

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES ELÉCTRICAS DE UN
BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

EDWIN ACEVEDO PÉREZ
JUAN PABLO MORALES MEDINA

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ
2019

ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES ELÉCTRICAS DE UN
BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

EDWIN ACEVEDO PÉREZ
JUAN PABLO MORALES MEDINA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

Director de tesis ANDRÉS CAMILO JIMENEZ ALVARES Ingeniero Electrónico
ALEXANDER GARCÍA MARIACA Ingeniero Mecánico

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BOGOTÁ
2019

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bogotá DC, 12 de Agosto del 2019

Gracias a la vida, por permitirme el haber llegado hasta este momento tan fundamental en mi formación profesional. A mi familia, por ser el pilar más importante para mí, demostrarme siempre el apoyo incondicional en cada decisión tomada y enseñarme a afrontar las adversidades del día a día, a mi compañero porque sin el equipo que formamos, no habiéramos logrado esta meta, y finalmente a mis amigos que vivieron a mi lado esta etapa.

Edwin Acevedo Pérez

Gracias a mi madre y mi abuela por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad; muchos de mis logros se los debo a ustedes en los que se incluye este, son mi principal motivación. A toda mi familia por el apoyo y cariño que me han brindado, a mis amigos y compañeros que siempre han caminado junto a mí en lucha para alcanzar nuestras metas y gracias a la vida por lograr que este sueño se haga realidad.

Juan Pablo Morales Medina

AGRADECIMIENTOS

Los autores de éste proyecto expresan agradecimientos:

A la fundación Universitaria Los Libertadores, en especial a la Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas, por permitirnos ser parte de una comunidad fiel a sus principios y conocimiento profesional.

Al ingeniero Alexander García Mariaca por ser nuestro guía y mayor colaborador en el desarrollo de éste proyecto.

A los ingenieros Andrés García Jimenez y Jhon Anzola por su apoyo y por el conocimiento que nos fue transmitido durante el transcurso de la elaboración del proyecto.

Finalmente, a todos los amigos y compañeros que siempre estuvieron acompañándonos y apoyándonos en éste camino de aprendizaje y crecimiento integral.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	18
3.2 JUSTIFICACIÓN	19
4. ESTADO DEL ARTE.....	20
4.1 Monitoreo de condición en motores de combustión interna monocilíndricos con base en adquisición y procesamiento de señales experimentales	¡Error! Marcador no definido.
4.2 Desarrollo de un laboratorio virtual de un motor de combustión Interna	¡Error! Marcador no definido.
4.3 Sistema de control, inyección y encendido, para motores térmicos y alternativos de ciclo Otto basado en programación abierta bajo LabVIEW™	¡Error! Marcador no definido.
4.4 Development of a testbed for evaluation of electric vehicle drive performance	¡Error! Marcador no definido.
5. MARCO TEÓRICO	24
5.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.....	24
5.2 BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA	25
5.3 INSTRUMENTACIÓN EN BANCOS DE PRUEBAS MCI	25
5.4 SENSORICA UTILIZADA	25
5.4.1 Termocuplas	26
5.4.2 Encoder	26
5.4.3 Sensor de par	¡Error! Marcador no definido.
5.4.4 Sensor Maf.....	28
5.5 ADQUISICIÓN DE DATOS.....	28
5.6 TARJETA DAQ.....	30
6 DESARROLLO DEL PROYECTO.....	32
6.1 ESQUEMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS MCI.....	32
6.2 MÓDULO BOLÍVAR	34

6.2.1 Tarjeta DAQ.	34
6.2.2 Alimentación eléctrica, y diseño de electrónica para el pre-procesamiento de señales	37
6.2.3 Computador (desarrollo de software)	38
6.2.2 Banco de resistencias, consumo potencia.....	42
6.3 MÓDULO CALDAS	44
6.3.1 Sensor MAF	45
6.3.2 Sensor de par.....	48
6.4 MÓDULO SANTANDER.....	50
6.5 MÓDULO CÓRDOVA	56
6.5.1 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE DE LAS TERMOCUPLAS.....	58
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Alimentación del sistema	37
Tabla 2. Características de Generador.	42
Tabla 3. Torque Exigido según potencia configurada.	44
Tabla 4. Datos a comparar con sensor calibrado.	46
Tabla 5. Tabla de datos primera medición	46
Tabla 6. Tabla de datos segunda medición.....	46
Tabla 7. Tabla de datos tercera medición.	47
Tabla 8. Conexión de termocuplas.	58
Tabla 9. Incertidumbre estándares de módulo temperaturas.	58
Tabla 10. Incertidumbre ruido de módulo temperaturas.	59
Tabla 11. Media estadística de módulo temperaturas.	59
Tabla 12. Desviación estándar de módulo temperaturas.	59
Tabla 13. Incertidumbre estándar de módulo temperaturas.	60

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Grafica de Potencia eléctrica(W) en función de Torque (N.m)	44
Gráfica 2. Comportamiento del sensor, flujo másico del aire vs diferencia de potencial... 47	47
Gráfica 3. Línea Característica del Sensor de Par.	49

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Partes sensor Sensor de par	27
Figura 2. Proceso adquisición de datos	29
Figura 3. Diagrama de bloques, esquema general.....	32
Figura 4. Fotografía del banco completo; a) Módulo bolívar ,b)Módulo Caldas ,c)Módulo Santander ,d)Módulo Córdoba	33
Figura 5. Diagrama de bloques Módulo Bolívar.	34
Figura 6. Fotografía de Módulo Bolívar.....	34
Figura 7. Tarjeta NI-6212.....	35
Figura 8. Representación de pines conexión, tarjeta NI-6212.....	36
Figura 9. Fotografía fuentes alimentación sistema.....	37
Figura 10. Alimentación y Diseño electrónico para el sistema.....	38
Figura 11. Programación desarrollada en LabVIEW student.....	38
Figura 12. Acción para detener el ciclo en programa.....	39
Figura 13. Bloque de DAQ Assistant.....	39
Figura 14. Menú para la configuración de los contadores	40
Figura 15. Menú para la configuración de sensores voltaje y temperatura.....	40
Figura 16. Menú para configuración de función de salida.....	41
Figura 17. Menú para la selección de señal de trabajo.....	41
Figura 18. Bloque para el almacenamiento de los datos en un documento tipo Excel	42
Figura 19. Banco de resistencias.....	43
Figura 20. Generador de 10 KVA.....	43
Figura 21. Diagrama de bloques Módulo Caldas	45
Figura 22. Fotografía de Módulo Caldas	45
Figura 23. Bloque LabVIEW para medición de MAF.....	48
Figura 24. Bloque LabVIEW para visualización de MAF.....	48
Figura 25. Diseño de divisor de tensión para salida de sensor de par.....	49
Figura 26. Bloque LabVIEW para la medición de torque y velocidad.....	50
Figura 27. Bloque LabVIEW para la visualización de torque y velocidad.....	50
Figura 28. Diagrama de bloques Módulo Santander.....	51
Figura 29. Fotografía de Módulo Santander.....	51
Figura 30. Bloque LabVIEW para la medición de velocidad.....	52
Figura 31. Bloque LabVIEW para la visualización de velocidad.....	52
Figura 32. Bloque para obtener las revoluciones reales del rpm.....	53
Figura 33. Tipo de señales y conexión de encoder.....	53
Figura 34. Diagrama de bloques para la conexión del encoder con DAQ.....	54
Figura 35. Diseño de configuración pull-up para encoder.....	54
Figura 36. Diseño de configuración MOSFET ON-OFF.....	55
Figura 37. Bloque LabVIEW para generar señal de activación de los inyectores.....	55

Figura 38. Bloque LabVIEW para la visualización de señal de inyectores, y activación por usuario.....	55
Figura 39. Diagrama de bloques de Módulo Córdova	56
Figura 40. Fotografía de Módulo Córdova	57
Figura 41. Bloque LabVIEW para la medición de temperatura.....	57
Figura 42. Bloque LabVIEW para la visualización de temperatura.....	57

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Comportamiento de sensor MAF	47
Ecuación 2. Diseño divisor de tensión.	49
Ecuación 3. Ecuación para obtener valor de velocidad según pulsos de encoder.....	51
Ecuación 4. Relación RPM con reducción.	53
Ecuación 5. Incertidumbre por ruido de la medición.....	58
Ecuación 6. Media para módulo de temperaturas.	59
Ecuación 7.Desviación estándar.....	59
Ecuación 8. Incertidumbre por estadística estándar.....	60

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Tablas resultados	89
Anexo B. Datasheet Sensores	90
Anexo C. Programación LabVIEW	95

}

RESUMEN

La propuesta de este proyecto es instalar un sistema de instrumentación en un banco de pruebas para motores de combustión interna para evaluar el desempeño y el rendimiento de un motor Diesel de 4 tiempos, con el fin de generar energía eléctrica a través de un alternador y comprobar la potencia total entregada al conectarse a un banco de resistencias, el cual se alimentará con dos tipos de combustible, el combustible diésel común y el combustible a gas GLP. Para ello se implementan varios tipos de sensores para evaluar en tiempo real todas las variables implicadas en la operación del motor.

El sistema de instrumentación está compuesto por varios módulos los cuales están constituidos por los sensores instalados en el banco, tales como termocuplas tipo k para la medición de temperatura, Sensor de par para medición de torque, encoder para medir RPM, sensor de masa de aire o MAF para la medición del flujo de aire de entrada al motor y cuenta con un control de activación en las válvulas de inyección del gas licuado GLP. Con el sistema completo se realizan pruebas de rendimiento en el motor en diferentes parámetros de velocidad con el objetivo de obtener, visualizar y almacenar el estado de las variables que se están midiendo y posterior a esto realizar el análisis correspondiente del funcionamiento del motor.

PALABRAS CLAVE: Motor de combustión interna, Banco de pruebas, Sensores, Instrumentación, Adquisición, Procesamiento, Control, Datos, Diseño, DAQ.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad los bancos de pruebas de motores de combustión interna son utilizados para evaluar el funcionamiento del motor bajo parámetros establecidos para determinar la eficiencia en emisión de gases, velocidad, generación de energía mecánica e inyección de más de un tipo de combustible. La instalación de estos bancos permite realizar pruebas experimentales que ofrece medir algunas de las variables físicas asociadas con el rendimiento del motor.

Con respecto a las mediciones en las pruebas realizadas en estos motores, son de gran importancia los bancos de pruebas que cuentan con el sistema de instrumentación que permite adquirir los valores de las variables de interés para establecer el comportamiento del motor bajo los criterios de operación dados en la etapa de trabajo.

El desarrollo de este proyecto tiene como fin adquirir y procesar las señales provenientes de los sensores instalados en el banco de pruebas de un motor diésel para realizar la visualización de las mediciones de variables en operación como temperaturas, velocidad, torque, flujo de aire de entrada y controlar la inyección de combustible con la activación de electroválvulas.

En este documento se muestra el desarrollo del proyecto, ejecutado desde la alimentación de los sensores y la tarjeta de adquisición de datos utilizada para recibir las señales provenientes de los distintos dispositivos del banco de pruebas para realizar el procesamiento y visualización en tiempo real de las variables a través del diseño de un software en el programa LabView, en el cual, además de realizar la visualización de las distintas variables, se controla la activación de la electroválvula de inyección de combustible GLP, y por último, se registra todos los valores obtenidos en la etapa de trabajo en un hoja de Excel para realizar el análisis correspondiente.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño de un sistema de adquisición y procesamiento de señales eléctricas de un banco de pruebas de motores de combustión interna para controlar y visualizar los parámetros de operación.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Capturar y visualizar las mediciones en tiempo real de temperatura, flujo de aire, velocidad y torque del motor con el software LabVIEW utilizando el dispositivo de adquisición de datos multifunción DAQ USB – 6212 de National Instruments.
- Procesar y controlar los rangos de inyección de gas licuado GLP a través de electroválvulas antes del punto muerto superior en el motor de acuerdo a los parámetros establecidos.
- Registrar y guardar los datos obtenidos en la captura de información del banco de pruebas instrumentado, en un documento de Excel para su posterior análisis de eficiencia y rendimiento del banco.
- Corroborar los valores teóricos y experimentales del torque resultante con la potencia configurada en el banco de resistencias.

3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

En Colombia, la generación de energía eléctrica en zonas no interconectadas y en algunos campos de la industria se opera con motores diésel, los cuales no cuentan con instrumentación electrónica, lo que implica altos costos en operación debido al precio del combustible y además causen un impacto ambiental por las emisiones de gases excesivas que no están siendo monitoreadas permanentemente. [1]

Por esta razón, se está implementando una nueva tecnología en motores de combustión interna llamada HCCI (homogeneous charge compression ignition) que combina los procesos de combustión de los motores diésel y a gasolina, es decir la mezcla aire combustible se realiza de manera homogénea como en el motor a gasolina y la mezcla aire combustible se enciende por compresión. Sin embargo, esta aplicación presenta aun inconvenientes cuando se trabaja con mezclas pobres de aire combustible o grandes cantidades de gases de escape recirculados, razón por la cual aún no se ha desarrollado comercialmente. [2]

Por lo anterior, estos motores deben ser sometidos a una larga serie de mediciones alternadas con severas pruebas de durabilidad y de carga, que se repiten hasta que tras una precisa puesta a punto, se alcanzan los resultados previstos. Por lo tanto, la instalación de un banco de pruebas se hace necesaria con el fin de corroborar y verificar que las variables medidas estén dentro del rango y límites que se esperaba para su buen funcionamiento.

No obstante, en estos bancos de pruebas no se cuenta con un control de combustión en los motores, lo que genera bajos índices de eficiencia y rendimiento por una escasa electrónica aplicada, por consiguiente, es necesario controlar los distintos tipos de variables de operación que influyen en el rendimiento de éste; tales como temperatura del flujo de aire de entrada y gases de escape, al igual que la visualización de la velocidad, torque del motor y el control en la inyección de combustible.

De lo planteado anteriormente se establece la siguiente pregunta, **¿Cómo asegurar la calidad de las señales eléctricas para el buen desempeño del**

análisis experimental del banco de pruebas para motores de combustión interna?

3.2 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto propone diseñar e implementar un sistema de adquisición y procesamiento de señales eléctricas en banco de pruebas en este tipo de motores para reducir el error experimental en la captura de los datos obtenidos, y de esta forma poder visualizar y controlar las diferentes variables que mejora el desempeño de operación del motor ya que gracias al sistema de instrumentación se podrá analizar con más facilidad el comportamiento del banco.

Asimismo, ayudará a reducir las emisiones de gases de escape, ya que se mejorará la combustión en el motor controlando la inyección de combustible, teniendo en cuenta la información obtenida de las mediciones de las otras variables implicadas en éste, lo que hará que el motor obtenga un mejor rendimiento.

De igual forma, el proyecto impactará en el ámbito académico al diseño e instrumentación en bancos de pruebas de motores de combustión interna en la universidad, abriendo campo para la implementación de éste, al diseño de controladores de otros sistemas que requieran captura y procesamiento de señales para prácticas experimentales.

4. ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el monitoreo de condición con base en análisis de señales se ha convertido en una herramienta valiosa para el diagnóstico de motores de combustión interna. Como caso de estudio se presenta el sistema de instrumentación, adquisición y análisis de señales para el monitoreo de un motor de combustión interna monocilíndrico, funcionando con combustible diésel, a condiciones normales de operación y diferentes velocidades. Las señales adquiridas fueron: vibraciones provenientes del bloque del motor, presión en cámara y velocidad de rotación del cigüeñal.

El artículo presenta de manera general las técnicas de instrumentación, adquisición y análisis utilizadas actualmente desde el Laboratorio de Motores de Combustión Interna de la Universidad Tecnológica de Pereira, con el fin de obtener parámetros de operación de los motores de combustión interna monocilíndricos, mediante la implementación de procesamiento de señales. El documento describe los métodos de instrumentación, adquisición y análisis utilizados para la generación y estudio de las bases de datos. [3]

Para desarrollar el proyecto se hace uso de múltiples sensores o dispositivos de adquisición de datos, con el objetivo de obtener el monitoreo y control de un Motor Monocilíndrico, se logra adquirir de forma favorable los datos de las variables, de igual forma manipular cada una de ellas con el fin de llegar a una medición o situación específica para el motor, estos proyectos atribuyen para el conocimiento en procesamiento de señales y adquisición de las mismas, los datos alcanzados para el motor, muestran como mejora el control y manipulación sobre el mismo.

Se propone el desarrollo de un Laboratorio Virtual que permita que todos los grupos de estudiantes dispongan de una herramienta con la cual puedan desarrollar la experiencia que representa la realización de la práctica de laboratorio para un motor de combustión interna.

El prototipo de Laboratorio Virtual de Motor de Combustión Interna planteado en este proyecto fue desarrollado utilizando el entorno de programación LabView, el

mismo consiste un modelo matemático que representa el comportamiento del motor y una interfaz gráfica que permite al usuario variar ciertos parámetros de prueba (Posición Válvula del acelerador, Relación aire combustible, torque del freno acoplado al motor) y observar el comportamiento presentado por otros parámetros dada la variación de los primeros (Velocidad de giro, Torque, Potencia y Eficiencia del motor).[4]

Desde un problema como el de no contar con el espacio para desarrollar practicas con los motores de combustión interna, por medio del software LabView se obtuvo la aplicación que representa el laboratorio Virtual, gracias a la programación gráfica que emplea Labview la estructura de algoritmo no fue complicada desarrollarla, de igual forma esto representa la viabilidad del software como herramienta para la adquisición de datos, señales y procesamiento de las mismas desde un entorno con hardware o sencillamente solo ambiente virtual.

Es el comienzo para iniciar con una aplicación a mayor escala, ya que como producto final se logró un ejecutable para cualquier tipo de computadora a trabajar sin restricción de horario, el objetivo principal finalizo de forma correcta y cumpliendo con los requerimientos para que el aplicativo sea fundamental en el proceso de aprendizaje y montaje de ambientes virtuales.

La gestión electrónica permite extraer más rendimiento de los motores de combustión interna, así como reducir los contaminantes que producen. Por este motivo, en la actualidad, los vehículos realizan la gestión de su motor mediante componentes electrónicos que les permiten ser más competitivos y les ayudan a cumplir la legislación vigente en materia de contaminación.

En este proyecto se busca realizar una gestión electrónica con la que se pueda variar con facilidad los parámetros que gobiernan la inyección y el encendido en los motores de ciclo Otto para experimentar con ella; como también la realización de unas prácticas que acerquen a los alumnos la estrategia seguida en la gestión mediante la observación de las señales de inyección y encendido en un osciloscopio, y el funcionamiento de una simulación que muestre, además de los diferentes pulsos, el visionado del ciclo Otto teórico de los parámetros introducidos y la manipulación de los parámetros de entrada de los sensores. [5]

Siendo un proyecto más robusto encamina más la integración de adquisición y control de datos, ya que, para la gestión de un motor de combustión interna, es un proceso crítico y de precisión, debido a la velocidad de ejecución y a las múltiples

decisiones que se han de tomar, para ello es necesario una gran capacidad de procesado de información; para generar la programación se emplea el software LabView, la interfaz es sencilla ya que permite la modificación de parámetros de gestión de forma cómoda mediante una entrada de teclado, ya la visualización es por medio de un monitor enlazado con el equipo de cómputo, esto permite tener una visión de los componentes y procesos que se llevan a cabo para conseguir la modificación de la gestión electrónica en un motor de combustión interna.

A pesar de la capacidad de respuesta del sistema, se plantea el uso de una tarjeta captadora de datos de conexión por USB industrial, con procesador del tipo Compact-RIO, sin tener implicación es cambiar los algoritmos ya que el lenguaje de programación es el mismo, el objetivo principal es poder gestionar en tiempo real todas las variables y componentes del motor, para ellos es necesario emplear el módulo FPGA que permite realizar la ejecución del software a bajo nivel, para aprovechar la mayor capacidad del procesamiento, y realizar una gestión de lazo cerrado con los sensores a trabajar.

Esta tesis desarrolla e implementa un banco de pruebas para la evaluación de los accionamientos de motor en vehículos eléctricos. El banco de pruebas consta de un dinamómetro controlado por computadora conectado a las herramientas de análisis de energía y recolección de datos. Se cubre la programación y operación del banco de pruebas. El objetivo es analizar el efecto de la topología y las mejoras del software en la eficiencia del motor.

Las pruebas comienzan con un análisis de eficiencia de estado estable en un amplio rango de par y velocidad. Luego, las pruebas de los ciclos de manejo se utilizan para simular la conducción tanto en ciudad como en carretera. Juntos, estos resultados de pruebas dinámicas y de estado estable proporcionan una evaluación realista del rendimiento de la unidad de vehículo eléctrico. [6]

Finalmente, la plataforma de prueba proporciona una evaluación acertada y precisa de la eficiencia del motor, gracias a que la plataforma combina control automático con registro de datos de potencia mecánica y eléctrica; los parámetros del vehículo a trabajar se configuran y luego el programa resuelve una operación matemática, ecuación diferencial para calcular y generar el archivo de control, en donde éste archivo contiene los comandos de velocidad y de par requeridos para ejecutar la prueba del ciclo de manejo para que así luego se codifiquen y envíen los datos a los inversores de control de par y velocidad, de igual forma se permite

configurar la sincronización de la ejecución, para desarrollar el proceso en el intervalo de tiempo correcto.

Todos los datos obtenidos en las pruebas dinámicos y de estado estable, presentan los beneficios cuando se genera un cambio en la topología de inversor, por eso el banco de pruebas cumple su propósito de proporcionar una herramienta para evaluar el rendimiento de la unidad, por ello se proyecta ésta instrumento para controlar una variedad de sistemas de accionamiento por medio de protocolos de comunicación disponibles, gracias a la versatilidad que permite al operador adaptar la herramienta a cualquier sistema, esto conlleva a generar investigación en el uso de los vehículos eléctricos.

5. MARCO TEÓRICO

5.1 MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor de combustión interna (MCI) es un tipo de máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión. Su nombre se debe a que dicha combustión se produce dentro de la máquina en sí misma. [7]

5.1.1 TIPOS DE MCI

- a. Alternativos.
 - El motor de explosión ciclo Otto.
 - El motor diésel.
- b. La turbina de gas.
- c. El motor rotatorio.

5.1.2 MCI TIPO DIESEL

Los motores diésel en particular tienen ciclos de cuatro tiempos, salvo los de tamaño muy grande, ferroviarios o marinos, que son de dos tiempos. Las fases son diferentes de las de los motores de gasolina.

En la fase de admisión, el pistón sale hacia fuera, y se absorbe aire hacia la cámara de combustión. En la fase de compresión, en que el pistón se acerca y el aire se comprime a una parte de su volumen original, lo cual hace que suba su temperatura hasta unos 850 °C. Al final de la fase de compresión se inyecta el combustible a gran presión mediante la inyección de combustible con lo que se atomiza dentro de la cámara de combustión, produciéndose la inflamación a causa de la alta temperatura del aire. En la fase de trabajo, la combustión empuja el pistón hacia fuera, transmitiendo la fuerza longitudinal al cigüeñal a través de la biela, transformándose en fuerza de giro par motor. La cuarta fase es, al igual que en los motores Otto, la fase de escape, cuando vuelve el pistón hacia dentro. [8]

La eficiencia o rendimiento (proporción de la energía del combustible que se transforma en trabajo y no se pierde como calor) de los motores diésel dependen, de los mismos factores que los motores Otto, es decir de las presiones (y por tanto de las temperaturas) inicial y final de la fase de compresión. Por lo tanto es mayor que en los motores de gasolina, llegando a superar el 40% en los grandes motores

de dos tiempos de propulsión naval. Este valor se logra con un grado de compresión de 20 a 1 aproximadamente, contra 9 a 1 en los Otto. Por ello es necesaria una mayor robustez, y los motores diésel son, por lo general, más pesados que los motores Otto. Esta desventaja se compensa con el mayor rendimiento y el hecho de utilizar combustibles más baratos.

Los motores diésel grandes de 2T suelen ser motores lentos con velocidades de cigüeñal de 100 a 750 revoluciones por minuto (rpm o r/min), mientras que los motores de 4T trabajan hasta 2.500 rpm (camiones y autobuses) y 5.000 rpm (automóviles) [9]

5.2 BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El banco de pruebas es un montaje experimental cuyo objetivo es el de evaluar parámetros operativos como, velocidad angular, temperaturas, torque, flujo de aire y consumo de combustible. Estos parámetros ayudan a determinar la eficiencia del motor y de esta forma analizar el comportamiento de este bajo los criterios de operación dados la etapa de trabajo. [10]

5.3 INSTRUMENTACIÓN EN BANCOS DE PRUEBAS MCI

Las ventajas de instrumentar un banco de pruebas es la caracterización del motor de combustión interna, esta instalación ofrece mediciones de algunas de las variables físicas importantes en la operación del motor.

Un banco de pruebas sofisticado consta de varios sensores, adquisición de datos y actuadores para controlar el estado del motor. Los sensores se utilizan para conocer los valores de las variables físicas de interés, como son: velocidad angular, aire de admisión, consumo de combustible, mezcla de admisión, gases de escape, temperaturas, condiciones atmosféricas como presión y humedad. La información obtenida a través de los sensores es procesada y registrada a través de sistemas de adquisición de datos. [11]

5.4 SENSORICA UTILIZADA

¿Qué es un Sensor?

La medida de un fenómeno físico, como la temperatura de una habitación, la intensidad de una fuente de luz o la fuerza aplicada a un objeto, comienza con un

sensor. Un sensor, también llamado un transductor, convierte un fenómeno físico en una señal eléctrica que se puede medir. Dependiendo del tipo de sensor, su salida eléctrica puede ser un voltaje, corriente, resistencia u otro atributo eléctrico que varía con el tiempo. Algunos sensores pueden requerir componentes adicionales y circuitos para producir correctamente una señal que puede ser leída con precisión y con toda seguridad por un dispositivo DAQ. [12]

La sensorica empleada para el proyecto se basa en 4 elementos:

-Termocuplas, encoder, Sensor de par, sensor maf.

5.4.1 Termocuplas

Las termocuplas empleadas son tipo k de inmersión, una termopar se hace con dos alambres de distinto material unidos en un extremo, al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje en el orden de los milivoltios, éste aumenta o disminuye según el valor de temperatura que se registre por parte del sensor, existen varios tipos de termocuplas, clasificándose por varios criterios, tales como material del que están construidas, su tolerancia o desviación, las más usadas son la tipo j y tipo k, ya que son económicas, físicamente muy rígidas y adicional cubren un rango de medición de -180 a 1370 °C. [13]

5.4.2 Encoder

Son sensores que generan señales digitales en respuesta al movimiento. Están disponibles en dos tipos, uno que responde a la rotación, y el otro al movimiento lineal. Cuando son usados en conjunto con dispositivos mecánicos tales como engranajes, ruedas de medición o flechas de motores, estos pueden ser utilizados para medir movimientos lineales, velocidad y posición. [14]

Actúan como transductores de retroalimentación para el control de la velocidad en motores, como sensores para medición, de corte y de posición. También como entrada para velocidad y controles de rango.

A medida que el eje rota, el emisor infrarrojo emite luz que es recibida por el sensor óptico (o fototransistor) generando los pulsos digitales a medida que la luz cruza a través del disco o es bloqueada en diferentes secciones de este. Esto produce una secuencia que puede ser usada para controlar el radio de giro, la dirección del movimiento e incluso la velocidad. [15]

5.4.3 Sensor de par

Estos sensores de par se utilizan para ensayar y estudiar elementos de rotación como motores, generadores, alternadores. Un medidor de par es un dispositivo que mide el par que existe, por torsión en un eje, que tiene de entrada y salida los componentes entre los que se quiere medir dicho par y manda una señal eléctrica con los valores recogidos.

Los tipos de sensores de par son diferentes, pero por tecnología se dividen en estáticos o dinámicos, a su vez, estos últimos se dividen en sensores de par dinámicos sin escobillas o anillos rozantes y sensores de par con escobillas o anillos rozantes.

Los formatos son variados, aunque siempre hay un denominador común, consta de un eje instrumentado, que ha de ser intercalado entre fuente y carga, para que el sensor de par, sea sometido a la torsión que deseamos medir. [16]

Las partes que hacen parte de un sensor de par:

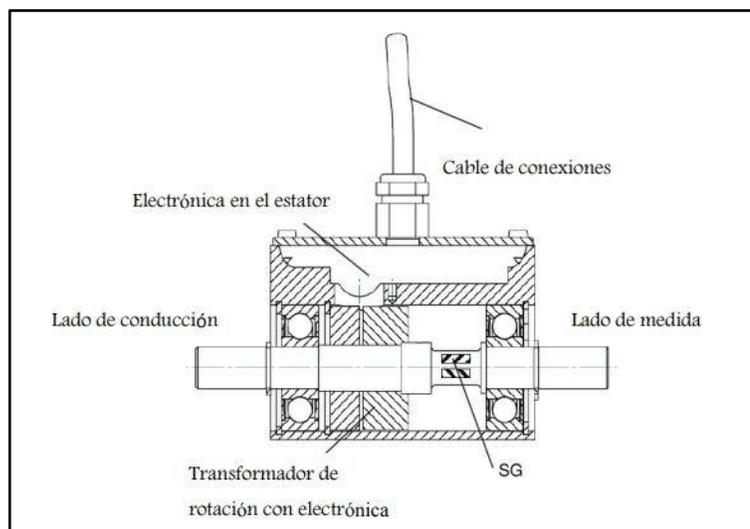


Figura 1. Partes sensor Sensor de par, tomado de [17]

Cable de conexiones: es el cable donde están todos los conductores, los de la señal del par y los de alimentación.

SG: son las galgas extensométricas con las que medimos el par. El funcionamiento de las galgas extensométricas es el siguiente: al producirse una deformación de torsión del eje en el que están colocadas debido al par aplicado,

éstas se deforman a la misma vez que el eje, con lo que al deformarse varían su resistencia, y al medir esta variación de resistencia podemos encontrar una relación entre la deformación (resistencia) y el par aplicado.

La electrónica en el estator: es la que se encarga de encontrar la correspondencia entre la variación de resistencia de la galga extensométrica y el par, y manda la señal de tensión para poder registrarla. [17]

5.4.4 Sensor MAF

El sensor MAF está diseñado para medir el flujo de aire que ingresa al motor, este dato viaja hasta el dispositivo de modulación por impulsos por medio de un cable el cual envía una señal de voltaje que cambia de acuerdo al flujo. En algunos sensores MAF la señal entregada es una corriente pulsante de frecuencia variable.

En este sensor, internamente funciona mediante un hilo muy fino metálico el cual se encuentra a muy alta temperatura, en el momento que comienza a entrar aire el aire enfría este hilo y las cargas cambiantes de aire causan un efecto diferente sobre la temperatura del hilo, entonces todo el circuito que maneja el tema del calentamiento del hilo generará una señal de voltaje de acuerdo a que tanto es enfriado. Esto se encuentra incorporado dentro del sensor, el cual va ubicado en el sistema de admisión del vehículo, lo más próximo al filtro de aire del motor. Internamente existe un circuito que permanente monitorea los cambios de temperatura del hilo por medio de un transductor eléctrico, internamente. Es importante interpretar que de este dispositivo sale una señal hacia el PCM (modulación por impulsos codificados), que es la que realmente nos interesa al momento de la medición o verificación. Entonces será necesario controlar que por el cable de señal se esté generando un valor de voltaje de acuerdo al volumen del aire que ingresa al motor bajo distintas condiciones de carga. [18]

5.5 ADQUISICIÓN DE DATOS

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PCs

estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable.



Figura 2. Proceso adquisición de datos, Tomado de: National Instruments [19]

El hardware DAQ actúa como la interfaz entre una PC y señales del mundo exterior. Funciona principalmente como un dispositivo que digitaliza señales analógicas entrantes para que una PC pueda interpretarlas. Los tres componentes clave de un dispositivo DAQ usado para medir una señal son el circuito de acondicionamiento de señales, convertidor analógico-digital (ADC) y un bus de PC. Varios dispositivos DAQ incluyen otras funciones para automatizar sistemas de medidas y procesos. Por ejemplo, los convertidores digitales-analógicos (DACs) envían señales analógicas, las líneas de E/S digital reciben y envían señales digitales y los contadores/temporizadores cuentan y generan pulsos digitales.

La función de un pc con software programable controla la operación del dispositivo DAQ y es usada para procesar, visualizar y almacenar datos de medida. Una PC de escritorio se puede utilizar en un laboratorio por su poder de procesamiento, una laptop se puede utilizar por su portabilidad o una PC industrial se puede utilizar en una planta de producción por su robustez, los componentes de un sistema DAQ:

-Software Controlador

El software controlador ofrece al software de aplicación la habilidad de interactuar con un dispositivo DAQ.

-Software de Aplicación

El software de aplicación facilita la interacción entre la PC y el usuario para adquirir, analizar y presentar datos de medidas. [19]

Finalmente, Todo esto se puede registrar gracias a las tarjetas de adquisición de datos, las cuales sirven para obtener una muestra de una variable física (voltaje, temperatura, nivel de sonido), es decir, toman una señal de un sensor (sistema analógico) y después la adecuan para transformarla en un dato que pueda ser reconocido y registrado por un sistema digital, con el fin de que la pueda leer una computadora y realizar una tarea en específico mediante un software específico.

5.6 TARJETA DAQ

Las tarjetas de adquisición de datos (hardware) actúan como la interfaz entre una computadora y señales físicas, es decir, la información recaudada por el sensor se pasa al DAQ, el cual se encarga de transformar los códigos del mundo real a los códigos digitales, como si se tratara de un intérprete que traduce de un lenguaje a otro, con el fin de que el sistema digital sea capaz de comprender los signos del analógico. Adicional, consisten en tres partes principales: por un lado, está el circuito de acondicionamiento de señales, después está el convertidor analógico-digital y el bus del ordenador.

Acondicionamiento de señales:

Los signos o información recaudada por los sensores pueden ser muy inestable para el medidor, ya que, por ejemplo, si se está queriendo registrar el voltaje de una planta generadora de electricidad, éste puede ser de una intensidad demasiado variable, es por ello que se necesita de un circuito de acondicionamiento de señales, el cual ajusta la información recibida del exterior con el fin de que pueda ser leída correctamente por el convertidor analógico-digital.

El circuito tiene la capacidad de amplificar la intensidad o magnitud de la señal, por otro lado, también es capaz de disminuirla con el fin de que la potencia sea menor, asimismo, es capaz de realizar una especie de filtrado, en el que elimina los picos más altos de la señal y se queda con los más estables, finalmente, puede actuar como aislante de las perturbaciones externas que afectan el registro de la señal.

Convertidor:

El convertidor, conocido principalmente como ADC es el traductor de todos los códigos que se utilizan, es decir, es el artefacto que transforma las señales analógicas recibidas por el sensor en señales digitales, con el fin de que cualquier equipo electrónico, como una computadora, sea capaz de comprenderlos y

leerlos. Es como si fragmentara la información en varios pedazos y los tradujera a otro idioma, después estos pedazos son llevados al bus de la PC.

Bus de datos del pc:

Toda la información del mundo físico que ya fue transformada a un sistema digital pasa por un artefacto llamado bus, el cual detecta las señales y nuevamente las interpreta y las traduce para que pueda ser vislumbrada en la pantalla del ordenador. Esto lo hace una vez que el DAQ es conectado a la computadora a través de cualquier puerto de entrada (USB, Ethernet, etcétera).

Utilidades

Las tarjetas de adquisición de datos se pueden utilizar en todo tipo de industrias y centros de investigación científica, ya que permiten realizar una serie de mediciones y controlar las condiciones de trabajo. Una de las aplicaciones más útiles de este artefacto es en los sistemas de registro, monitoreo y control de temperatura. [19]

6 DESARROLLO DEL PROYECTO

Para la construcción e instalación de toda la parte electrónica utilizada en el banco de motores que cuenta la universidad, se investigó acerca de cómo se puede instrumentar un banco de motores de combustión interna y de esta forma, poder realizar pruebas y calibración a cada uno de los sensores utilizados para luego poder instalarlos en el banco y realizar pruebas reales con el motor en funcionamiento.

6.1 ESQUEMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS MCI

En la figura 3 se observa el esquema general del banco de pruebas instalado en la sede automecatrónica de la fundación universitaria Los Libertadores.

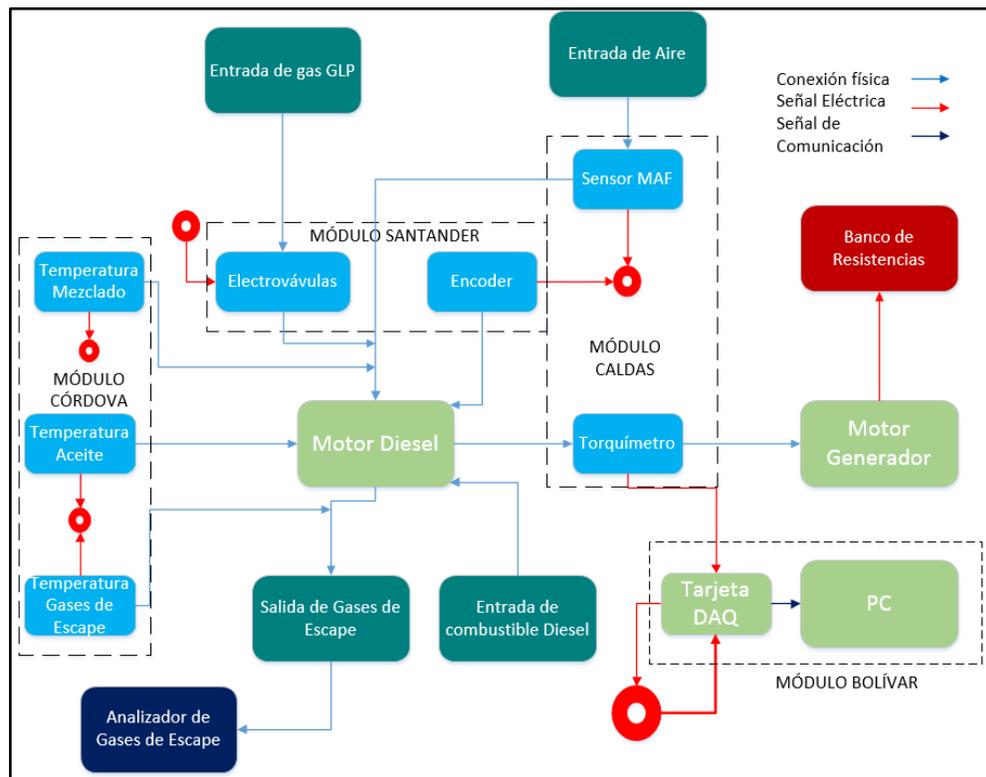


Figura 3. Diagrama de bloques, esquema general.

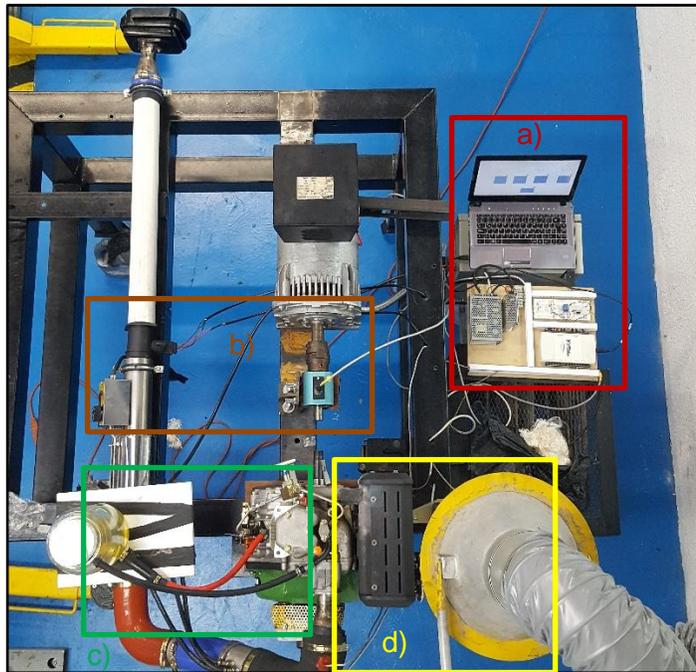


Figura 4. Fotografía del banco completo; a) Módulo Bolívar, b) Módulo Caldas, c) Módulo Santander, d) Módulo Córdoba.

Este sistema de instrumentación cuenta con cuatro módulos cuyos componentes están mencionados a continuación:

1. Módulo Bolívar
 - 1.1. Fuente de alimentación y hardware electrónico.
 - 1.2. Tarjeta DAQ.
 - 1.3. Computador (desarrollo de software).
 - 1.4. Banco de resistencias, consumo potencia.

2. Módulo Caldas
 - 2.1. Sensor de flujo de aire.
 - 2.2. Sensor de par (Encoder interno)

3. Módulo Santander
 - 3.1. Electroválvulas.
 - 3.2. Encoder.

4. Módulo Córdoba
 - 4.1. Termocupla de entrada de aire mezclado.
 - 4.2. Termocupla de aceite del motor.
 - 4.3. Termocupla de gases de escape

6.2 MÓDULO BOLÍVAR

El módulo Bolívar es en donde se desarrolla la alimentación eléctrica del sistema, la programación bajo el software LabVIEW student y adquiriendo las señales de la sensorica haciendo uso de un dispositivo (DAQ) tarjeta NI-6212, realizando diseños electrónicos para los sensores que requieren un pre-procesamiento en los datos entregados por los sensores.

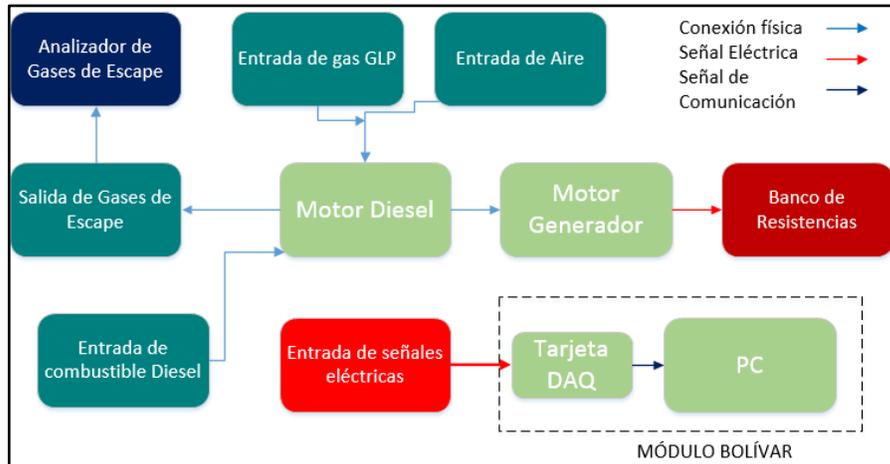


Figura 5. Diagrama de bloques Módulo Bolívar.

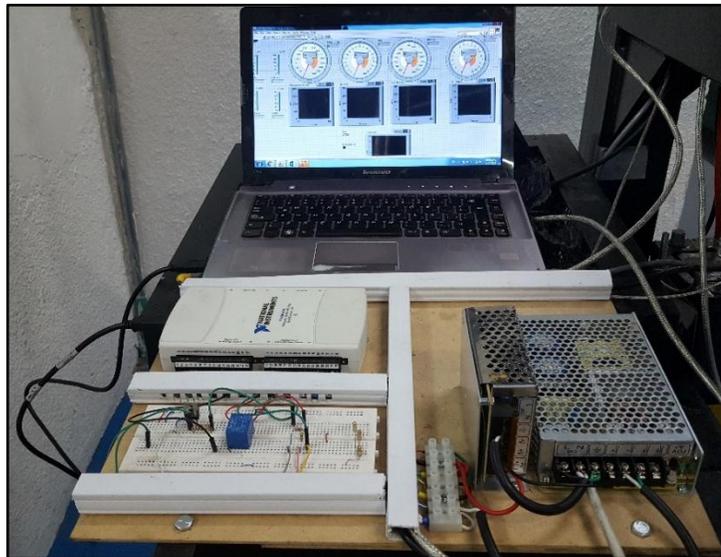


Figura 6. Fotografía de Módulo Bolívar.

6.2.1 Tarjeta DAQ.

El dispositivo DAQ actúa como la interfaz entre una computadora y señales físicas; la tarjeta usada para el proyecto es la referencia NI-6212, de propiedad de

la empresa NATIONAL INSTRUMENTS, es energizado por bus para facilidad de portabilidad; ofrece entrada analógica, entrada digital, salida digital y dos contadores de 32 bits, adicional posee un controlador NI-DAQmx para configuración de la misma.

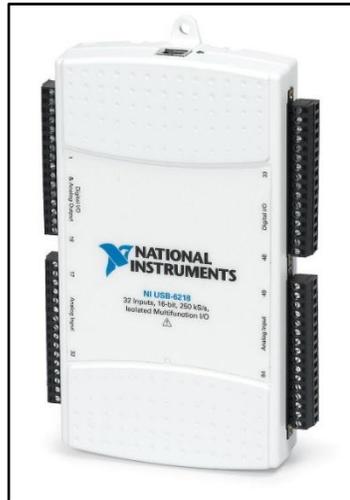


Figura 7. Tarjeta NI-6212. [19]

La tarjeta consta de:

- 16 entradas analógicas (16-bit, 400 kS/s)
- 2 salidas analógicas (16-bit, 250 kS/s)
- 32 E/S digitales
- Dos contadores de 32-bit
- NI señal de streaming de alta velocidad a través de USB; Compatible con Labview, ANSI C / C + +, C#, Visual Basic. NET y Visual Basic 6.0
- Resolución de convertidor analógico digital 16bits
- Datos de muestreo:
 - 400 kS/s máximo y como valor mínimo 0 kS/s
 - Tiempo de resolución 50 ns
 - Acople de entrada Dc
 - Rango de entrada ± 0.2 V, ± 1 V, ± 5 V, ± 10 V
 - Impedancia de entrada; On >10 G Ω in parallel with 100 pF y OFF 1.200 Ω

Adicional, es necesario el uso de DAQ Assistant, siendo una herramienta que se basa en la configuración del dispositivo, es ideal para realizar la adecuación, medición, activación y registro de datos obtenidos de la medición de los sensores

expuesto en el banco de pruebas, es un instrumento que facilita la toma de valores, pero es el primer paso para finalmente registrar los datos en tiempo real.

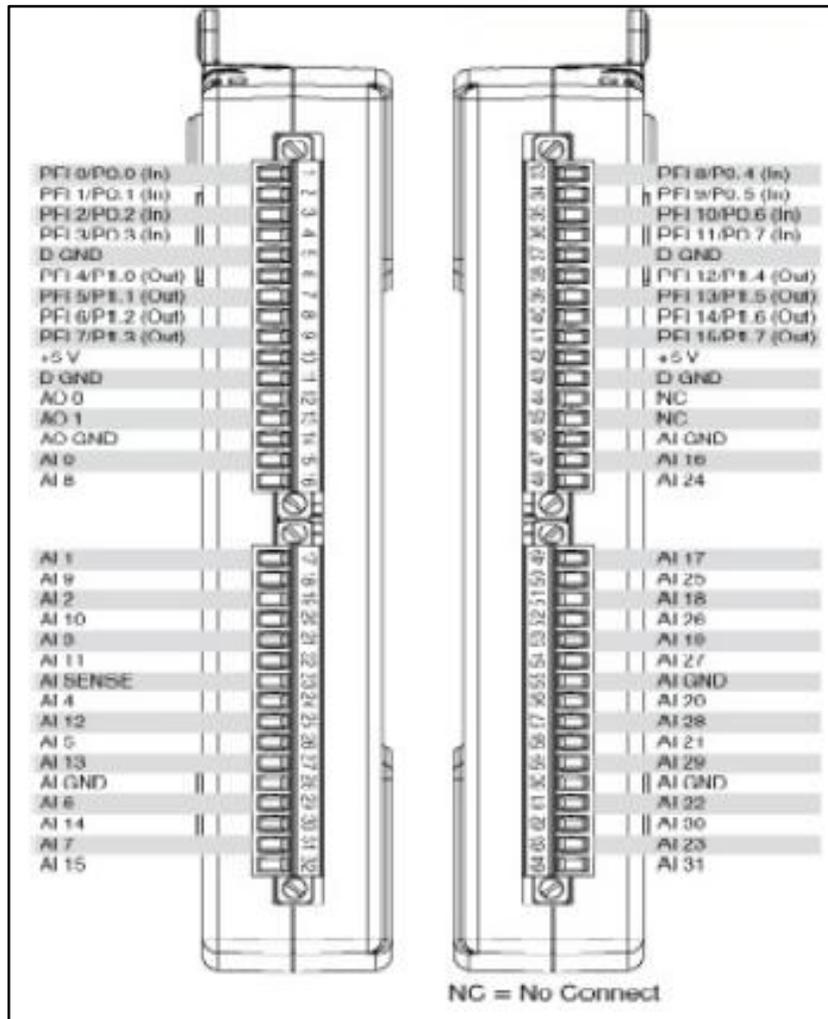


Figura 8. Representación de pines conexión, tarjeta NI-6212. [19].

La conexión física de los diferentes sensores se configura con el asistente, en la figura.8. Se puede visualizar la distribución de los pines de entrada, salida, es fundamental conocer que pines de conexión se usarán para los diferentes dispositivos de medición empleados en el proyecto, se conoce que se usarán dos encoder's, entonces se determinan que las terminales de los contadores empleados son PFI8 y PFI3, correspondientemente para encoder y módulo encoder de Sensor de par, igualmente para la salida de activación de las electroválvulas, se emplean salidas analógicas, usando el pin AO1; ya para los sensores que entreguen una diferencia de potencial en sus terminales, se conectan al conjunto de AI dev0 pines 17-32.

6.2.2 Alimentación eléctrica, y diseño de electrónica para el pre-procesamiento de señales

La alimentación eléctrica del sistema es ofrecida por 3 fuentes:

Tabla 1. Alimentación del sistema

Fuente	Tensión (V)	Corriente (A)
22 VDC	20-22 VDC	3 A
12 VDC	12 VDC	4.5 A
5 VDC	5 VDC	4.5 A



Figura 9. Fotografía fuentes alimentación sistema.

Se tienen estos 3 valores de tensión con el fin de alimentar los siguientes dispositivos:

-Sensor de par: 20 v de alimentación general, adicional 5 v para señal de rpm.

-MAF: 12 v de alimentación y 5 v adicionales de referencia.

-Electroválvulas: 12 v, para ello es necesario la segunda fuente ya que el consumo de corriente es de 3 A.

El diseño electrónico para realizar pre-procesamiento de señales y activación de electroválvulas, se basa en un divisor de tensión, resistencias en configuración pull-up, por ultimo un circuito ON-OFF por medio de un transistor MOSFET. El primer diseño es una resistencia pull-up donde lo que se busca es que esto evita

que se hagan lecturas erróneas si este pin ya no tiene nada conectado o no está recibiendo una señal.

El divisor de tensión se realiza con el fin de obtener un rango adecuado de medición para la entrada a la tarjeta que no debe superar ± 10 V. El circuito ON-OFF con MOSFET, tiene como finalidad activar las electroválvulas con la corriente suficiente para la activación de las mismas. Respectivamente en los apartados 6.3 (Módulo caldas) y 6.4(Módulo Santander), se profundizará en el diseño de los circuitos.

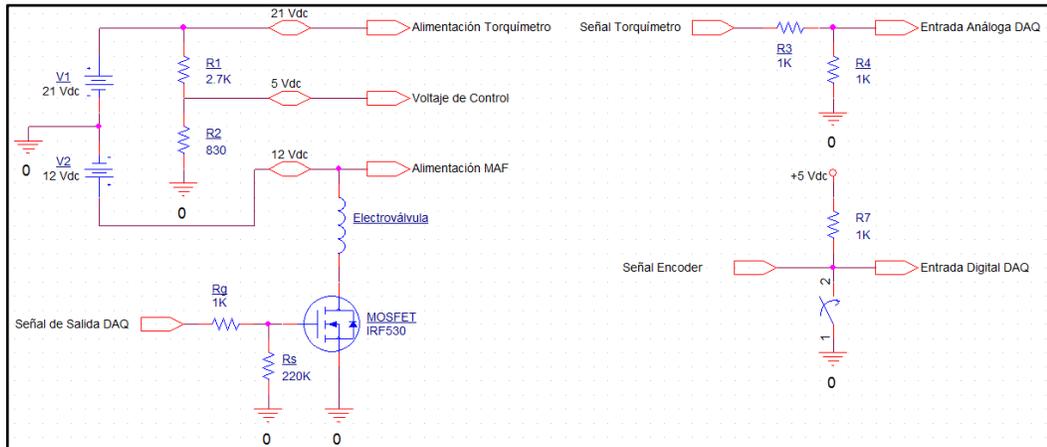


Figura 10. Alimentación y Diseño electrónico para el sistema.

6.2.3 Computador (desarrollo de software)

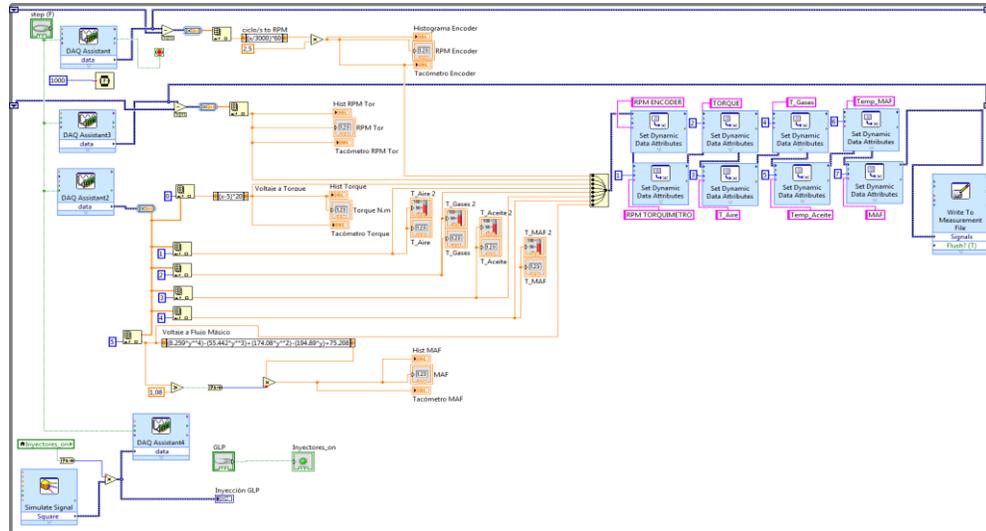


Figura 11. Programación desarrollada en LabVIEW student.

Utilizando la interfaz de desarrollo LabVIEW student, se desarrollaron módulos de software sobre la tarjeta de adquisición de datos NI-USB 6212, para obtener de forma correcta los valores de los sensores, velocidad(rpm), flujo másico de aire(kg/h), torque(Nm), temperatura(°C). Inicialmente como se busca obtener los valores en tiempo real, la programación está sobre una estructura de ejecución tipo while loop, la condición para detener el ciclo es un stop accionado por el usuario.

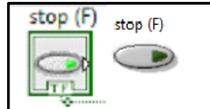


Figura 12. Acción para detener el ciclo en programa.

Se busca la facilidad de conexión y configuración para el usuario, por eso se emplea DAQ Assistant, en donde se configura el sensor a trabajar y su visualización de datos.



Figura 13. Bloque de DAQ Assistant

Para que el bloque opere correctamente se configura como entrada, salida o contador, dependiendo de la finalidad y se establece un tiempo de espera para la toma de datos, el cual es de 1 segundo como valor predeterminado, el valor de ésta espera se define por el usuario, pero con límites de tiempo menor a medición de 500 mS, ya que si se trabaja bajo éste rango, se pierde la precisión en la toma de datos de pulsos/rev del encoder; dentro de la figura 11, se observan 4 módulos.

Los dos primeros (DAQ assistant y DAQ Assistant 3) los cuales se dividen para la medición de velocidad, por medio de los contadores, la configuración se debe hacer aparte, ya que no es posible obtener dos contadores en el mismo módulo.

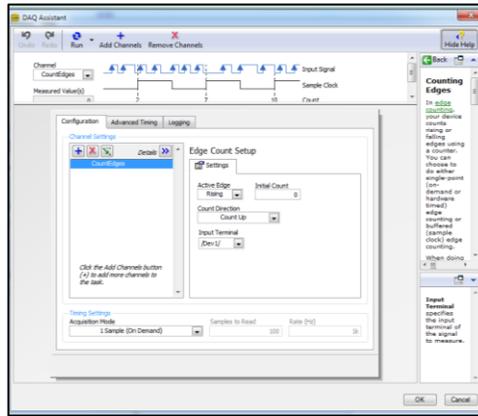


Figura 14. Menú para la configuración de los contadores

El tercero es la designación de todos los sensores que entregan un diferencial de potencial en sus terminales, en dónde se encuentra el Sensor de par, temperaturas y sensor MAF.

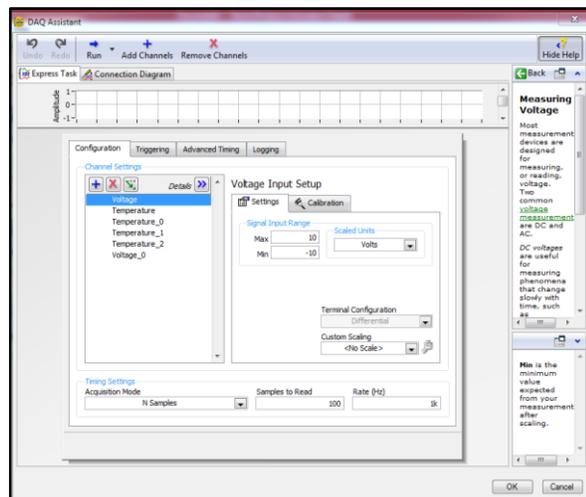


Figura 15. Menú para la configuración de sensores voltaje y temperatura.

Por último, se tiene el bloque de salida, se configura una salida analógica, con el fin de operar los inyectores con una función cuadrada.

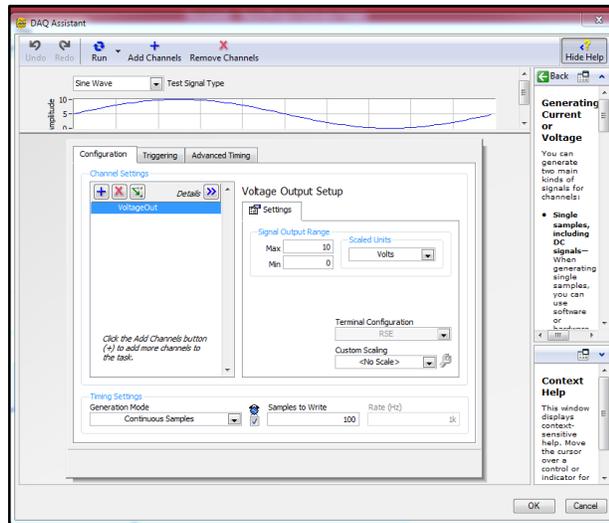


Figura 16. Menú para configuración de función de salida.

La función que obtendrá en la salida, está configurada por medio del bloque (Simulate Signal), en dónde se establece el tipo de función a trabajar, la frecuencia, amplitud y ciclo de trabajo, se dejan valores fijos la amplitud y el ciclo de trabajo, el dato de frecuencia se cambiará de acuerdo al tiempo de inyección que se requiere por parte del funcionamiento del motor.

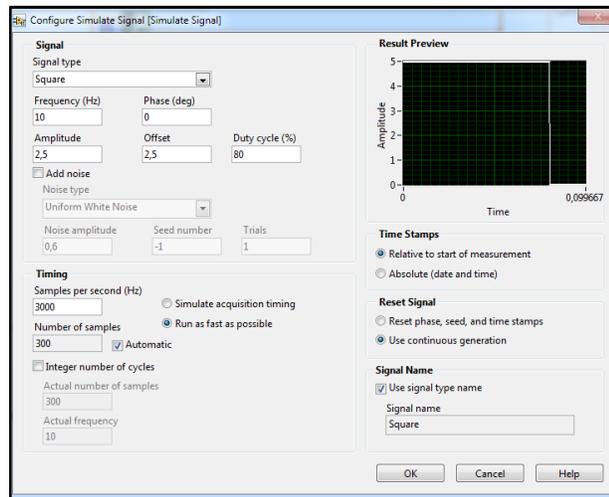


Figura 17. Menú para la selección de señal de trabajo.

Adicional a los bloques de adquisición y visualización de datos, se opera con un bloque para almacenar los datos en un documento tipo Excel, éste bloque de trabajo (Write to Measurements), se configura de manera sencilla, especificando el tipo de archivo que se requiere y el directorio para almacenar dicho documento, anexo, están los elementos para diferenciar y organizar en forma de columnas, según el número asignado a los datos.

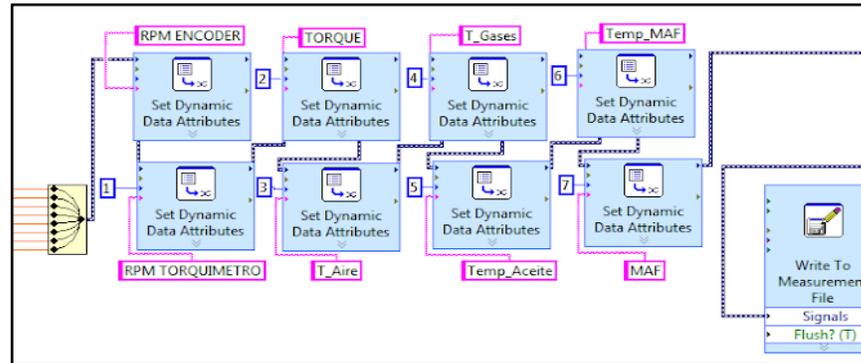


Figura 18. Bloque para el almacenamiento de los datos en un documento tipo Excel

6.2.2 Banco de resistencias, consumo potencia.

Finalmente, para verificar el trabajo realizado por el banco de pruebas, se ejecuta una prueba con un alternador y banco de resistencias, esto es con el fin de generar carga al motor y de esta forma se pueda verificar el rendimiento en términos de torque y potencia generada. El banco de resistencias está acompañado por un generador (GSa -H2-2) con las siguientes características:

Tabla 2. Características de Generador.

Frecuencia (Hz)	60 Hz
Voltaje (Vac)	120/240 V
Potencia nominal (KVA)	10 KVA
Factor potencia (Cos ϕ)	1.0

Con la configuración se logró realizar una simulación del consumo de una zona residencial con máximo de 4,82 kW, la prueba inicia desde que el motor llega a una velocidad de 3600 rpm, así se obtiene el voltaje en el generador de 220 V, y dando paso para la activación de las resistencias según la potencia que se requiera.



Figura 19. Banco de resistencias



Figura 20. Generador de 10 KVA.

A continuación, se puede observar los valores de torque requeridos para generar la potencia consumida por el banco de resistencias, dada por la siguiente ecuación:

$$P = M \cdot \omega$$

Donde,

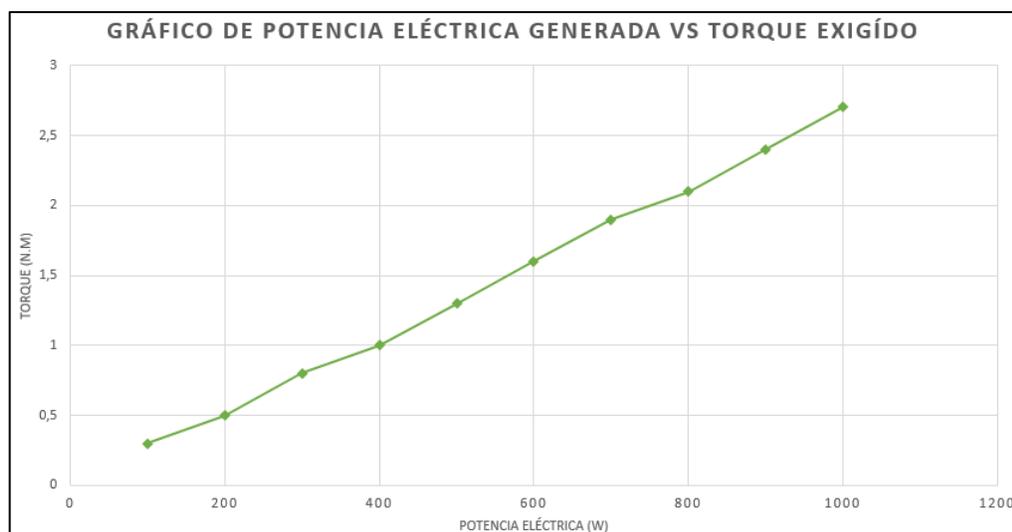
P = Potencia eléctrica (w)

M = Torque del motor (N.m)

ω = Velocidad angular (rad/s)

Tabla 3. Torque Exigido según potencia configurada.

Potencia generada (W)	Torque exigido (N.m)
1000	2,7
900	2,4
800	2,1
700	1,9
600	1,6
500	1,3
400	1
300	0,8
200	0,5
100	0,3



Gráfica 1. Gráfica de Potencia eléctrica(W) en función de Torque (N.m)

6.3 MÓDULO CALDAS

Con la finalidad de obtener las mediciones correspondientes de una segunda medición de velocidad (rpm), torque(Nm) y flujo másico de aire (Kg/h) para el banco de pruebas de motores de combustión interna, para ellos los sensores usados son Sensor de par y sensor MAF, éste primero cuenta con la capacidad de sensar tanto el momento de fuerza como las revoluciones por minuto del motor al momento de realizar trabajo, el segundo es un instrumento de medición con la precisión de registrar el flujo real de masa de aire y adicional enviar una señal eléctrica, para un uso correcto del Sensor de par es fundamental desarrollar un

circuito completamente analógico con objeto de, que los niveles de voltaje no sobrepasen la entrada a la tarjeta NI-USB 6212, cómo se explicó en el apartado del módulo bolívar.

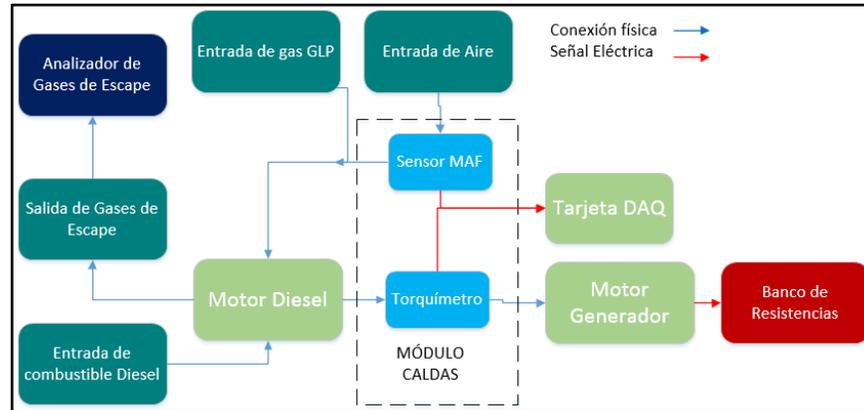


Figura 21. Diagrama de bloques Módulo Caldas



Figura 22. Fotografía de Módulo Caldas

6.3.1 Sensor MAF

Inicialmente fue necesario desarrollar una prueba para conocer la relación de voltaje con respecto al flujo másico (calibración del sensor) del aire de admisión, el proceso fue realizado en un túnel de viento 38 m/s.

Las características del sensor (Bosch 0 280 218 089),

Presión atmosférica: 74,6 kPa

Diámetro: 61 mm

Los datos de comparación con el sensor calibrado son:

Tabla 4. Datos a comparar con sensor calibrado.

Manual	
flujo másico [kg/h]	V
8	1,239
10	1,3644
15	1,5241
30	1,8748
60	2,371
120	2,9998
250	3,7494
370	4,1695
480	4,4578

Los datos adquiridos en la prueba, después de realizar 3 tomas diferentes de medición:

Tabla 5. Tabla de datos primera medición

Sensor calibrado prueba 1							
Voltaje [V]	T [°C]	rpm	dens [kg/m ³]	velocidad [m/s]	caudal [m ³]	flujo másico [kg/s]	flujo másico [kg/h]
1,16	18,8	150	0,89032476	1,2	0,00350696	0,003122333	11,24039956
1,24	18,8	182	0,89032476	1,6	0,004675947	0,004163111	14,98719942
1,325	18,8	208	0,89032476	2,1	0,00613718	0,005464083	19,67069923
1,585	18,8	298	0,89032476	3,8	0,011105373	0,009887389	35,59459861
1,998	18,8	475	0,89032476	7,4	0,021626253	0,019254388	69,3157973
2,66	18,8	837	0,89032476	17	0,049681932	0,044233054	159,2389938
3,002	18,8	1130	0,89032476	24,1	0,070431444	0,062706859	225,7446912
3,2	18,8	1388	0,89032476	30,5	0,08913523	0,079359302	285,6934889
3,38	18,8	1650	0,89032476	36,2	0,10579329	0,094190385	339,0853868

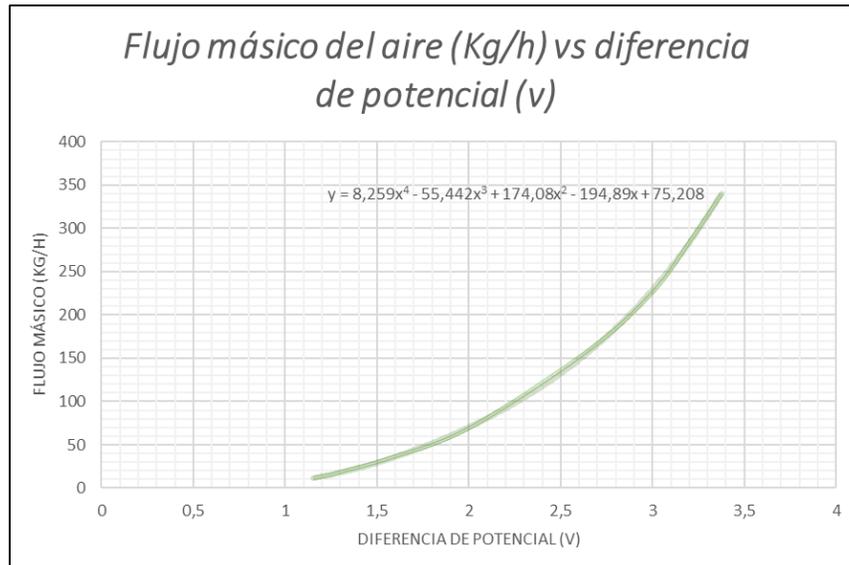
Tabla 6. Tabla de datos segunda medición.

Sensor calibrado prueba 2							
Voltaje [V]	rpm	T [°C]	dens [kg/m ³]	velocidad [m/s]	caudal [m ³]	flujo másico [kg/s]	flujo másico [kg/h]
1,154	150	18,8	0,89032476	1,2	0,00350696	0,003122333	11,24039956
1,244	182	18,9	0,890019906	1,6	0,004675947	0,004161685	14,98206769
1,325	208	18,9	0,890019906	2,1	0,00613718	0,005462212	19,66396385
1,575	298	18,9	0,890019906	3,7	0,010813126	0,009623898	34,64603154
1,997	475	18,9	0,890019906	7,3	0,021334006	0,01898769	68,35568385
2,65	837	18,9	0,890019906	17,1	0,049974178	0,044478013	160,1208485
3	1130	18,9	0,890019906	24,2	0,070723691	0,062945493	226,6037738
3,2	1388	18,9	0,890019906	30,4	0,088842984	0,079072024	284,6592862
3,374	1650	18,9	0,890019906	36,4	0,106377783	0,094678344	340,84204

Tabla 7. Tabla de datos tercera medición.

Sensor calibrado prueba 3							
Voltaje [V]	rpm	T [°C]	dens [kg/m ³]	velocidad [m/s]	caudal [m ³]	flujo másico [kg/s]	flujo másico [kg/h]
1,153	150	18,7	0,890629822	1,2	0,00350696	0,003123403	11,24425099
1,245	182	18,7	0,890629822	1,6	0,004675947	0,004164537	14,99233466
1,32	208	18,7	0,890629822	2,1	0,00613718	0,005465955	19,67743924
1,57	298	18,8	0,89032476	3,7	0,010813126	0,009627194	34,65789865
2	475	18,9	0,890019906	7,3	0,021334006	0,01898769	68,35568385
2,65	837	18,9	0,890019906	17,1	0,049974178	0,044478013	160,1208485
2,999	1130	18,9	0,890019906	24,2	0,070723691	0,062945493	226,6037738
3,2	1388	18,9	0,890019906	30,4	0,088842984	0,079072024	284,6592862
3,37	1650	18,9	0,890019906	36,4	0,106377783	0,094678344	340,84204

Con las tablas anteriores se obtuvo la curva característica del sensor y su ecuación correspondiente:



Gráfica 2. Comportamiento del sensor, flujo másico del aire vs diferencia de potencial.

Ecuación 1. Comportamiento de sensor MAF

$$\text{Flujo másico} = 8.259 V^4 - 55.442 V^3 + 174.08 V^2 - 194.89 V + 75.208$$

Para lograr visualizar los datos en el software de labview se realiza el bloque de medición MAF, se configura el dispositivo DAQ en las terminales 31 y 32 como medición de voltaje, para obtener el valor en tiempo real se anexa como operación la ecuación.1, para que al realizar el cálculo con la diferencia de potencial que hay en los terminales se obtenga el valor verdadero del flujo másico del aire.

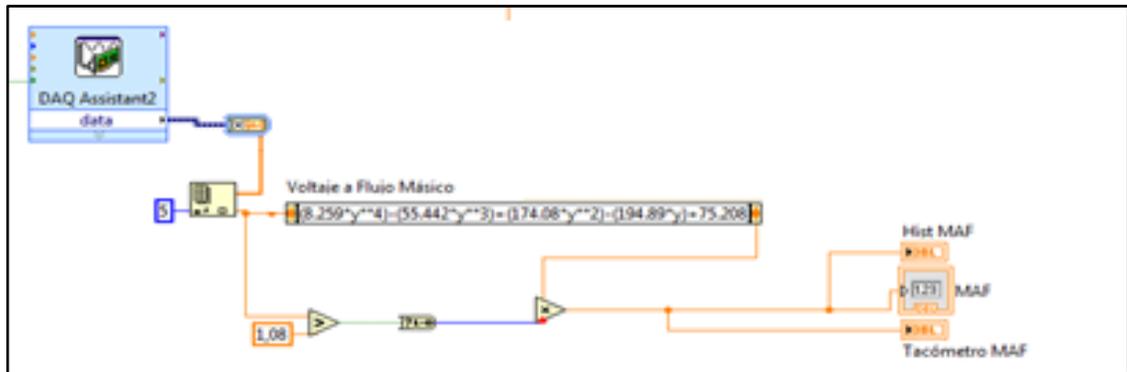


Figura 23. Bloque LabVIEW para medición de MAF.

Se adicionan elementos visuales (Histograma, Tacómetro y valor numérico), para que el usuario pueda observar los datos de forma correcta y precisa.

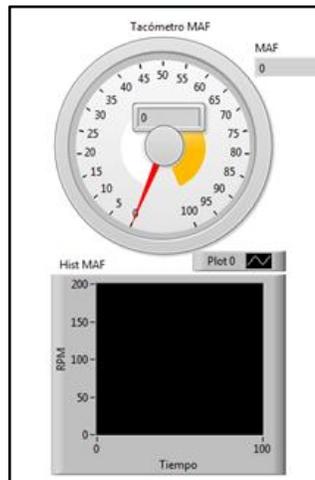
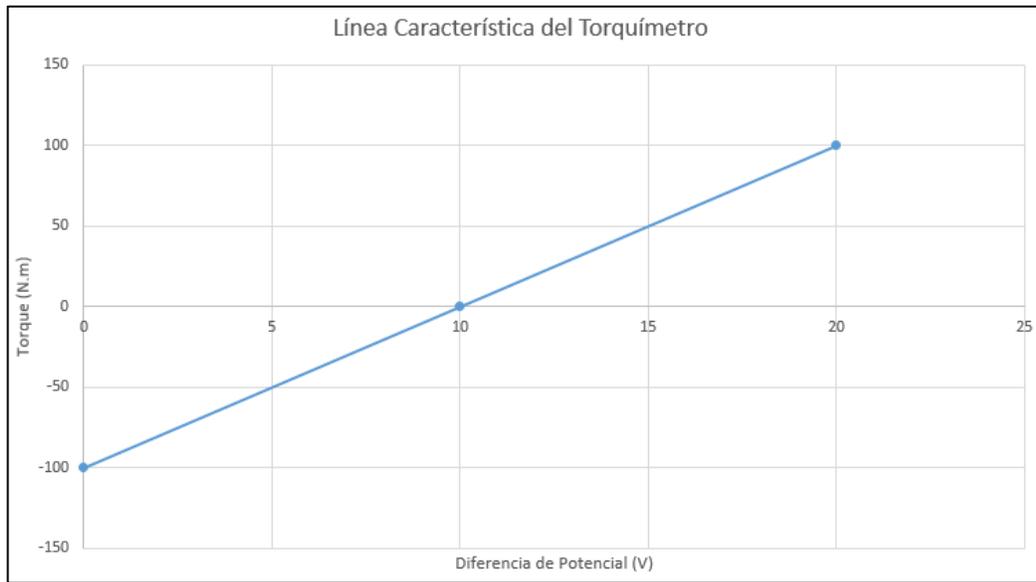


Figura 24. Bloque LabVIEW para visualización de MAF.

6.3.2 Sensor de par

Es un transductor que convierte la torsión mecánica de entrada en una señal eléctrica, entregando diferencial de potencial en rangos de 0 ...20 v, y entrada de torque de 1... 100 N.m, con el sensor utilizado (Kistler 4520A), el objetivo principal es la medición de torque, pero adicional cuenta con un encoder de resolución 60 pulsos/rev. La diferencia de potencial entregada por el sensor se registra de la siguiente manera:

- 0 voltios - 100 N.m valor negativo, ya que está en sentido de giro contrario
- 10 voltios - 0 N.m
- 20 voltios - 100N.m



Gráfica 3. Línea Característica del Sensor de Par.

Para obtener los datos correctos de la medición sin sobrepasar los límites de ingreso de voltaje a la tarjeta DAQ, se realizó un diseño de divisor de tensión, se debe aplicar un pre-procesamiento de datos para obtener los niveles de voltaje en el rango de ± 10 v, ya que la salida que genera el sensor, está en valores de 0 a 20 v para ello se usó un divisor de tensión figura. 23, la configuración del dispositivo se realiza en los pines de entrada 17 y 18, siendo el (+) y (-) correspondiente, ajustando el conteo hasta la detección de flancos de subida.

Para obtener los valores de rpm, la conexión está dada como salida digital de colector abierto, con una resistencia interna de 1 k Ω a 5 VDC (pull up), entonces la conexión se realiza en el segundo contador disponible de la tarjeta DAQ, PFI3.

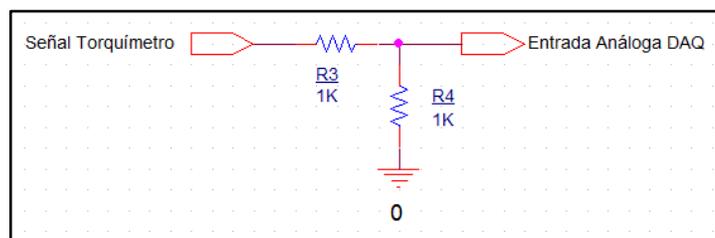


Figura 25. Diseño de divisor de tensión para salida de sensor de par.

Ecuación 2. Diseño divisor de tensión.

$$V_{DAQ} = \frac{(V_{\text{torquímetro}} \times R4)}{R3 + R4} = 10 \text{ V} = \frac{(20 \text{ V} \times 1\text{K}\Omega)}{R3 + 1\text{K}\Omega}$$

$$R3 = 1\text{K}\Omega$$

El bloque para el torque, está compuesto del contador para la velocidad, y un sensor de voltaje para obtener el valor del torque, es necesario emplear túneles de estructuras, para que cada vez que ejecute una medición del contador, sólo tome la última medición y no realice una suma entre toma de datos, adicional se emplea una operación con el valor del Sensor de par, para obtener el valor real, de acuerdo a las modificaciones impuestas por el divisor de tensión: $(\text{Valor}-5) * 20$

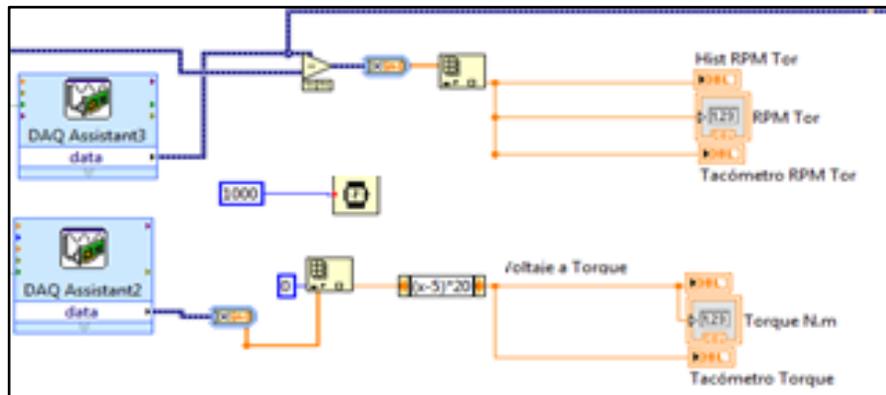


Figura 26. Bloque LabVIEW para la medición de torque y velocidad.

Se adicionan elementos visuales (Histograma, Tacómetro y valor numérico), para que el usuario pueda observar los datos de forma correcta y precisa, para las dos señales que entrega el sensor de par.

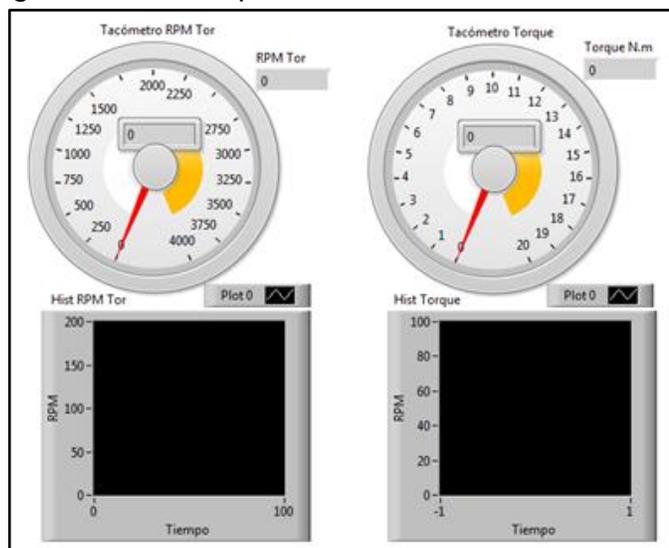


Figura 27. Bloque LabVIEW para la visualización de torque y velocidad.

6.4 MÓDULO SANTANDER

Es necesario conocer la velocidad de trabajo del motor, se realiza con el sensor encoder generando pulsos, codificando el movimiento rotatorio mecánico a

señales eléctricas capaces de ser captadas por el dispositivo DAQ, de igual forma se requiere la activación de las electroválvulas con el fin de realizar el proceso de inyección de GLP, en donde el procedimiento debe realizarse antes de llegar al punto muerto superior, por eso es necesario conocer el número de pulsos por revolución.

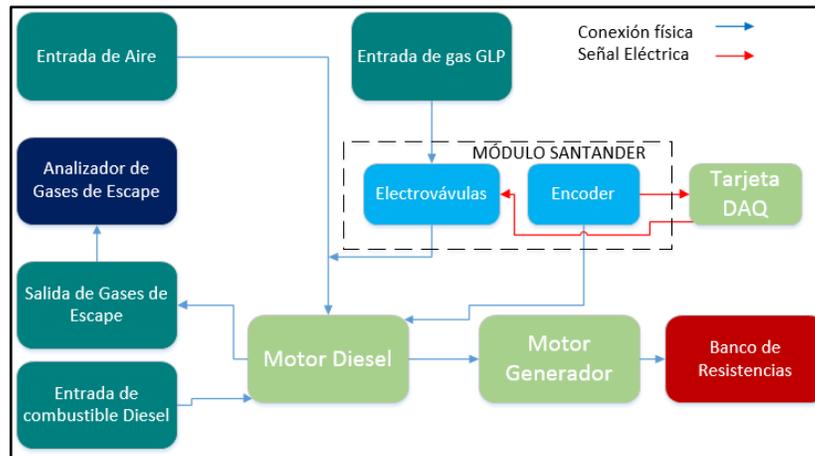


Figura 28. Diagrama de bloques Módulo Santander.



Figura 29. Fotografía de Módulo Santander

El sensor de rpm o encoder nos brindará la información de velocidad de nuestro motor, el medidor de RPM nos genera salida digital con pulsos de 5 voltios, basándonos en la información de la hoja técnica del sensor 3000 pulsos equivale a un giro completo del motor, con lo anterior se establece la relación para pasar de ciclos por unidad de segundos a revoluciones por minuto de nuestro dato x que nos entrega el encoder.

Ecuación 3. Ecuación para obtener valor de velocidad según pulsos de encoder.

$$x \left(\frac{\text{ciclos}}{s} \right) x \left(\frac{60s}{1\text{mnt}} \right) x \left(1 \frac{\text{rpm}}{3000\text{ciclos}} \right) = n \text{ rpm}$$

La ecuación anterior nos brinda el cálculo para determinar las revoluciones por minuto que está leyendo el encoder, este cálculo algebraico se realiza en el software LabView para la visualización del dato, se anexa los túneles de estructuras, para que cada vez que ejecute una medición del contador, sólo tome la última medición y no realice una suma entre toma de datos.

Se adicionan elementos visuales (Histograma, Tacómetro y valor numérico), para que el usuario pueda observar los datos de forma correcta y precisa de la velocidad de trabajo del encoder.

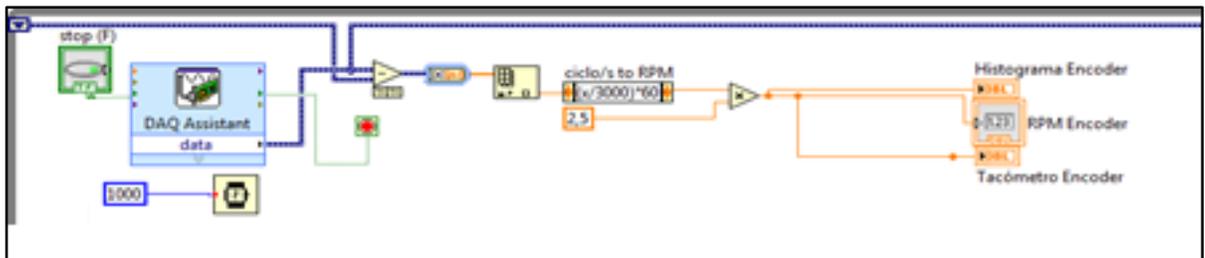


Figura 30. Bloque LabVIEW para la medición de velocidad.

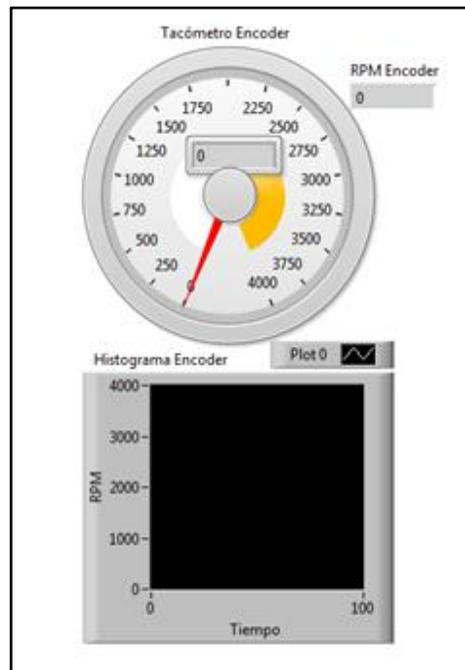


Figura 31. Bloque LabVIEW para la visualización de velocidad.

En la anterior figura se observa el desarrollo del diagrama en bloques en el software LabView en el cual se tiene la lectura del dato o contador con el DAQ Assistant y nuestro tiempo de muestreo de 1000 milisegundos, pasa por un restador para que reinicie el contador cada segundo y registre de nuevo el dato a leer, después de esto, cambiamos el tipo de variable y se coloca un bloque Array

para que nos muestre el primer arreglo del vector de entrada. A continuación, se realiza el cálculo de la ecuación para las rpm y posteriormente se pasa a visualizar ésta valor en un histograma y un tacómetro y una ventana numérica con el valor que se está registrando, estos datos los podemos observar en el panel frontal del software LabView. Revisando los criterios de funcionamiento del encoder, el sensor no puede llegar a 3600 RPM porque se dañaría, lo que tocó realizar una modificación ya que, el motor generador es de 3600 RPM, por consiguiente, se realiza un acople de piñón reductor el piñón reductor es de factor 2.5, por lo que la relación sería de la siguiente forma.

Ecuación 4. Relación RPM con reducción.

$$RPM\ real = RPM\ Encoder * 2.5$$

Con la ecuación anterior ya sabremos las revoluciones reales de nuestro generador, es decir, si el motor generador está a 3600 RPM gracias al piñón reductor, el encoder estaría registrando un valor de 1440 RPM, con esto aseguramos que el encoder no se averíe. Esto en el diagrama de bloque del software traduce a colocar un multiplicador con un valor constante de 2,5 a la salida de la ecuación para tener la visualización real de las RPM del generador

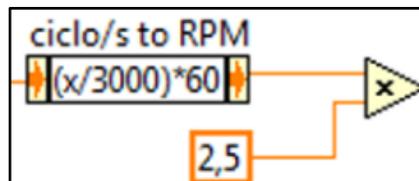


Figura 32. Bloque para obtener las revoluciones reales del rpm.

Para la conexión a la tarjeta, se emplean los datos expuestos por el datasheet del dispositivo para mirar los cables que se usaran para alimentar el sensor y para adquirir la señal que se requiere con base a esto, en la siguiente figura se observan las señales que podemos obtener del sensor.

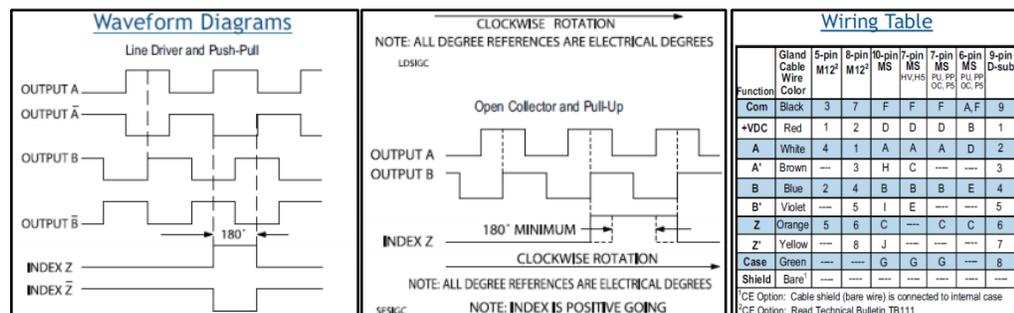


Figura 33. Tipo de señales y conexión de encoder.

Según la tabla que aparece en la figura anterior extraída del datasheet nos brinda la información del color de los cables y su funcionamiento en el sensor, para nuestro caso sólo necesitamos obtener la salida A que corresponde al cable blanco, el cable rojo que es el de alimentación y el cable verde y negro que irán a común (tierra).

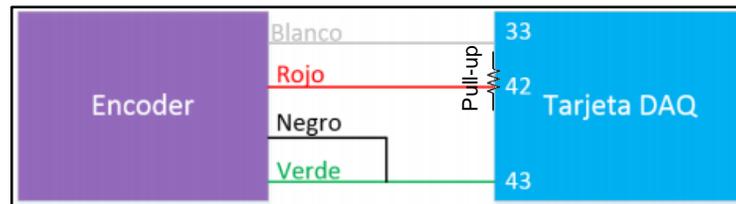


Figura 34. Diagrama de bloques para la conexión del encoder con DAQ.

Es necesario emplear una configuración de pull-up con el objetivo de obtener la forma de pulsos digitales como entrada al contador de la tarjeta DAQ, en la posición PFI8 para la medición de las rpm en el encoder.

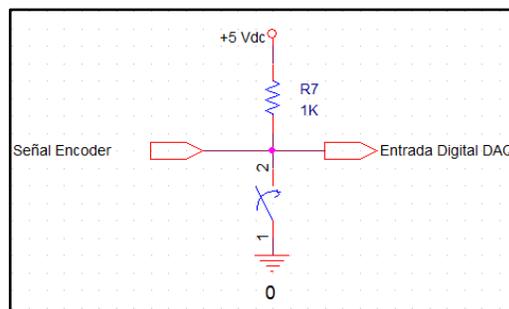


Figura 35. Diseño de configuración pull-up para encoder.

Activación de electroválvulas:

Son electroválvulas de sistema ON-OFF, con alimentación de 12 VDC y consumo de 3 A en su activación, se maneja por medio de señales cuadradas, que no superen el nivel alto por más de 3 segundos, para ello se usará la salida analógica de la DAQ AO1 pin 13, en donde la señal de salida se tomará del bloque simulación de funciones, como señal cuadrada, con ciclo útil de 80%, esto hace parte del circuito switch ON-OFF, desarrollado con MOSFET IRF530, el objetivo es que el circuito soporte la carga generada por las electroválvulas, la configuración switch es necesario considerar las regiones de corte y saturación en donde, si el voltaje entre compuerta y la fuente es menor que el voltaje de umbral (expuesto por el datasheet) 4 V, el transistor se encuentra en corte, cuando el voltaje sea suficientemente grande para tener un corto circuito entre fuente y drenaje, estará en modo saturación. La señal emitida por la salida de la tarjeta

está en niveles de 0-5 Voltios, se entiende que estos niveles de tensión generan la operación de corte y saturación del MOSFET IRF530.

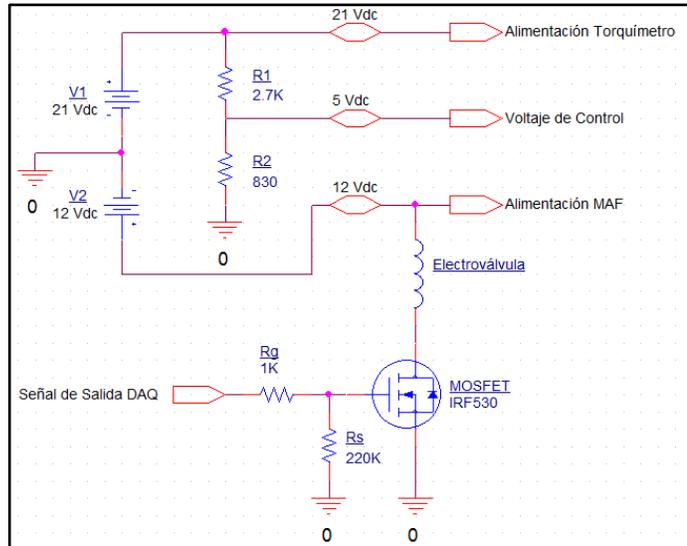


Figura 36. Diseño de configuración MOSFET ON-OFF.

Adicional en el diagrama frontal del programa se creó un botón de activación para que el usuario pueda determinar cuándo generar la inyección por medio del sistema GLP.

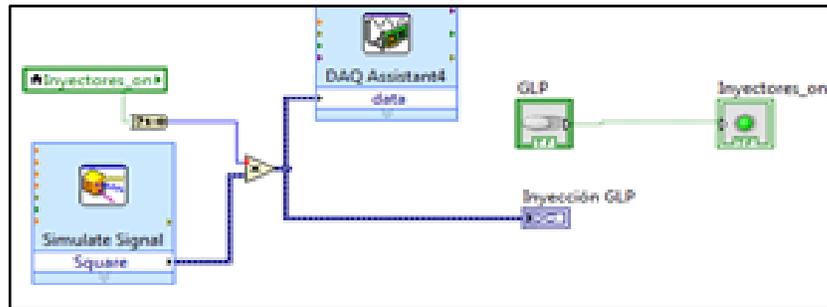


Figura 37. Bloque LabVIEW para generar señal de activación de los inyectores.

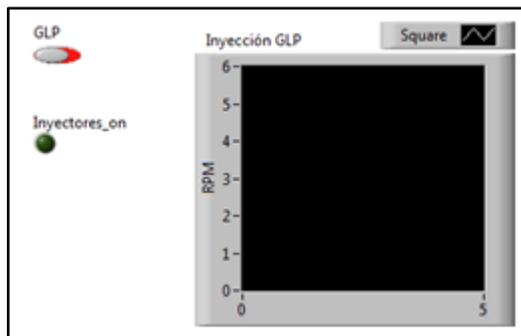


Figura 38. Bloque LabVIEW para la visualización de señal de inyectores, y activación por usuario.

6.5 MÓDULO CÓRDOVA

Este módulo cuenta con el sistema de temperaturas de todo el banco de pruebas, estas temperaturas como se mencionaron antes, son sensadas por medio de termocuplas tipo k de inmersión, las cuales obtendrán y visualizarán temperaturas en tres áreas del motor en las cuales es importante conocer su estado, como lo es la temperatura de entrada de aire, temperatura del aceite y temperatura de gases de escape.

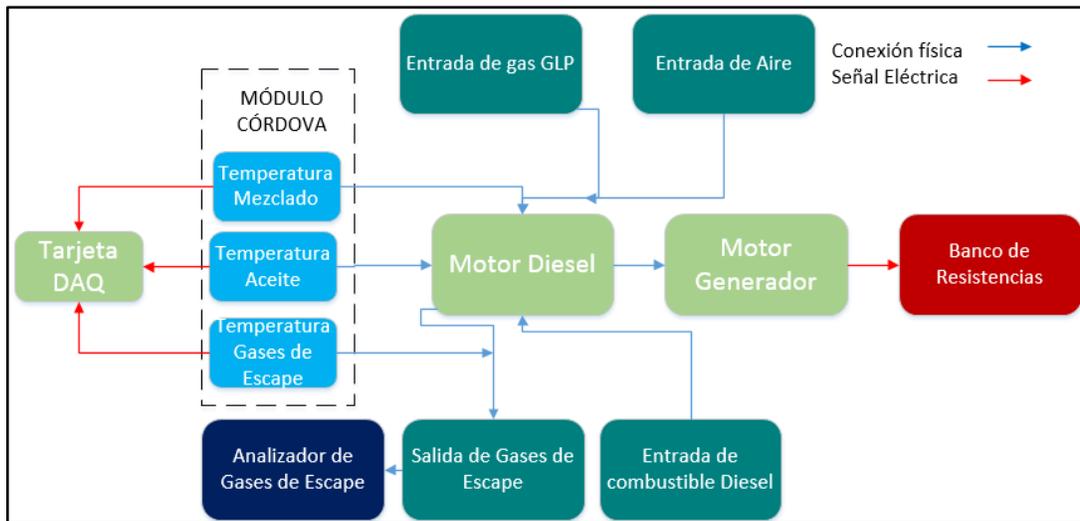


Figura 39. Diagrama de bloques de Módulo Córdoba

En la figura 39 se ilustra el diagrama en el cual muestra los puntos en que se están midiendo las temperaturas. A continuación, se observa las conexiones reales de las termocuplas en el banco de pruebas del motor de combustión interna.

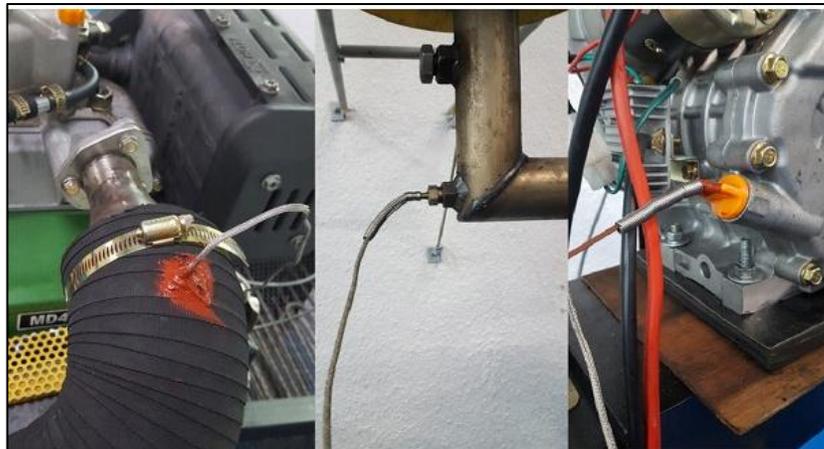


Figura 40. Fotografía de Módulo Córdoba

Se obtendrán y visualizarán temperaturas en tres áreas del motor en las cuales es importante conocer su estado, como lo es la temperatura de entrada de aire, temperatura del aceite y temperatura de gases de escape, utilizando termocuplas tipo k de inmersión.

En el software LabVIEW se crea un módulo de DAQ Assistant y se selecciona la medición de termocupla tipo K, y habilitamos las entradas análogas 15 y 16 para un termocupla, 17,18 para la termocupla número 2, y para la última se usan las entradas, al realizar esta configuración el dato de salida de ese bloque dará un vector con los valores de las tres mediciones, por éste motivo se asigna un cambio de tipo de dato un bloque de Array, se hace un proceso de separación de datos entregados por los 3 sensores tipo K.

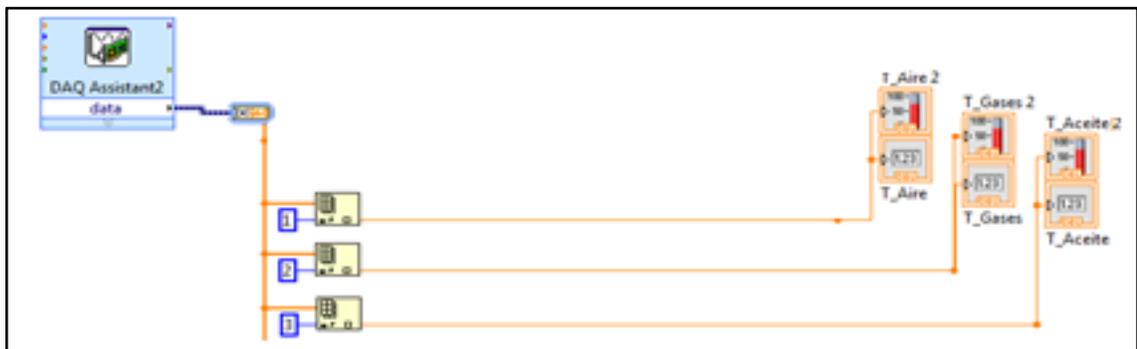


Figura 41. Bloque LabVIEW para la medición de temperatura.

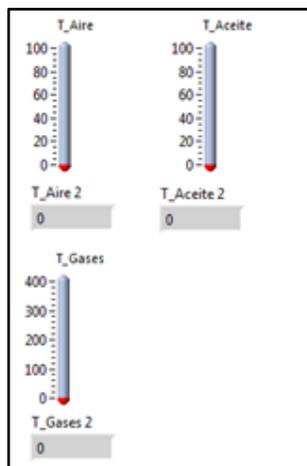


Figura 42. Bloque LabVIEW para la visualización de temperatura.

La conexión de estos dispositivos es muy simple, cuentan con dos cables para la conexión, por lo general vienen identificados con los colores rojo y amarillo, rojo y naranja, etc. Es importante saber que el cable identificado con el color rojo es la entrada negativa y el otro es positivo, con esta información se realiza la conexión de las termocuplas a la tarjeta de adquisición de datos:

Tabla 8. Conexión de termocuplas.

Temperatura de admisión de aire:	pinos +21 -22
Temperatura de gases de escape:	pinos +24 -25
Temperatura de aceite:	pinos +26-27

6.5.1 CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE DE LAS TERMOCUPLAS

Varias incertidumbres de calibración deben evaluarse para determinar la incertidumbre total de un sistema de calibración de termocuplas, para el cálculo y análisis en este sistema de temperaturas. A continuación, se muestra la tabla de evaluación de incertidumbre de este sistema para el módulo Córdoba

Tabla 9. Incertidumbre estándares de módulo temperaturas.

Incertidumbres estándares	Código	Incertidumbre T_Aire	Incertidumbre T_Gases	Incertidumbre T_Aceite
Ruido de medición/estabilidad de referencia	A1	0,149527667	0,130225283	0,176593563
Estadística estándar de verificación	A3	0,191304348	0,191304348	0,191304348
Incertidumbre estandar total		0,340832015	0,321529631	0,367897911

A1. RUIDO DE LAS MEDICIONES

Se refiere al ruido de las mediciones como la incertidumbre provocada por el ruido o la inestabilidad de las lecturas realizadas. las mediciones se monitorean para verificar la estabilidad (la desviación estándar) en esta prueba, para esto se usa un límite de desviación estándar. La siguiente ecuación demuestra cómo se efectúa este cálculo:

Ecuación 5. Incertidumbre por ruido de la medición.

$$U_{A1} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

- U_{A1} : incertidumbre por el ruido de la medición (en °C)
- s : desviación estándar de la medición (en °C)
- n : cantidad de muestras (30 o más)

Tabla 10. Incertidumbre ruido de módulo temperaturas.

Incertidumbre ruido		
T_Aire	T_Gases	Temp_Aceite
0,149527667	0,130225283	0,176593563

Para el cálculo de esta incertidumbre se seleccionaron 30 datos de los valores de temperatura del anexo x; se empieza calculando la media de la población que es la relación entre la sumatoria de los datos de obtenidos y el número de muestras

Ecuación 6. Media para módulo de temperaturas.

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{n}$$

En la siguiente tabla se observa los valores calculados de la media para cada una de las termocuplas

Tabla 11. Media estadística de módulo temperaturas.

Media estadística		
T_Aire	T_Gases	Temp_Aceite
27,04104773	52,3749267	41,905308

A continuación, se aplica la fórmula de la desviación estándar:

Ecuación 7. Desviación estándar.

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

Tabla 12. Desviación estándar de módulo temperaturas.

Desviación estandar		
T_Aire	T_Gases	Temp_Aceite
0,818996762	0,713273252	0,967242781

A3. ESTADÍSTICA ESTANDAR DE VERIFICACIÓN

Es el cálculo de precisión de la lectura de la sonda de referencia,

Ecuación 8. Incertidumbre por estadística estándar.

$$U_{B1} = \frac{U_V}{S_{MJ}}$$

- U_{B1} : Incertidumbre por estadística estándar de verificación (en °C)
- U_V : Incertidumbre de la medición del voltaje (mV)
- S_{MJ} : Sensibilidad de la termocupla tipo K (en mV/ °C)

Para U_V se tiene en cuenta el valor de voltaje que arroja la termocupla tipo K a 1000° que es de 41,4 mV [21], junto con parámetros estándar dando por precisión específica en este rango a $\pm 0,0049$ mV. La sensibilidad de la termocupla se refiere al cambio en el voltaje (mV) por el cambio de 1 °C ($\Delta V/\Delta T$). La termocupla tipo K cuenta con una sensibilidad de $\pm 0,0042$ mV/°C.

Tabla 13. Incertidumbre estándar de módulo temperaturas.

Incertidumbre estándar		
T_Aire	T_Gases	Temp_Aceite
0,191304348	0,191304348	0,191304348

CONCLUSIONES

Para la instrumentación del banco de pruebas, fue necesario estudiar y comprender los conceptos básicos del funcionamiento de un motor de combustión interna para conocer las variables implicadas en el rendimiento del motor y en base a esto, se diseñó un software que permitió la adquisición, procesamiento y visualización de las señales de los sensores utilizados, usando los elementos de National Instruments, software y hardware, se logró obtener el registro y almacenamiento de los mismos, en tiempo real, durante las pruebas realizadas con el banco.

Se garantizó confiabilidad en la información, ya que se corroboraron los datos obtenidos con equipos de medición alternos, también por el manejo correcto de los sensores, alimentándose con los voltajes correspondientes y conservando los rangos de operación de los mismos

Finalmente, la programación desarrollada en LabVIEW fue totalmente gráfica, por lo cual se empleó el módulo DAQ-Assistant, considerando un elemento de facilidad de operación para configuración y selección de tipo de sensor conectados en las terminales de NI-6212, obteniendo los valores en forma de vectores y visualizando el último valor adquirido, adicional se vio necesario usar operaciones matemáticas básicas y/o bloques de funciones, con el fin de adquirir los datos reales y en tiempo real de los sensores, se seleccionó un periodo de adquisición de datos, de cada segundo garantizando así que al medir la variable de velocidad, se puedan obtener el número correcto de pulsos por revolución.

RECOMENDACIONES

Para este gran proyecto se desea que esté en una mejora continua; por lo que se recomienda a futuros estudiantes de electrónica que deseen participar en él, la complementación del montaje del cableado, perfilado y aislado de las partes mecánicas que puedan afectarlos. También, es necesario instalar un tablero de circuitos que cumpla el grado de protección IP 65 para no tener filtraciones de líquidos y polvo que causen daños a los componentes electrónicos.

Ya con este tablero, sería de buen uso incluir una tarjeta impresa PCB para mayor estética, reducir impedancias y ruidos generados por la cantidad de cables y conexiones en la protoboard, otra recomendación sería realizar un control automático de temperatura para el sistema de calentamiento de la admisión de aire y por último poder visualizar los datos experimentales en un dispositivo externo al PC central.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. García M. Alexander (Investigador principal), PROPUESTA DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN” Título: Evaluación de la viabilidad técnica de motores HCCI operando con GLP para la generación eléctrica.”, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá Colombia, 2017, Pág, 2
- [2]. García M. Alexander (Investigador principal), PROPUESTA DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN” Título: Evaluación de la viabilidad técnica de motores HCCI operando con GLP para la generación eléctrica.”, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá Colombia, 2017, Pág, 3
- [3]. Torres M. Daniela, ESTEC Conference Proceedings, MONITOREO DE CONDICIÓN EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA MONOCILÍNDRICOS CON BASE EN ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES EXPERIMENTALES, Science and Technology conference, febrero 2017.
- [4]. Lopez Ramiro, DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA, Tesis Pregrado, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, 2015.
- [5]. Pérez R. Alejandro, SISTEMA DE CONTROL, INYECCIÓN Y ENCENDIDO, PARA MOTORES TÉRMICOS Y ALTERNATIVOS DE CICLO OTTO BASADO EN PROGRAMACIÓN ABIERTA BAJO LABVIEW, Tesis Pregrado, Escola Tecnica Superior d’Enginyeria Industrial de Barcelona, Barcelona 2007.
- [6]. Dimosthenis C. Katsis DEVELOPMENT OF A TESTBED FOR EVALUATION OF ELCTRIC VEHICLE DRIVE PERFORMANCE, Tesis Maestría, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia 1997.
- [7]. Stone, R, Introduction to internal combustion engines, Palgrave Macmillan, 2012.
- [8]. Conesa A. Juan, MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA, 2011, Tomado de: core.ac.uk/download/pdf/16369305.pdf, Pág 6
- [9]. Conesa A. Juan, MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA, 2011, Tomado de: core.ac.uk/download/pdf/16369305.pdf , Pág 7-8
- [10]. Marquez B. Freddy- Rojas T. Sneider, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES MONOCILINDRICOS DE CUATRO TIEMPOS A GASOLINA, Tesis Pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniería y Administración, Bucaramanga 2011
- [11]. Henandez R. Alexander- Portillo O.Cristian, DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE UN MOTOR DIESEL, Tesis Pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana Escuela de Ingeniería y Administración, Bucaramanga 2011
- [12]. Qué es Adquisición de Datos?, NATIONAL INSTRUMENTS, Tomado de: www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/.

- [13]. ¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?, ARIAN control & instrumentación, Nota técnica 2, Tomado de: www.arian.cl/espanol/products.htm
- [14]. WEST INSTRUMENTS DE MEXICO, S.A, MANUAL DE APLICACIÓN DE ENCODERS “Una guía de referencia y tutoría sobre encoders para control de movimiento: Tipos, tecnologías, aplicaciones e instalaciones”, México.
- [15]. Mecafenix Frank, INGENIERÍA MECAFENIX, Encoder ¿Cómo funciona? Y sus tipos. Abril 2017, Tomado de: www.ingmecafenix.com/automatizacion/encoder/
- [16]. SENSING sensores de medida, SENSORES DE PAR Y TORSIÓN, ESPAÑA,2018, Tomado de: sensores-de-medida.es/medicion/sensores-y-transductores/sensores-de-par-y-torsion/
- [17]. Muñoz J. Juan Antonio, PUESTA EN MARCHA DE UN BANCO DE ENSAYOS DE VEHICULOS HIBRIDOS “5. SENSOR DE PAR”, Tesis pregrado, Universidad de Sevilla, España,2017.
- [18]. Augeri Fernando, EL SENSOR MAF, CISE electrónica, septiembre 2010, Tomado de: www.cise.com/portal/notas-tecnicas/item/142-el-sensor-maf.html.
- [19]. ¿Qué es Adquisición de Datos? Dispositivos y Tarjetas DAQ- PC y Software, NATIONAL INSTRUMENTS, Tomado de: www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/.
- [20]. ¿Qué son y cómo funcionan las termocuplas?, ARIAN control & instrumentación, Nota técnica 2, Tomado de: www.arian.cl/espanol/products.htm, Pág-7.
- [21]. FLUKE Calibration, CÁLCULO DE INCERTIDUMBRE EN UN SISTEMA DE CALIBRACIÓN DE TERMOPARES, Nota de Aplicación, Fluke.
- [22]. Quintero N. David-León M. Miguel, DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERN NO MAYOR A 120 hp, Tesis pregrado, Universidad de San Buenaventura, Bogotá, 2015.
- [23]. Budia A. Alberto, INSTRUMENTACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE ENSAYO CON MOTOR DIESEL CON FRENO HIDRÁULICO, Tesis pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Mina y Energía, Madrid,2016.