria al receptor y a la batería, para evitar su deterioro.

BIBLIOGRAFÍA

Libros de Consulta

- 📖 Heywood, John B. 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. McGraw-Hill. 563 Págs.
- 📖 Pullkrabek, W. 1997. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. Prentice Hall. 411 Págs.
- 📖 Spotts, M. F. 1998. Elementos de Máquinas. Prentice Hall. 829 Págs.
- 📖 Mott, R. 1996. Diseño de Elementos de Máquinas. Prentice Hall. 765 Págs.
- 📖 Beer, F. y Russel Johnston Jr. 1997. Mecánica Vectorial para Ingenieros. McGraw-Hill. 599 Págs.
- 📖 _____, 1993. Mecánica de Materiales. McGraw-Hill. 837 Págs.

Sitios de Internet

- 📖 <http://www.howstuffworks.com>
- 📖 <http://www.towerhobbies.com>
- 📖 <http://www.wildcatfuel.com>
- 📖 <http://www.apcprop.com/Engineering/engineering.html>
- 📖 <http://www.masterairscrew.com/techbull.asp#B>
- 📖 <http://www.modelairplanenews.com>

ANEXO: Glosario, Unidades de Medición y Marcas

A. Glosario

Dispositivo Venturi. Dispositivo que funciona gracias al efecto Venturi que es un fenómeno que se produce en una canalización horizontal de sección variable por la que circula un fluido incompresible, sin viscosidad y en un proceso de régimen permanente. La velocidad en una parte estrecha de la canalización tiene que ser mayor que la ancha (como lo indica el teorema de Bernoulli) y por estar ambas a la misma altura, la presión en la parte ancha es mayor que en la estrecha. Por tanto, cuando un fluido incrementa su velocidad sin variar de nivel, su presión disminuye.

Nomograma. Conjunto de líneas acotadas que sirven para resolver gráficamente una ecuación o hallar los valores de una fórmula.

Número de Reynolds. Número adimensional que se utiliza en la mecánica de fluidos para estudiar el movimiento de un fluido en el interior de una tubería o alrededor de un obstáculo sólido.

Relación polinómica. Aproximación de una sucesión de puntos a una línea de tendencia que tiene origen en funciones polinómicas.

Tecnología CNC (*computer numerical control*). Tecnología de conformado de piezas mediante el uso de un programa de computación al cual se le ingresan los parámetros necesarios que le permitan llevar a cabo dicha tarea en un torno, fresadora u otra herramienta de taller.

B. Unidades de Medición

- | | |
|------------------------------------|----------------------------------|
| 1. Distancia: | 5. Presión: |
| Metro: m | Kilopascal: KPa |
| Centímetro: cm | Libras por pulgada cuadrada: psi |
| Pulgada: in o " | 6. Velocidad: |
| Pie: ft o ' | Metro por segundo: m/s |
| 2. Tiempo: | Pie por segundo: ft/s |
| Segundo: s | Revoluciones por minuto: RPM |
| 3. Volumen: | 7. Par |
| Metro cúbico: m ³ | Newton metro: N-m |
| Centímetro cúbico: cm ³ | Libra pie: lb.-ft |
| Litro: L | Libra pulgada: lb.-in |
| Pulgadas cúbicas: in ³ | 8. Potencia |
| 4. Fuerza: | Kilowatt: KW |
| Newton: N | Caballo de fuerza: HP |

C. Marcas

Hélices:
APC propellers, Master Airscrew propellers

Equipo auxiliar: Hobbico

Motores:
OS Engines, Thunder Tiger Engines

