

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

**DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN DINAMÓMETRO
HIDRÁULICO PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA
CON UN A POTENCIA MENOR A 50 HP.**

Nelson Chávez

Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 28 de Junio del 2007

Universidad San Francisco de Quito
Colegio del Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN DE UN DINAMÓMETRO
HIDRÁULICO PARA MOTORES DE COMBUSTION INTERNA
CON UN A POTENCIA MENOR A 50 HP.**

Nelson Chávez

Laurent Sass, PhD.

Director de la Tesis

Juan Cajas, M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

Alberto Sánchez, PhD.

Miembro del Comité de Tesis

Fernando Romo, M.Sc.

Decano del Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, 28 de Junio del 2007

© Derechos de Autor
Nelson Eduardo Chávez Enríquez
2007

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a toda mi familia, la cual ha inculcado en mí desde corta edad la importancia de la educación en el desarrollo de una persona como profesional y como individuo. Especialmente a mi madre que fue un soporte incondicional en la consecución de esta meta y a mi padre que nunca dudó de mí y me apoyó durante todo el camino.

Agradecimientos

Agradezco al Ingeniero Laurent Sass por exigir el mejor esfuerzo durante todas las etapas de este proyecto, al Ingeniero Nelson Herrera por el conocimiento técnico brindado para desarrollar este proyecto, al Ingeniero Rudolf Koslich y Francisco Maila por el apoyo técnico.

Resumen

Este documento presenta el “Diseño y automatización de un dinamómetro hidráulico para motores de combustión interna con un a potencia menor a 50 HP.”, y tiene como finalidad automatizar un dinamómetro hidráulico manual para poder generar curvas de Potencia vs. Velocidad.

Contiene un análisis de los productos similares disponibles comercialmente, una reseña histórica del desarrollo de los dinamómetros. Continúa con un estudio básico de la teoría termodinámica que sustenta los cálculos de potencia utilizados basados en la Primera Ley de la Termodinámica. Se realizan diagramas funcionales del sistema antes y después de la automatización para clarificar el proceso.

Se presenta un estudio de los elementos necesarios para efectuar la automatización incluyendo el sensor de presión OMEGA PX4100, el tacómetro DC Servotek SA740-A, y el elemento electro mecánico para el control de la válvula restrictora. Además, se presenta el diseño del programa en LABVIEW que permite controlar los mecanismos del sistema, procesar las señales de los sensores y generar curvas de Potencia vs. Velocidad.

Posteriormente se exponer el acoplamiento del motor, los sensores y elementos de automatización al sistema manual. Finalmente se hacen pruebas para evaluar las prestaciones del dinamómetro mediante la comparación de diferentes curvas de Potencia vs. Velocidad obtenidas del mismo motor con diferentes configuraciones.

Abstract

This document presents the “Design and automatisation of a hydraulic dynamometer for engines rated below 50HP”. Its primary objective is the automatisation of a manual hydraulic dynamometer which will be able to generate Power vs. Velocity graphs useful to evaluate small combustion engines.

An analysis of similar commercial products offered in the actual market and the development of the dynamometers through history is presented, followed by a review of the theory which supports the calculations used, based on the First Law of Thermodynamics. There are functional diagrams drawn before and after automatisation to clarify the process.

An investigation of the elements necessary to carry out automatisation including the pressure transducer OMEGA PX4100, the Servotek SA 740-A DC Tachometer, and the electro mechanic controller for the restriction valve. Afterward, the LABVIEW design of the software that controls the mechanisms, acquires and processes the signals coming from the sensors is presented along with the user interface designed to present Power vs. Velocity graphs and actual values of velocity, pressure, and voltages.

Subsequently, the assembly process of the engine, sensors, and automatisation elements into the manual hydraulic dynamometer is shown. Finally, tests of the automatic dynamometer are described and the results obtained from a 125c.c two cycle engine are presented, showing examples of the benefits an automatic dynamometer can offer when a user attempts to evaluate and improve the performance of an engine.

A. Contenido

1. Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2. El Dinamómetro.....	3
1.3. Reseña Histórica.....	6
1.4. Tipos de Dinamómetro.....	8
1.5. Teoría de un dinamómetro hidráulico.....	13
1.6. Logros y Objetivos Alcanzados.....	18
2. Automatización del Dinamómetro.....	20
2.1. Descripción del prototipo.....	20
2.2. Diagrama mecánico del prototipo.....	21
2.3. Automatización.....	24
3. Implementación.....	34
3.1. Acoplamiento de motor.....	34
3.2. Acoplamiento de sensores.....	35
3.3. Implementación del software.....	41
4. Resultados.....	47
4.1. Prueba 1.....	48
4.2 Prueba 2.....	50
4.3. Prueba 3.....	52
4.4. Prueba 4.....	54
5. Conclusiones.....	57
6. Investigación posterior.....	60
7. Bibliografía.....	62
8. Anexos.....	64

B. Glosario

- **Bomba hidráulica:** Máquina o artefacto para dar impulso a un líquido en una dirección determinada. [1]
- **Db:** desplazamiento de la bomba
- δh : diferencial de entalpía
- δke : diferencial de energía cinética
- δp : diferencial de presión
- δpe : diferencial de energía potencial
- δq : diferencial de calor
- δs : diferencial de entropía
- δw : diferencial de trabajo
- **Entalpía:** Magnitud termodinámica de un cuerpo, igual a la suma de su energía interna más el producto de su volumen por la presión exterior. [1]
- **Entropía:** Magnitud termodinámica que mide la parte no utilizable de la energía contenida en un sistema. [1]
- ξ : Eficiencia general de la bomba
- **F:** flujo hidráulico en Galones por minuto (GPM)
- **Fs:** Flujo de salida de la bomba
- **GPM:** galones por minuto
- **HP:** Caballos de Potencia.
- \dot{m} : flujo másico
- **Momento de Inercia:** o inercia rotacional es una magnitud que da cuenta de cómo es la distribución de masas de un cuerpo o un sistema de partículas alrededor de uno de sus puntos. Este concepto, desempeña en el movimiento de rotación un papel análogo al de la masa inercial en el caso del movimiento rectilíneo y uniforme. [2]
- **Potencia:** Cantidad de energía producida o consumida por unidad de tiempo
- **P:** presión en libras por pie cuadrado (psi)
- **Pe:** Potencia de entrada a la bomba
- **Q:** caudal

- **RPM:** Revoluciones por Minuto.
- **T:** temperatura
- **Torque:** momento, magnitud resultante del producto de una fuerza por su distancia a un punto de referencia. [2]
- v : volumen específico
- **W:** trabajo
- **Win:** Trabajo entrada bomba

1. Introducción

1.1. Contexto

El dinamómetro es una herramienta de ingeniería que permite evaluar y optimizar el desempeño de motores de combustión interna. Comúnmente, la potencia es medida en unidades de caballos de fuerza (HP) y es un parámetro obtenido de dinamómetros utilizado para reflejar las prestaciones de un motor.

En la última década, el parque automotor ecuatoriano ha debido incrementarse descomunalmente para poder satisfacer las necesidades de transporte de los habitantes de las ciudades y las necesidades logísticas de las industrias. La mayoría de los vehículos que conforman este nuevo parque automotor, son impulsados por motores de combustión interna que utilizan combustibles fósiles como diesel o gasolina. Junto a este crecimiento del parque automotor, también se han generado avances tecnológicos importantes en el área del mantenimiento mecánico al aparecer talleres equipados con herramientas de última generación, como sistemas de lectura de autodiagnóstico y dinamómetros. Los dinamómetros son utilizados tanto por entidades universitarias como entidades comerciales envueltas en el campo del desarrollo de motores, el mantenimiento de motores y el deporte automotor.

Podemos encontrar por ejemplo a la empresa Importadora Agrícola Andina SA, que posee un dinamómetro para evaluar y medir la potencia de los motores luego de realizar reparaciones en su taller mecánico. Existe también el taller mecánico especializado Dr. Power, que utiliza un dinamómetro para demostrar

las nuevas prestaciones de motores de vehículos de línea, luego de someterlos a modificaciones o rediseños importantes como la colocación de un turbo. Por último está la Escuela Superior Politécnica del Ejército que utiliza dinamómetros para estudiar temas tales como la eficiencia térmica de diferentes tipos de motores.

A nivel internacional, los dinamómetros son utilizados en el campo de las competencias del deporte automotor como el automovilismo, el motociclismo o el kartismo. Como sabemos, en estos deportes el rendimiento de los motores es vital para el correcto desempeño de los participantes y por esta razón se necesita una herramienta que permita extraer la máxima cantidad de potencia posible de un motor. Hoy en día, un dinamómetro es útil para ajustar correctamente un motor de competencias, ahorrando a técnicos y pilotos cientos de horas de pruebas en pista, y por lo tanto reduciendo el presupuesto necesario para competir. En los motores de dos tiempos utilizados en las competencias de Kart y de motos por ejemplo, se invierten muchos recursos en encontrar la correcta puesta a punto de algunas variables como: los grados de encendido del motor, los grados de transferencia de admisión y escape, la relación de compresión, entre otras. Toda esta operación se realiza normalmente a base de pruebas en pista en largas horas de trabajo, sin embargo, la misma se podría llevar a cabo sobre un dinamómetro al conocer ciertas variables como la presión atmosférica, y el rango de velocidades del motor con sus respectivas frecuencias sobre una pista determinada.

Existe otra perspectiva importante en donde los dinamómetros son de gran aporte, y esta es la del cuidado al ambiente. En Quito, en el 2003 se comenzó una campaña de cuidado al medio ambiente, al generar un sistema de revisión vehicular que contemple los niveles de contaminación de un vehículo antes de emitirle una matrícula que le permita circular el país. “Este sistema tiene como objetivo primordial garantizar las condiciones de seguridad de los automóviles y todos los vehículos de transporte de pasajeros, obviamente, impulsados por motores de combustión interna, basados en los criterios de fabricación de los

mismos, además de comprobar que estos cumplen con la norma técnica de emisiones contaminantes” [3]

En esta campaña se utilizaron dinamómetros integrados a sistemas de control de emisión de gases, y se logró reducir los niveles de monóxido de carbón en el aire de Quito hasta los niveles deseados en el 2006. Los datos que se observan en la figura 1 son cifras del nivel de monóxido de carbón monitoreados en diferentes estaciones de control distribuidas en el norte, centro y sur de Quito por CORPAIRE en la cuarta semana del mes de Mayo del 2006. Los valores de esta tabla ubicados en el nivel 0-50 son considerados deseables, ya que no sugieren ningún tipo de precaución para las personas o animales habitantes de la zona debido a la condición óptima del aire.

CONTAMINANTE ? ESTACION ?	MONOXIDO DE CARBONO					
	BEL	CAM	CEN	COT	CAR	GUA
22 / 05 / 2006 LUNES	15		13	10	9	6
23 / 05 / 2006 MARTES		11	13	12		5
24 / 05 / 2006 MIERCOLES	16	13	14	12		8
25 / 05 / 2006 JUEVES	21	14	12	10	8	8
26 / 05 / 2006 VIERNES	19	13	11	10	8	6
27 / 05 / 2006 SABADO	15	13	11	12	8	5
28 / 05 / 2006 DOMINGO	12	13	11	10	8	7

Figura 1. Tabla de distribución de niveles de monóxido de carbón

El Ecuador es un país propicio para difundir el interés en los dinamómetros, ya que en su entorno existen varias particularidades que demandan la investigación de herramientas tecnológicas relacionadas con la evaluación y optimización de motores. Lo son por ejemplo, el enorme crecimiento del parque automotor, la urgencia por un ambiente limpio y maquinas eficientes que prolonguen la existencia de nuestros recursos naturales, la incursión en nuevas tecnologías que permitan fortalecer las instituciones educativas, y una aceptable actividad deportiva a nivel automovilístico, de motociclismo y de kart que estaría beneficiada por proyectos alrededor de los dinamómetros.

1.2. El Dinamómetro

Un dinamómetro es una herramienta mecánica que permite aplicar carga sobre un motor al proporcionarle un torque opuesto a su giro, simulando el escenario de la vida real en el que el motor debe entregar la potencia necesaria para impulsar un vehículo o producir el torque necesario para energizar una máquina.

Un dinamómetro trabaja bajo el principio de que cuando un motor mantiene un régimen constante de velocidad angular (Revoluciones por Minuto o RPM) ante un torque opuesto al giro de su cigüeñal aplicado por un dinamómetro, entonces el torque aplicado por el dinamómetro debe ser idéntico al torque producido por el motor en ese régimen. Si el torque aplicado por el dinamómetro para cagar el motor es conocido, entonces podemos conocer el torque entregado por el motor en un régimen de velocidad angular específico. De esta manera, al poder calcular potencia fácilmente a partir de torque y al disponer de un dinamómetro podemos medir la potencia entregada por el motor en sus distintos regímenes de velocidades angulares y así crear la curva de potencia característica del motor, que constituye una fuente de diagnostico confiable al evaluar rendimiento de un motor.



Figura 2. Dinamómetro de rodillos



Figura 3. Dinamómetro hidráulico

El principio fundamental de un dinamómetro se basa en su capacidad para cargar el giro del eje de potencia de un motor, que en el caso de un motor de

combustión interna es el eje del cigüeñal, y en el caso de un motor eléctrico es el eje del rotor. En la figura 2 se presenta un dinamómetro de chasis para kart conectado a un freno hidráulico diseñado para medir la potencia de motores directamente desde los neumáticos del kart, lo que acorta el tiempo de evaluación del motor ya que no es necesario desconectarlo del kart. Por otro lado, la figura 3 presenta un dinamómetro hidráulico diseñado para medir la potencia desde el cigüeñal del motor. Para esto, el motor debe ser separado de la maquina que impulsa, lo cual incrementa el tiempo necesario para realizar la evaluación, sin embargo, al medir la potencia directamente desde el cigüeñal se descartan las pérdidas de energía en elementos como rodamientos, neumáticos y reducciones mecánicas. El método con el cual el dinamómetro carga al motor, puede variar dependiendo tanto del diseño del sistema, como de las demandas del usuario en cuanto a la precisión y costo.

Los resultados que se obtienen de herramientas como los dinamómetros son tablas o gráficos fáciles de interpretar y que proporcionan información explícita de las prestaciones de un motor. En la Figura 4 se presenta un diagrama **Torque/Potencia VS. Velocidad** obtenido del motor de un vehículo Acura Integra modelo 1995 mediante un dinamómetro. En esta figura se aprecian 2 curvas de torque (Nm) en color opaco rojo y azul que se muestran en el rango entre 90-120ft-lbs. Se aprecian también, 2 curvas de potencia (hp) del motor comparadas con la velocidad angular medida en revoluciones por minuto (RPM) en el rango entre 60-150hp.

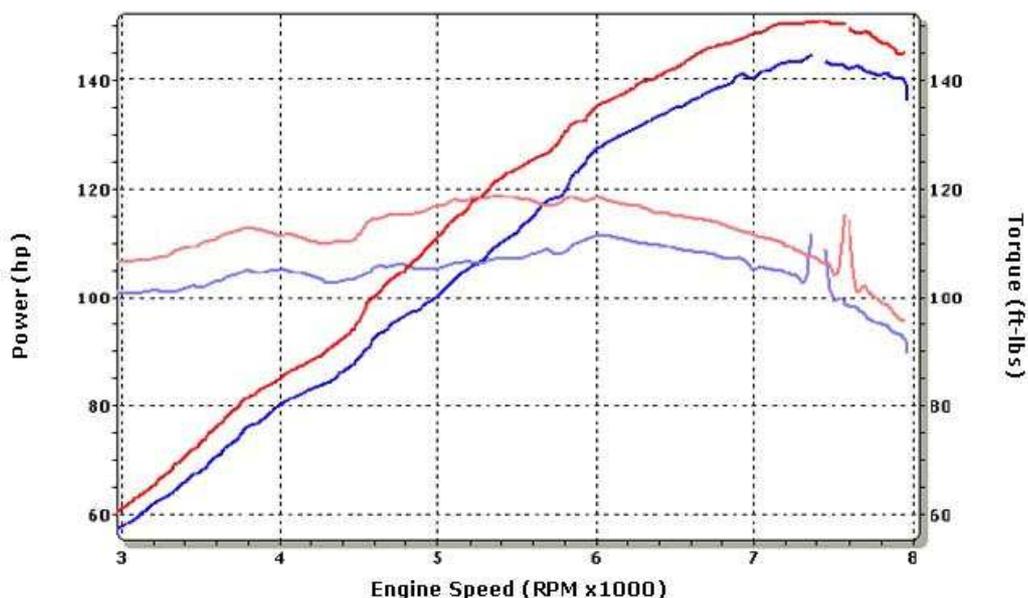


Figura 4. Gráfico de RPM vs. Potencia y RPM vs. Torque. [4]

Las líneas azules representan la evaluación del motor sin ninguna modificación y las líneas rojas representan la evaluación del motor después de una modificación al sistema de inyección del vehículo que no está descrita. Aquí se puede apreciar claramente como un dinamómetro puede dar un diagnostico claro del rendimiento de un motor de combustión.

1.3. Reseña Histórica

Gaspard de Prony inventó el primer dinamómetro conocido de la historia en 1821. Este instrumento permitía calcular el torque del motor o de un eje al montar una banda sobre el eje del motor y al medir la fuerza transferida a la banda por fricción. La fricción puede incrementarse al aumentar la tensión de la banda y de esta manera reduciendo la velocidad angular del eje del motor hasta el punto deseado.

El método más común para medir el torque era utilizar dos resortes en cada lado de la banda colocada alrededor del eje del motor, y aplicar una pretensión a la banda. Cuando el motor esta girando se puede medir un aumento de tensión en un resorte y una reducción de tensión en el otro. La diferencia en estas tensiones

puede ser considerada como un torque el conocer el diámetro del eje de salida del motor. [5]

En la figura 5 se presenta un dinamómetro que utiliza el Método de Prony obtenido del www.Physics.montana.edu, donde se aprecia claramente el resorte calibrado y la disposición de los elementos en un dinamómetro utilizando el Método de Prony.

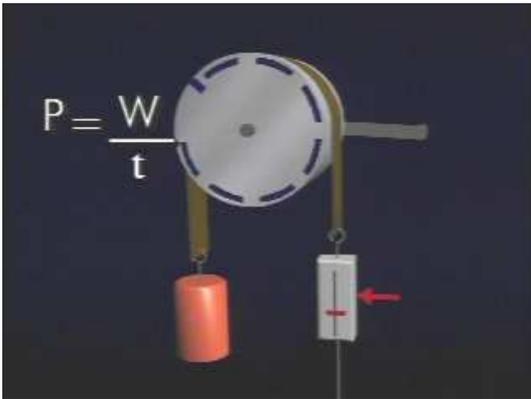


Figura 5. Dinamómetro Método de Prony



Figura 6. Dinamómetro de resorte

En 1877, William Froude inventó el primer dinamómetro hidráulico en Inglaterra y se cree que los primeros dinamómetros de venta al público fueron fabricados en 1881 por una empresa llamada Heenan & Froude.

El dinamómetro de Corriente Eddy fue inventado en 1931 por Martin y Anthony Winther, y aunque para esta época ya se habían utilizado los dinamómetros de generadores DC por varios años, este nuevo instrumento ganó popularidad rápidamente debido a sus generosas prestaciones.

En 1969, Heenan & Froude, la empresa fundada por William Froude, trabaja con Volkswagen aprovisionando a esta reconocida firma con instrumentos para la evaluación de sus motores, dando así inicio a la popularización de los dinamómetros en Europa.

En 1976, Consine Dynamics crea el primer Dinamómetro de chasis con Motor DC controlado digitalmente capaz de simular con eficiencia el desempeño en carretera de un motor.

En 1998, Froude Consine, la empresa que nació de la fusión de Heenan & Froude y Consine Dynamics, gana el premio de Certificación de Calidad Q1 entregado por Ford.

Hoy en día los dinamómetros son herramientas muy amistosas al usuario y con resultados rápidos y precisos, ahorrando gran cantidad de tiempo y recursos, entregando al campo del desarrollo de motores una herramienta con bondades incomparables, que se analizarán en este proyecto.

1.4. Tipos de Dinamómetro

Hoy en día existen varios tipos de dinamómetros para motores en el mercado mundial, sus prestaciones dependen de la tecnología que incluyen y de su precio en el mercado. Existen dinamómetros cuyas prestaciones son similares a las del modelo real que se ha construido en este proyecto, cuyo precio puede ascender a los USD 4000 como el dinamómetro hidráulico Dynamite diseñado y construido por Land & Sea Inc. cuya presentación se encuentra en el anexo 8.1 de este informe.

1.4.1. Dinamómetros mecánicos

Los primeros dinamómetros utilizados posteriores a la época de Prony, eran simplemente frenos similares a los de una camioneta antigua. Se instalaba un tambor rotatorio de acero en el eje del cigüeñal del motor; este tambor esta sujeto a fricción cuando roza contra zapatas de distintos materiales resistentes a la temperatura. Al aplicar presión sobre las zapatas en contra de las paredes del tambor rotante, se crea un torque en sentido opuesto a la rotación del motor que carga al eje del motor.

Para poder medir el torque, se colocan resortes calibrados de manera especial en ciertos puntos de la zapata que esta deteniendo al tambor rotatorio. La deformación de estos resortes muestra la carga de arrastre que están aplicando

las zapatas, y a partir de allí, se puede calcular el torque entregado por el eje del cigüeñal del motor. La desventaja de estos dinamómetros radica en la dificultad de regular la carga aplicada al cigüeñal y la inexactitud que se tiene al medir el torque generado por el motor; además, siempre se debe utilizar un sistema de refrigeración para mantener las zapatas a una temperatura adecuada en la cual su coeficiente de fricción es constante.

1.4.2. *Dinamómetros con Generador DC*

Los dinamómetros más utilizados por los ingenieros cuando disponen de un presupuesto alto, son aquellos que usan generadores eléctricos DC con un control computarizado de la excitación de su campo eléctrico para cargar los motores. La potencia del motor, es disipada en la armadura del generador que esta su vez conectada a disipadores de calor exteriores al generador. Si las velocidades angulares de trabajo del motor de prueba son bajas, el cigüeñal de este motor se pueden conectar directamente al eje del generador DC, pero si la velocidad angular excede las 6000 RPM, es necesaria la implementación de una reducción mecánica entre el motor y el generador para llevar la velocidad del generador a los rangos permitidos. [6]

El generador DC permite transformar la energía mecánica en el eje del motor de combustión en energía eléctrica en los devanados del generador y finalmente transferir esta energía a una resistencia donde es cuantificada en potencia. Asumiendo que no existen pérdidas de energía en el matrimonio mecánico entre el motor y el eje del generador, la potencia de un motor de prueba conectado a un dinamómetro con generador DC se puede calcular al conocer la magnitud de la corriente eléctrica generada por el generador DC utilizando la ecuación 1:

$$P = I^2 * R$$

Ecuación 1. Potencia disipada por corriente eléctrica circulando en una resistencia

Los motores de prueba que se utilizaron en este proyecto son motores de kart cuyos rangos de velocidad habituales están entre 3000 y 16000 RPM, por lo

tanto, en caso de utilizar un dinamómetro con generador DC para este proyecto sería necesaria la implementación de una reducción mecánica entre el eje del motor y el eje del generador que dependerá de las velocidades de trabajo recomendadas por el fabricante del generador DC.

La desventaja más importante de los dinamómetros con generadores DC es su precio, debido a que se necesita un generador adecuado, con la reducción correspondiente, el sistema de adquisición de datos y el software.

Los dinamómetros con generador DC no son eficientes cuando se requiere analizar motores bajo aceleraciones rápidas debido al gran momento de inercia polar del rotor de un generador. Cuando la masa del rotor del generador DC debe ser acelerada hasta una velocidad específica o a través de todo un rango de velocidades, existe un periodo de tiempo en el cual una cantidad considerable de potencia del motor de prueba no se refleja en las mediciones de corriente y por lo tanto no se refleja en los cálculos de potencia debido a que esta se utiliza en la aceleración del rotor. Así mismo, esta inercia polar concede al cálculo de la potencia algunas unidades más de las que realmente son entregadas por el motor, ya que la masa del rotor empuja al motor aun cuando este está en desaceleración. Aun cuando los dinamómetro con generador DC, permiten generar la curva de potencia de un motor, estos no son eficientes para analizar un motor a velocidad constante al necesitar grandes cantidades de tiempo para estabilizar la velocidad del motor en un punto deseado.

1.4.3. Dinamómetros con freno de Eddy.

Existe otro tipo de dinamómetro conocido como “Dinamómetro con corriente de Eddy”, que es muy similar en características de operación a aquellos con generadores DC. Como se observó antes, un dinamómetro con generador DC genera corriente a partir del giro de su rotor que es impulsado por el cigüeñal del motor de combustión. La diferencia que se encuentra en los dinamómetros de “Eddy” es que estos no producen corriente eléctrica a partir del giro del rotor, estos dinamómetros utilizan una fuente externa de poder que alimenta los

devanados alrededor del rotor y esto genera una fuerza electro motriz opuesta al giro del cigüeñal del motor en prueba cargándolo y reduciendo su velocidad. Es decir que un dinamómetro de Eddy, si puede frenar un motor y mantenerlo a velocidad constante. La magnitud de esta fuerza es proporcional a la corriente suministrada externamente por la fuente de poder. La potencia suministrada al dinamómetro de “Eddy” puede ser medida y a partir de esta información se puede calcular la potencia generada por el motor de combustión en prueba.

Si se conoce la potencia entregada por la fuente externa al dinamómetro para reducir la velocidad del motor de combustión hasta el punto deseado, se puede conocer la potencia del motor de combustión en esa velocidad específica, ya que estas dos potencias son iguales asumiendo que no existen pérdidas energéticas en el matrimonio mecánico entre el eje del cigüeñal del motor de combustión y el eje del rotor del dinamómetro, o en componentes mecánicos del dinamómetro como rodamientos o devanados.

La ventaja de los dinamómetros con corriente de Eddy es el rápido control que se puede obtener sobre la velocidad del motor de combustión debido al fácil control del potencial enviado al dinamómetro por la fuente externa, pero al igual que con los generadores DC, los costos de estas herramientas es muy elevado. Debido a que la potencia generada por el motor de combustión se transforma en calor y debe ser disipada en el rotor del dinamómetro, este rotor debe ser refrigerado con agua o aire circulando en su interior; de otra manera el rotor se derretirá. Esta necesidad le añade complejidad y valor a este tipo de dinamómetro, lo cual no es beneficioso en para este proyecto.

1.4.4. *Dinamómetros Hidráulicos*

Existen también dinamómetros que generan un torque opuesto al giro del motor de prueba mediante una bomba hidráulica de desplazamiento positivo, cuya descarga es regulada por una válvula graduable. Estos dinamómetros no tienen un momento de inercia polar alto mientras la bomba es pequeña, pero debido a que las bombas están limitadas a velocidades angulares bajas, casi siempre se

debe usar una reducción mecánica entre el eje del motor de combustión y el eje de la bomba hidráulica. Esta reducción aumenta la inercia de todas maneras por lo que se debe procurar que las reducciones sean lo más simples y pequeñas posibles cuando se decide utilizar un dinamómetro de freno hidráulico.

Un dinamómetro hidráulico es un sistema cerrado que permite cargar un motor al generar una fuerza motriz contraria al giro del eje del cigüeñal de un motor. Los dinamómetros hidráulicos utilizan bombas de desplazamiento positivo conectadas al eje del cigüeñal del motor mediante un matrimonio mecánico, los dinamómetros hidráulicos tienen válvulas que restringen el flujo hidráulico proveniente de la bomba para cargar el motor, estas válvulas pueden ser válvulas manuales o servo válvulas controladas por un voltaje análogo, que al poder ser controladas por software permiten automatizar el proceso de adquisición de datos.

Al restringir el flujo hidráulico se aplica carga sobre la bomba de piñones, generando un torque opuesto al giro del motor de combustión que permite reducir la velocidad del motor hasta la velocidad angular deseada que se mide en unidades de revoluciones por minuto o RPM. Cuando el motor de prueba trabaja a una velocidad determinada cargado por el dinamómetro hidráulico, se puede calcular la potencia que es entregada por el motor de combustión a la bomba hidráulica mediante cálculos matemáticos y obtener curvas de potencia.

En la mayoría de dinamómetros, la potencia generada por el motor de combustión se convierte en calor; en un dinamómetro hidráulico la potencia se traduce en el incremento de la temperatura del aceite circulando en el sistema, por lo cual se necesita un intercambiador de calor para enfriar el aceite. Este intercambiador puede usar agua como refrigerante para mantener la temperatura del aceite dentro de límites donde su viscosidad es la adecuada para los cálculos de la potencia.

Para este proyecto se utilizó un dinamómetro de freno hidráulico, debido a que los componentes necesarios para construir un prototipo son los más accesibles

en el mercado ecuatoriano. Además, se ha utilizado un motor de kart como motor de prueba y las prestaciones de este tipo de dinamómetro son adecuadas para el análisis de motores pequeños como los de kart.

1.5. Teoría de un dinamómetro hidráulico.

El dinamómetro hidráulico es un freno hidráulico que absorbe la energía del motor en el eje de la bomba conectada al cigüeñal. Finalmente, toda la energía disipada por el motor es convertida en calor que se transfiere al fluido hidráulico, a la bomba, a las mangueras de presión, y al reservorio. Ese calor es transferido del dinamómetro a sus alrededores por radiación pasiva y por el intercambiador de calor incorporado al sistema para enfriar el aceite.

Debido a que es muy difícil medir la transferencia de calor de un sistema hidráulico a sus alrededores con eficacia, se utiliza la velocidad angular del eje de la bomba y la presión del fluido hidráulico como parámetros de medida en lugar de potencia directamente. Para calcular la potencia del motor impulsando la bomba, se utilizó la ecuación 2 descrita aquí, que es muy utilizada en la industria de las bombas mecánicas de piñones que se basa en los conceptos básicos de la primera ley de la termodinámica como se ve más adelante:

$$Pe = \frac{F \times P}{1714}$$

Ecuación 2. Potencia de entrada a una bomba hidráulica

Donde, Pe es la potencia de entrada a la bomba, que en este caso sería la potencia del motor de prueba, F representa el flujo hidráulico generado por el giro de la bomba con unidades medidas en galones por minuto GPM, P representa la presión antes de la válvula restrictora medida en unidades de libras por pie cuadrado PSI.

Estas variables pueden ser medidas con sensores análogos, y al ser evaluadas permiten calcular la potencia entregada por el motor de prueba en velocidades específicas y obtener curvas de potencia en todo el rango de velocidades angulares deseado por el investigador.

La presión P se puede medir con un manómetro o un sensor análogo en la línea de presión antes de la válvula restrictora. El flujo F proveniente de la bomba, se puede calcular al conocer el desplazamiento cúbico por revolución representado por Db en la fórmula 3 y al medir la velocidad angular en revoluciones por minuto RPM con un sensor de velocidad angular instalado en el eje de la bomba, como se ve en la ecuación 3:

$$F = \frac{RPM \times Db}{\xi}$$

Ecuación 3. Flujo Bombas Hidráulicas. [7]

En esta fórmula, ξ representa la eficiencia general de la bomba hidráulica que es una magnitud adimensional obtenida de las tablas de especificaciones técnicas correspondientes a la bomba en uso.

En el anexo 8.2 se encuentran las especificaciones técnicas de la bomba hidráulica utilizada para este proyecto: PARKER P16 115 donde la eficiencia calculada a partir de los gráficos de rendimiento característicos de la bomba mediante la ecuación 4 fue de 0.765.

$$Eficiencia = \frac{F \times P}{1714 \times Pe}$$

Ecuación 4. Eficiencia general de bombas hidráulicas. [7]

Un dinamómetro hidráulico es considerado como un sistema cerrado debido a que existe una masa fija que es el volumen de aceite hidráulico, y ninguna masa puede atravesar las fronteras del sistema en ningún sentido, ya sea este de salida o de entrada. Lo único que puede cruzar las fronteras del sistema es energía en la forma de trabajo o calor. [8]

Se asume por el momento que la energía perdida en forma de calor en la bomba es despreciable comparada con el trabajo transferido desde el eje del motor de combustión al eje de la bomba. Por otro lado, la bomba tiene un eje rotante

cruzando sus fronteras, por lo que el trabajo transferido en el es muy importante, y es lo que se va a evaluar.

Para analizar el origen de la ecuación 2, se debe estudiar la Primera Ley de la Termodinámica que establece que el intercambio de energía de un sistema con sus alrededores debe ser transferencia de calor o trabajo. Aplicando el balance de energía para dispositivos de flujo constante que atraviesan un proceso internamente reversible, la Primera Ley de la Termodinámica puede ser expresada en forma diferenciales como se presenta en la ecuación 5:

$$\delta q - \delta w = dh + dke + dpe$$

Ecuación 5 Balance de energía para un dispositivo de flujo constante en proceso internamente reversible. [8]

Donde δq representa el diferencial de calor, δw el diferencial de trabajo, dh el diferencial de entalpía, dke el diferencial de energía cinética, y dpe representa el diferencial de energía potencial.

Se sabe que el cambio de calor δq puede ser expresado como la temperatura T a la cual se realiza el cambio de estado de un sistema por el cambio de entropía δs como se describe en la ecuación 6. Se conoce de la primera ley de la termodinámica que la temperatura T por el cambio de entropía δs es igual a cambio de entalpía dh menos el volumen específico v por el cambio de presión δP , al cual se realiza el proceso termodinámico. Esto se describe en la ecuación 7:

$$\delta q = Tds$$

Ecuación 6.

$$Tds = dh - vdP$$

Ecuación 7.

Al reemplazar la ecuación 6 en la ecuación 7 se tiene:

$$\therefore \delta q = dh - vdP$$

Ecuación 8.

Al sustituir la ecuación 8 en la ecuación 5 se obtiene:

$$-\delta w = vdP + dke + dpe$$

Ecuación 9.

Donde finalmente integrando se obtiene:

$$W = -\int_1^2 v dP - \overbrace{\Delta ke}^0 - \overbrace{\Delta pe}^0$$

Ecuación 10.

Se supone que el aceite hidráulico es un fluido incompresible; por lo tanto sabemos que su volumen específico v se mantendrá constante durante el proceso de compresión en la bomba por lo que podemos sacar este término del integral. Se asume que los cambios de energía potencial Δpe y cinética Δke son despreciables y tendrán un valor de cero, debido a que tanto la bomba, como las mangueras de presión están a la misma altura y a que la válvula restrictora no permitirá que el flujo después de la bomba tenga cambios de velocidad significativos.

El signo negativo del trabajo, proviene de la convención en la teoría de fluidos en la cual la energía entregada al sistema es negativa. Reescribiendo la fórmula como el trabajo entregado al dispositivo de flujo, que en nuestro caso es una bomba hidráulica de piñones, se podrá obviar este signo negativo.

Al integrar el término del trabajo W entregado a la bomba por el motor en la ecuación 10 se obtiene el siguiente término de signo positivo:

$$W = v(P_2 - P_1)$$

Ecuación 11. Trabajo de entrada a la bomba de desplazamiento positivo.

Se conoce que P_1 siempre será equivalente a la presión atmosférica, por lo que al utilizar sensores de presión diferencial se puede obviar el término. Al multiplicar $v(P)$ por el flujo másico \dot{m} que es una cantidad de masa por unidad de tiempo cuyas unidades más comunes son [Kg/s]:

$$\dot{m} = \frac{\text{masa}}{\text{tiempo}}$$

Ecuación 12. Flujo másico

Se obtiene un término que representa la potencia de entrada a la bomba hidráulica representada en la ecuación 13 con unidades en Kilovatios (KW), donde ya se ha tomado en cuenta la eficiencia general de la bomba representada por ξ :

$$Pe = \frac{\dot{m} \times v(P)}{\xi} [KW]$$

Ecuación 13. Potencia de entrada a la bomba hidráulica.

Al multiplicar al flujo másico \dot{m} por el volumen específico v se obtiene unidades de Flujo en $\frac{m^3}{s}$ como se puede ver:

$$\begin{aligned} \dot{m} \times v &\Rightarrow \left[\frac{kg}{s} \times \frac{m^3}{kg} \right] \Rightarrow \left[\frac{m^3}{s} \right] \\ \dot{m} \times v &\Rightarrow \left[\frac{m^3}{s} \right] \end{aligned}$$

Por lo que se podría reemplazar $\dot{m} \times v$ en la ecuación 13 por un Flujo como se presenta en la ecuación 14:

$$Pe = \frac{F \times (P)}{\xi} [KW]$$

Ecuación 14. Potencia de entrada a la bomba hidráulica.

Ahora se puede ver que las ecuaciones 2 y 14 son las prácticamente las mismas:

$$Pe = \frac{F \times (P)}{\xi} \approx Pe = \frac{F \times P}{1714 \times \xi}$$

La constante 1714 proviene de la conversión de las unidades de la ecuación 2 que son KW y las unidades en la ecuación 14 que son caballos de Fuerza HP.

Así se pretende explicar de mejor manera el origen de la fórmula para bombas expresada anteriormente en la ecuación 2 [8], pp.259

1.6. Logros y Objetivos Alcanzados

El objetivo principal de este proyecto es automatizar un dinamómetro hidráulico manual y construir un prototipo pequeño capaz de generar curvas de potencia automáticamente para motores con una potencia menor a 50 HP.

El dinamómetro del cual se origina este proyecto es una herramienta diseñada en los 80's que permite obtener curvas de potencia de un motor mediante un proceso manual y sistemático al medir diferentes variables como presión y velocidad angular en el rango de velocidades en el que se desea evaluar el motor, y posteriormente procesar estos datos para obtener medidas de potencia mediante tablas y aproximaciones como veremos en el capítulo 2.

Un dinamómetro hidráulico automático, que trabaje con una interfaz gráfica computarizada, es una herramienta de bajo costo que permite realizar un diagnóstico rápido y preciso de un motor en pocos minutos. Esta ventaja puede ser aprovechada por los usuarios que necesitan hacer evaluaciones repetitivas de un motor en desarrollo.

En el capítulo 2 se presentan las características técnicas del dinamómetro hidráulico manual que se tiene a disposición, además de un estudio completo de los sensores y actuadores que debemos acoplar a este sistema para poder adquirir los datos de manera automática. Adicionalmente, se encontrará el diseño mecánico del sistema de dinamómetro antes y después de la

automatización, en donde se verá de una forma clara la disposición de los elementos mecánicos, sensores, reducciones, y la forma en que estos interactúan.

En el capítulo 3 se encuentran los detalles de la implementación del prototipo, donde se analiza el acoplamiento de todos los sensores y actuadores al dinamómetro tanto en su sistema hidráulico como en el sistema mecánico. También se presenta una descripción completa del diseño del programa para adquirir, procesar los datos, y generar las curvas de potencia que buscamos.

En el capítulo 4 se tiene un análisis de resultados, donde se comparan los desempeños de un motor que fue sometido a diferentes tipos de puesta a punto en lo referente a relación de compresión, transferencia de admisión y escape, grados de encendido, y carburación. Se puede analizar el cambio en el comportamiento del motor al comparar sus curvas de potencia en distintas configuraciones.

En el capítulo 5 se encuentran las conclusiones de este proyecto y las recomendaciones que se pueden transmitir a futuros estudiantes o usuarios que decidan profundizar en el tema de los dinamómetros y buscarles usos más innovativos y beneficiosos. En este dinamómetro por ejemplo, otros usuarios pueden encontrar el origen de un sistema completo de análisis de motores, con el cual se podría evaluar la calidad del combustible, y las cualidades del motor para disminuir la contaminación del ambiente, mediante la adición de un analizador de gases y de oxígeno.

Este proyecto pretende investigar y crear tecnología que no ha sido explorada en nuestro país. Esto se hará con el soporte técnico y teórico del Área de Ingeniería Mecánica de la USFQ y será un trabajo de gran beneficio para todos aquellos interesados en este campo, ya que concederá una base para nuevas investigaciones y desarrollos en el terreno ambiental, de los dinamómetros, y del desarrollo de motores.

2. Automatización del Dinamómetro

2.1. Descripción del prototipo

El dinamómetro es un sistema hidráulico cerrado capaz de aplicar carga sobre motores pequeños a gasolina con propósitos de optimización y evaluación. El equipo a disposición tiene capacidad para cargar motores catalogados entre 3HP - 50HP dentro de los parámetros de la bomba.

Este dinamómetro carga al motor al proveer resistencia a la rotación del eje de su cigüeñal. La magnitud de esta resistencia depende de dos variables en general:

- La velocidad angular del eje del motor, que origina el flujo del aceite en el sistema hidráulico al impulsar una bomba de piñones mediante un matrimonio mecánico.
- La proporción de la restricción del flujo del fluido hidráulico en el sistema, que depende de la posición de una válvula restrictora de flujo ubicada en la descarga de la bomba hidráulica.

Al cerrar la válvula restrictora, el orificio por el cual el aceite debe fluir se reduce, restringiendo el flujo de aceite y por lo tanto deteniendo a la bomba de piñones.

Bajo condiciones normales, el flujo de aceite no puede ser restringido completamente, ya que existe un bypass permanente que siempre permite a un

mínimo flujo, atravesar la válvula restrictora. De hecho, esto es para prevenir una sobrecarga en el motor o el sistema.

En el Anexo 8.3 se encuentra el manual de operador del prototipo sin automatización: “Model 500 Dynamometer”

2.2. Diagrama mecánico del prototipo

La figura 7 presenta un diagrama funcional del dinamómetro con su sistema hidráulico y sus conexiones antes de hacer las adaptaciones para llevar a cabo la automatización. Este diagrama se basa en la norma de diagramación BS 2917-1:1993. ISO 1219-1:1991:

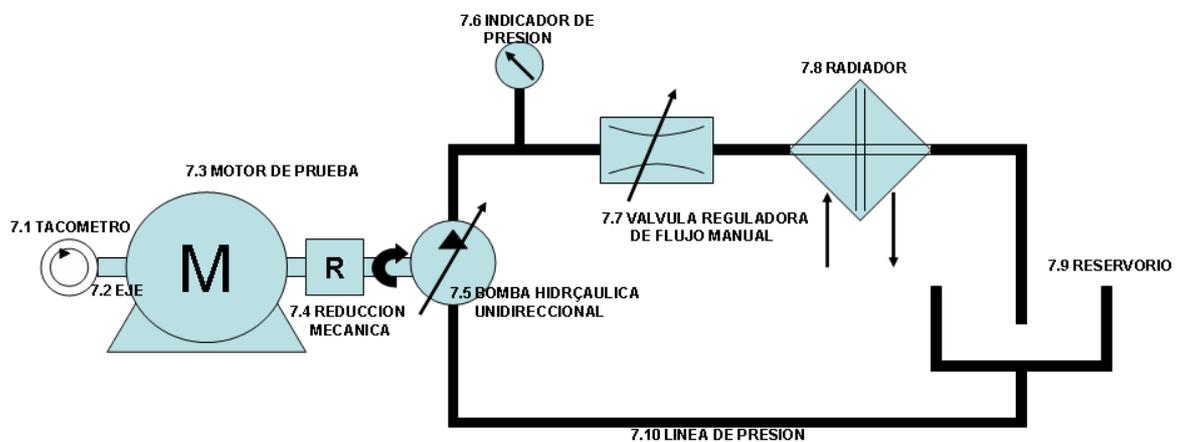


FIGURA 7: DIAGRAMA MECANICO BASADO EN EL STANDARD BS. 2917-1:1993 – ISO 1214-1:1991

En el Anexo 8.4 se encuentran los manuales de diagramación de circuitos hidráulicos obtenidos de www.roytech.co.uk.

Se puede apreciar los diferentes elementos que conforman un dinamómetro hidráulico en orden numérico:

- 7.1 Tacómetro análogo que se ubica en el eje del motor para conocer su velocidad en el momento de tomar una medida de presión.
- 7.2 Eje que une el motor al tacómetro y a la bomba mediante la reducción mecánica.
- 7.3 Motor de combustión interna a ser evaluado.
- 7.4 Reducción mecánica que permite que la bomba hidráulica trabaje en el régimen de velocidad angular recomendado.
- 7.5 Bomba Hidráulica Unidireccional que transforma la energía generada por el motor en energía hidráulica impulsando el aceite hidráulico.
- 7.6 Indicador de Presión que permite evaluar la presión del fluido hidráulico antes de la válvula restrictora.
- 7.7 Válvula reguladora de flujo que restringe el paso de aceite deteniendo el motor de combustión.
- 7.8 Intercambiador de calor enfría el aceite hidráulico permitiéndole mantener su viscosidad promedio constante.
- 7.9 Reservorio donde se almacena el aceite que sale del sistema e ingresa nuevamente a la bomba cerrando el ciclo.
- 7.10 Líneas de alta y baja presión que transportan el aceite a través de los elementos del dinamómetro.

Todos estos elementos conforman el Dinamómetro Manual, y permiten medir las variables necesarias para resolver la ecuación 2:

$$Pe = \frac{F \times P}{1714}$$

Donde, como se dijo anteriormente, la presión P se puede evaluar con el indicador de presión 7.6. y el Flujo hidráulico F se puede calcular con la ecuación 3, conociendo los valores de $Db = 0.0097$ Galones/revolución y $\zeta \cong 0.765$:

$$F = \frac{RPM \times Db}{\zeta}$$

Reemplazando los datos de velocidad angular con unidades en RPM tomados del sensor de velocidad angular 7.1.

Para generar una curva de potencia con el dinamómetro manual se debe seguir un procedimiento:

1. Abrir completamente válvula restrictora (sentido anti horario). Esto configura al dinamómetro para carga mínima al motor.
2. Encender el motor dejándolo trabajar a velocidad baja. Después de una rápida inspección visual para verificar la alineación de la cadena, lentamente cerrar la válvula restrictora (sentido horario), cargando el motor hasta que la velocidad del motor empiece a reducirse.
3. Para iniciar las mediciones, se debe acelerar el motor al máximo, y se debe reducir la velocidad del motor hasta el punto deseado y tomar la primera medición de Velocidad y Presión.
4. Para variar la velocidad del motor, se debe cerrar o abrir la válvula restrictora incrementando o reduciendo la carga sobre el motor. Cuando se alcanza la segunda velocidad deseada se anota la medida de presión junto a su respectiva medida de velocidad en RPM.
5. Se realiza los pasos 1,2 y 3 sucesivamente para obtener un conjunto de datos que detallen la presión y la velocidad en todo el rango de trabajo del motor.
6. Se procesan los datos mediante la ecuación 2 para obtener una curva RPM vs. Potencia, y obtener una base de datos para empezar a hacer cambios de configuración al motor y comparar su desempeño.

En la figura 6 se presenta un ejemplo de los datos obtenidos manualmente de un motor CRG en Julio del 2006, estos datos fueron procesados en una hoja de cálculo electrónica para poder obtener una curva de potencia en un tiempo aproximado de 3 horas:

RPM	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000	14000	15000	16000	17000
PSI	1400	1500	1600	1650	1800	2210	2250	2000	1800	1550	1350	1200	950
HP	3.8	4.89	6.09	7.17	8.81	12.01	13.46	13.05	12.72	11.8	11.01	10.48	8.78

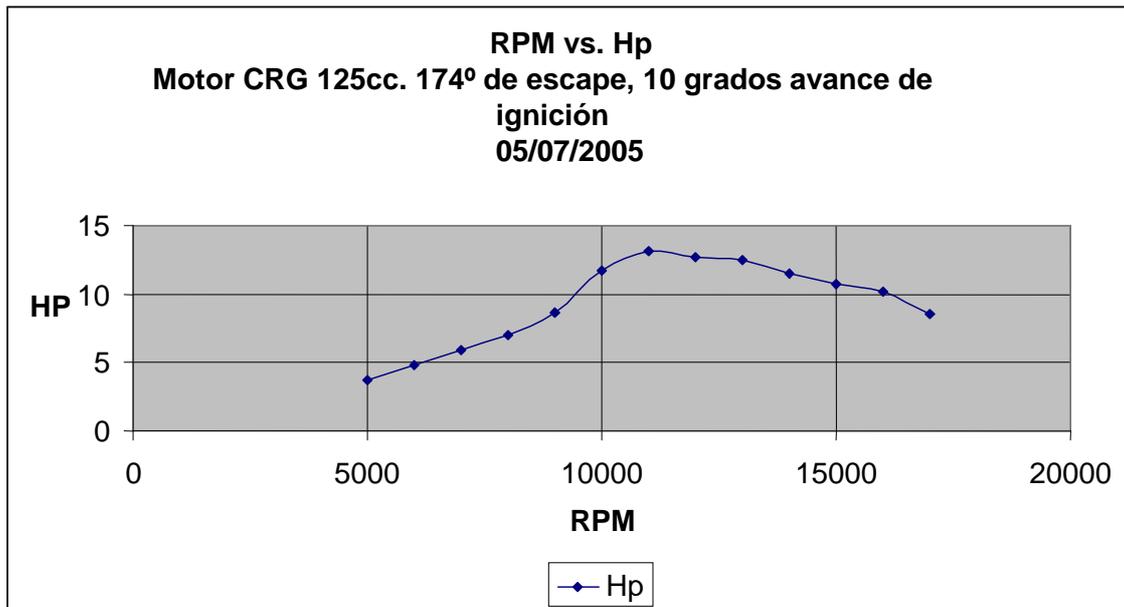


Figura 8 Gráfico de Potencia de un Motor CRG 125cc

2.3. Automatización

Para llevar a cabo la automatización del dinamómetro, se debe añadir al sistema descrito en la figura 7 un circuito electrónico cuyo fin es el de adquirir datos de presión y velocidad, además de controlar de la válvula restrictora y generar de resultados en forma de curvas de potencia. Esta red electrónica y mecánica esta compuesta de un sensor transductor de presión, un tacómetro DC, y un sistema de control de la válvula restrictora 5.7. Estos sensores están conectados a una tarjeta de adquisición de datos que transfiere las señales de voltaje provenientes de los sensores hacia el programa diseñado específicamente para este proyecto donde estas señales son procesadas para generar las curvas de potencia deseadas. Este mismo programa se encarga de generar dos señales de voltaje que controlan la apertura o cierre de la válvula restrictora como se indicará posteriormente.

2.3.1. Investigación y selección de sensores y actuadores

El primer paso en la realización de este proyecto fue escoger los sensores y el tipo de válvula necesarios para realizar la automatización del sistema:

- Se necesita un transductor de presión cuyo rango de operación seguro esté entre 0 psi – 3000 psi. Esto se dedujo a partir de las especificaciones y rangos de trabajo de la bomba hidráulica PARKER P16-115 y de las pruebas realizadas en el dinamómetro de forma manual cuyos resultados se presentan en la figura 8 donde la presión máxima alcanzada no superó los 3000psi.
- Se necesita un tacómetro que permita medir la velocidad angular de la bomba en RPM, para así poder conocer el flujo hidráulico que se genera en la bomba en sus diferentes regimenes de velocidad.
- Se necesita un motor eléctrico para controlar la apertura y cierre de la válvula restrictora 7.7 y de esta manera cargar y descargar el motor hasta las velocidades deseadas.
- Se necesita un programa capaz de recibir las señales de los sensores descritos, controlar la válvula restrictora, y procesar los datos para presentar resultados en forma de curvas de Potencia vs. Velocidad.
- Finalmente es necesario escoger una tarjeta de adquisición de datos DAQ que tenga por lo menos 2 canales en entrada para la presión y la velocidad angular y 2 canales de salida para el control de la válvula restrictora.

2.3.2. Transductor de presión

Un transductor de presión es un sensor que convierte presión hidráulica en una señal eléctrica analógica de voltaje o corriente. La conversión de presión en una señal eléctrica se logra mediante la deformación de galgas extensiométricas adheridas a un diafragma y conectadas a un Puente de Wheatstone en el interior del sensor. Al aplicar presión sobre el sensor mediante el fluido, el diafragma se deforma introduciendo una deformación en las galgas adheridas a él. Al deformarse, las galgas producirán un cambio de su resistencia eléctrica que es proporcional a la presión sobre el diafragma.

Existen tres clases de transductores de presión que son mas comúnmente encontrados en el mercado: los que entregan una señal de salida en milivoltios,

los de salida en voltios con un rango de 0v-10v, y los de salida de corriente con un rango de 4 mA-20 mA. Los transductores de salida en milivoltios son los más económicos del mercado, su rango de señal está 0mV - 20mV, y se recomiendan para usos que proponen fuentes de poder reguladas. Su señal es directamente proporcional a la presión a la que están sujetos lo cual facilita su uso. No se recomienda su uso en ambientes con ruido eléctrico, y se los debe mantener relativamente cerca de la adquisición de la señal debido a su baja señal. Los transductores de salida en voltios, funcionan bajo el mismo principio físico, pero tienen amplificadores integrados que acondicionan la señal para que el sensor entregue un voltaje entre 0v-10v. Estos sensores, normalmente no entregan una señal directamente proporcional a su excitación, lo que quiere decir que una fuente de poder no regulada es suficiente. La aplicación de estos sensores es industrial, debido a que estos soportan mucho más ruido y lejanía de la adquisición de la señal. Por último, están los transductores con señal de corriente entre 4 mA y 20 mA o también conocidos como transmisores de presión, debido a que son los menos afectados por el ruido y son capaces de transmitir la señal a largas distancias.

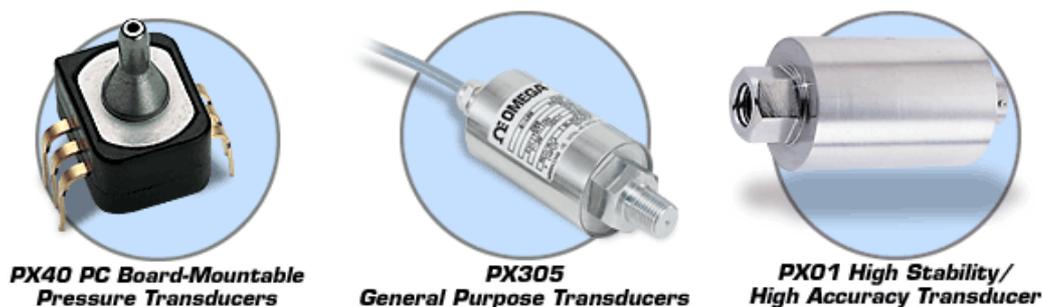


Figura 9 Transductores de presión. [9]

Para este proyecto se ha utilizado el transductor “OMEGA PX4100-3KGB” con un rango de presión admisible entre 0-3000psi y una salida de voltaje análoga entre 0-20mV con una exactitud del 0.25%. Este sensor es ideal para este proyecto debido a su bajo costo de USD 95.00, altas prestaciones, y además se debe recalcar que el ambiente de trabajo del dinamómetro es de bajo ruido

eléctrico. La salida de voltaje del sensor PX4100 se encuentra representada con la figura 8 para clarificar lo expuesto:

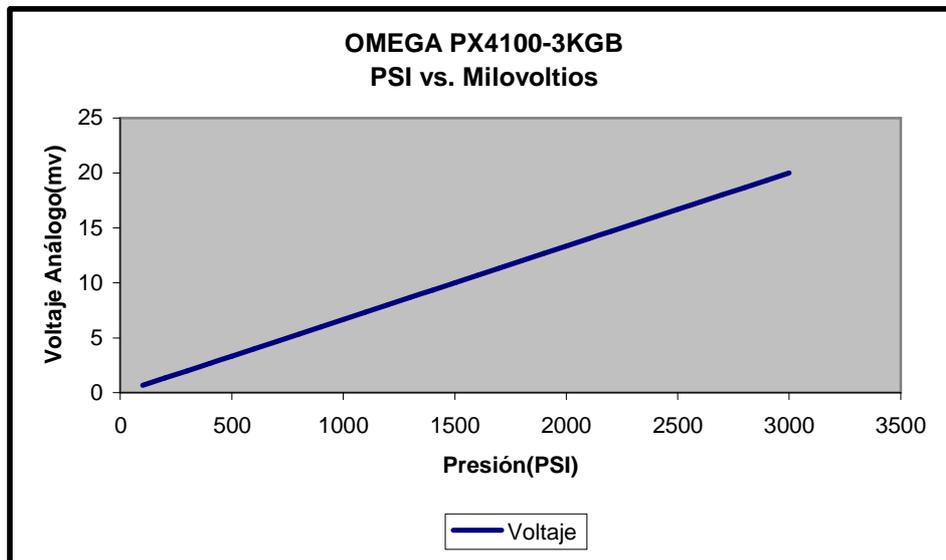


Figura 10 Señal sensor OMEGA PX4100-3KGB

El Anexo 8.5 presenta la tabla de características técnicas del transductor de presión OMEGA PX4100-3KGB utilizado.

2.3.3. Tacómetro DC

Los tacómetros son utilizados para medir la velocidad angular de un objeto en rotación. Actualmente los tacómetros, operan bajo el principio de que un motor DC utilizado como generador produce un voltaje que es proporcional a la velocidad angular del eje del motor. La constante de proporcionalidad, K, es un valor característico del motor que es usado para traducir el movimiento mecánico en un voltaje y tiene típicamente valores entre 1 y 30volts/1000RPM [10]



Figura 11 Tacómetros DC disponibles en el mercado. [5]

Las configuraciones más comunes para los tacómetros son: de mano, portátiles, fijos, o modulares. Aquellos de mano son diseñados específicamente para ser usados mientras se sostienen en la mano. Los portátiles, tienen medios de transporte fácil y no necesariamente deben ser sostenidos en la mano. Los fijos son utilizados en un lugar específico como en paneles, adjuntos a ejes de motores estacionarios con matrimonios mecánicos, etc. Existen también los tacómetros modulares que pueden ser utilizados en diferentes rangos de velocidad, y tienen diferentes escalas de medición dependiendo de la aplicación. Los tacómetros también pueden depender de baterías para su correcto funcionamiento.

Los dos parámetros más importantes a ser considerados cuando se trata de escoger un tacómetro son: su rango de velocidad de operación y su exactitud. El rango de velocidad es aquel rango de velocidades angulares que el sensor es capaz de monitorear y normalmente es expresado en unidades de RPM. La exactitud indica un rango de error admitido para el tacómetro.

La tecnología utilizada en tacómetros puede ser de contacto, en la que el sensor entra en contacto con la parte en rotación. Puede también ser una tecnología fotoeléctrica, en la que rayos de luz, visible o infrarroja, son utilizados para medir la velocidad. Existen también instrumentos inductivos, que utilizan elementos magnéticos para inducir campos magnéticos cuya frecuencia es utilizada para medir la velocidad. Existen tacómetros de Efecto Hall, también utilizados para medir velocidad angular.

Como en los transductores de presión, las salidas de los tacómetros DC incluyen señales de voltaje análogo, corriente, y frecuencia modulada.

El tacómetro que se ha elegido para este proyecto es el “SERVOTEK SA-740A-7 D.C.” que es un tacómetro DC que entrega 2.6 V/1000 RPM y cuyas características técnicas se presentan en el Anexo 8.6.

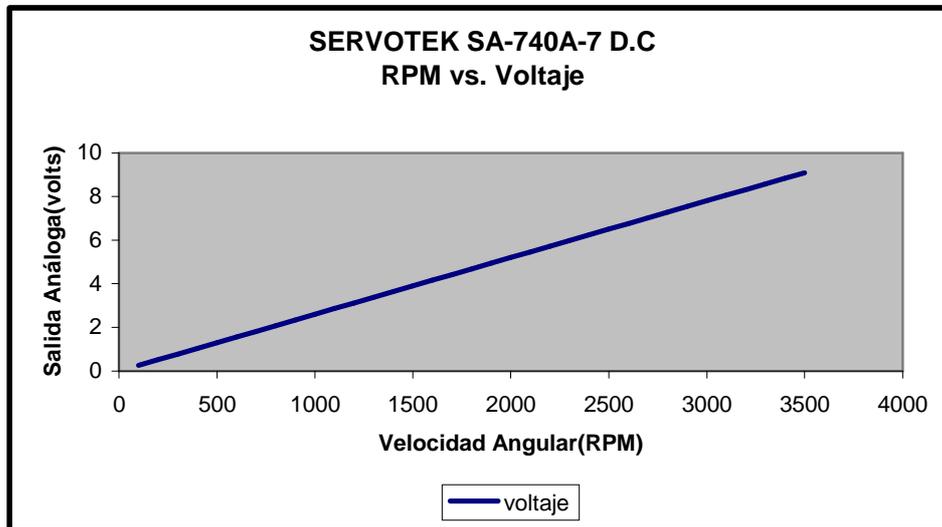


Figura 12 Gráfico de Señal SERVOTEK SA-740A-7 D.C. 2.6 voltios/1000 RPM

El gráfico de la figura 12 muestra una curva generada en EXCEL para ejemplificar la fácil interpretación que se le pueden dar a los datos obtenidos de un sensor que entregue una señal lineal proporcional a la magnitud medida.

Se escogió este tacómetro debido a su costo (USD 240.00), debido a que entrega una señal proporcional en voltios, y a que debido a su rango de señal entre 0v-10v lo cual es muy manejable por la tarjeta de adquisición de datos.

2.3.4. Control de Válvula Restrictora

Como se puede ver en la figura 7, en el dinamómetro se utiliza la válvula manual 7.7 para restringir el flujo hidráulico proveniente de la bomba. Para este fin, bien se podría utilizar un electro-válvula proporcional controlada por un voltaje análogo que podría ser generado por programación. Esta opción permitiría regular el flujo de fluido hidráulico a la salida de la bomba con mucha exactitud, pero los costos de este tipo de válvula son muy elevados. La segunda opción, y en este caso la más conveniente, es utilizar la misma válvula

restringidora de precisión 7.7, y controlar su apertura o cierre, al hacer un matrimonio mecánico entre el mando de la válvula y un motor eléctrico con reducción mecánica que sea capaz de ejercer el torque necesario para abrir o cerrar la válvula. Una vez acoplado el motor a la válvula restrictora, el sistema será capaz de controlar automáticamente la apertura o cierre de la válvula dependiendo de sus necesidades.

Los motores DC con reducción son muy utilizados en la actualidad, y proveen al usuario de una fuente de torque prudente para sus trabajos específicos. Sus rangos de torque varían entre las 0.5 y las 100lb.pie y sus velocidades de trabajo varían en un rango de 15 a 100 RPM. **[10]**

La DAQ 6014 que se utiliza en este proyecto maneja una corriente máxima de 10mA mientras que el motor eléctrico que se ha seleccionado consume una corriente máxima de 2A; por esto, fue necesario diseñar un circuito de Potencia para alimentar el motor eléctrico y controlar su sentido de giro.

En la figura 13 se presenta un diagrama básico que ilustra como un puente H controla el sentido de giro de un motor DC:

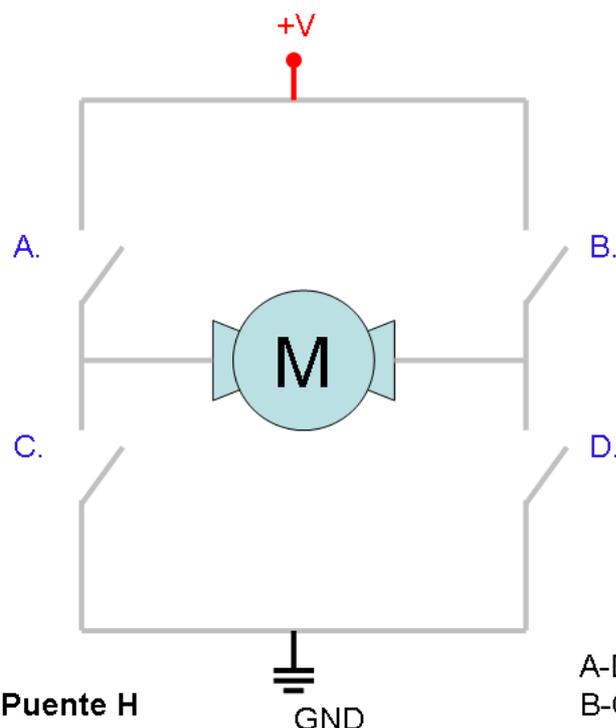


Figura 13
Diagrama Básico Puente H

A-D Giro Horario
B-C Giro Anti Horario

Como se puede ver en la figura 13, si se activan los contactos A y D el motor se alimentará con un voltaje mayor a 0 (+V) y girará en sentido horario y si se activan los contactos B y C el motor se alimentará con un voltaje menor a 0 (-V) y girará en sentido anti horario. Con este sistema de control podemos abrir y cerrar la válvula restrictora y al mismo tiempo llevar el motor a prueba por todo su rango de velocidad angular entre 4000RPM y 16000RPM al descargar el motor paulatinamente abriendo la válvula restrictora y liberando el flujo hidráulico proveniente de la bomba de piñones.

Para poder controlar el sentido de rotación de este motor mediante programación, un algoritmo específico fue diseñado que envía 2 señales de voltaje hasta el circuito de potencia, cada una de estas señales activa un sentido de rotación correspondiente como se estudiará en el capítulo 3.

En el Anexo 8.7.1 se encuentra el diseño electrónico del circuito de potencia y puente H utilizado para este proyecto.

2.3.5. Software

El software necesario para automatizar el sistema de la figura 7 debe cumplir con 4 características específicas que le permitirán cumplir su función:

- Debe ser capaz de recibir las señales de los 2 sensores de Presión y velocidad angular correspondientes.
- Debe ser capaz de controlar la válvula restrictora mediante 2 señales de voltaje que controlan el sentido de giro del motor eléctrico mediante el circuito de potencia.
- Debe ser capaz de procesar los datos de los sensores y generar una curva de Potencia vs. Velocidad.
- Debe tener una interfaz gráfica que le permita al usuario leer constantemente los voltajes de los diferentes sensores, decidir cuando comenzar una nueva prueba para evaluar un motor de combustión, y

revisar la curva de potencia vs. Velocidad generada en la prueba respectiva.

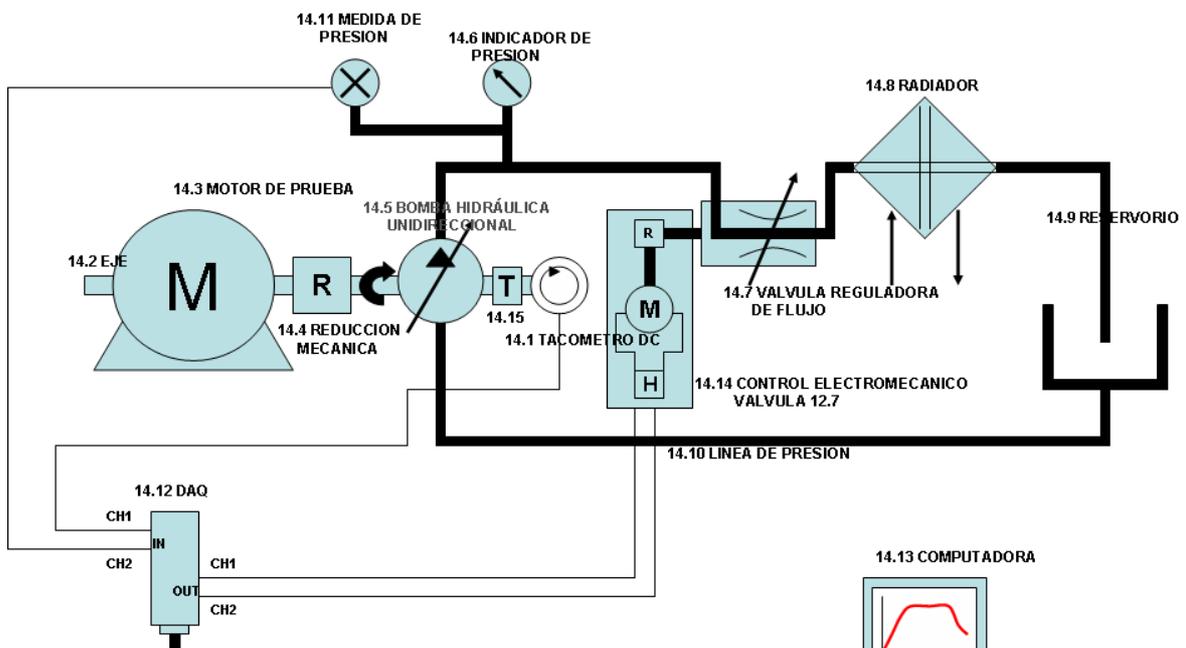
La implementación de este software se describe con mayor detalle en el capítulo 3.5.

2.3.6. DAQ Sistema de adquisición de datos

La tarjeta de adquisición de datos que se utilizó es una National Instruments 6014, que tiene 8 entradas análogas, 8 entradas digitales, 2 salidas análogas, y una salida de reloj. La capacidad de esta tarjeta para recibir o generar señales es de 0-10 voltios con una corriente máxima de 10mA. Esta tarjeta está disponible en la USFQ y fue escogida ya que sus características de operación son compatibles con el programa que se utilizó y satisfacen las necesidades de adquisición de datos para los sensores y servo válvulas elegidas para la automatización.

2.3.7. Dinamómetro Automático

En la figura 14 se presenta un diagrama mecánico del sistema de dinamómetro donde se incluyen todos los elementos necesarios para llevar a cabo la automatización analizados en 2.3.1. Aquí se puede ver la disposición de la red electrónica necesaria para esta implementación y como los sensores y actuadores se acoplan al sistema descrito en la figura 7. Este diagrama esta basado en la norma de diagramación BS 2917-1:1993. ISO 1219-1:1991.



En esta figura, se pueden examinar los nuevos elementos que han sido añadidos al sistema:

14.1 Reemplazó a 7.1 y representa al tacómetro DC conectado al eje de la bomba hidráulica que permitirá calcular el caudal de la bomba en un instante determinado.

14.11 Es el transductor de presión instalado en paralelo al indicador de presión 14.6 que permitirá medir la presión en PSI antes de la válvula restrictora.

14.12 Es la DAQ tarjeta de adquisición de datos National Instruments 6014 que recibirá los voltajes de los sensores 14.1 y 14.11 en sus entradas análogas AIN1 y AIN2 y controlara el dispositivo 14.14 para regular el flujo hidráulico del sistema.

14.13 Es el computador donde trabaja el software diseñado y se procesan los datos para presentar los resultados en la interfaz gráfica.

14.14 Es el control electromecánico de la válvula 14.7 donde se incluye el puente H, el motor DC y la reducción mecánica detallada en 2.3.4.

14.15 Elemento transmisor de giro desde el eje de la bomba hacia eje del tacómetro DC 14.1

Con el diagrama 14 se obtiene una clara idea de la disposición de todos los elementos del dinamómetro automático.

La implementación física del prototipo se estudia en el capítulo siguiente.

3. Implementación

3.1. Acoplamiento de motor

El motor de prueba 14.3 se debe acoplar al dinamómetro mediante un sistema de aseguramiento que brinde facilidades para su montaje y desmontaje, y que además minimice la transmisión de vibración desde el motor al el resto de elementos del dinamómetro.

En la figura 15 se puede apreciar la estructura cuadrada hecha de acero estructural 15.4 donde se ensamblan tanto el motor de prueba 14.4 como la bomba hidráulica 14.5. Existen 2 tubos de 30mm de diámetro 15.2, donde asienta la base del motor hecha de aluminio 15.3; esta base se desliza sobre los tubos de 30mm mediante medias lunas para permitir regular la tensión de la cadena que une al piñón del motor con el piñón del eje de la bomba. Cuando se ha alcanzado la regulación de la cadena deseada, se ajusta la base de aluminio mediante abrazaderas 15.1 desde la parte inferior de la estructura de acero.

La estructura 15.4 se ensambla al resto del dinamómetro mediante elementos anti-vibratorios 15.5 que permiten reducir las vibraciones eficientemente.

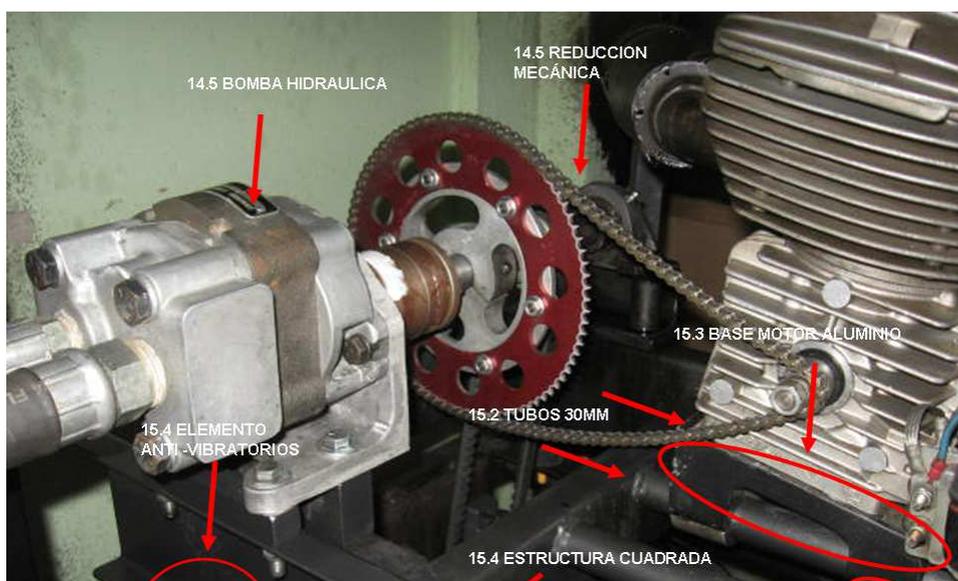


Figura 15 Imagen los elementos 15.1 15.2 15.3 15.4 15.5 que se utilizaron para acoplar el motor de prueba 14.3 al dinamómetro.

3.2. Acoplamiento de sensores

Para realizar la implementación del prototipo, se acoplaron mecánicamente y electrónicamente los elementos 14.1, 14.11, 14.12, 14.13, 14.14 expuestos en la figura 14.



Figura 16 Imagen los elementos 14.1 14.11 14.12 14.14 que se utilizaron para la implementación de la red electrónica de la automatización.

Cada uno de estos elementos fue acoplado al sistema tomando en cuenta sus necesidades específicas de trabajo y capacidades por lo que se realizó una operación especial en cada caso.

3.2.1. Acoplamiento sensor de presión

El acoplamiento del sensor de presión se debe hacer de tal manera que este pueda medir la presión generada por el aceite en válvula restrictora. Para hacer esto, se debe conectar el sensor de presión 14.11 en paralelo con el manómetro de presión manual 14.6.

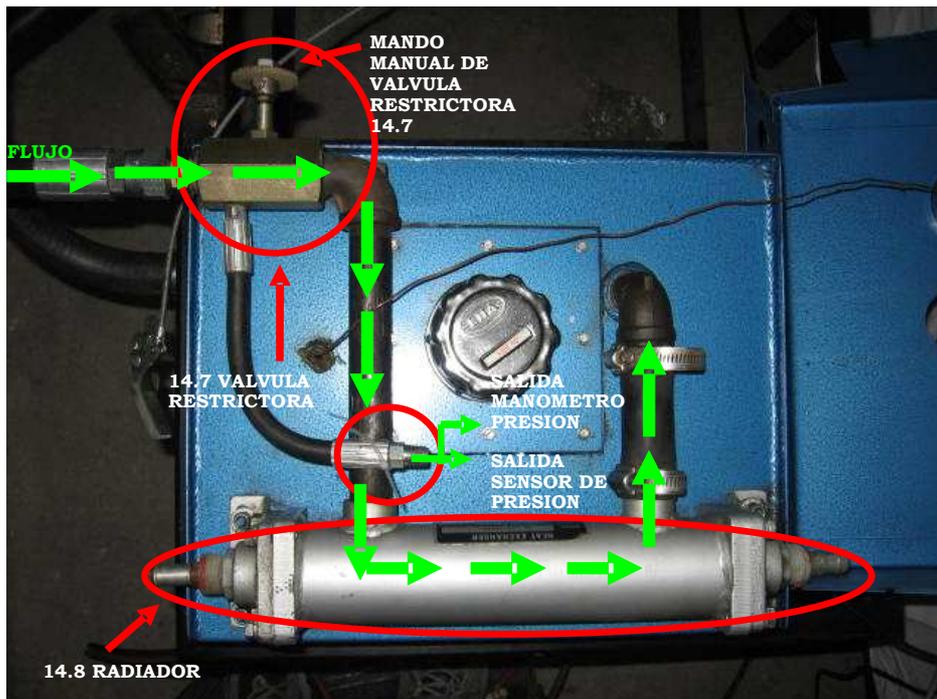


Figura 17 Imagen del sistema hidráulico del dinamómetro.

En la figura 17 en verde esta delineado el sentido del flujo hidráulico proveniente de la bomba 14.5 que pasa por la válvula restrictora 14.7, luego por el radiador 14.8 y se deposita en el reservorio 14.9 donde será absorbido nuevamente por la bomba para repetir el ciclo. Además se puede distinguir la válvula restrictora 14.7 con su mando manual acoplado a un piñón plástico de 78 dientes, también se aprecia la salida de presión antes de la válvula en donde serán conectados el sensor de presión 14.11 y el manómetro 14.6

En la figura 18 se ve como queda acoplado el sensor 14.11 a la estructura del dinamómetro después de haberse realizado las conexiones hidráulicas correspondientes. El sensor de presión en esta figura esta listo para ser conectado a la DAQ mediante un cable blindado que evitará las distorsiones de

la señal. La lectura de presión observada en la interfaz gráfica del programa, después de procesar la señal del transductor de presión fue verificada con un manómetro de dial calibrado conectado en paralelo con el transductor.

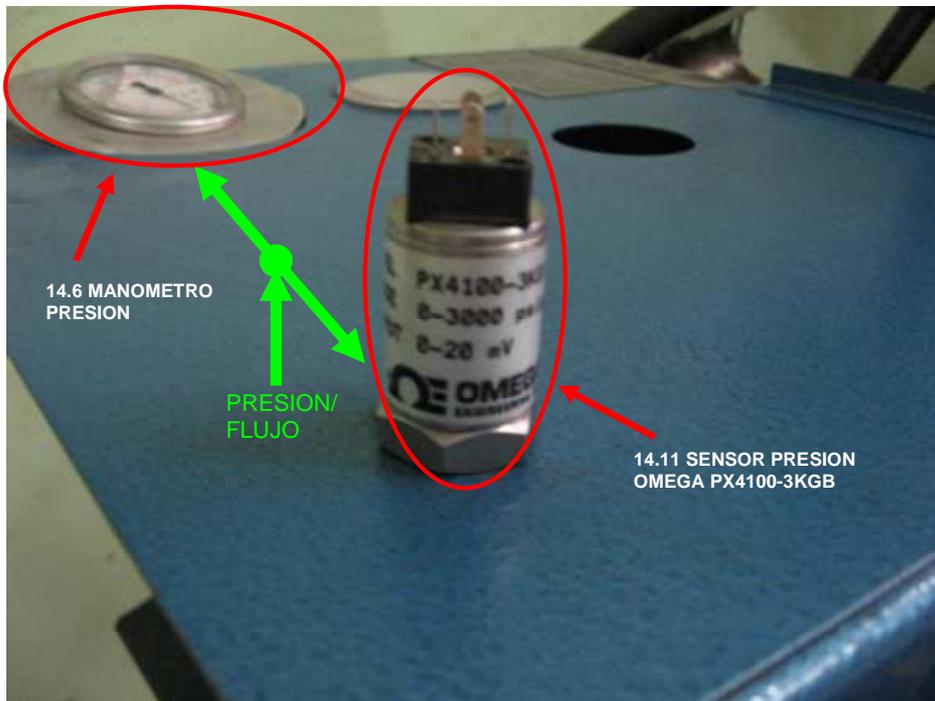


Figura 18 Imagen del sensor de presión 14.11 acoplado al dinamómetro en paralelo al manómetro de presión.

3.2.2. Acoplamiento de Tacómetro DC

Para el acoplamiento del tacómetro SERVOTEK SA-740A-7 D.C. se tuvo que realizar una adaptación mecánica especial que consistió en transmitir sin reducción el giro desde el eje de la bomba mediante una banda de goma hasta un eje alterno donde estará ubicado el sensor. Esto se hizo debido a la falta de espacio que existe alrededor del eje de la bomba por la ubicación del motor y de la reducción mecánica que existe entre el eje del motor y el eje de la bomba. En las figura 19 tenemos una imagen del tacómetro DC 14.1 acoplado al dinamómetro mediante un elemento que transmite el giro del eje de la bomba hasta un eje alterno mediante una banda de goma. El tacómetro se conecta al eje alterno.

La reducción final que existe entre el eje del motor y el eje de la bomba es de 13:1 que se obtuvo al medir la velocidad del eje del motor y la velocidad del eje de la bomba simultáneamente con sensores de velocidad angular. La

lectura de velocidad angular del motor que se observa en la interfaz grafica del programa después de procesar la señal del tacómetro DC fue verificada al conectar un tacómetro de pulsos directamente a la bujía del motor.

En la figura 20 se puede ver la imagen del tacómetro DC 14.1 acoplado al eje alterno que es impulsado por la banda de goma.

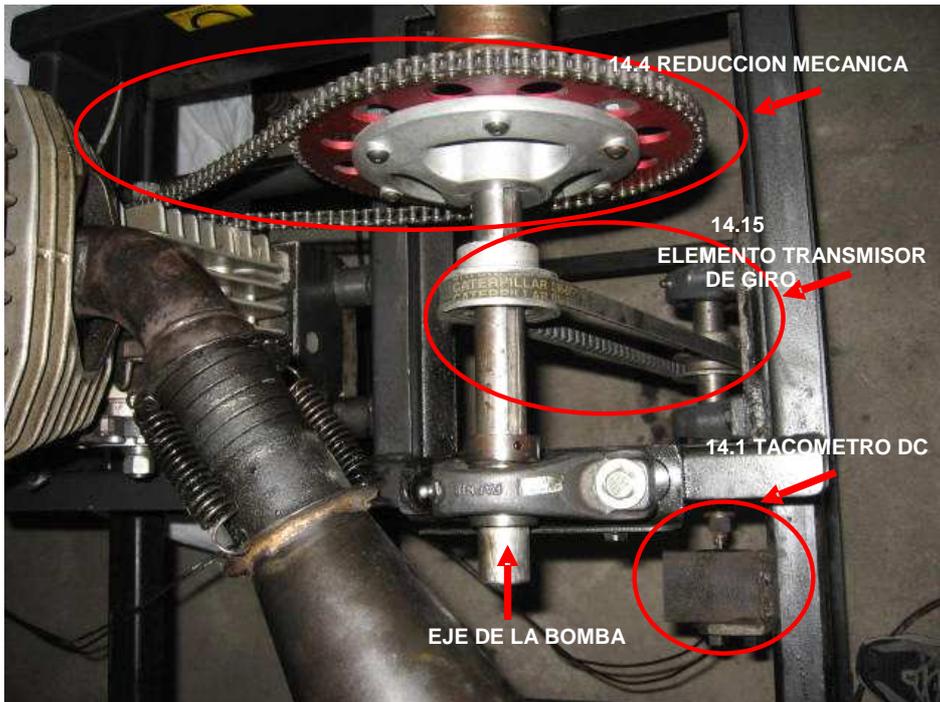


Figura 19. Acoplamiento de Tacómetro DC

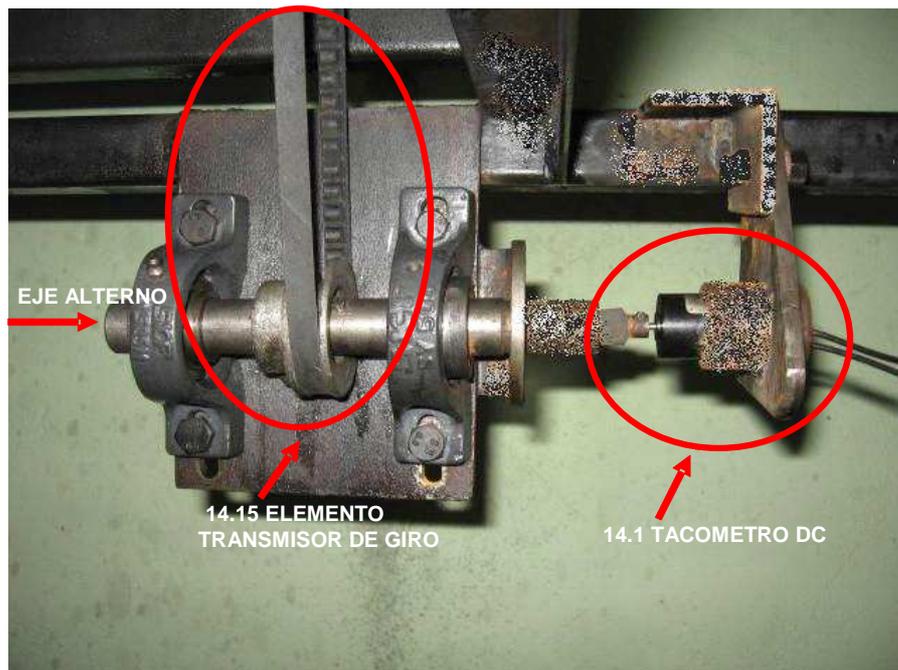


Figura 20- Acoplamiento de Tacómetro DC.

3.2.3. Control Electromecánico Válvula Restrictora

El acople del control electromecánico de la válvula 14.14 expuesto en la figura 14 utiliza los elementos mostrados en la figura 22 analizados más de cerca.

Como se había mencionado antes es necesaria la implementación de un circuito de potencia para poder manejar la corriente de 2A que necesita el motor eléctrico para trabajar, este mismo circuito además debe cumplir con la función del puente H que permite determinar el sentido de giro del motor mediante software. El diseño electrónico del circuito Controlador de Potencia/Puente H de la figura 22.5 se presenta en el anexo 8.7.2 adjunto.

El principio de este puente H electrónico es idéntico al analizado en 2.3.4, la diferencia está en que los contactos son reemplazados por transistores IRF 530 que son saturados para convertirse en contactos cerrados tal como A, B, C y D en la figura 13. Se utiliza el integrado 7805T para recibir las señales desde la DAQ 14.12 en las entradas 22.2. Este integrado de compuestas lógicas provee 5 voltios para saturar los transistores y alimentar el motor eléctrico con +V o -V dependiendo de las necesidades del sistema y además funciona como protector de altas corrientes hacia la DAQ.

El sentido de giro del motor esta determinado por la tabla en la figura 21:

ENTRADA 1	ENTRADA 2	SENTIDO DE GIRO	ACCION VÁLVULA
ALTO(5VOLTIOS)	ALTO(5VOLTIOS)	NEUTRAL	NO CAMBIA POS.
BAJO(0VOLTIOS)	ALTO(5VOLTIOS)	HORARIO	CIERRA
ALTO(5VOLTIOS)	BAJO(0VOLTIOS)	ANTI-HORARIO	ABRE

Figura 21 Tabla lógica del control del motor eléctrico en 14.14

Como se verá después el estado de las salidas de voltaje hacia el motor será controlado por un algoritmo temporizado o existirá la opción de ser controlado

manualmente según sea la necesidad del operador del dinamómetro de cerrar o abrir la válvula restrictora.

En la figura 23 se puede apreciar como queda finalmente acoplado el motor eléctrico 14.14 con su respectiva reducción mecánica de 78:5 a la válvula restrictora 14.7. Con esto se da una clara idea de cómo funciona el control electromecánico de la válvula 14.7.

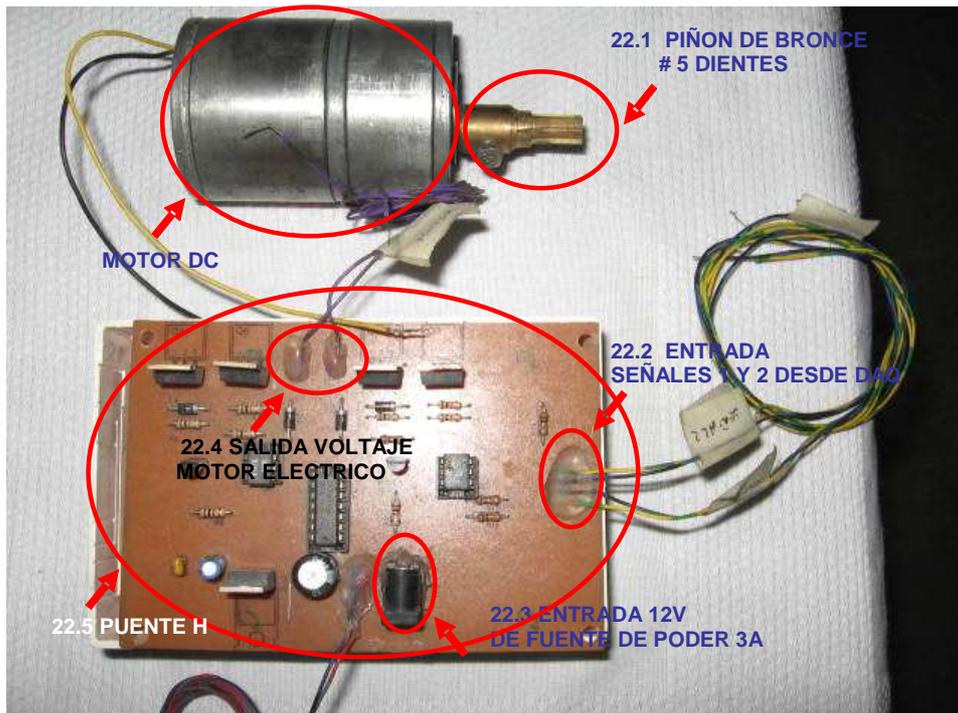


Figura 22 Imagen del circuito Controlador de Potencia/Puente H y el motor eléctrico que controlan la válvula restrictora 14.14

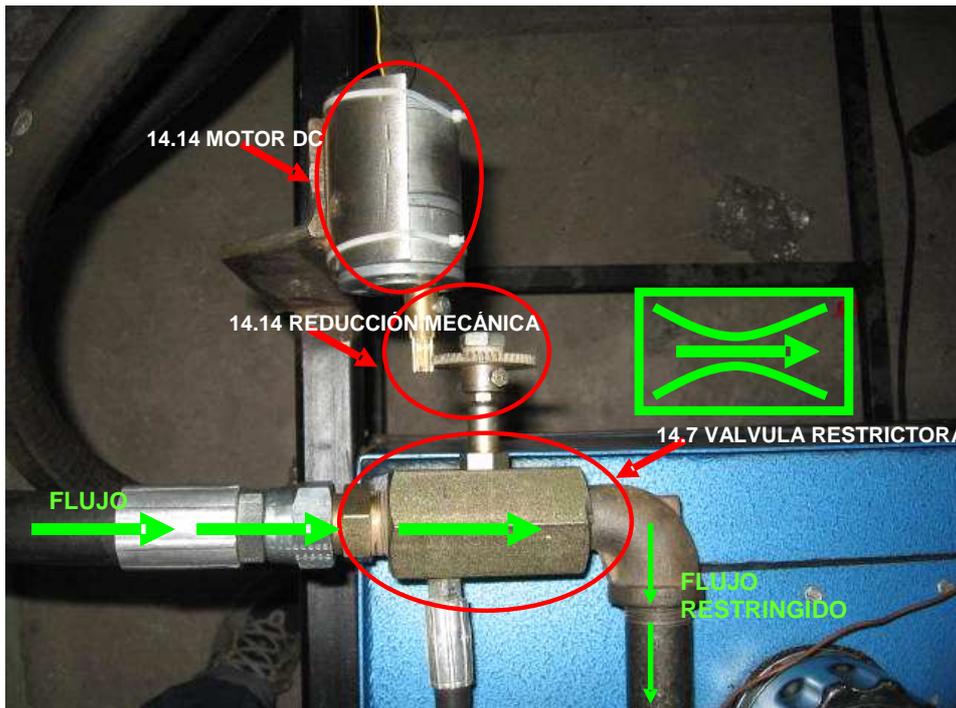


Figura 23 Acople del motor eléctrico 14.14 con su reducción y la válvula restrictora 14.7 donde se aprecia como se controla dicha válvula.

3.3. Implementación del software

Existen muchos ambientes o plataformas sobre las cuales se podría diseñar un software de adquisición y análisis de datos con su respectiva interfaz gráfica que sería compatible con los sensores utilizados para realizar este proyecto. Algunos ejemplos de estos programas son Visual Basic, MATLAB, Java, C++, o LabVIEW. Para este dinamómetro se decidió utilizar LabVIEW 7.1 que es un software fácil de usar y que además está disponible para los estudiantes en la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito.

LabVIEW es un software que permite desarrollar programas en un ambiente gráfico de una manera rápida y eficaz. Este software permite convertir una computadora en un instrumento virtual ya sea de medición o de procesamiento de datos, además permite crear interfaces gráficas amistosas con el usuario y trabaja con un lenguaje estructural, es decir que contiene lazos WHILE, IF, o FOR, para realizar iteraciones repetitivas. En la figura 24 se detallan los módulos que fueron necesarios para poder procesar toda la información proveniente de los sensores y presentar finalmente un resultado comprensivo y útil al usuario final del dinamómetro.

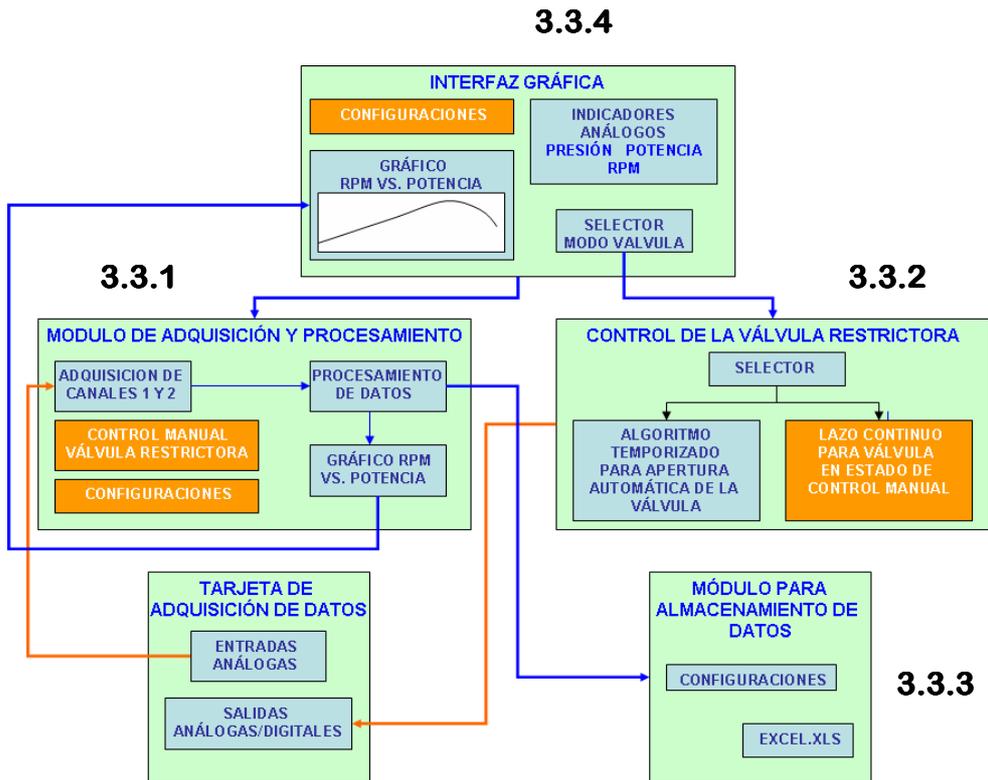


Figura 24 Implementación del Software Dinamómetro Nelson Chávez

En el Anexo 8.8 se encuentra el diagrama completo del software implementado en LabVIEW.

3.3.1. Módulo de Adquisición y Procesamiento de Datos

Este módulo básicamente se encarga de adquirir los datos desde los sensores mediante la DAQ tarjeta de adquisición de datos marca National Instruments NI6014 14.12. Los datos son recibidos en forma de voltajes análogos desde el tacómetro DC SERVOTEK SA-740A-7 y el transductor de presión OMEGA PX4100-3KGB y posteriormente se procesan para transformar estos voltajes en datos precisos de velocidad angular y presión.

Se conoce, que el tacómetro conectado al eje de la bomba hidráulica entrega 2.6 voltios/1000 RPM. Esto da una constante de 384.61 RPM/voltio con lo cual por ejemplo, con un voltaje de 1 voltio se tendría 384 RPM de la bomba. En la figura 25 se aprecia como se procesa la señal proveniente del tacómetro DC. Esta señal de velocidad angular también se procesa para calcular las revoluciones del motor que posteriormente se usarán para graficar el diagrama

Potencia vs. Velocidad, al conocer que la reducción final del eje de la bomba con el eje del motor es de 13:1. Es decir, que si el motor de prueba 14.3 gira a 13000RPM la bomba hidráulica 14.5 gira a 1000RPM.

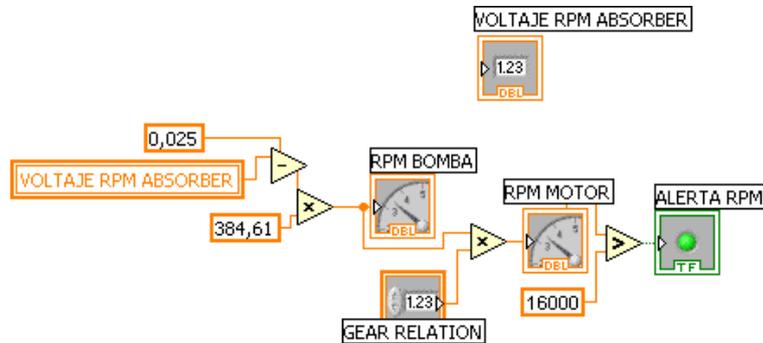


Figura 25 Procesamiento de la señal del tacómetro DC

Las revoluciones de la bomba son utilizadas a su vez para calcular el flujo hidráulico generado en la bomba al conocer el Desplazamiento Cúbico real de la bomba por cada revolución que es de 0.0097Galones/Rev como se aprecia en la figura 26.

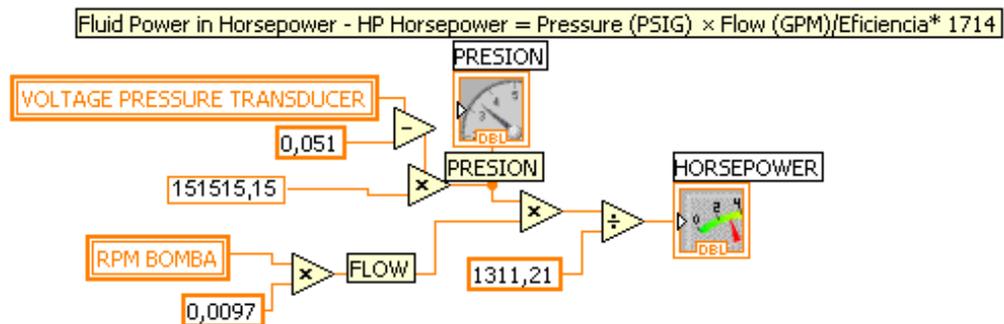


Figura 26 Procesamiento de la señal del tacómetro DC y del sensor de presión para obtener potencia

De la misma manera se procesa la señal del sensor de presión que llega a la DAQ 14.12 en milivoltios y se procesa en unidades de presión PSI. Cada 6.6 milivoltios que se leen en la DAQ12.12 representan 1000 PSI como se ve en la figura 26 en donde se multiplica la señal por una constante de 151515.15 que la transforma en una señal de presión. Al final todos estos valores se conjugan en la ecuación 2 antes mencionada para obtener la potencia de entrada a la bomba, que representa la potencia del motor de prueba 14.3::

$$Pe = \frac{F \times P}{1714 \times \xi}$$

En este módulo también se crea la señal de voltaje que controla el motor eléctrico que gobierna la válvula restrictora. Esta señal se emite en la DAQ mediante los canales de salidas análogas 1 y 2 y posteriormente se dirige hacia el circuito controlador de potencia 14.14 para cerrar o abrir la válvula restrictora dependiendo de las necesidades del sistema. Una vez procesados los datos hasta obtener la potencia y la velocidad del motor en RPM, se crea el gráfico de Potencia vs. Velocidad mediante el icono *XY GRAPH*, que se transmite a la interfaz gráfica para su estudio.

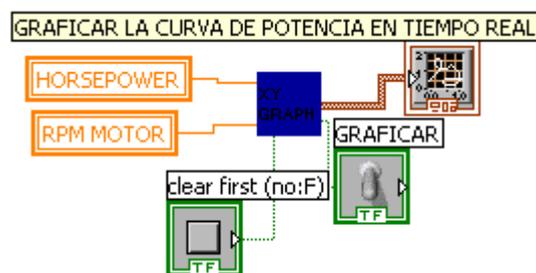


Figura 27 Generación del Grafico Potencia vs. Velocidad

En el Anexo 8.8.1 se encuentra el diagrama detallado del este modulo del software

3.3.2. Módulo de Control de la válvula Restrictora

Este módulo de control tiene como fin controlar la velocidad del motor de combustión al regular la descarga de la bomba hidráulica 14.5. Este control se hace mediante el programa diseñado ya sea de forma manual o automática dependiendo de la selección del usuario en la interfaz gráfica como se puede ver en la figura 28.



Figura 28 Selección de modo de control de válvula

En el modo automático el programa se encarga de abrir la válvula restrictora gradualmente hasta permitir al motor de combustión girar en la máxima velocidad deseada que en este caso son 16000 RPM. Este módulo compara constantemente la velocidad actual del motor con la velocidad máxima seleccionada por el operador, cuando esta velocidad se alcanza el módulo envía una señal de 5 voltios a la SALIDA 2 que a su vez activa el motor eléctrico en sentido horario cerrando la válvula.

La máxima velocidad es un parámetro que también puede ser escogido por el usuario desde la interfaz gráfica en CONFIGURACIONES dependiendo de las características del motor de prueba.

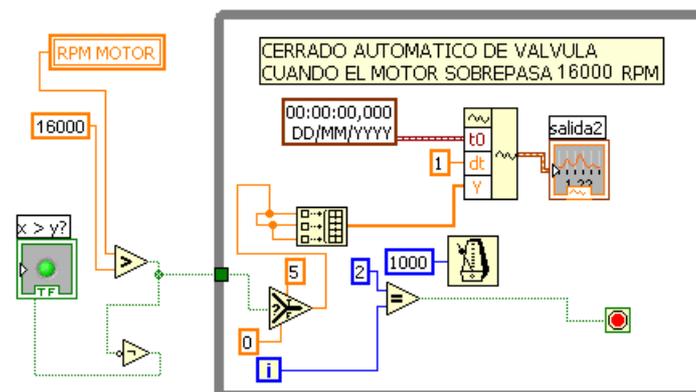


Figura 29 Módulo utilizado para cerrar válvula restrictora cuando se sobrepasan la velocidad seleccionada

En el Anexo 8.8.2 se encuentra el diagrama detallado del este módulo del programa.

3.3.3. Interfaz Gráfica

La interfaz gráfica creada para este programa tiene como objetivo presentar al usuario información clara de la configuración del software y de los resultados que genera el programa, además de permitirle variar ciertos parámetros necesarios para que el algoritmo calcule la potencia del motor.

La manera de crear una interfaz gráfica en LabVIEW se origina en el creación de un Panel Frontal (Front panel) en el cual se encuentran indicadores analógicos de las variables que son importantes para el usuario como la presión hidráulica del sistema, las revoluciones de la bomba, las revoluciones del motor, la potencia entregada por el motor, y el gráfico de Potencia vs. RPM. Esto se puede apreciar en la figura 30:

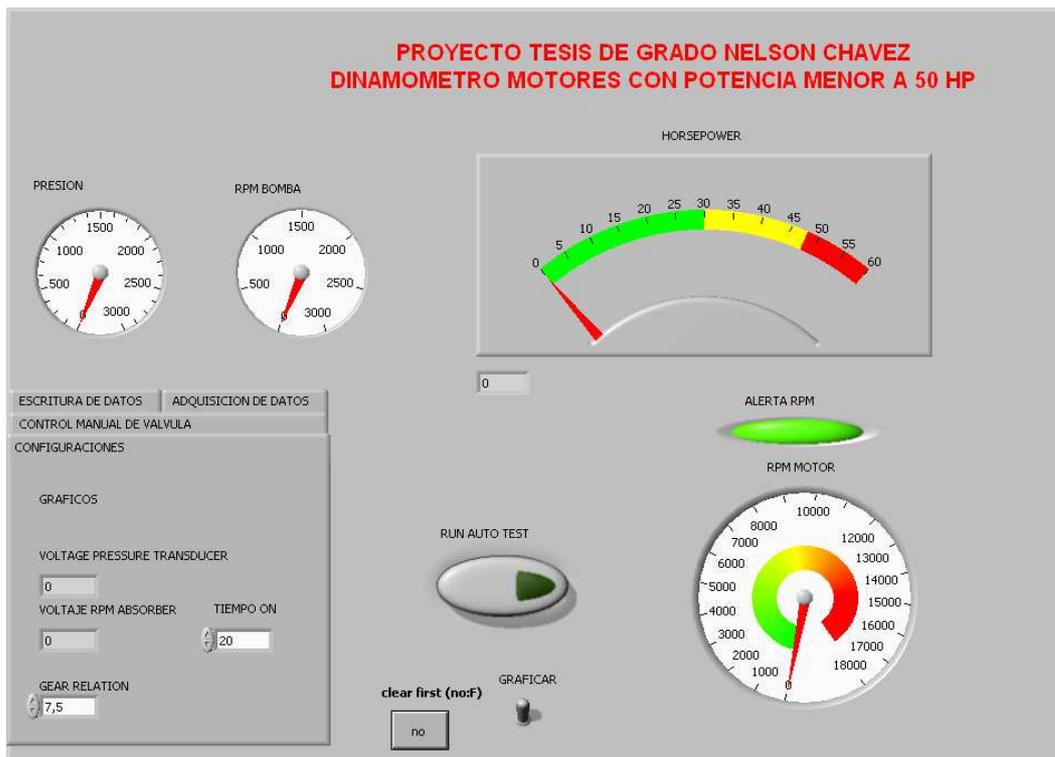


Figura 30. Interfaz gráfica

En el bloque de adquisición de datos se puede editar los canales por los que se realiza la adquisición, la escritura de datos, y la tasa de actualización de datos del programa. El bloque de control manual permite seleccionar entre un control manual o automático de la válvula restrictora, el bloque de configuraciones

tiene indicadores numéricos de los voltajes del transductor de presión y del tacómetro DC, y tiene un espacio para editar la relación de transmisión entre el cigüeñal del motor y el eje de la bomba que actualmente es 13:1

Ubicado en la parte central se tiene un botón para iniciar una prueba automática, en la cual la válvula restrictora será controlada por un algoritmo, y en la parte inferior se tiene un cuadro donde se muestra el gráfico Potencia vs. Velocidad que es generado por el programa.

En el Anexo 8.8.3 se encuentra el diagrama detallado del este modulo del software

4. Resultados

Para realizar las pruebas del dinamómetro se utilizó un motor de 2 tiempos procedente de un carro de karting de competencias. Las características de este motor de prueba 14.3 se detallan en la tabla de la figura 31.

MARCA	CRG
NO. SERIE	S102
CILINDRAJE	125 C.C.
# CILINDROS	1
RELACIÓN DE COMPRESIÓN	VARIABLE
AVANCE DE LA IGNICIÓN	VARIABLE
GRADOS DE ADMISIÓN & ESCAPE	VARIABLE
CARBURADOR	TILLOTSON ADMISION VARIABLE

Figura 31 Características técnicas del motor de prueba 12.3

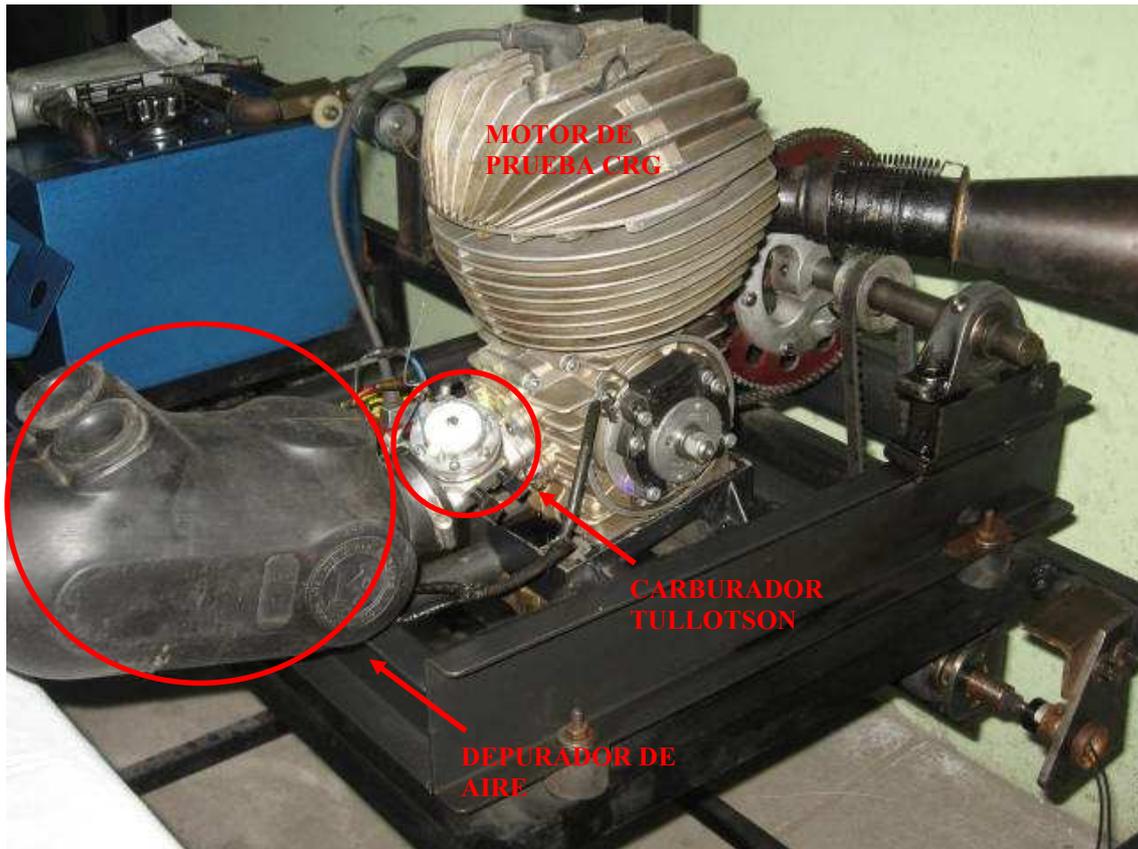


Figura 32. Motor CRG 125cc.

En la figura 32 se puede apreciar el motor de prueba 14.3 acoplado al dinamómetro con sus diferentes partes, como son el carburador Tillotson y el depurador de aire.

Se realizaron cuatro pruebas expuestas en las figuras 34, 37, 41, y 45 en donde se fueron cambiando variables importantes para la correcta puesta a punto del motor como el avance de la ignición, los grados de admisión y escape, y la relación de compresión, para encontrar la mejor combinación posible de las variables a disposición.

Lo que se buscó con estas pruebas fue poder encontrar una puesta a punto óptima del motor comparando diferentes configuraciones del motor para las condiciones de presión atmosférica y humedad en Quito que son 720 hPa y 65% de humedad promedio, y principalmente demostrar las capacidades del dinamómetro para estudiar el comportamiento de un motor y evaluar sus prestaciones de una manera rápida y eficaz.

4.1. Prueba 1

El procedimiento para realizar la evaluación de un motor con el dinamómetro automático es simple y eficaz, y se realiza de la siguiente manera:

- Se debe configurar el sistema con la relación de reducción correspondiente entre el motor y la bomba, y se deben configurar los canales de adquisición y escritura de datos.
- Con el control de la válvula en modo manual, se debe abrir totalmente la válvula para configurar al dinamómetro en carga mínima, encender el motor y dejarlo funcionar a baja velocidad para calentarlo.
- Con el control de la válvula todavía en modo manual, se debe cerrar la válvula restrictora hasta alcanzar la velocidad del motor donde se desea iniciar la evaluación automática.
- Con el control de la válvula en modo automático, se acelera el motor a fondo y se inicia la evaluación con el botón "RUN AUTO TEST".
- Cuando el motor alcanza la velocidad máxima configurada por el usuario del dinamómetro, el programa cierra la válvula nuevamente sin permitir que el motor exceda la velocidad seleccionada, y detiene la adquisición de datos.
- Finalmente se obtiene la curva de potencia para su posterior análisis.

En la figura 33 se observa la tabla de configuraciones del motor CRG que se utilizaron para obtener la curva de potencia de la figura 34:

RELACION DE COMPRESIÓN	10:1
GRADOS DE ADMISIÓN & ESCAPE	178.5
AVANCE DE IGNICIÓN	10°
CARBURADOR	360° CCW L jet 360° CCW H jet

Figura 33 Puesta a punto motor de prueba 12.3

Para clarificar la configuración del carburador en la tabla 33, se debe indicar que para el control de la mezcla aire/combustible que ingresa al motor se utilizan 2 agujas de tornillo regulables que se insertan en el cuerpo del carburador. Estas agujas se denominan "L jet", la cual controla la mezcla en velocidades inferiores a 11000RPM, y "H jet", que controla la mezcla en

velocidades superiores a 11000RPM. De esta manera, en la figura 34 se observan calibraciones que se realizan girando cada aguja en sentido anti horario a partir de la posición totalmente cerrada.

Como se puede ver en la figura 34 el motor en esta configuración alcanza una potencia máxima de 11.4 HP @ 12900 RPM y la curva obtenida es muy uniforme lo cual indica que el motor no producirá cambios bruscos de potencia, además indica que no existen fallas graves de funcionamiento en el motor, ya que este entrega su potencia gradualmente en todo su rango de velocidades.



Figura 34 Diagrama RPM vs. HP motor CRG 178.5 grados de escape, 360° L jet 360° H jet, 10° de avance ignición, 10:1 relación de compresión.

La prueba de la figura 34 fue realizada en un tiempo de 50 segundos, que al compararse con las 3 horas que se toma para generar la curva de potencia de forma manual, demuestra claramente las convenientes prestaciones que brinda el dinamómetro automático.

4.2. Prueba 2

En la figura 35 se puede ver la tabla de configuraciones del motor utilizadas para la segunda prueba realizada. La curva de potencia generada por el motor de prueba se presenta en la figura 26.3

RELACIÓN DE COMPRESIÓN	10:1
------------------------	------

GRADOS DE ADMISIÓN & ESCAPE	178.5
AVANCE DE IGNICIÓN	8°
CARBURADOR	360° CCW L jet 360° CCW H jet

Figura 35 Puesta a punto motor de prueba 12.3

Como se ve en la figura 35 para esta prueba se disminuyeron los grados de avance de la ignición a 8° con un reloj de precisión que se muestra en la figura 36. Para realizar este procedimiento se cambia la posición del encendido en relación al magneto acoplado al eje del cigüeñal del motor, midiendo los grados de retraso o avance del encendido desde la posición de punto muerto superior en el pistón.



Figura 36 Reloj de precisión

Si se compara la curva de potencia en 37 con la de la figura 34 se ve que la potencia máxima alcanzada es prácticamente igual pero las velocidades en las que se alcanza esta potencia son diferentes.

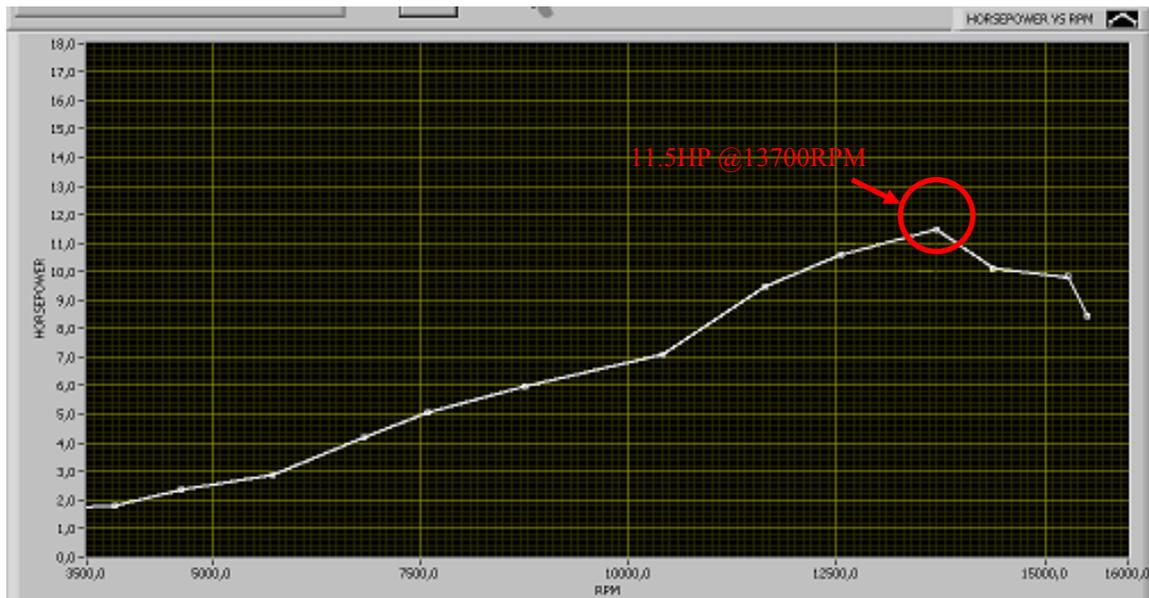


Figura 37 Diagrama RPM vs. HP 178.5° de escape, 360° L jet, 360° H jet, 8° de avance ignición, 10:1 relación de compresión.

En la curva en 34 tenemos 11.4HP @ 12900RPM y en la curva en 37 se tiene 11.5HP @ 13700RPM; esta información permite entender como el cambio de avance en la ignición afecta al motor haciendo que este desplace su curva de potencia hacia un régimen más alto de velocidad.

Se puede apreciar también que con 8° de avance en la ignición se tiene una reducción de potencia en el rango de velocidad medio alto del motor, es decir entre 10000RPM y 12500RPM. Si se compara en la figura 37 se tiene 6.8HP @ 10000RPM y en la figura 34 se tiene 7.8HP @ 10000RPM. Posiblemente esta puesta a punto sería conveniente para un circuito de competencias en el que predominen las rectas largas y obligue al motor a mantenerse en un rango de revoluciones alto entre 12500RPM y 15000RPM.

4.3. Prueba 3

Para la tercera prueba se utilizó la configuración del motor en la tabla 38, en la cual se mantuvieron las variables de relación de compresión, avance de ignición y carburador tal como en la configuración de 35, más se cambiaron los grados de escape de 178.5° a 174°.

RELACIÓN DE COMPRESIÓN	10:1
GRADOS DE ESCAPE	174
AVANCE DE IGNICIÓN	8°
CARBURADOR	360° CCW L jet 360° CCW H jet

Figura 38 Puesta a punto motor de prueba 12.3

Este procedimiento se realiza cambiando el espesor de los empaques de cartón entre el cilindro y el carter del motor como podemos ver en las figuras 39 y 40.



Figura 39 Empaques de diferentes espesores

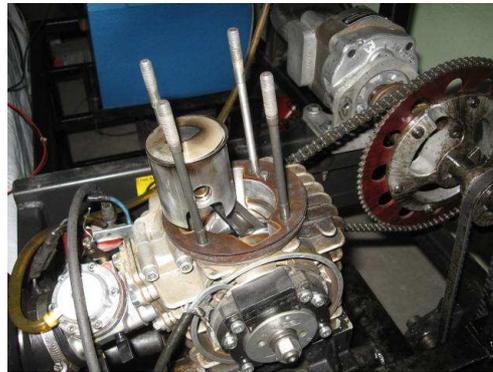


Figura 40 Empaques entre carter y cilindro

Al reducir el espesor de los empaques el cilindro desplaza su posición con relación al recorrido del pistón, haciendo que las toberas de escape y admisión cambien su posición con respecto al recorrido del pistón y por lo tanto haciendo que los tiempos de admisión y escape se adelanten en el proceso de compresión y explosión y se retrasen en el proceso de explosión y escape.

En la figura 41 se puede apreciar la curva de potencia generada en esta prueba, cuyo tiempo de evaluación fue de 56 segundos. Con esta configuración del motor se logró un notable incremento de potencia en los rangos de velocidad medio entre 7500RPM y 10000RPM, medio alto entre 10000RPM y 12500RPM y alto 12500RPM a 15000RPM. Aun cuando se mantuvo el pico de potencia prácticamente igual en 11.4@ 13700RPM.

Se puede ver que en la figura 37 de la prueba 2 se tiene 6.9HP@ 10000RPM mientras que en la figura 41 de la prueba 3 se tiene 8.1HP@ 10000RPM, y en

la figura 37 se tiene 9HP@ 11400RPM mientras que en 41 se tiene y 10.4HP@ 11400RPM, demostrando un incremento superior a 1 HP en los dos regimenes de velocidad.

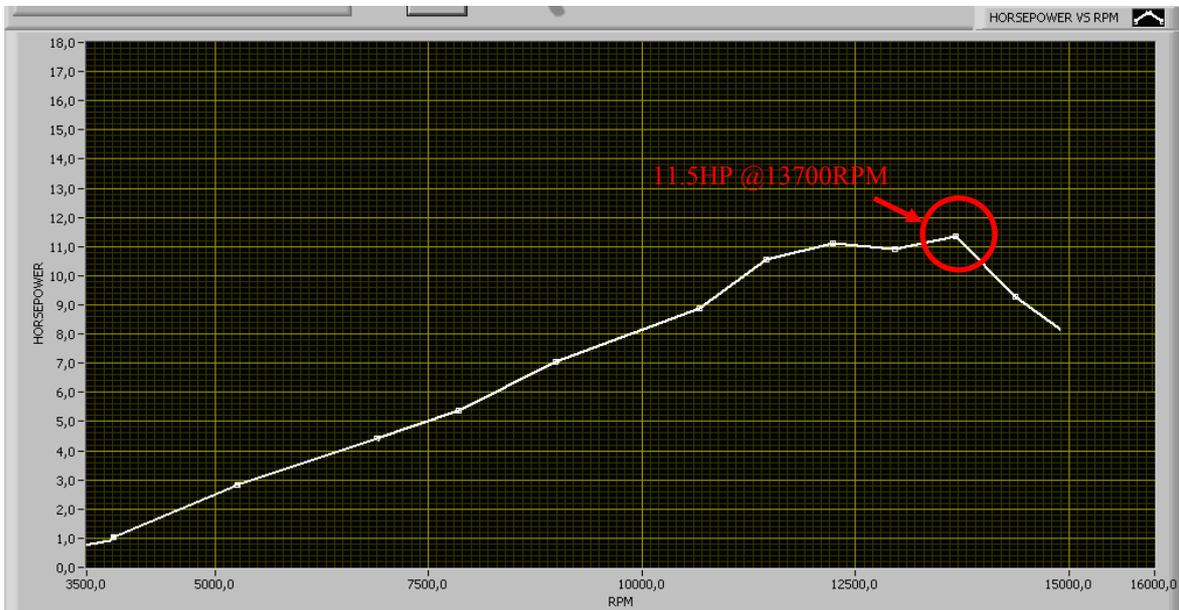


Figura 41 Diagrama RPM vs. HP, 174° escape, 360° L jet 360° H jet, 8° de avance de ignición, 10:1 relación de compresión.

Con este cambio en la configuración se ha logrado mantener el pico de potencia desplazado hacia el rango de velocidades alto de la prueba 2, pero también hemos mejorado el desempeño del motor en los rangos medio y medio alto de velocidades. Esta configuración demuestra ser la más adecuada hasta el momento, tanto para pistas largas, como para pistas cortas con curvas lentas donde se necesite potencia en rangos de velocidad medios.

4.4. Prueba 4

En la cuarta prueba se utilizó la configuración del motor detallada en la figura 42, donde se realizaron dos cambios concretos, se utilizó nuevamente 10° de avance en la ignición y se cambio la relación de compresión de 10:1 a 10.25:1.

RELACIÓN DE COMPRESIÓN	10.25:1
GRADOS DE ADMISIÓN & ESCAPE	174
AVANCE DE IGNICIÓN	10°
CARBURADOR	360° CCW L jet 360° CCW H jet

Figura 42 Puesta a punto motor de prueba 12.3

Para cambiar la relación de compresión del motor CRG 125c.c. se debe seguir un procedimiento simple que consiste en aumentar o reducir el espesor de las arandelas de cobre que se colocan entre el cilindro y el cabezote del motor, como se ve en las figuras 43 y 44. El espesor de estas arandelas se mide con un calibrador digital.



Figura 43 Empaques de cabezote intercambiables



Figura 44 Empaques de diferentes espesores

Con la configuración expuesta en 42 se ha logrado el mejor desempeño en todos los rangos de velocidad del motor de prueba 14.3. El pico máximo de potencia con esta configuración alcanzó 12.5 HP @ 12550RPM y se obtuvo un incremento de potencia en todos los rangos de velocidad del motor.



Figura 45 Diagrama RPM vs. HP 174° de escape, 360° L jet, 360° H jet, 10° de avance ignición, 10.25:1 relación de compresión.

Esta prueba se llevo a cabo en un tiempo de 54 segundos, y permitió encontrar la mejor puesta a punto del motor de prueba 14.3 al combinar diferentes configuraciones de los parámetros variables del motor. Si se compara la figura 45 de la prueba 4 con la figura 34 de la prueba 1 se encuentra que a 5000 RPM se mide un aumento de potencia de 2.8HP a 3.3 HP, a 7500 RPM se mide un aumento de potencia de 4.5HP a 5.5HP, a 10000 RPM se mide un aumento de potencia de 7.6HP a 9HP, y a 12500RPM se mide un aumento de potencia de 11.2HP a 12.5HP.

Todas las pruebas realizadas en el dinamómetro se realizaron en un tiempo inferior a 1 minuto, sin tomar en cuenta el tiempo que se toma realizar los cambios de configuración del motor. Esto demuestra que con un dinamómetro automático se pueden realizar aproximadamente 4 evaluaciones de un motor con diferentes configuraciones en aproximadamente 1.5 horas, lo que con el dinamómetro manual tomaría aproximadamente 10 horas. A continuación se presentan los gráficos 34, 37, 41 y 45 juntos para que se puedan analizar y comparar más fácilmente:



Figura 34

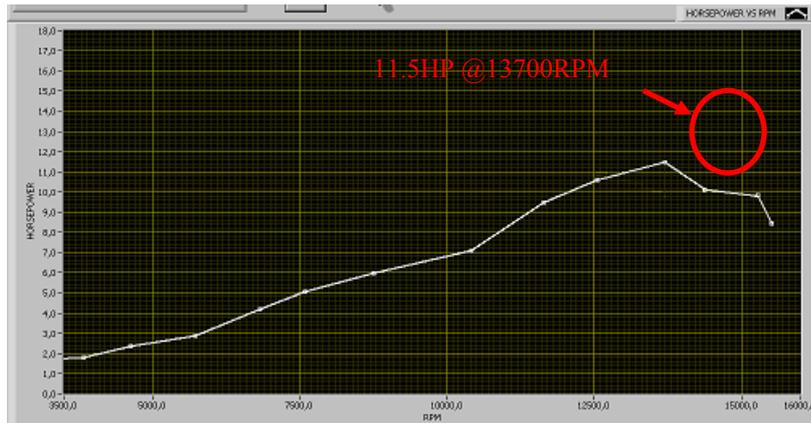


Figura 37



Figura 41



Figura 45

5. Conclusiones

Este proyecto ha desarrollado una herramienta de ingeniería que permite evaluar y optimizar el desempeño de motores de combustión interna de una manera rápida y eficaz, alcanzando su objetivo original de presentar al usuario un gráfico de Potencia vs. Velocidad mediante una interfaz gráfica clara y concisa.

El tiempo de ejecución del proyecto fue de 1 año y seis meses donde la fase de investigación duró 3 meses, la fase de diseño del software tomo aproximadamente 4 meses y la implementación del prototipo tomo alrededor de 5 meses debido que los sensores tuvieron que ser importados y los actuadores diseñados y contruidos por completo. La fase de pruebas que originalmente no fue tomada en cuenta en el plan de tesis tuvo un periodo de 4 meses, en la cual se logró dejar a punto el dinamómetro para realizar evaluaciones repetitivas de un motor cada una en un tiempo menor a 60 segundos, lo cual facilita convenientemente el trabajo del usuario de un dinamómetro automático. Por último, la fase de obtención de resultados y redacción tomo 2 meses en los cuales se pudieron apreciar las bondades del prototipo.

La investigación y selección de los sensores se realizó principalmente en Internet buscando los proveedores más conocidos de sensores análogos como OMEGA y SERVOTEK. Se aprovechó el soporte técnico disponible en www.omega.com, como asesores virtuales que ayudan a seleccionar los sensores que más se adaptan a las necesidades y recursos del usuario.

El diseño inicial del software o programa, que fue hecho específicamente para este proyecto tomo alrededor de 3 meses, pero fue modificado hasta que finalmente satisfizo totalmente las necesidades del proyecto. Esto se pudo lograr gracias a la facilidad que presenta LabVIEW para modificar algoritmos y constantes rápidamente mientras se realizan las pruebas. Los ejemplos de software ya creados que existen en la biblioteca virtual de LabVIEW también fueron un apoyo extenso para el desarrollo de este software, que aun cuando no fueron parecidos si quiera a lo que el proyecto demandaba, dotaron de ideas básicas para el desarrollo del programa.

La implementación del prototipo fue un proceso muy minucioso ya que se debieron solucionar decenas de detalles que fueron apareciendo al implementar cada uno de los sensores. El costo de implementación de este prototipo fue de USD 2040.00 donde se incluyen el dinamómetro original, el sensor de presión, el tacómetro DC, el Puente H con su motor eléctrico, el computador, y las adaptaciones mecánicas e hidráulicas necesarias para

realizar la implementación. En este costo no se incluyen el valor de la tarjeta de adquisición de datos, ni el costo del software Labview ya que estos fueron provistos por la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito.

Los resultados obtenidos en este proyecto son satisfactorios ya que se cumplieron los objetivos dispuestos inicialmente y se lograron conjugar las actividades realizadas en el campo de la investigación, diseño e implementación para poder presentar un dinamómetro automatizado capaz de generar curvas de Potencia vs. Velocidad precisas al usuario.

Se demostró como un dinamómetro puede aportar de gran manera a la optimización de un motor al encontrar gradualmente la mejor configuración posible del motor de prueba 14.3 para las condiciones de presión atmosférica y humedad del lugar donde se realizaron las evaluaciones.

Inicialmente el motor de prueba entregó un pico de potencia de 11.4HP@ 12900RPM; después de buscar la mejor configuración de sus parámetros variables, el motor de prueba 14.3 pudo entregar un pico máximo de potencia de 12.5HP@ 12550RPM mostrando un incremento de potencia puntual del 9.6%.

Este trabajo se realizó al evaluar el motor en las diferentes configuraciones presentadas en las tablas 34, 37, 41 y 45, en las que se aisló y evaluó un solo parámetro en cada prueba para no confundir los efectos de cada variable específica sobre el desempeño del motor.

El estudio de los dinamómetros inicio a principios del siglo XIX, y gracias a las bondades de estas herramientas se ha vendido estudiando y utilizando hasta la actualidad disfrutando de popularidad en varios campos de la ingeniería. Este proyecto ha desarrollado el estudio e implementación en el campo de los dinamómetros hidráulicos gracias a que los componentes necesarios para llevarlo a cabo son comunes en el mercado ecuatoriano y estadounidense.

Como se ha mencionado antes, pensamos que el Ecuador es un ambiente propicio para difundir el interés en los dinamómetros, las razones son por ejemplo, la abundancia de motores de combustión interna distribuidos en el parque automotor del país que representan potenciales usuarios de dinamómetros para su correcta puesta a punto y la verificación de su estado y eficiencia mecánica, la gran actividad deportiva que se ha venido acrecentando en los últimos años relacionada con el motociclismo, el kartismo, y el automovilismo, y la necesidad de un medio ambiente limpio que fomente la salud de nuestros habitantes, campo en el cual los dinamómetros pueden tener un rol principal.

6. *Investigación posterior*

Como se dijo inicialmente los dinamómetros pueden aportar considerablemente al desarrollo de diferentes campos como el del mantenimiento, el cuidado

ecológico o los deportes automotores. En nuestro caso, los resultados presentados giran alrededor de un motor de 2 tiempos de 125cc diseñado para uso en competencias de karting, y se usó este motor debido a que sus características permiten ilustrar claramente como un dinamómetro puede ayudar a mejorar el desempeño de un motor. Como se vio antes, este motor posee parámetros variables que afectan a su desempeño como la relación de compresión, el avance de la ignición, y el tiempo de admisión y escape de gases.

Este proyecto abre las puertas para el desarrollo de investigación y diseño más profundos que fomenten el uso de dinamómetros en el Ecuador así como la comprensión de que un dinamómetro es una herramienta útil para evaluar y optimizar motores de combustión interna o eléctricos.

Existen varios proyectos que podrían desarrollarse con base en este proyecto, lo son por ejemplo:

1. Evaluar nuevas partes y sistemas diseñados para mejorar el desempeño de un motor de pruebas.
2. Diseño y desarrollo de dinamómetro automático útil para motores de buses, camiones, y equipo pesado, que son abundantes en nuestro país.
3. Diseño e implementación de dinamómetros de chasis similares a los de la figura 3^a, que permitan evaluar los motores sin tener que separarlos que los vehículos que impulsan. Para esto se necesita profundizar en el diseño mecánico de los rodillos y los efectos que estos tendría sobre la medición de la potencia.
4. En el campo del cuidado del medio ambiente, en un dinamómetro se pueden realizar investigaciones y evaluaciones de combustibles biológicos, o desarrollarse motores diseñados para trabajar con otros tipos de combustible.
5. El prototipo construido en este proyecto puede ser perfeccionado para ser comercializado en talleres de motos o de karting donde

se de importancia al desempeño y la correcta puesta a punto de los motores.

Los usos de los dinamómetros son muy extensos y se pueden aplicar en diferentes ramas de la ingeniería donde se necesite evaluar y optimizar motores. Este proyecto entrega una base teórica y práctica sólida en lo referente a los dinamómetros hidráulicos a investigadores y usuarios que pretendan incursionar en el campo de los dinamómetros y de la evaluación de motores

7. **Bibliografía**

- Referencia 1: Pleno de los Académicos, < <http://buscon.rae.es> >, **Diccionario de la Lengua Española en WWW**, Vigésima Segunda Edición, disponible en <http://buscon.rae.es/drael/>
- Referencia 2: Wikipedia < <http://buscon.rae.es> >, **Wikipedia La Enciclopedia Libre en WWW**, 14 de Diciembre del 2006, disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/>
- Referencia 3: Corpaire < <http://www.corpaire.org/>>, **Red Metropolitana de monitoreo Atmosférico de Quito en WWW**, mes de Mayo del 2006, disponible en <http://prueba.corpaire.org/>
- Referencia 4: Acura-Integra-Dyno-Results-Graphs-8815, < <http://www.dragtimes.com> >, **Dyno results en WWW**, disponible en <http://www.dragtimes.com/1995-Acura-Integra-Dyno-Results-Graphs-8815.html>
- Referencia 5: Freno de Prony, < <http://www.physics.montana.edu> >, **Prony Demonstrations en WWW**, Julio del 1998, disponible en http://www.physics.montana.edu/demonstrations/video/1_mechanics/demos/pics/prony_brake2.jpg
- Referencia 6: Bergeron, Bob. "Dynamometer Tech: How they work." Volume 2, Number 4: Kart Racer. July/August 1998. New Hampshire
- Referencia 7: Fluid Power IN HORSEPOWER < <http://www.airlinehyd.com> >, **Airline Hydraulics corporation en WWW**. Copyright 2007, disponible en <http://www.airlinehyd.com/KnowledgeCenter/Hydraulic/Formulas/PumpH.asp>
- Referencia 8: Cengel, Yunus. "Thermodynamics: an engineering approach."Third Edition: MacGraw Hill. 1998. Boston
- Referencia 9: Omega Engineering, Inc. <www.omega.com>, **Milivolt Output Pressure Transducers en WWW**. Copyright 2006, disponible en <http://www.omega.com/ppt/pptsc.asp?ref=PX4100&Nav=preb02>
- Referencia 10: Servotek Products Company, Inc. <www.servotek.com>, **DC tachometers disponible en WWW**. Copyright 2006, disponible en <http://www.servotek.com/PAGE13.HTM>

- Referencia 11: De Prony Brake < <http://buscon.rae.es> >, **Wikipedia La Enciclopedia Libre en WWW**, Mayo del 2006, disponible en <http://es.wikipedia.org/wiki/>
- Referencia 12: Symbols used in Neumatic and Hidraulic Circuit Diagrams, <<http://www.roymech.co.uk>> Hidraulic Symbols disponible en www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Drawing/Hyd_Pnue_symbols.html
- Referencia 13: Dyno International. "Model 500 Dynamometer: Operators Manual" 2nd Edition: Internaltional Dyno Coop: 1997. Minneapolis.
- Referencia 14: Company History, < <http://www.froudehofmann.com> >, **Froudehofmann en WWW**, disponible en http://www.froudehofmann.com/about_1.htm