

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA



Implementación y análisis de un banco de pruebas para motores de combustión interna.

Daniel Patiño López

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Asesor

Iván Darío Bedoya Caro, Doctor (PhD) en Ingeniería Mecánica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia, Colombia.

2022

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

Cita	Patiño Daniel [1]
Referencia	[1] Patiño Daniel, “Implementación y análisis de un banco de pruebas para motores de combustión interna.”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2022. Estilo IEEE (2020)



Grupo de Investigación Ciencia y Tecnología del Gas y Uso Racional de la Energía (GASURE).



Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Jesús Francisco Vargas

Jefe departamento: Pedro León Simanca

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

Los motores son unas máquinas tan complejas y tan simples, como se quiera ver; el tener la oportunidad de descubrir su principio de funcionamiento y adentrarme en los detalles de la termodinámica para comprender sus fenómenos es algo muy bello y que se lo debo a mi padre. Para mí es un gran honor poder dedicar este proyecto a mis padres Juan C. Patiño y Mary López, quienes siempre estuvieron a mi lado para dar una ayuda cuando lo necesitaba, a mi esposa Yeresmín Arias que me ayuda cada día a ser mejor y a mantener todos mis proyectos en pie. Este título es para ustedes con todo mi ser.

Agradecimientos

A la facultad de Ingeniería Mecánica por darme la oportunidad de crecer como profesional en ella, con sus docentes y en especial a mi tutor Iván Darío Bedoya Caro por generar pasión y amor por lo motores. A mi compañero Andrés Herrera por haberme soportado en los trabajos y estudios en conjunto. A la Universidad de Antioquia por haberme hecho parte del alma mater y de ayudarme a comprender la cultura y la sociedad desde un punto de vista más amplio. Al grupo de investigación GASURE por haberme abierto las puertas y haberme permitido aprender tanto.

A todos, gracias infinitas.

Tabla de contenido

1	Introducción	10
2	Objetivos	12
2.1	Objetivo general	12
2.2	Objetivos específicos	12
3	Marco Teórico	13
3.1	Tipos de dinamómetros	13
3.1.1	Dinamómetros activos:	13
3.1.2	Dinamómetros pasivos:	13
3.1.3	Dinamómetros Universales:	14
3.2	Tipos de acoples para el motor o vehículo	14
3.2.1	Dinamómetro de chasis o rodillos:	14
3.2.2	Dinamómetro de acople directo axial:	15
3.3	Tipos de frenos dinamométricos	16
3.3.1	Freno Hidráulico	16
3.3.2	Freno Discos Hidráulicos	17
3.3.3	Freno Electromagnético	17
3.3.4	Dinamómetro de corriente directa (DC)	18
3.3.5	Dinamómetro de corriente alterna (AC)	19
3.3.6	Dinamómetro de imanes permanentes (DC)	20
3.3.7	Dinamómetro de fricción	20
3.3.8	Dinamómetro de freno de aire	20
3.3.9	Dinamómetro de Eddy-current o retardador electromagnético	21
3.4	Fuente de suministro del retardador electromagnético	21
3.4.1	Salidas de la fuente	23
3.5	Dispositivo de Control del Freno Dinamométrico	24
3.6	Sensor de presión	25
3.7	Sensor Temperatura	26
3.8	Sensor de revoluciones	26
3.9	Sensor de vibraciones o acelerómetro	27
3.10	Celda de carga	28
3.11	Downsizing	28
3.12	Análisis de elementos finitos (FEA)	30
4	Metodología	31

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

4.1	Diagrama: Toma de decisiones.	31
4.2	Análisis de elementos finitos.....	32
5	Resultados	33
5.1	Motor Ford Fiesta 1.6 GTDI	33
5.2	Cálculo de la potencia del motor 1.6 TDI a presión atmosférica Medellín	33
5.3	Cuadro Ventajas y desventajas diferentes configuraciones.	35
5.4	Elección del freno dinamométrico	36
5.4.1	Freno dinamométrico.	37
5.4.2	Rotor	37
5.4.3	Estator	38
5.4.4	Caja de rodamientos (Bearing Housing).....	38
5.4.5	Brida (Flange)	38
5.4.6	Tuerca (Nut).....	39
5.4.7	Puerto de conexión (conecting terminal)	39
5.4.8	Bobina (Coil)	40
5.4.9	Placa polo (Pole plate)	41
5.5	Especificaciones Retardador electromagnético.....	41
5.6	SP5 Controller	43
5.7	Cálculo de potencia del freno dinamométrico.....	45
5.8	Potencia del motor Ford Fiesta 1.6 GTDI a la altura de la ciudad de Medellín.....	48
5.1	Diagrama de cuerpo Libre chasis	48
5.2	Resultados diagrama de cuerpo libre y análisis de la estructura	50
5.3	Cargas de la estructura	50
5.4	Diagrama eléctrico del montaje.....	56
5.5	Resultado del banco.	57
6	Conclusiones	58
7	Referencias.....	59
8	Anexos	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Banco de rodillos con freno hidráulico para camiones y autos tomado de: https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-freno-hid.php?lang=es	14
Figura 2: Bancos de pruebas de motor tomado de: https://mwdyno.com/	15
Figura 3: Freno dinamométrico hidráulico seccionado tomado de: Engine testing pag 155....	17

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

Figura 4: Dinamómetro de corriente directa (DC) Tomado de: https://www.webscolar.com/generadores-de-corriente-continua	18
Figura 5: Dinamómetro de corriente alterna (AC) Tomado de: https://comercialmendez.es/es/blog/noticias/-las-diferencias-entre-generadores-asincronos-y-generadores-sincronos	19
Figura 6; Dinamómetro de fricción ENGINE%20TESTING.pdf	20
Figura 7: Montaje de retardador electromagnético en flecha cardánica tomado de: https://mobile.twitter.com/frenelsa	21
Figura 8: Fuente suministro Sport Devices V3.3.....	22
Figura 9: Diagrama de rectificado de onda.....	23
Figura 10: Sensor de presión óptico.....	25
Figura 11: Tipos de termocuplas.....	26
Figura 12: Esquema de un codificador incremental con un pulso de referencia. Tomado de: https://www.celeramotion.com/zettlex/es/asistencia/documentacion-tecnica/codificadores-absolutos-y-codificadores-incrementales/	27
Figura 13: Comportamiento del mean effective pressure con respecto a engine speed tomado de Conferences knocking in gasoline engines, pag 11	29
Figura 14: Comparativo de eficiencias motor aspirado 2.0 lts vs motor turbocargado 1.2 lts .	30
Figura 15: Mapa conceptual toma de decisiones	32
Figura 16: Motor Ford 1.6 GDI EcoBoost.....	33
Figura 17: Potencia indicada en función de la altitud para diferentes grados de sobrealimentación (p/p0)	34
Figura 18: torque y potencia vs revoluciones Ford EcoBoost 1.6 GDI.....	35
Figura 19: Componentes principales del retardador electromagnético.....	37
Figura 20: Diagrama cableado eléctrico retardador electromagnético	39
Figura 21: Freno electromagnético KLAM CFK 140.....	41
Figura 22: Especificaciones técnicas de serie CFK KLAM	42
Figura 23: Selección de la serie CFK 140	42
Figura 24: Rendimiento con respecto a potencia absorbida por el freno electromagnético	43
Figura 25: Sistema DAQ SP5 Controller.....	43
Figura 26: Diagrama de cableado adquisición de datos para DAQ.....	45
Figura 27: Diagrama brazo y fuerza	46
Figura 28: Método de captación de amperaje sin interrumpir la línea con gancho tomada de Google.....	47
Figura 29: Relación perdida de potencia motor Turbocargado	48
Figura 30: Vista isométrica estructura banco de pruebas	49
Figura 31: Carga soporte 1 y componentes de fuerza en el espacio	50

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

Figura 32: Carga soporte 2 y componentes de fuerza en el espacio	51
Figura 33: Carga soporte 3 y componentes de fuerza en el espacio	51
Figura 34: Carga estructura piso y componentes de fuerza en el espacio	52
Figura 35: Carga brazo de retardador y componentes de fuerza en el espacio.....	53
Figura 36: Fuerzas, momento, desplazamiento estructura total.....	53
Figura 37: Resumen de las cargas.....	54
Figura 38: Discretización mayado del chasis.....	54
Figura 39: Esfuerzo máximo en la estructura soporte 1	55
Figura 40: Deflexión máxima en la estructura.....	56
Figura 41: Diagrama eléctrico simplificado motor de combustión GDI y retardador electromagnético.	56
Figura 42: Banco de pruebas finalizado.....	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1:Cuadro comparativo de ventajas y desventajas diferentes configuraciones	36
Tabla 2: Especificaciones técnicas tubería ASTM 500 grado C.....	55

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

Resumen

En el contexto del proyecto CODI, “Estudio experimental del uso de mezclas gasolina/combustibles gaseosos para la optimización del desempeño de motores de encendido provocado de alta relación de compresión turboalimentados en el sector transporte colombiano”, se implementó y se analizó un banco de pruebas para motores de combustión (SI o CI) donde se puede medir diferentes parámetros de operación, acorde con esto se debió elegir los componentes principales para la realización de pruebas en un motor Ecoboost de 1.6 litros de cilindrada a condiciones de Medellín. Posteriormente se realizaron análisis de elementos finitos para la estructura de banco y garantizar su correcto funcionamiento.

Palabras claves

Downsizing, retardador electromagnético, banco de pruebas, motor de combustión, freno dinamométrico, turboalimentado.

Abstract

This undergraduate project has been developed within the framework of a research project devoted to the testing and analysis of Spark Ignited engines with high compression ratios and turbocharging, using Gasoline/Natural Gas blends as fuels. A test bench and a brake system for combustion engines were implemented and studied. Accordingly, the main components for the measurement and testing of an Ecoboost engine of 1.6 liters were selected. Subsequently, a finite element analysis was carried out for the test bench structure to guarantee its correct operation.

Keywords

Downsizing, electromagnetic retarder, test bench, combustion engines, brake system, turbocharger.

1 Introducción

Durante la evolución de la industria automotriz se ha visto la necesidad de hacer bancos de pruebas los cuales permitan tener información del comportamiento del motor de combustión interna al frente de unos parámetros establecidos por el medio ambiente (altura sobre el nivel del mar) y por el diseño conceptual del motor; de esta forma los bancos de pruebas dan a conocer las prestaciones del motor bajo condiciones controladas de régimen de giro y carga. Para la prueba de motores en banco estacionario se han utilizado los diferentes frenos de motor o frenos dinamométricos los cuales tienen un costo elevado, teniendo referencias como la marca AVL con el equipo “AVL Engine TS™ Performance and Emission”, el cual es un banco de pruebas que tiene la capacidad de medición de potencias de 50 KW hasta 1MW, siendo un banco de excelentes características, pero de un costo elevado (alrededor de 350.000 USD) para el contexto colombiano. [1]

El uso de dichos frenos es de gran utilidad para la medición de parámetros al freno e indicados (al interior del cilindro); la investigación en la educación está al frente de estos temas para generar conocimiento y proponer alternativas por medio de estos estudios generando impacto social y mejorando la relación medio ambiente–industria. Para las nuevas tendencias que se tiene en el mercado debido a que las empresas automotrices están afrontando un cambio en la normativa, cada vez más estricta y donde la tecnología en la combustión debe estar mayormente parametrizada para garantizar menores productos de la combustión nocivos para el medio ambiente. No obstante, para los intereses del grupo en investigar las diferentes alternativas para estudiar estos fenómenos se buscaron motores con las nuevas tendencias aplicadas, pero estos siempre superaron la potencia de los 20 KW que tiene el generador a disposición en el laboratorio. El grupo GASURE ha realizado investigación en motores de combustión interna en régimen estacionario a velocidades del motor constante (1500 o 1800 rpm), dando uso a generadores eléctricos acompañado de bancos de resistencias eléctricas para generar la carga al motor. Debido a que los regímenes de revoluciones son mayores en motores turboalimentados, se necesita diseñar un sistema que soporte tanto la carga de potencia como las altas rpm a las que giran este tipo de motores. Estos nuevos motores tienen como base el concepto denominado “downsizing”, el cual consiste en la disminución del tamaño para reducir emisiones de CO₂. Estos motores disminuyen su tamaño y aumentan las presiones en cámara debido a ser tubocargados y tener inyección electrónica directa en la misma. Actualmente el grupo GASURE se encuentra desarrollando el proyecto titulado

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

“Estudio experimental del uso de mezclas gasolina/combustibles gaseosos para la optimización del desempeño de motores de encendido provocado de alta relación de compresión turboalimentados en el sector transporte colombiano”. En este proyecto se tiene un motor turboalimentado, en el cual se pretende estudiar un fenómeno denominado “Super Knocking” y el régimen de giro esperado de esta operación supera el régimen nominal del generador; [2] cabe resaltar además que el motor que se tiene para estudio es un EcoBoost de 1.6 litros, GDI turbocargado que supera los 147 KW de potencia (197 hp), exigencia que el montaje anterior no soporta. Es de índole obligatoria cambiar el sistema de frenado (banco de pruebas o sistema dinamométrico), es por esto que se ha encontrado alternativas de otros frenos dinamométricos que cumplen con unos estándares de medición muy buenos y su costo es asequible al presupuesto del proyecto (alrededor de unos 8000 USD). El grupo GASURE de la Universidad de Antioquia se encuentra en la elaboración de un banco de pruebas que permita medir los diferentes parámetros necesarios para realizar el proyecto mencionado y por ende la implementación de un sistema de “freno de motor” es de orden indispensable para el mismo, sistema que se calculó y analizó en este trabajo.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Implementar y analizar un banco de ensayos y un sistema de frenado alternativo para pruebas en motores de combustión interna con aplicación en el sector transporte.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar los elementos del banco de ensayos implementar a partir de una evaluación técnico-económica de las opciones disponibles en el mercado y su posible integración al banco de ensayos existente y a los intereses de investigación del grupo GASURE.
- Realizar estructura de montaje del motor y del sistema de freno de motor en el banco de pruebas con la selección de periféricos necesarios para la medida el torque y sistemas de control teniendo en cuenta un rediseño con el tema estructural en análisis de elementos finitos.
- Evaluación y calibración del sistema de frenado en el banco de pruebas.

3 Marco Teórico

Existen diferentes tipos de absorbedores que se pueden usar en el sistema de dinamómetro. Un dinamómetro es entonces un dispositivo que mide fuerzas, en este caso se genera un torque por medio del elemento motriz o conductor, acorde con un régimen y un torque a medir en la flecha del motor conductor, se debe parametrizar el absorbedor y generar una resistencia al giro. Una vez que se ha seleccionado el dinamómetro, se puede conectar al sistema de alimentación del motor, para que se puedan recopilar los datos sobre el mismo. Las pruebas que se llevan a cabo en las industrias automotrices son pruebas de motores, pruebas de transmisión y pruebas de tren motriz de vehículos. Estas pruebas generalmente están motivadas hacia el par y la potencia de salida en función de las diferentes velocidades del propulsor. [3]

Casi todas las mediciones se pueden realizar en bancos de prueba de motores altamente dinámicos para máquinas de encendido provocado y de encendido por compresión, desde pruebas estacionarias hasta transitorias. Las compañías y en este caso el grupo de investigación está interesado en determinar el torque y la potencia que un motor podía producir y también en las pruebas que también se llevaban a cabo para validar los componentes según el diseño y la calibración del ingeniero. [3]

3.1 Tipos de dinamómetros

Acorde con la entrega o la absorción del par y potencia, estos se clasifican en:

3.1.1 Dinamómetros activos:

También conocidos como dinamómetros de impulsión, se utilizan cuando una maquina necesita potencia para ejercer su función, en el caso de una bomba de agua, esta es accionada bajo un motor eléctrico (dinamómetro de impulsión en este caso) para así realizar el ensayo. [4][5]

3.1.2 Dinamómetros pasivos:

Son utilizados para medir, estudiar y caracterizar un motor que fue construido para un propósito específico. También conocido como “dinamómetro de absorción” este dispositivo permite absorber potencia y definir características y especificaciones del motor que se mide in situ. [4][5]

3.1.3 *Dinamómetros Universales:*

Este último dinamómetro cumple las tareas de los 2 anteriores mencionados, es decir, absorben torque y de la misma manera generan trabajo en el eje para ayudar con la impulsión, son generalmente más costosos y complejos. [4][5]

3.2 *Tipos de acoples para el motor o vehículo.*

3.2.1 *Dinamómetro de chasis o rodillos:*

Se usa comúnmente cuando se pretende medir y conocer el comportamiento de un vehículo en conjunto con el sistema de transmisión y demás subsistemas integrados al mismo. Este método consiste en analizar el comportamiento completo y no solo del motor sino del conjunto global del automotor controlando todo este en estado estacionario mientras las piezas móviles se desempeñan a alto régimen. [6][7]

Esta estructura está compuesta de un chasis en el cual se ubica el vehículo para la prueba, a su vez las ruedas de este se ubican en los rodillos los cuales serán impulsados por las ruedas del auto. El vehículo por seguridad deberá permanecer anclado. [7]

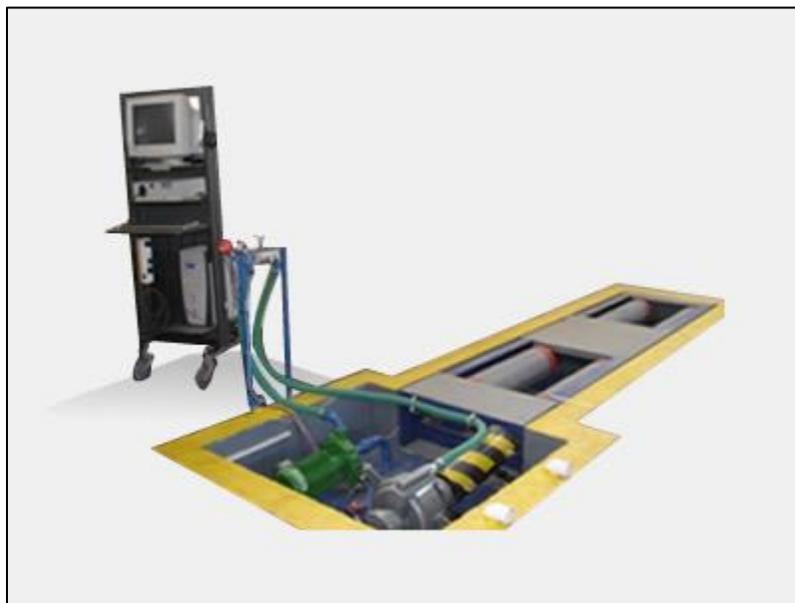


Figura 1: Banco de rodillos con freno hidráulico para camiones y autos tomado de:
<https://www.saenzdynos.com.ar/bco-rodillos-freno-hid.php?lang=es>

3.2.2 Dinamómetro de acople directo axial:

Este dinamómetro se utiliza principalmente cuando se pretende estudiar el motor y las condiciones o parámetros medidos en cámara acorde con un torque aplicado o torque a vencer dispuesto por el dinamómetro. A partir de ser la manera más fácil de caracterizar un propulsor, a partir de velocidades de régimen y de medidas de par se pueden realizar ensayos donde la combustión, la tribología, vibraciones y esfuerzos son medidos para provecho de la investigación. El rotor del dinamómetro está unido al cigüeñal, la correcta unión y tolerancias de este acople son el éxito a la correcta toma de muestras; es el estator entonces que actúa radialmente sobre la configuración anteriormente hablada y es la que entrega el par a vencer por medio del propulsor.

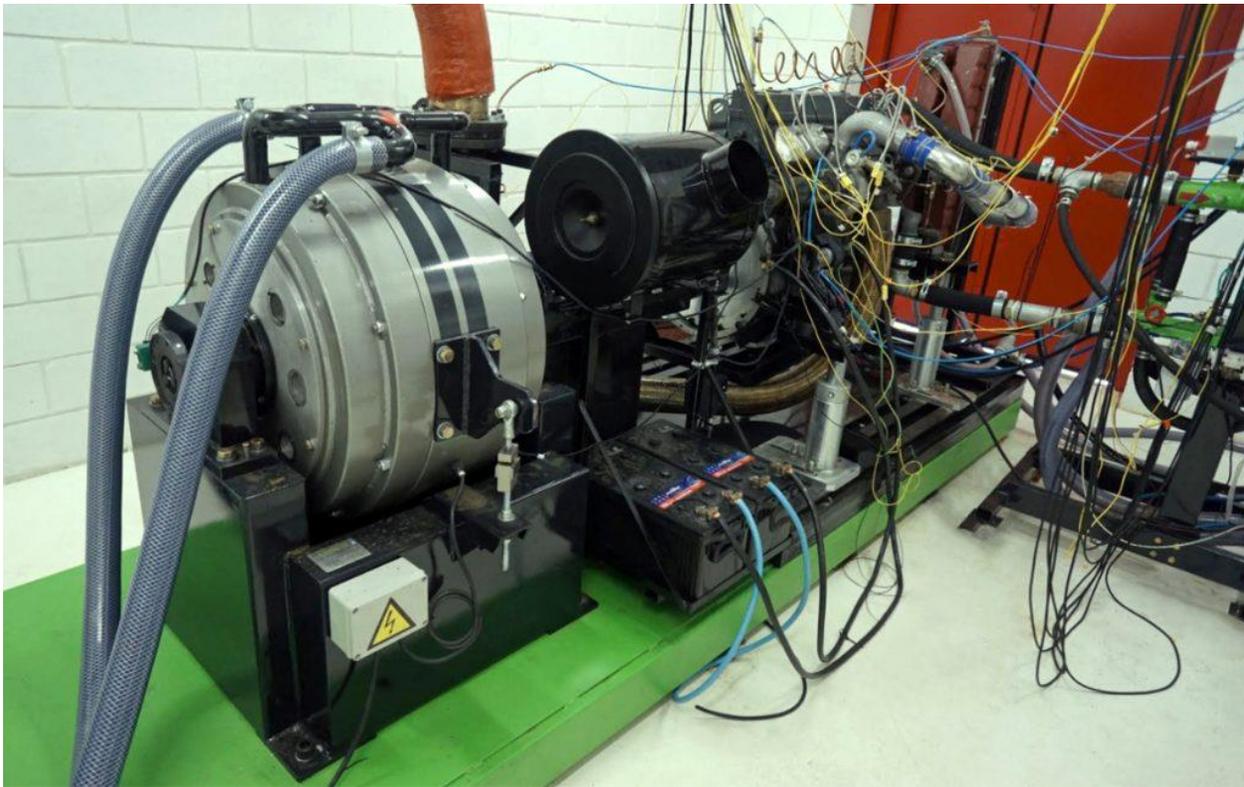


Figura 2: Bancos de pruebas de motor tomado de: <https://mwdyno.com/>

3.3 Tipos de frenos dinamométricos

3.3.1 Freno Hidráulico

Tipo de dinamómetro hidráulico turbulento ideado en el siglo pasado por el ingeniero británico William Froude, usado generalmente en los bancos de prueba de motor para operaciones de rodaje o para determinar la potencia.

Esencialmente consta de un órgano rotativo de paletas, unido al motor mediante un árbol, al que se hace girar en el interior de un recipiente de cierre hermético. Las paredes del recipiente poseen igualmente paletas situadas a una distancia más o menos corta de las paletas del rotor. En el recipiente, mediante una tubería se introduce agua que, movida por los alabes del órgano rotativo y chocando contra las paletas fijas del recipiente, tiende a arrastrar a éste, confiriéndole igualmente un movimiento rotativo. El recipiente está sujeto por un brazo provisto de muelle y de índice graduado. La potencia del motor se valora a base de la intensidad con que el rotor, moviendo turbulentamente el agua, actúa sobre el par opuesto por el recipiente en posición de parado. Dado que el rozamiento entre las paletas y el agua engendra calor, la temperatura interior del recipiente se mantiene constante gracias a la renovación del líquido que rebosa por un orificio.

El freno de Froude posee un sistema de regulación constituido por unos tornillos, que separan o aproximan al rotor las paredes del recipiente. Si el espacio existente entre las aletas del rotor y las del recipiente se reduce, aumenta la intensidad con la que el rotor tiende a arrastrar el cuerpo del freno y, consecuentemente, se incrementa el par de resistencia opuesto por el mismo recipiente. [5]

En los tipos más recientes de freno de Froude la circulación del agua se consigue mediante una bomba centrífuga ensamblada al árbol del rotor. Una válvula regula su caudal, con lo que la variación del par se obtiene actuando sobre ella, es decir modificando la cantidad de agua introducida en el freno en lugar de variar la distancia entre las paredes del recipiente y del rotor.

El freno de Froude es uno de los más usados en el campo dinamométrico, por la sencillez de su regulación y por su capacidad de absorber potencias notables. [5]

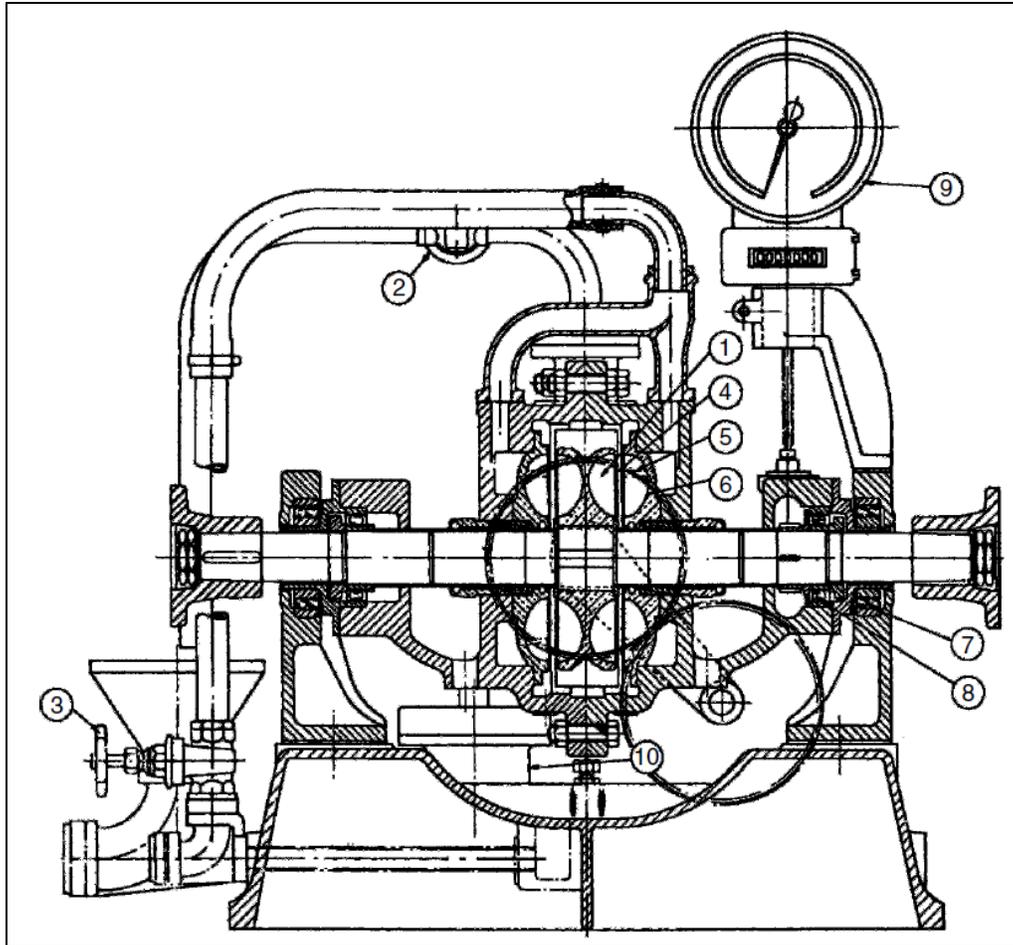


Figura 3: Freno dinamo-métrico hidráulico seccionado tomado de: Engine testing pag 155

3.3.2 Freno Discos Hidráulicos

El dinamómetro de discos hidráulicos no es ampliamente usado, este trabaja con discos planos que tienen holguras muy pequeñas entre ellos. La potencia es absorbida por la cizalladura generada por los platos y el torque es controlado por una válvula de control a la entrada asociada con una válvula de estrangulamiento a la salida. Al tener discos planos y usar la cizalladura como elemento torsional, el freno de discos hidráulicos es de mayor utilidad en aplicaciones de altas velocidades de giro (altas rpm), un ejemplo de esto son las turbinas de gas.[5]

3.3.3 Freno Electromagnético.

Un dinamómetro de corrientes parásitas funciona con base al principio de inducción electromagnética para desarrollar torque y disipar energía. Similar a un generador eléctrico,

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

excepto por el hecho de que está diseñado para ser muy ineficientes, por lo que convierte la energía eléctrica en calor de manera efectiva en lugar de la generación de energía eléctrica para la entrega de una carga. Las corrientes de Foucault se producen a propósito entre imanes estacionarios y el rotor dentado giratorio. La producción de corrientes parasitas provoca una alta ineficiencia como generador y disipa la corriente de manera efectiva. La medición de la potencia mecánica que absorbe un dinamómetro de corrientes parasitas se realiza de la misma manera que en los otros dinamómetros, midiendo el par de reacción con la celda de carga y midiendo la velocidad. La carga de un dinamómetro no está controlada por un motor eléctrico, sin embargo, todavía clasifica como un dinamómetro eléctrico porque que utiliza electricidad para controlar la operación. [5]

3.3.4 *Dinamómetro de corriente directa (DC)*

Esta configuración consiste en el montaje de un generador DC montado en muñón, quiere decir que tiene un control en un tiristor convertidor basado en AC-DC-AC. Estas máquinas son ampliamente usadas en Estados Unidos gracias a su robustez, fácil control y con una absorción de la potencia combinada con la capacidad de arranque de los mismos motores de combustión. Algunas de sus desventajas son limitada velocidad máxima y alta inercia, las cuales se ven en la vibración torsional y un delta muy pequeño en las velocidades de giro; el mantenimiento de los motores DC puede ser mayor que en configuraciones AC jaula de ardilla. [5]

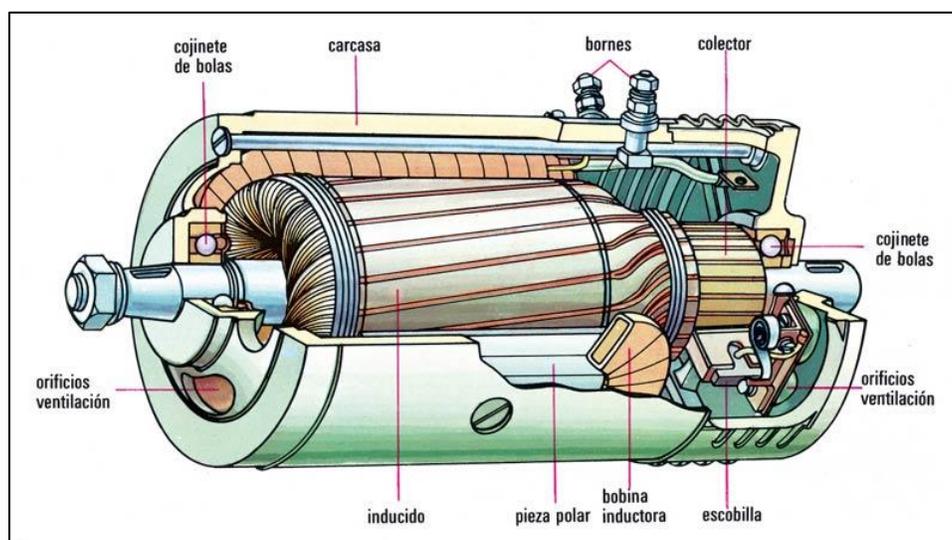


Figura 4: *Dinamómetro de corriente directa (DC)* Tomado de: <https://www.webscolar.com/generadores-de-corriente-continua>

3.3.5 Dinamómetro de corriente alterna (AC)

Los motores asíncronos de jaula de ardilla consisten en la variación de la frecuencia que se le suministra a esta misma. Algunos módulos de control son basados en un transistor de compuerta bipolar (Insulated gate bipolar technology). Los motores AC jaula de ardilla tienen una inercia rotacional baja a comparación del DC mencionado anteriormente, lo cual permite un mejor desempeño transitorio. Hablando entonces de estos motores de corriente alterna, se requiere un servicio de mantenimiento disminuido. [5]

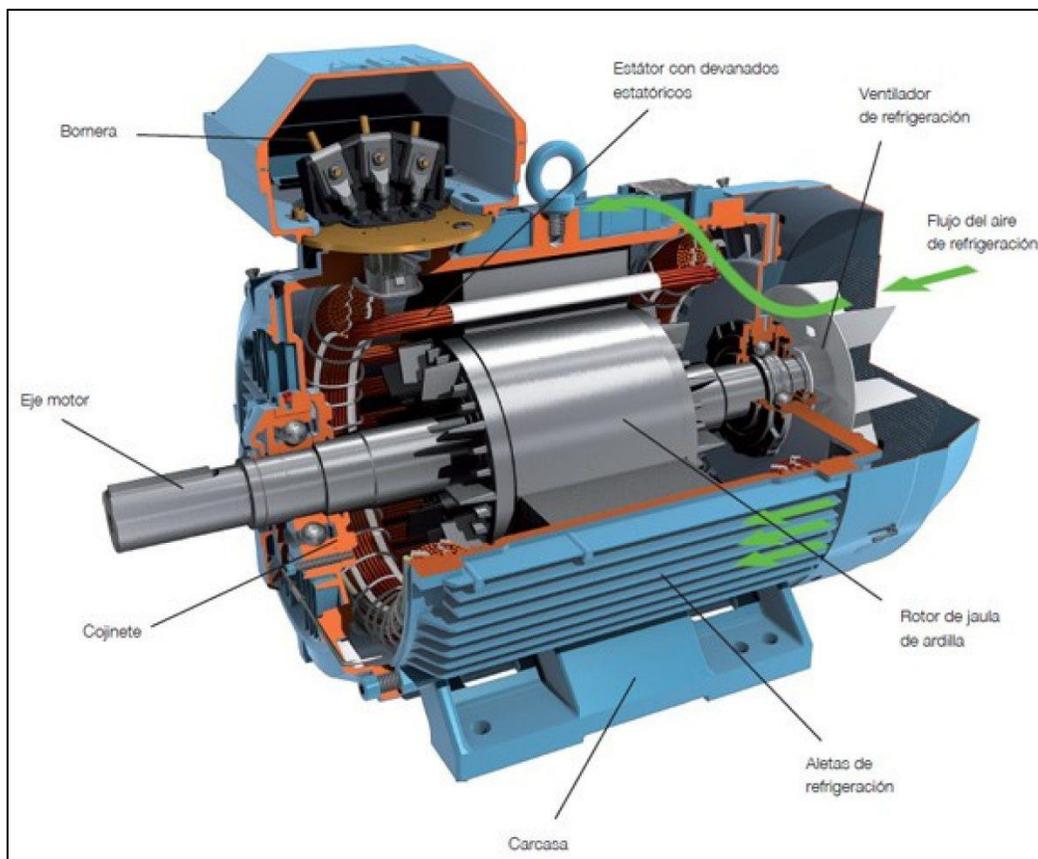


Figura 5: Dinamómetro de corriente alterna (AC) Tomado de: <https://comercialmendez.es/es/blog/noticias/-las-diferencias-entre-generadores-asincronos-y-generadores-sincronos>

3.3.6 *Dinamómetro de imanes permanentes (DC)*

Estos son los dinamómetros eléctricos últimamente desarrollados, tienen la capacidad de tener un alto desempeño gracias a su dinámica de fluctuación de baja inercia rotacional. Es de gran ayuda esta característica proveyendo dinámica en las pruebas requeridos en banco de pruebas. Ratios de aceleración hasta 160.000 rpm logradas en 1 ms lo que permite una fluctuación dinámica en velocidad y torque requerida en componentes de testeo.[4]

3.3.7 *Dinamómetro de fricción*

Para esta máquina se tiene una configuración de un freno multidisco de fricción enfriado por agua. Este sistema es útil para aplicaciones de baja velocidad (rpm), un ejemplo de estos son las llantas de un vehículo generando torque hasta detener esta compartiendo la ventaja del dinamómetro hidrostático que lleva el par para detener el sistema. [5]

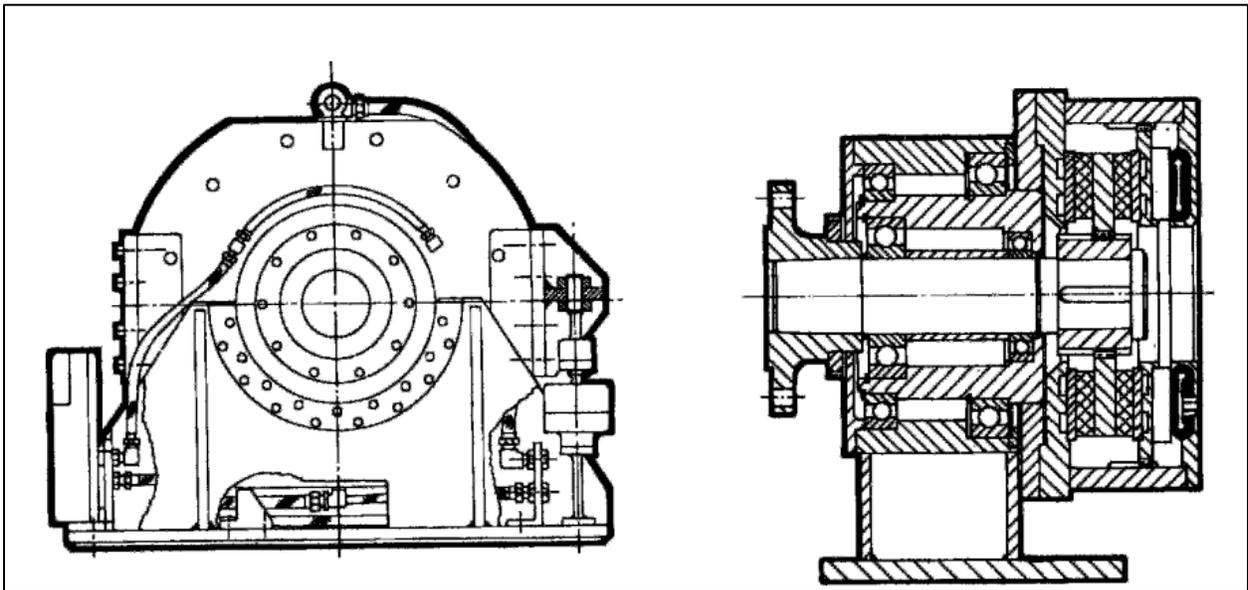


Figura 6; Dinamómetro de fricción ENGINE%20TESTING.pdf

3.3.8 *Dinamómetro de freno de aire*

Es una maquina el cual su uso es casi obsoleto. Consiste en un arreglo de aspas y aletas organizadas radialmente, el sistema con un rango de giro constante se puede lograr estimar el torque. Su aplicación fue exitosa en el testeo de motores de helicóptero y en lugares donde el ruido no es un inconveniente. [5]

3.3.9 *Dinamómetro de Eddy-current o retardador electromagnético*

Estas máquinas hacen uso de este principio para desarrollar torque y disipar potencia del motor acoplado. Con un rotor dentado de acero con alta permeabilidad magnética, rota con una tolerancia muy fina con el estator, este a su vez refrigerado por agua. El campo magnético puede ser manipulado en cuanto a su flujo y de esta forma obtener un torque acorde con las bobinas que generan el campo axial que actúan sobre los rotores. La energía de disipación se hace a través de los platos que rotan y por convección forzada con el aire se genera la transferencia de calor. Las bobinas a su vez son actuadas en pares para lograr una simetría en el flujo magnético en la misma dirección del eje, las cuales permiten una rápida variación del flujo y lograr un desarrollo sustancial de frenado a muy bajas rpm. A diferencia de los dinamómetros AC o DC, estos son incapaces de generar par motor. [4] [5]



Figura 7: Montaje de retardador electromagnético en flecha cardánica tomado de:
<https://mobile.twitter.com/frenelsa>

3.4 *Fuente de suministro del retardador electromagnético*

La fuente necesaria para suministrar al freno dinamométrico debe ser adaptada a corriente directa. En el laboratorio de GASURE se dispone de 110 V a corriente alterna. Es entonces cuando la

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

fuelle de Brake Power Suply Gen 3 realiza su función, no solo generando una corriente continua de 192 V sino que con un sistema de control y por medio de relés manda señales para inducir parcialmente las bobinas que se encuentran en el retardador electromagnético y así poder entregar un torque que implique la inducción parcial por pulsos de las bobinas logrando diferentes fuentes a las de 25-50-75-100 en porcentaje.[8]

El suministro de corriente a la fuente debe ser máximo de 230 V/ 50-60Hz alterna, para el contexto de la ciudad de Medellín se tiene 60 Hz. Y su salida máxima es de 200 VDC con un amperaje deseado de 16 A (21 Amp Max). Para esto es necesario conocer el principio de funcionamiento de la conversión de corriente alterna a corriente continua.

Con el principio del SCR y con el control de ángulo de fase se puede obtener una modulación que permite regular, rectificar y amplificar en diferentes circuitos de electrónica de potencia, para aplicaciones como la de motores eléctricos, en este caso un absorbedor o retardador electromagnético.



Figura 8: Fuente suministro Sport Devices V3.3

El SCR (Silicon Controller Rectifier) es un diodo controlado de silicio, este diodo tiene como bases de funcionamiento 4 capas conductoras como lo son PNPN o NPNP y 3 terminales o pines. Su función en cuanto al proceso que se realiza en el retardador consta de desfasar la corriente alterna

por medio de pulsos y rectificar la señal del voltaje en DC. Este superconductor tiene como beneficio el no desgaste de sus piezas ya que no hay movimiento relativo entre ellas, solo se basa en su principio de funcionamiento por medio de los electrones libres de los materiales en funcionamiento. [8][9]

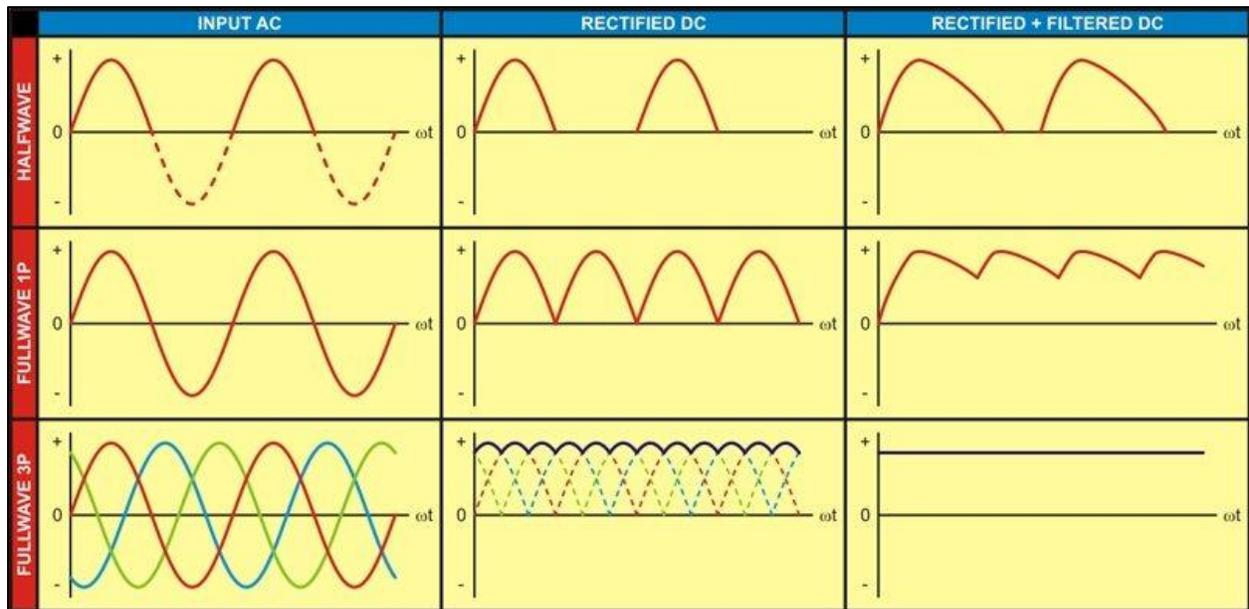


Figura 9: Diagrama de rectificado de onda.

Por otro lado, existe el método de regulación y control de la energía suministrada a un circuito, siendo este el retardador, tenemos una señal PWM (Pulse Width Modulation)

3.4.1 Salidas de la fuente

Las salidas de la fuente se clasifican en:

3.4.1.1 PWS3.x

- Modulation Method: Phase Angle Control (SCRs) @ 100 Hz
- Inductive Load Control: Flywheel diode (passive discharge)

3.4.1.2 HS-PWS

- Modulation Method: PWM (IGBTs) @ 1000 Hz
- Inductive Load Control: Flywheel diode (passive discharge)

3.4.1.3 HS-PWS-Discharge

- Modulation Method: PWM (partial H-bridge topology) @ 1000 Hz
- Inductive Load Control: Regenerative discharge (-200VDC) + Overvoltage

Para el control de esta (entrada), se encuentran dos opciones las cuales el **SP5 Controller** tomará las decisiones en cuanto a la señal PWM para que el freno dinamométrico genere el torque necesario acorde con los parámetros que sean necesarios por el estudio, estos son:

3.4.1.4 PWM input: PWM 0 to 5 Volt, 2.4 KHz. ISOLATED:

- + Brake output (SP4/SP5)
- – GND

3.4.1.5 Analog input (optional): 0 to 5 Volt. ISOLATED:
3 pin connector*

- Pin 1: GND
- Pin 2: Analog in
- PIN 3: 5V (low current for potentiometer)

3.5 Dispositivo de Control del Freno Dinamométrico.

Los dispositivos de control y los equipos de adquisición de datos son de gran importancia en el banco de pruebas, debido a estos, se puede realizar unas pruebas controladas y llevar a cabo las mediciones de fenómenos físicos como la presión, temperatura, torque, revoluciones por minuto, voltaje, corriente, shock y vibraciones, peso, ángulos, entre otros. Estos parámetros pueden ser dados bajo un ambiente controlado y unas medidas estudiadas con antelación para obtener un resultado acorde con unas pruebas.[10]

En la industria automotriz y de investigación de motores existen diferentes tipos de dispositivos para la adquisición de datos, marcas comunes en el mercado son AVL, National Instruments, Kistler, entre otros, los cuales ayudan a tomar datos de importancia y a su vez, controlar variables de importancia.

3.6 Sensor de presión

El sensor de presión óptico funciona bajo el principio de la medición de luz o fotones. Es entonces cuando una nanomembrana, es usada para que a través de una presión, se genere un desplazamiento de la veleta opaca, esta interfiere con la transmisión de la luz (cantidad de fotones) que es generada por un led y que el diodo de medición se encarga de captar acorde con una referencia inicial debido a la intensidad de la luz, distancia entre el led y el diodo de medición. Este tipo de sensor óptico es de gran uso en la industria, ya que su rango de operación genera una alta confiabilidad, temperaturas entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la transferencia de sus datos es optima, usando una cable de fibra óptica que no tiene interferencia con las señales parasitas y campos magnéticos de otros componentes del motor que interfieren entre ellos [11], [12]. Al contar con una tecnología de motor de combustión como la GDI o sus siglas “Gasoline Direct Injection” se trata de un motor con el inyector en cámara y donde el espacio para captar la presión en la misma es de difícil acceso. Con el sensor de presión, las bujías en este caso tienen un captador de presión en su punta, esta señal óptica será transformado en presión con una función matemática de conversión en el DAQ y así poder analizar los datos en diferentes momentos de la combustión obteniendo hasta mil datos por segundo (ms).[11], [12]

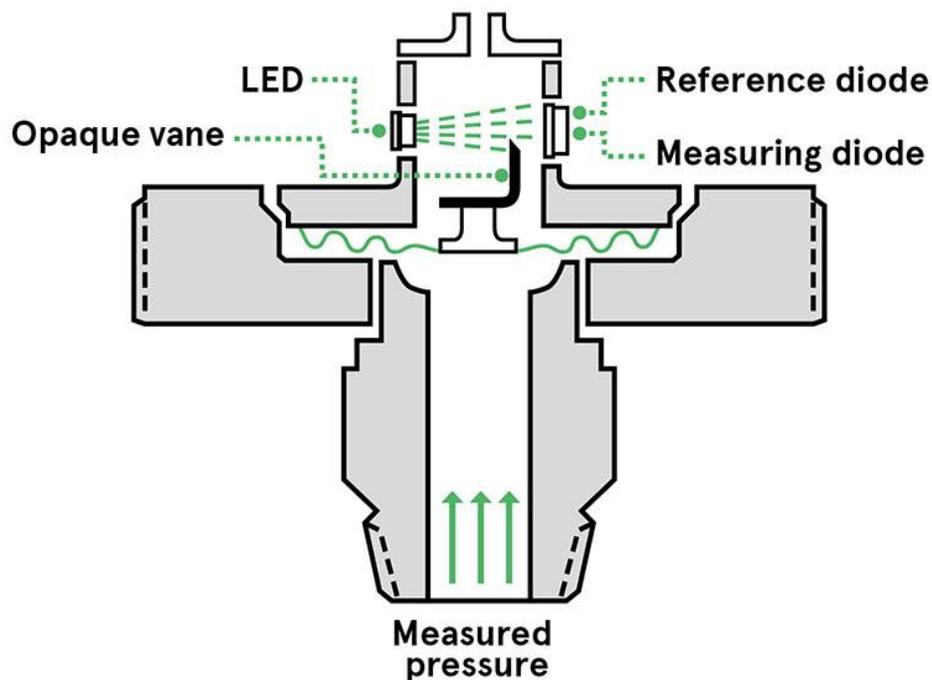


Figura 10: Sensor de presión óptico.

3.7 Sensor Temperatura

La temperatura es la medida de la excitación de las moléculas de un material al estar expuesta a una reacción que genera las vibraciones de estas, los diferentes materiales al tener diferentes sensibilidades. Para aplicaciones automotrices se tienen termocuplas que pueden medir diferentes temperaturas acordes con la sensibilidad del material o los materiales con los que están diseñadas. En el principio más básico consta de 2 materiales que componen un circuito cerrado en el cual los 2 materiales se encuentran a T1 y T2, generando así una FEM (Fuerza Electromotriz) por el diferencial de potencial. En la siguiente tabla, se muestran las diferentes termocuplas, y los rangos de operación a los cuales están sometidas, algunas alcanzan un equilibrio térmico más eficientemente, esto se determina también acorde con la necesidad del proceso para la correcta elección. [13]

Tc	Cable + Aleación	Cable - Aleación	Rango (Min, Max) °C	Volts Max mV
J	Hierro	cobre/nickel	(-180, 750)	42.2
K	Nickel/cromo	Nickel/aluminio	(-180, 1372)	54.8
T	Cobre	cobre/nickel	(-250, 400)	20.8
R	87% Platino 13% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	21.09
S	90% Platino 10% Rhodio	100% Platino	(0, 1767)	18.68
B	70% Platino 30% Rhodio	94% Platino 6% Rhodio	(0, 1820)	13.814

Figura 11: Tipos de termocuplas

3.8 Sensor de revoluciones

En la industria, para diferentes procesos, es necesario conocer en tiempo real las revoluciones o velocidad lineal de un proceso. Para los bancos de pruebas es inherente el tener como parámetro las revoluciones del motor a estudio y sus cambios de velocidad (aceleraciones) para los estudios en tema. Se tienen entonces los diferentes encoders, estos utilizan los impulsos eléctricos

generados por el eje y los convierten en una señal de onda sinusoidal o cuadrada para genera luego el dato de las rpm.

Para clasificar los tipos de encoder que hay, se comienza con el encoder óptico; este lo componen una fuente emisora de luz, un disco con giratorio con secciones opacas y transparentes y un fotodetector que detecta las diferencias entre lo opaco y lo transparentes, generando así la señal o pulso.

Por otro lado, el encoder lineal poseen una escala graduada para así determinar la posición, esta codificación es dependiente de un control de movimiento electrónico, se dividen en incremental y absoluto. El incremental utiliza un emisor y un sensor acorde con una geometría del disco codificado y la emisión del rayo pasa por la rendija, registrando una intermitencia entre ellas y por ende una velocidad angular; para complementar a este, el encoder de cuadratura genera una señal cuadrada y además conoce su posición, velocidad y sentido de giro, todo esto acorde con la aplicación a determinar.[7]

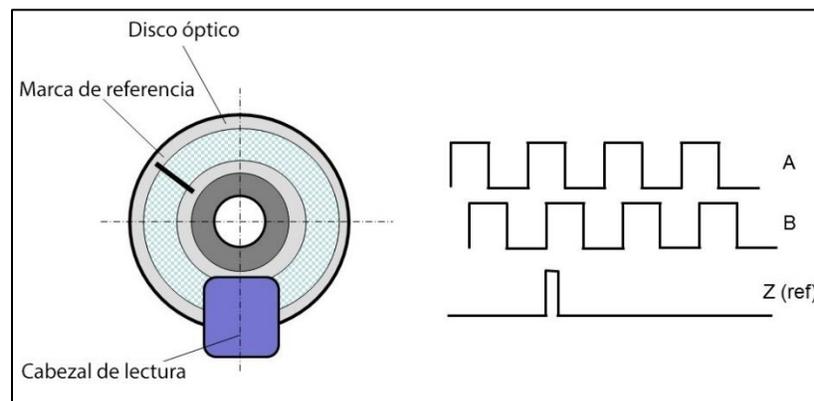


Figura 12: Esquema de un codificador incremental con un pulso de referencia. Tomado de:
<https://www.celeramotion.com/zettlex/es/asistencia/documentacion-tecnica/codificadores-absolutos-y-codificadores-incrementales/>

3.9 Sensor de vibraciones o acelerómetro

Los acelerómetros o sensores de vibración son elementos que ayudan a medir las aceleraciones de un cuerpo, pieza, motor, eje, etc. y permiten sacar conclusiones acerca del comportamiento

adecuado o inadecuado de la misma. Para esto se tienen acelerómetros que acorde con su fabricación tienen una aplicación específica o para varias tareas.

Los acelerómetros capacitivos son los más comunes y usados en la industria, consisten en un sistema de suspensión y de una masa que al deflactarse genera una medición de aceleración, este entonces transmite una fuerza mecánica y se transduce a un pulso eléctrico.[14]

Para la correcta elección de este elemento, es necesario tener en cuenta los rangos de funcionamiento(frecuencia) y de temperatura, ya que en el caso de un banco de pruebas para motores la temperatura es inherente a la combustión y las frecuencias dependen del lugar a medir (espesor, material, posición).[15]

Otros tipos de acelerómetros son los mecánicos, piezoeléctricos, piezoresistivos, térmicos entre otros.

3.10 Celda de carga

Este dispositivo es un dinamómetro que mide la compresión que se le genere en unidades internacionales como lo son newton, kilogramo fuerza, libra fuerza, etc. Se puede ubicar en zonas para determinar una fuerza o con un brazo fijo, un momento o torque. En la industria se encuentran diferentes tipos de celdas de carga, las piezoeléctricas son de las mas usadas y constan de un cuerpo al cual se le conoce su deflexión por medio de una geometría y material de fabricación, además este cuerpo esta diseñado para generarle la carga al sensor de presión y de esta manera poder medir la fuerza.

3.11 Downsizing

Para la década de 1980, podíamos encontrar vehículos con motores de 3000 cc de desplazamiento y con una potencia no superior a los 100 hp de potencia, medida que era muy pobre para carrocerías con alto peso además de una dinámica longitudinal poco favorable; sin embargo, en la actualidad se cuentan con motores de 1000 cc de desplazamiento que generan 120 hp y que tienen un consumo de combustible mucho menor. Es entonces cuando desde 1997 se empezó a generar conciencia de

que el CO₂ (producto de combustión que ayuda con los gases de efecto invernadero) era nocivo para el ambiente y la salud del planeta. De esta manera se logra realizar un proceso de disminuir el tamaño de los motores, tanto en desplazamiento (volumen) como en cantidad de cilindros y aumentar los picos de potencia, todo esto con la ayuda de la combinación del turbocargador y la inyección directa de gasolina.[16]

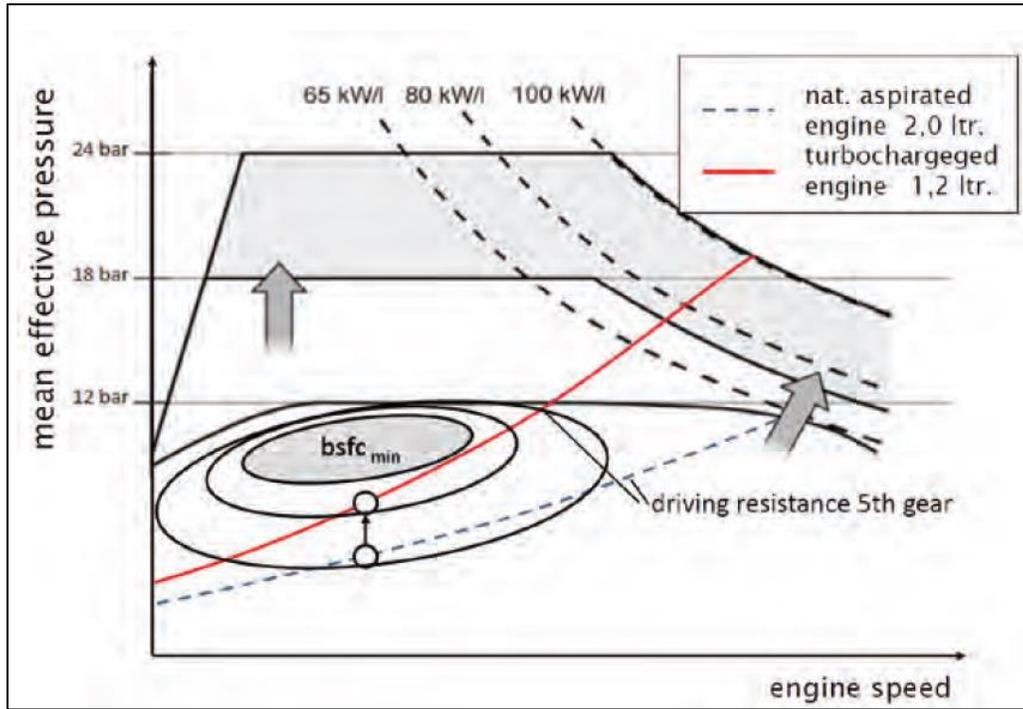


Figura 13: Comportamiento del mean effective pressure con respecto a engine speed tomado de *Conferences knocking in gasoline engines*, pag 11

En la gráfica anterior se logra evidenciar como se obtiene una mayor presión efectiva media disminuyendo el desplazamiento del motor, obteniendo mayor trabajo neto por ciclo llegando al consumo específico de combustible mínimo de una forma más eficiente con el salto entre los dos puntos mostrados en la gráfica, entre un motor de 2.0 ltr. aspirado y uno de 1.2 ltr. turbocargado.

$$mep = \frac{\text{net work for one cycle}}{\text{displacement volume}} \quad (9)$$

Una situación por corregir en los motores con la tecnología downsizing adaptada es la preignición o superknocking, esto es debido a una alta presión en cámara y se generan detonaciones no programadas en el motor. [16]

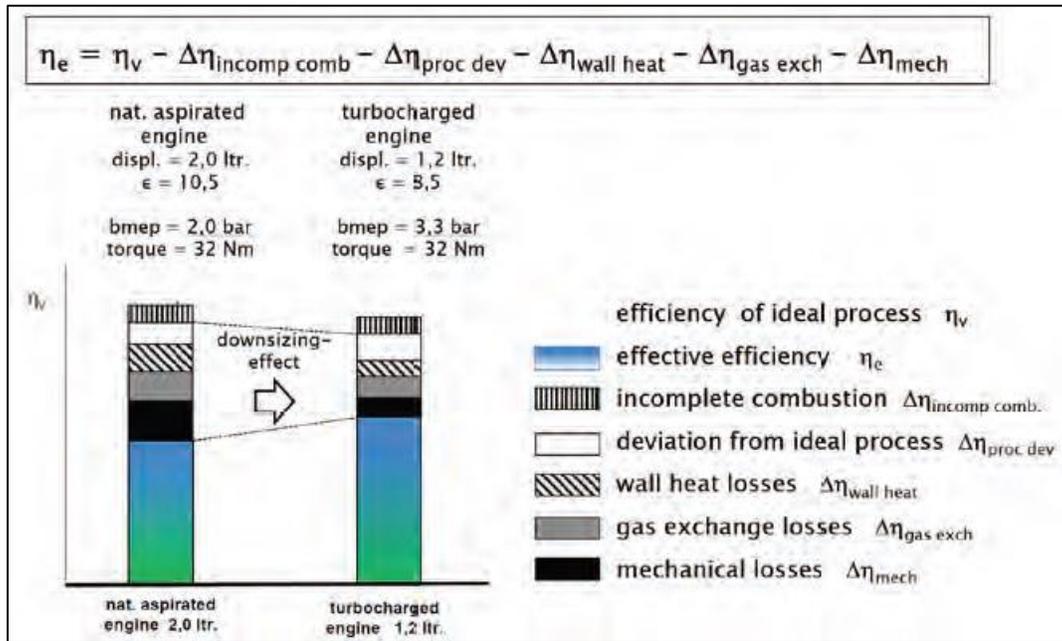


Figura 14: Comparativo de eficiencias motor aspirado 2.0 lts vs motor turbocargado 1.2 lts

3.12 Análisis de elementos finitos (FEA)

Los elementos finitos son una ayuda de diseño computacional que permite bajo los métodos numéricos resolver un problema fisicomatemático y de ingeniería. Es de gran uso para evaluar geometrías complejas y que requieren de una optimización para su funcionamiento, ayudando a generar confiabilidad en los procesos.

Según el diseño o la complejidad de la geometría a evaluar, se remite a un tipo de análisis para tener resultados más confiables:[17]

- Tener un concepto acerca del comportamiento de los materiales (en este caso, perfiles metálicos) y de su resultado cuando son sometidos a esfuerzos.
- Predecir el desempeño y el comportamiento de la estructura a evaluar para calcular un margen de seguridad adecuado e identificar esas debilidades del sistema en conjunto.
- Optimizar el diseño a partir de los estudios anteriores.

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para realizar factores de seguridad mucho mas acertados, se introducen las cargas de estos en un software, ANSYS es uno de los programas que permite hacer este tipo de simulaciones, para esto se necesita:[17]

- El diseño de la estructura o elemento en CAD.
- Realizar la discretización del mallado de la estructura, se pueden elegir diferentes mallados acorde con la necesidad de complejidad o simpleza de las geometrías.
- Introducir las cargas, saber cuales son las direcciones de estas mismas e introducir las componentes (plano dimensional X, Y, Z)

Este análisis permitirá saber en qué sección del mallado habrá esfuerzos o deflexiones mayores, además de dar resultado de las reacciones, tanto en fuerzas como momentos.

4 Metodología.

4.1 Diagrama: Toma de decisiones.

Por medio de un diagrama de toma de decisiones, se tiene que, para los diferentes componentes, aparte de motor y estructura, se estipularon los diferentes criterios para la elección de los mismos.

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

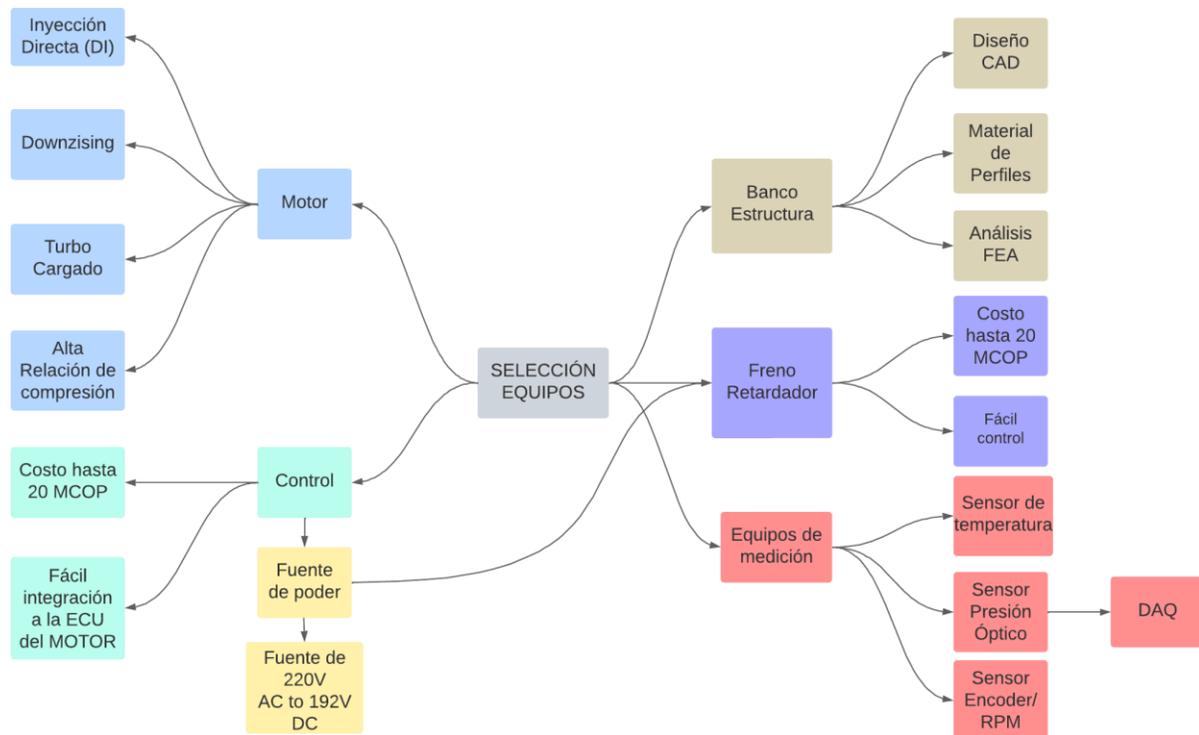


Figura 15: Mapa conceptual toma de decisiones

4.2 Análisis de elementos finitos.

Para la realización del análisis de elementos finitos o análisis estructural se tiene como base un CAD, diseño previo de la estructura a realizar; para el diseño de este conjunto de tubería, se utilizó el software INVENTOR STUDENT y para poder utilizar el análisis en el software ANSYS, fue pertinente guardar el archivo en formato IGES (.iges). Posteriormente con la función parametrizar solido en el software se realizo de manera simple su mallado ya que es una estructura de geometría simple. Es importante suministrar antes de esto el material con el que se está trabajando con las normas ASTM, DIN, SAE, etc. Posterior a esto se deben de fijar las cargas a las cual estará sometida la estructura bajo las condiciones más críticas (Par motor máximo) y se espera encontrar las reacciones como resultado para determinar el estrés y posibles fallas que pueda tener la estructura con su funcionamiento.

5 Resultados

5.1 Motor Ford Fiesta 1.6 GTDI

El motor EcoBoost 1.6 GTDI es un motor del ciclo otto SI (spark ignited) que cumple con las características de los nuevos motores de la denominación downsizing. Este motor tiene una configuración de 4 cilindros en línea, con inyección directa y turboalimentador que genera respuesta desde bajas rpm, doble árbol de levas con apertura variable de válvulas, posee una relación de compresión de 10.1 : 1,[18] sin embargo la presión en cámara se aumenta debido al turbocargador; este tema no solo se mitiga con electrónica en cuanto al ángulo de inyección y tiempo de encendido de la chispa, sino con combustibles que tengan un mayor octanaje y su temperatura de autoencendido sea mayor, debido a que la presión es proporcional en la temperatura. Este motor entonces eroga 197 hp a 6000 rpm y 270 Nm a 4200 rpm. [18]



Figura 16: Motor Ford 1.6 GDI EcoBoost

5.2 Cálculo de la potencia del motor 1.6 TDI a presión atmosférica Medellín

Los motores de combustión interna (encendido por chispa), se ven en una limitante cuando tiene una presión de aire para el proceso de oxidación del combustible en el sistema. Acorde con la altura que se tenga y temperatura ambiente, se podrá obtener datos de presión y en conjunto con

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

parámetros atmosféricos se puede encontrar la densidad del aire, humedad, etc. La inyección de combustible dependerá de la cantidad de aire que se pueda suministrar para generar una reacción estequiométrica de reacción calórica aprovechada por los motores reciprocantes, en este caso de 4 cilindros en línea. Al poseer un turboalimentador, la cantidad de aire que se inyecta es mayor, además de aumentar la presión de este; mitigando la falta de aire disponible en los diferentes pisos térmicos. El turbo al generar una mayor presión y ser dependiente de los gases de escape, posee un sistema de regulación de la presión denominado “west gate” o válvula de alivio, donde al llegar a una presión deseada en la admisión, esta compuerta se abre y mitiga la restricción de los gases de escape a fluir hacia el exterior, también en los motores modernos se usa la geometría variable que mantienen la relación de aire combustible y ayudan no solo con torque desde bajas rpm, sino con los contaminantes erogados debido a una falta de aire desde esos bajos regímenes.

Con una mezcla estequiométrica y con el factor de sobrealimentación igual a 1 ($\frac{\pi}{\pi_0} = 1$).

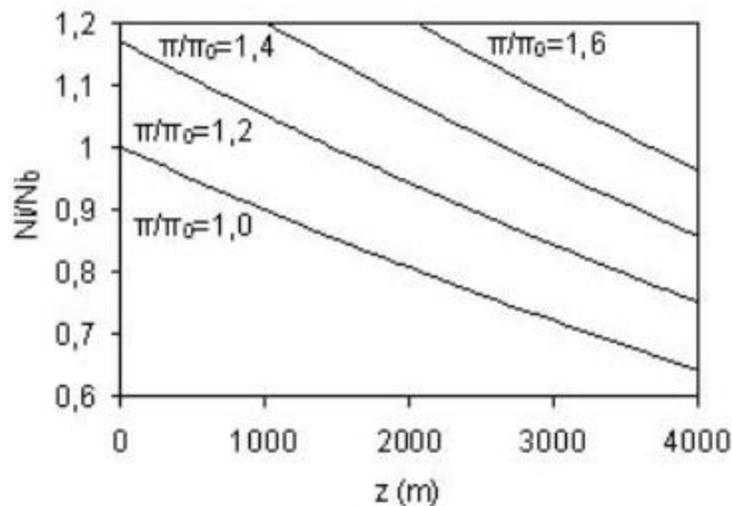


Figura 17: Potencia indicada en función de la altitud para diferentes grados de sobrealimentación (p/p_0)

Con una altura de 1500 msnm, tenemos un factor de la potencia indicada del 85% sobre la potencia real a expresada a presión atmosférica sobre el nivel del mar. La siguiente grafica demuestra el comportamiento del torque y la potencia del motor a tratar, de esta manera obtenemos cuales son los picos de estos parámetros y así definir como se desempeña en la ciudad de Medellín.

Para calcular la potencia a la altura de la ciudad de Medellín, se tiene:

$$Potencia_{med} = Potencia_{nivel\ mar} * \frac{N_i}{N_b}$$

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

$$Potencia_{med} = 197 \text{ hp} * 85\%$$

$$Potencia_{med} = 167.45 \text{ hp}$$

En la ciudad de Medellín, el motor Ford EcoBoost podrá erogar una potencia de 167.45 hp, con los componentes funcionando de manera correcta, además, el combustible debe ser gasolina con un RON de 89 octanos, similar a la gasolina extra colombiana de 2022. [22]



Figura 18: torque y potencia vs revoluciones Ford EcoBoost 1.6 GDI

5.3 Cuadro Ventajas y desventajas diferentes configuraciones.

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

Tabla 1: Cuadro comparativo de ventajas y desventajas diferentes configuraciones

Tipo de freno	Ventaja	Desventaja
Hidráulico	Freno de fácil acople y medición de torques, de sencilla instalación (manómetros miden el torque con una conversión). Bajo costo.	Alto consumo de agua y baja precisión en regímenes del motor donde se desea estudiar el fenómeno (1500-1800 rpm)
Dinamómetro DC – Corrientes Eddy Current	Altos torques, bobinas en pares para desarrollar su frenado en etapas. Sistema de control simple. Acople cardánico simple. Bajo costo del freno y de mantenimiento.	Recalentamiento de los platos discos bajo usos prolongados en altos torques. Acondicionamiento de enfriamiento.
Dinamómetro AC	Buen desempeño a bajas rpm, secuencia de mantenimiento bajas.	Costo del control elevado.
Dinamómetro imanes permanentes	Excelente desempeño gracias a su fluctuación de baja inercia rotacional. Alta calidad en testeo y mediciones	Alto costo, altas rpm. Se debe realizar un control de aceleración para acoplar un motor de combustión interna.

5.4 Elección del freno dinamométrico

Por las características evidenciadas anteriormente, el freno que por sus características se acopla tanto en la parte económica como de eficiencias es el retardador electromagnético. Las cualidades y especificaciones de este mismo serán explicadas a continuación.

El retardador seleccionado es un CFK-140 de la marca KLAM, este retardador funciona bajo el principio de funcionamiento de corrientes parasitas de Foucault y consta de un conjunto de bobinas (8 en este caso) donde se pueden inducir con una corriente DC para generar el campo magnético a los platos rotores que a su vez están acoplados a la tracción cardánica del vehículo o en este caso a la caja de transmisión del motor a evaluar FORD Fiesta 1.6 GTDI.

5.4.1 Freno dinamométrico.

El grupo de investigación GASURE tiene a disposición un freno electromagnético de corrientes parasitas de Foucault, con el cual se desarrollará el banco de pruebas para los fines académicos e investigativos de este, la siguiente imagen muestra el explosionado de sus componentes.

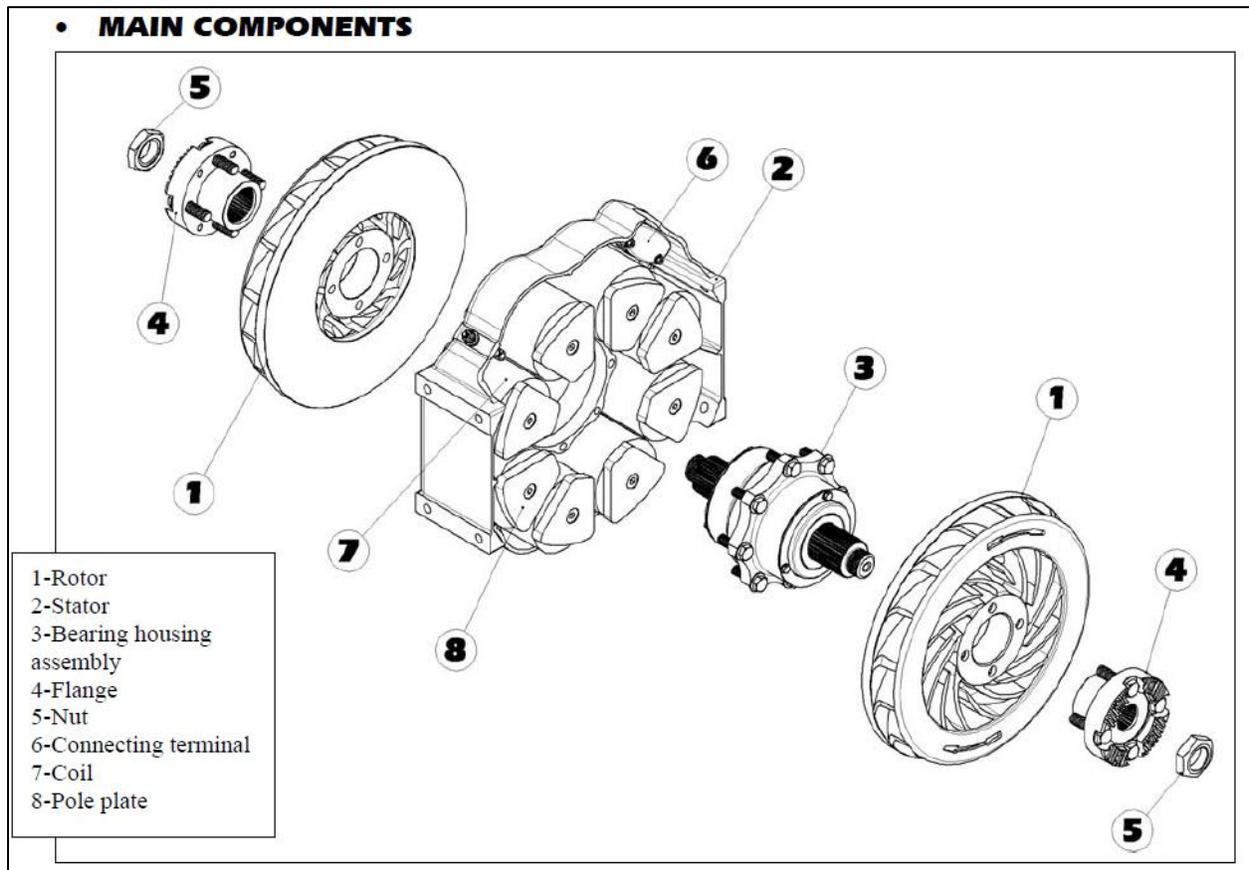


Figura 19: Componentes principales del retardador electromagnético.

5.4.2 Rotor

Este plato rotor se encuentra como elemento inducido por un campo magnético, su función es aprovechar el campo generado por las bobinas y disminuir la inercia de rotación de los ejes acoplados. Su arquitectura está basada en una cara interior que es plana y de un determinado calibre para el inducido del campo; por otro lado, hacia su parte intermedia se encuentran unas aletas de disipación de calor que se encuentran en forma de hélice para generar una transferencia de calor

generada por su misma rotación, [19] este diseño cambia según los fabricantes, pero su principio es el mismo, refrigerar el plato debido a la suba de temperatura cuando el freno es accionado. En su parte externa hay un plato que sujetan las hélices terminando en el interior de este una sujeción por cuatro orificios para perno donde será acoplado el flange. [13]

5.4.3 *Estator*

El estator, es un conjunto de bobinas, pernos, conector y platos de sujeción donde se encuentra el generador del campo magnético. Este tiene 8 bobinas que se ubican espaciadas y con un embobinado calculado por el fabricante para la generación de potencia y torque de frenado. La distancia entre las bobinas y la posición de las mismas es de suma importancia para el correcto funcionamiento del conjunto. [19]

5.4.4 *Caja de rodamientos (Bearing Housing)*

Como su nombre lo indica, es el lugar donde se encuentra el eje y a su vez los rodamientos que lo sostienen. Acorde con el diseño de mecanismos, su eje con los dos extremos acanalados debió haber sido calculado para tener una resistencia y capacidad de absorber cambios de torques bruscos debido a que su principal uso es en la de camiones y transporte de carga; debido a esto su composición permite de unas características de dureza externa (tratado térmicamente) y una flexibilidad en su interior donde permite que con la gama de tensión de esfuerzos del material se tenga un excelente desempeño. [20] Para complemento, los rodamientos de bolas están calculados para soportar tanto la alta carga radial como carga axial, esta última debido a como se mencionó anteriormente es usado en el sector transporte y debe soportar la inclemencia acorde con un factor de seguridad en el mismo diseño.

5.4.5 *Brida (Flange)*

El Flange o con su traducción al español brida, tiene la función de acoplar el conjunto plato-estator a la unión cardan o eje de transmisión. Este posee 4 pernos que se insertan al rotor, de la misma

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

manera un orificio estriado que se uno al eje del housing. La unión tanto estator flange como eje de potencia flange debe ser óptima para que la función de del freno y su durabilidad sea la esperada. La instalación de este es de carácter crítico y debe ser realizado con tolerancias concéntricas y se deben considerar las vibraciones. [20]

5.4.6 Tuerca (Nut)

Este elemento de sujeción debe ser acoplado de manera correcta, un torque indicado garantiza un buen desempeño en el conjunto.

5.4.7 Puerto de conexión (connecting terminal)

Este puerto tiene la conexión para los 4 pares de bobinas, funciona con 12 o 24 V acorde con la fuente de suministro y sus cables. El acople de este puerto debe ser muy importante debido a que es el que suministra la señal del torque que debe aplicarse acorde con el ensayo programado.

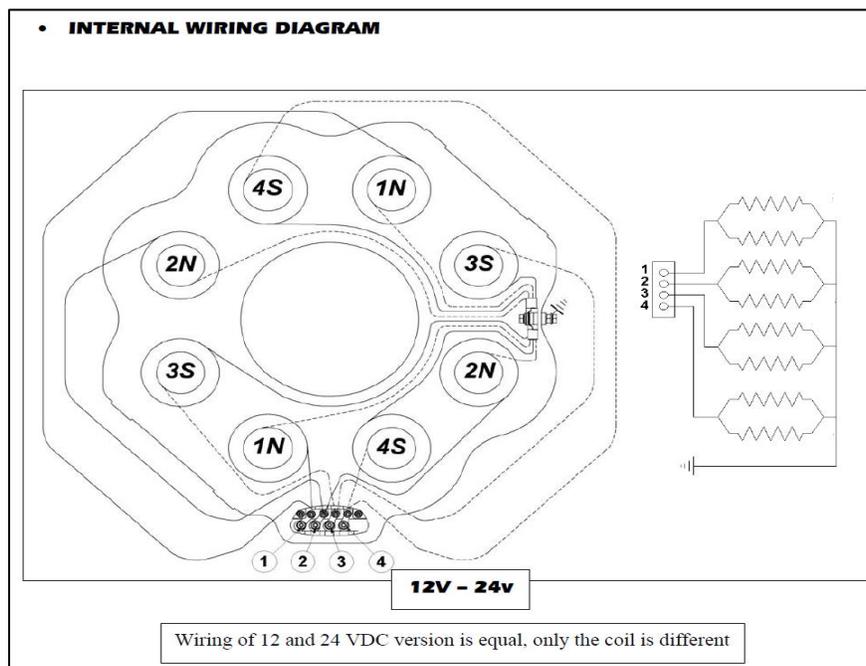


Figura 20: Diagrama cableado eléctrico retardador electromagnético

5.4.8 Bobina (Coil)

Para dar una explicación de esta bobina se debe remontar al concepto de motor de corriente directa o DC (direct current), estos motores juegan un importante papel en la actualidad. Su uso se encuentra desde discos duros de computadores hasta aplicaciones industriales, y para el caso, en un retardador electromagnético. Un motor eléctrico DC convencional utiliza como principio la siguiente expresión [21]

$$V_{ab} = \varepsilon + Ir$$

Donde el voltaje del circuito V_{ab} se iguala a una ε designada como fem o fuerza electromotriz, este fenómeno se describe como el campo que se genera por un electroimán (en este caso la bobina) y que hace girar el rotor acorde con el sentido del campo, a su vez se genera es menor que V_{ab} para lograr realizar el trabajo en el cambio de inercia del rotor, sea tanto para detenerlo como para generarle movimiento, se remite entonces el concepto de ley de inducción de faraday dice que el flujo de un campo eléctrico en una bobina generará una distribución de los campos eléctricos dada por la siguiente expresión:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

Donde σ es la permeabilidad eléctrica, \vec{E} es el campo eléctrico y \vec{j} es la distribución de corrientes en el seno conductor, denomina la ecuación de las corrientes de Foucault o Eddy Current. También al tener bobinas y obtenerse corrientes de Foucault negativas se provocan pérdidas por efecto joule en el motor, esto se desea evitar. [21] [19]

Entonces en el primero de los casos donde los rotores giran de manera inversa al sentido de giro del motor, de esta manera se detiene y genera una acción de frenado en el cardan de los vehículos con la instalación, o por el caso del banco de pruebas, una carga (torque-potencia) al eje para el estudio de los diferentes parámetros de medición en el proyecto. [21][19]

5.4.9 Placa polo (*Pole plate*)

La placa tiene una importante función, está elaborada de un material que mantiene el magnetismo (permeabilidad magnética) generado por la bobina, extendiendo así el campo magnético para generar la disminución de la inercia en el plato rotor. Su material es de suma importancia ya que al estar en constante inducción del campo puede perder propiedades, en este caso electrones se alinean para generar la polarización de la placa y transmitir el campo ya recibido por la bobina. La capacidad magnética de los materiales ferrosos depende de su temperatura y a su impacto del gradiente de inductancia generada por el campo que es fluctuante. Debido a esto su constante gradiente de polaridad se puede ver afectado por la histéresis generada por la fluctuación del campo, de la misma forma en que se llega a una saturación de magnetismo calculada para tener la mayor eficacia de la placa polo en los rotores.[19]

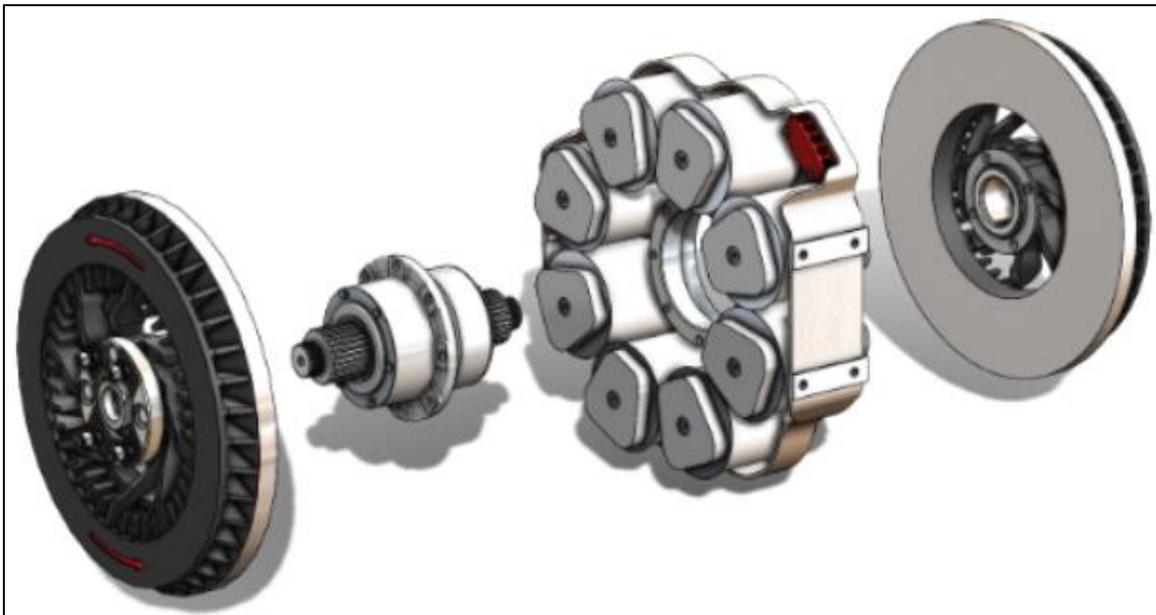


Figura 21: Freno electromagnético KLAM CFK 140

5.5 Especificaciones Retardador electromagnético

Para la elección de este retardador se eligió a la empresa KLAM, Industrias Zelu que tiene su origen en la ciudad de Navarra, España. Se tiene entonces una amplia gama para elegir acorde con la necesidad, estos equipos pueden ir acoplados en vehículos de carga liviana hasta carga pesada;

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

comienza de esa misma manera el desempeño del torque que comienza desde los 370 Nm hasta los 3820 Nm.



TECHNICAL SPECIFICATIONS
SERIE CFK
Driveline Installation

MODEL		K-40C	CFK-65	CFK-90	CFK-140	CFK-200	CFK-300	CFK-360	CFK-390	CFK-500
Range of application (t.) G.V.W. *		3,5 - 5	4 - 6.8	6.5 - 10	10 - 15	15 - 18	18 - 24	24 - 44	24.44	> 44
Max. Braketorque (Nm)	12 V	370	638	900	1400	1650	2140	2605		3775
	24 V	400	690	930	1730	2000	2600	3180	3370	3820
Weight (Kg.)	Unit complete	88	130	130	180	232	301	337	402	455
	Stator	66	94	94	130	154	183	219	275	329
	No brackets Rotors	11 + 11	18 + 18	18 + 18	25 + 25	39 + 39	59 + 59	59 + 59	63 + 63	63 + 63
Inertia of the rotors (Kgm2)		0,26	0,55	0,55	1,68	2,69	4,4	4,4	4,74	4,74
Airgap (±0.1mm)		0,9	1	1	1,2	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
* G.V.W. = gross vehicle weight, for indication only										
Max. transmissible torque (Nm) <small>Before shaft transformation is definite</small>		10000	10000	10000	12800	31600	31600	31600	31600	31600
Max. R.P.M	Continuous	4500	4000	4000	3200	2600	2600	2600	2600	2600
	Short endurance	5600	5300	5300	4300	3600	3600	3600	3600	3600
Consumption per stage (Amp)	12 V	39	28	43	45	46	56	60	-	45
	±5% (at 20°C) 24 V	22	18	24	35	38	38	38	38	40
Resistance per stage (Ω) <small>±5% (a 20°C)</small>	12 V	0,3	0,42	0,27	0,26	0,26	0,21	0,2	0	0,26
	24 V	1,09	1,3	1	0,68	0,63	0,63	0,63	0,63	0,6
Resistance per coil (Ω) 12v / 24v <small>±5% (at 20°C)</small>		0.3 / 1,09	0.85 / 2.6	0.54 / 2	0.53 / 1.36	0.52 / 1.26	0.43 / 1.26	0.4 / 1.26	0.63	1.06 / 0.6
Isolating resistance (MΩ)		1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 22: Especificaciones técnicas de serie CFK KLAM

Se elige entonces el CFK-140 donde tenemos las siguientes especificaciones

MODEL		K-40C	CFK-65	CFK-90	CFK-140
Range of application (t.) G.V.W. *		3,5 - 5	4 - 6.8	6.5 - 10	10 - 15
Max. Braketorque (Nm)	12 V	370	638	900	1400
	24 V	400	690	930	1730
Weight (Kg.)	Unit complete	88	130	130	180
	Stator	66	94	94	130
	No brackets Rotors	11 + 11	18 + 18	18 + 18	25 + 25
Inertia of the rotors (Kgm2)		0,26	0,55	0,55	1,68
Airgap (±0.1mm)		0,9	1	1	1,2
* G.V.W. = gross vehicle weight, for indication only					
Max. transmissible torque (Nm) <small>Before shaft transformation is definite</small>		10000	10000	10000	12800
Max. R.P.M	Continuous	4500	4000	4000	3200
	Short endurance	5600	5300	5300	4300
Consumption per stage (Amp)	12 V	39	28	43	45
	±5% (at 20°C) 24 V	22	18	24	35
Resistance per stage (Ω) <small>±5% (a 20°C)</small>	12 V	0,3	0,42	0,27	0,26
	24 V	1,09	1,3	1	0,68
Resistance per coil (Ω) 12v / 24v <small>±5% (at 20°C)</small>		0.3 / 1,09	0.85 / 2.6	0.54 / 2	0.53 / 1.36
Isolating resistance (MΩ)		1	1	1	1

Figura 23: Selección de la serie CFK 140

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Teniendo en cuenta que la capacidad de generar una potencia de frenado por encima de los 200 hp luego de 20 minutos de trabajo lo entrega con respecto a su grafica de potencia con respecto al tiempo.

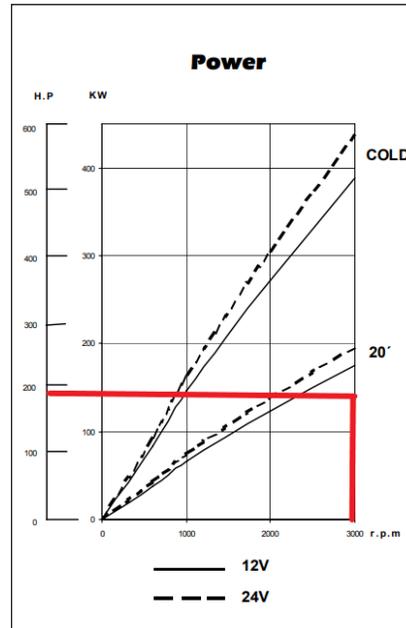


Figura 24: Rendimiento con respecto a potencia absorbida por el freno electromagnético

5.6 SP5 Controller

Para el caso del banco de pruebas se tiene el SP5 Controller, un dispositivo que permite tanto controlar el sistema como adquirir datos. En el control del sistema, se remonta la conexión que puede ser establecida a través de la ECU (Electronic Unit Controller) o módulo de control.[15]



Figura 25: Sistema DAQ SP5 Controller

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El SP5 Controller se conecta al dinamómetro electromagnético explicado anteriormente para poder generar una señal que permita accionar un torque en el retardador, este debe de ser una señal de energización con una fluctuación en el tiempo, debido a que las bobinas se inducen por pares, al tener 8, su crecimiento será de un cuarto de la potencia de frenado total(0-25-50-75-100 %) y al necesitar un valor diferente en cuanto al torque, se debe realizar un proceso de inducción parcial de las mismas para llegar al valor de torque deseado. [15]

Uno de los componentes de medición del sistema consta de una celda de carga que se ubica a una distancia determinada (L =brazo o distancia del punto de apoyo), esta es utilizada para determinar el torque del motor y de su variación acorde con la carga que el generador entrega al motor.

Entonces, hay 2 tipos de instalaciones del controlador en un dinamómetro.

- Para dinamómetro de rodillos: básicamente ayuda con la adquisición de datos básicos como el control de velocidad en los rodillos; normalmente no es usado para controlar la operación del vehículo ya que el usuario actúa directamente sobre este, encendido, aceleración, clutch, etc.
- Para dinamómetro de banco: Adicionalmente a la DAQ (Adquisición de datos) y control de velocidad (rpm), el SP5 Controller también puede controlar diferentes parámetros como el encendido del motor, ventilador, cuerpo de aceleración, entre otros. Todo esto en condiciones controladas en una habitación de pruebas que permite parametrizar y operar el motor de una manera más cómoda. [22]

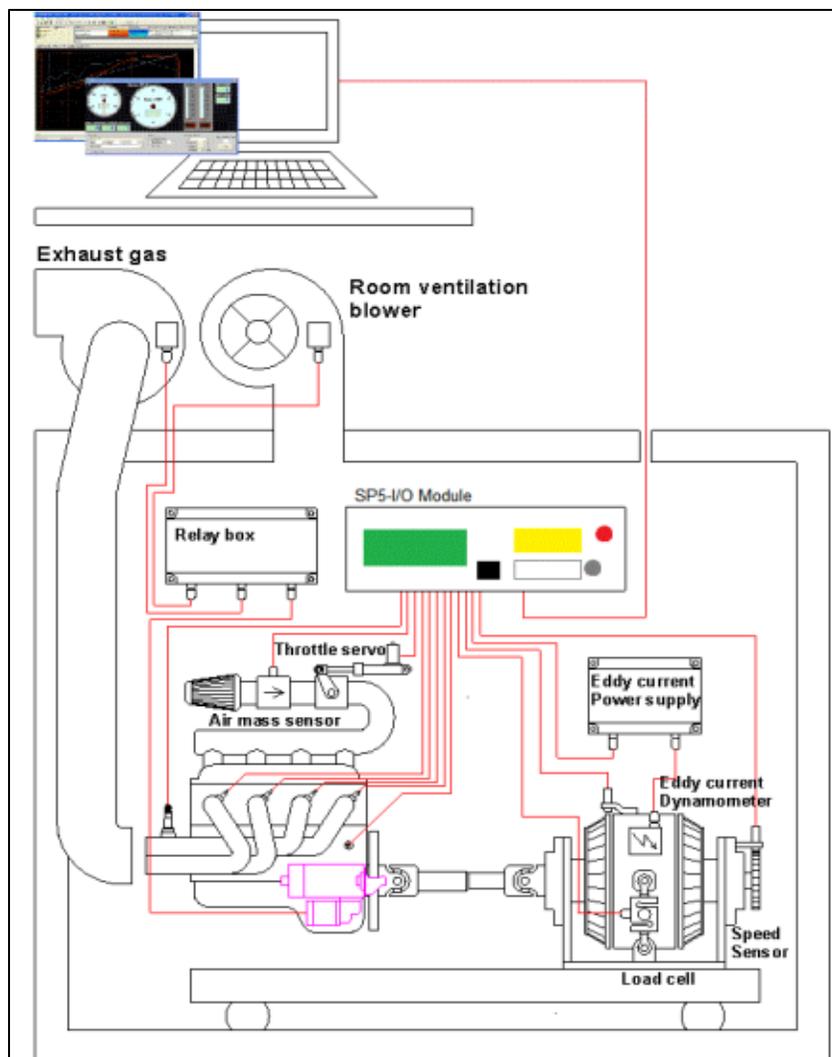


Figura 26: Diagrama de cableado adquisición de datos para DAQ.

Como se muestra en la ilustración 17, el sistema de adquisición DAQ se encuentra conectado a todos los sensores y actuadores disponibles del motor, de esta manera se puede tener en tiempo real los diferentes parámetros a medir y realizar los análisis necesarios posteriormente.

5.7 Cálculo de potencia del freno dinamométrico.

La potencia se puede calcular de dos maneras. El primer método es colocar el generador sobre cojinetes de muñón, lo que permitiría que el generador gire alrededor de un eje definido. A medida que el eje gira se mide unas revoluciones por segundo (N) y un par de reacción (T) requerido para

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

mantener el generador en su lugar. Una vez que se miden las revoluciones y el par se conoce la potencia (P) que produce el generador.

$$P = 2\pi * N * T$$

Para medir el par, se une un brazo de momento de una longitud conocida perpendicular al generador. A medida que el generador gira, produce una fuerza al final del brazo del momento, que puede medirse mediante medidores de tensión o un transductor de fuerza. El par se calcula luego mediante la siguiente ecuación.[3]

$$T = F * b$$

Donde:

F: Fuerza aplicada al final del momento

b: longitud del brazo del momento

Grafica conceptual:

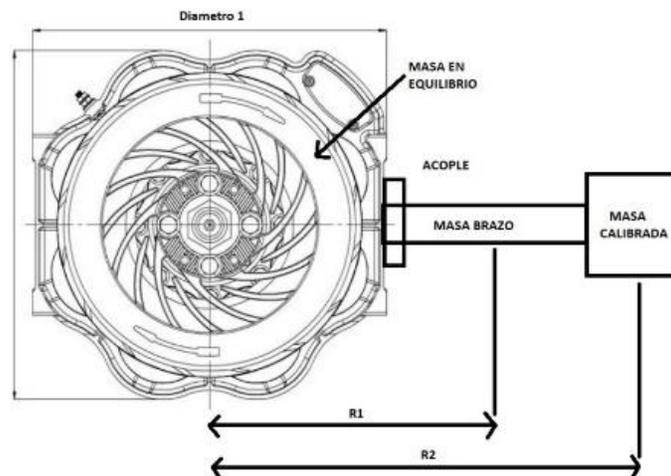


Figura 27: Diagrama brazo y fuerza

La otra manera para hallar la potencia es usando la ley de Ohm, donde la energía producida por el generador se puede medir con el voltaje y la corriente producida por el mismo; este es mucho más simple y precisa que el primer método. El par es tan importante como la potencia en los automóviles ya que dicta la cantidad de aceleración que tiene el vehículo y la cantidad de carga en

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

la carretera que este puede superar. Para medir entonces la potencia P en unidad de kW se tiene la siguiente formula:

$$P = I * V$$

Donde:

I: Corriente (Amperios)

V: Voltaje (Voltios)

El voltaje al ser una unidad constante conocida por el suministro del flujo eléctrico del edificio será entonces una constante, sin embargo, la corriente debe ser medida con un “gancho” o amperímetro que se coloca en el cable de energía como en la siguiente ilustración.



Figura 28: Método de captación de amperaje sin interrumpir la línea con gancho tomada de Google.

Todo lo anterior explicado en cuanto al freno dinamométrico es de interés para estudiar parámetros indicados en la cámara de combustión del motor, de esta manera no solo la industria de los autos le interesa estos datos; la investigación en la educación está al frente de estos temas para generar conocimiento y proponer alternativas por medio de estos estudios generando impacto social y mejorando la relación medio ambiente y la industria. El grupo GASURE de la Universidad de Antioquia con el proyecto “Estudio experimental del uso de mezclas gasolina/combustibles gaseosos para la optimización del desempeño de motores de encendido provocado de alta relación de compresión turboalimentados en el sector transporte colombiano” proyecto CODI se encuentra en la elaboración de un banco de pruebas que permita medir los diferentes parámetros necesarios

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

para realizar estudio y por ende la implementación de un sistema de “freno de motor” es de orden indispensable para el mismo, sistema que se calculará en este trabajo para implementarlo para el desarrollo del proyecto.

5.8 Potencia del motor Ford Fiesta 1.6 GTDI a la altura de la ciudad de Medellín.

Para la evaluación de la pérdida de potencia en la ciudad de Medellín, ubicada a un promedio de 1525 metros sobre el nivel del mar, según SAE J1349 se tiene una pérdida de presión equivalente al 15%, donde se asume un grado de alimentación 1; en la figura 30 se hace la relación.

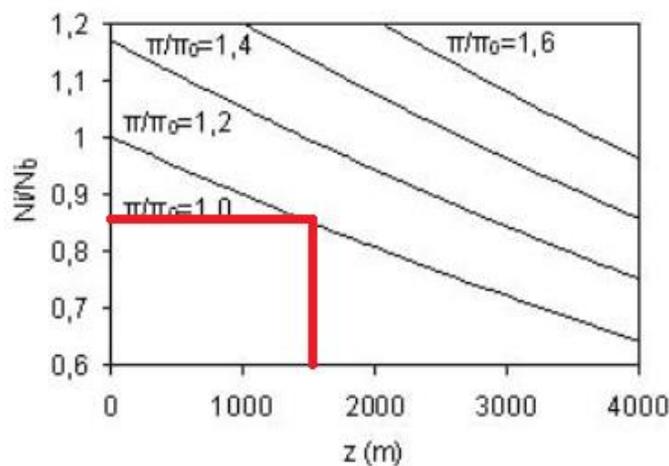


Figura 29: Relación pérdida de potencia motor Turbocargado

Se tiene entonces una potencia final de 196 hp por el 85%, teniendo un resultado de 166.6 hp que entrega la unidad FORD GTI 1.6.

5.1 Diagrama de cuerpo Libre chasis

Imagen del chasis con las cargas provenientes de los soportes del motor de combustión (FORD), freno electromagnético, pivote del freno, celda de carga, etc. Este diseño fue elaborado por medio del software INVENTOR 2020, versión para estudiantes. Se implementó una matriz o líneas de

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

centro en donde, posteriormente, se generó un barrido con los diferentes perfiles acorde con sus tamaños, así mismo, se seleccionó el material y calibre de la tubería usada.

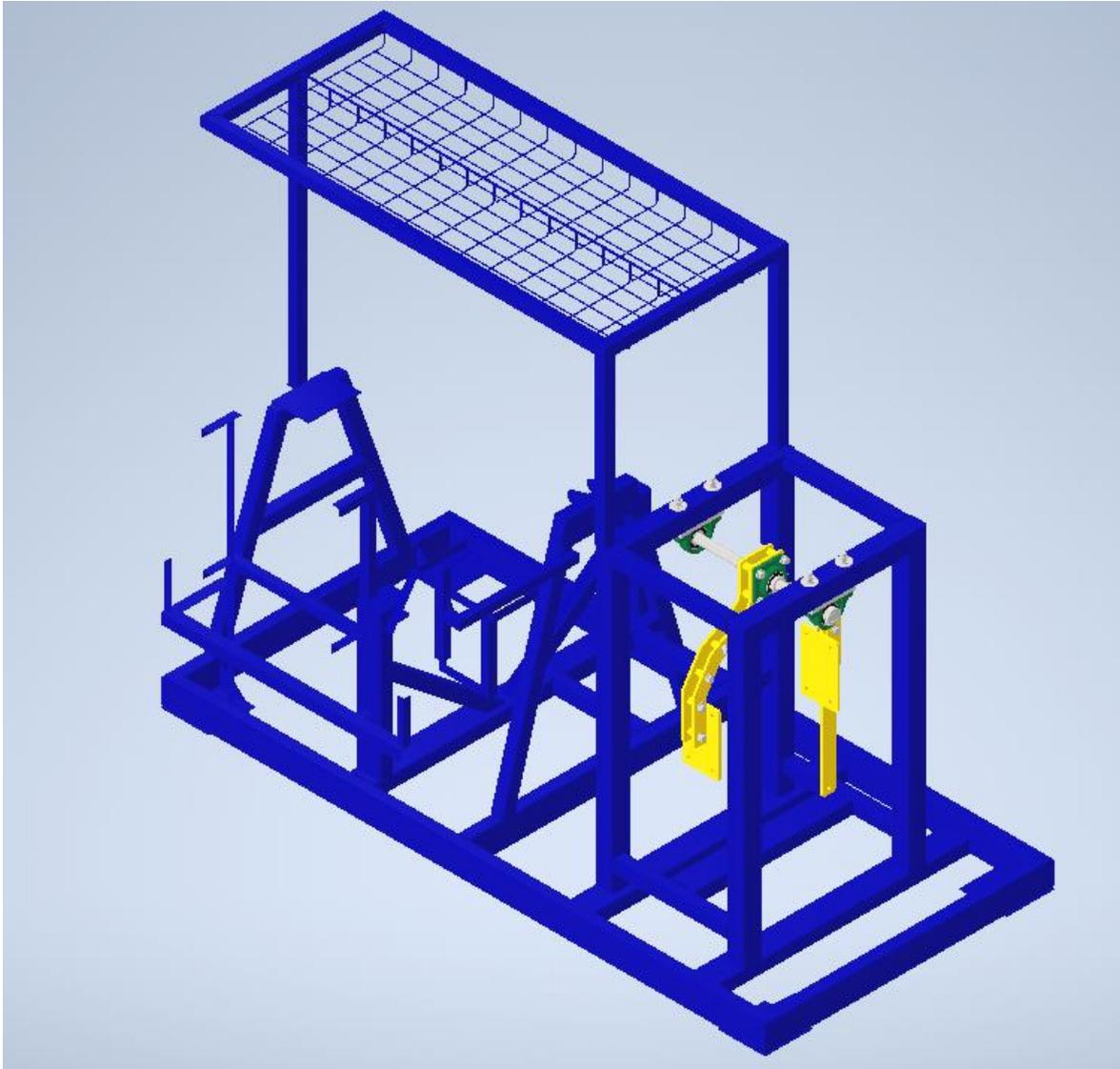


Figura 30: Vista isométrica estructura banco de pruebas

El banco fue diseñado con una estructura tubular cuadrada de calibre 4 mm, esta tiene adición de soldadura SMAW y su material es un acero SAE 1020. Su diseño fue concebido con el fin de acoplar los periféricos del motor (batería, radiador refrigerante, intercooler, tanque combustible, arnés o ramal eléctrico) a su vez como el dinamómetro, celda de carga y el sistema DAQ (Data Acquisition) junto con la fuente de alimentación al retardador electromagnético.

5.2 Resultados diagrama de cuerpo libre y análisis de la estructura

En el diagrama de cuerpo libre se tienen las principales cargas creadas por el motor de combustión y la reacción por el freno dinámico, además de sus pesos que también son tomados para la sumatoria de cargas. Es importante destacar que las fuerzas tomadas y la aplicación de estas en las secciones se puede hacer dividiendo la estructura por partes, sin embargo, con el método de mallado se tiene una estructura única y se comprende como una sola pieza.

5.3 Cargas de la estructura

Se resumen en el software ANSYS, en el cual se determinaron las principales cargas presentes en la estructura, de esta misma manera se realizó la discretización de la maya, siendo la realizada por defecto en el software, todo esto entregó resultados esperados de los cuales se destacan sus componentes en el espacio y las deformaciones, así mismo, esfuerzos que generan en los diferentes lugares de la estructura.

En la figura 31 se evidencia unas cargas con su mayoría de esfuerzo en el eje Y; en los demás ejes se genera unas cargas menores a los 20 N.

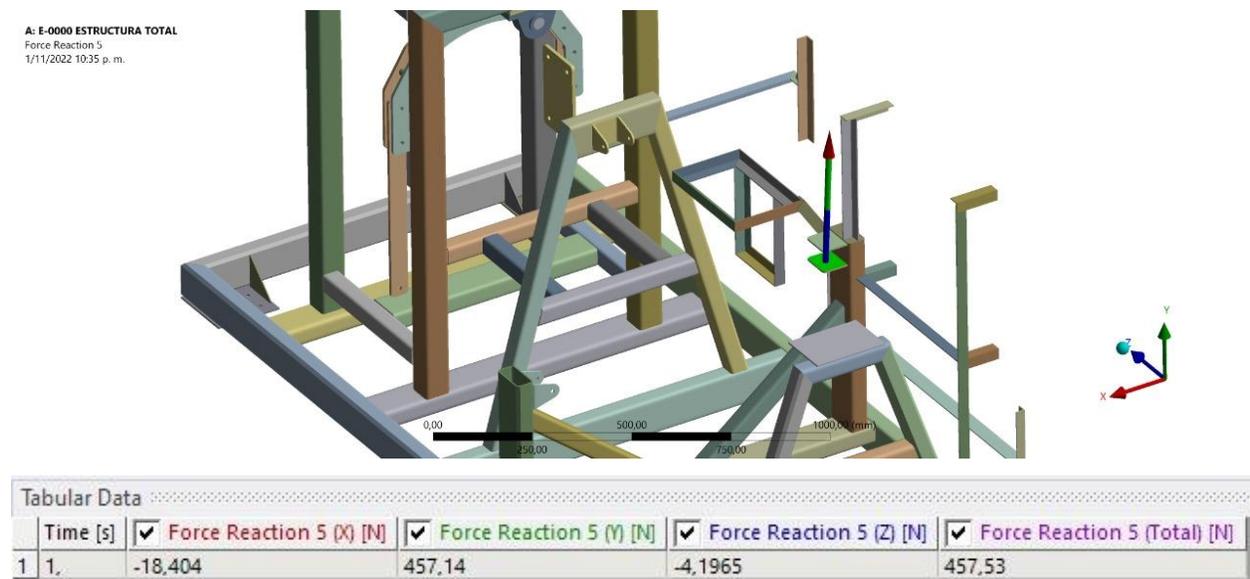


Figura 31: Carga soporte 1 y componentes de fuerza en el espacio

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

En la figura 30 podemos apreciar una componente mayoritaria en el eje X, esta en sentido positivo, 133.24 N en la componente negativa de Y y una fuerza casi nula del orden de micro Newton en la componente en Z en sentido positivo según el plano de coordenadas.

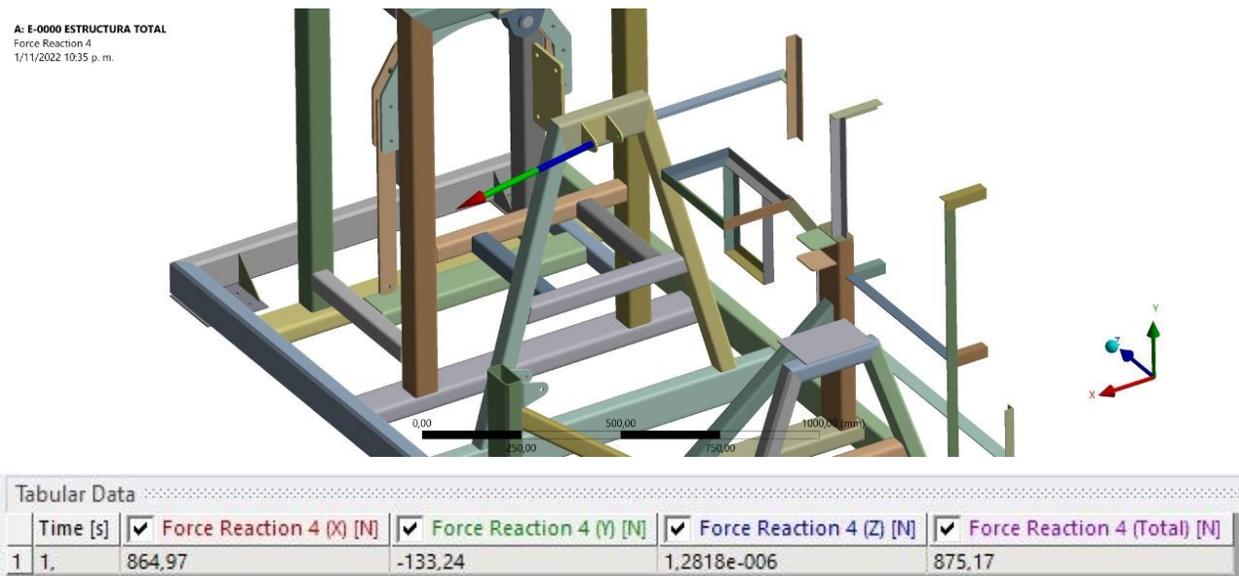


Figura 32: Carga soporte 2 y componentes de fuerza en el espacio

Para las reacciones en el soporte 3 se evidencia que debe soportar el momento de que se transmite al motor de combustión y su reacción se encuentra en gran proporción en este punto.

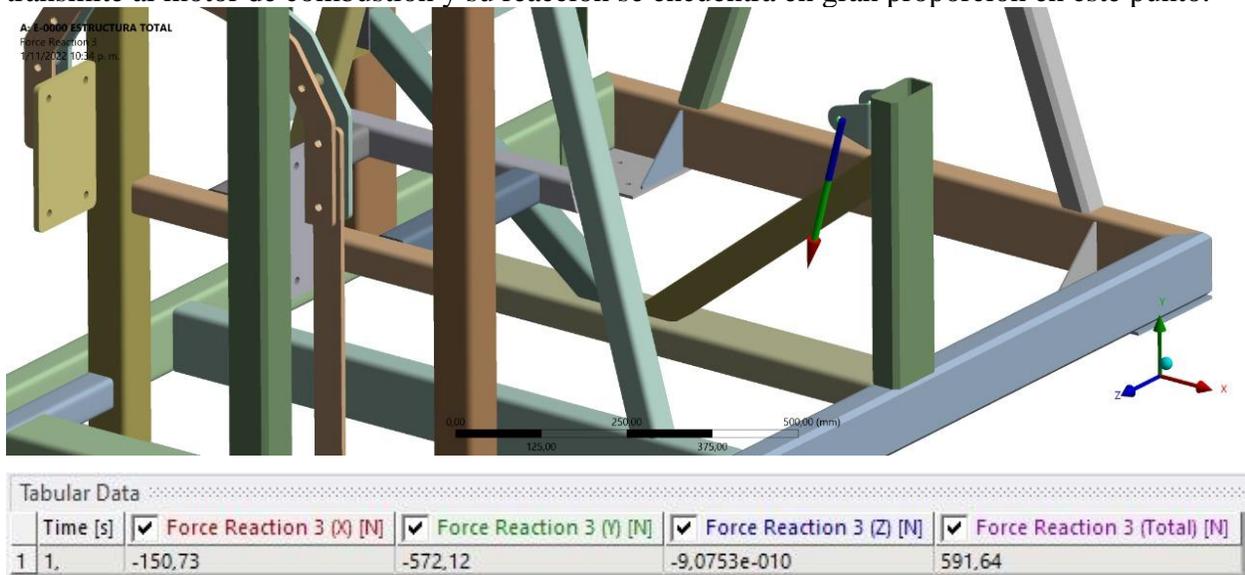


Figura 33: Carga soporte 3 y componentes de fuerza en el espacio

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Para la figura 32, se obtiene donde la estructura soportara el momento mas grande en el piso debido al momento generado en la fluctuacion de torques del conjunto motor-absorbedor. Cabe observar que la reaccion se encuentra en el mismo costado de la reaccion anterior del soporte 3.

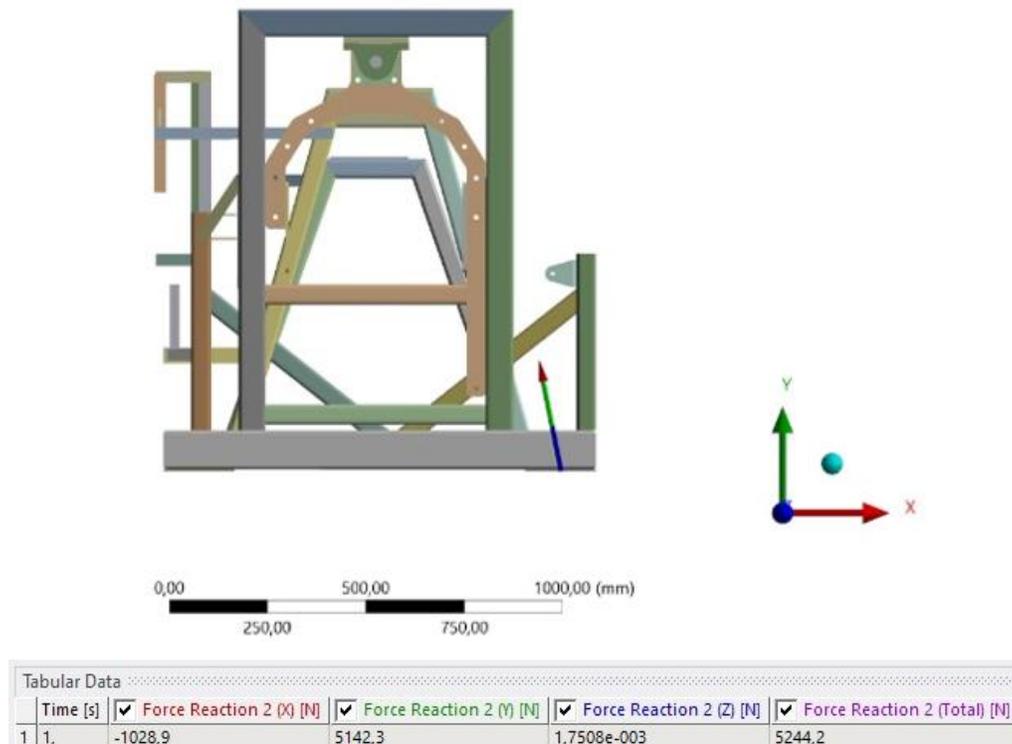


Figura 34: Carga estructura piso y componentes de fuerza en el espacio

La medida de esta fuerza nos indicara cual será, con la medida del brazo, un torque de frenado, necesario en la parametrizacion correcta del sistema. Se asume para estos cálculos que el elemento brazo no tiene deflexiones y es rigido en pruebas dinámicas.

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

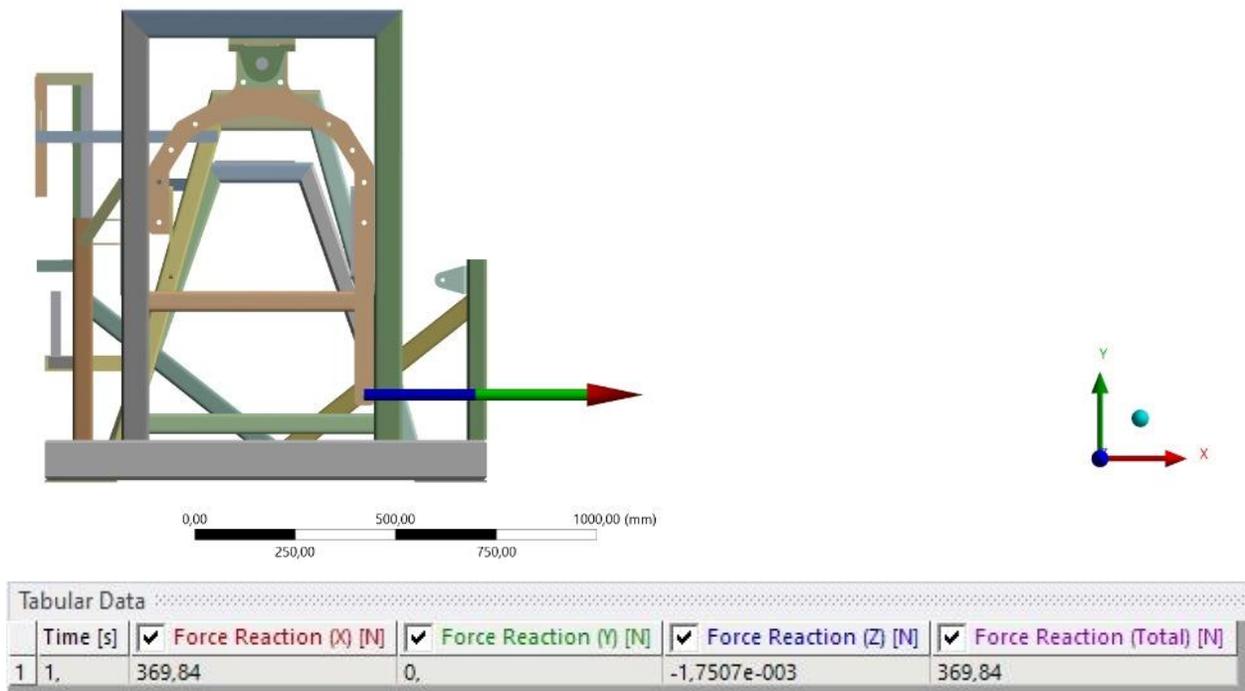


Figura 35: Carga brazo de retardador y componentes de fuerza en el espacio

En la siguiente imagen, se muestra el resumen de las principales fuerzas, momentos y desplazamientos. En la figura 34 están sus magnitudes y en la figura 35 encontramos su distribución en el chasis o estructura.

- A: E-0000 ESTRUCTURA TOTAL**
 Standard Earth Gravity
 Time: 1, s
 1/11/2022 10:37 p. m.
- A** Displacement
 - H** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
 - B** Force 2: 1800, N
 - C** Moment 2: 2,7525e+005 N-mm
 - D** Force 3: 586, N
 - E** Force: 1200, N
 - F** Force 5: 874,3 N
 - G** Force 4: 689,21 N

Figura 36: Fuerzas, momento, desplazamiento estructura total

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN
INTERNA

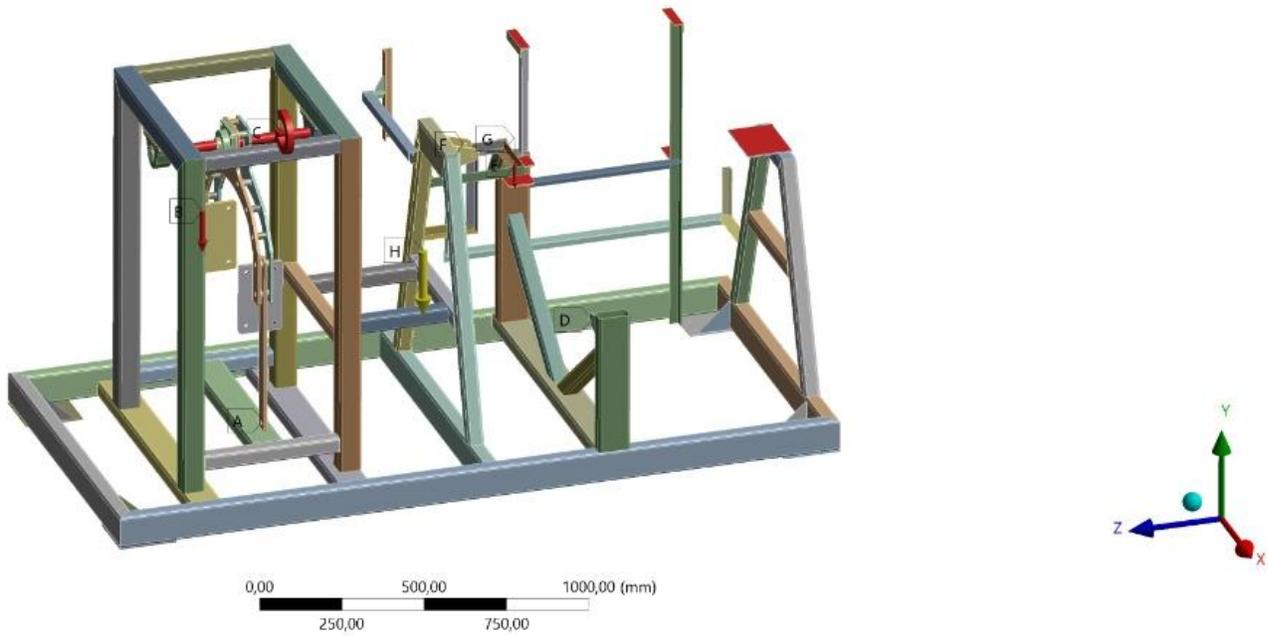


Figura 37: Resumen de las cargas

Se realiza un mallado de estructura bidimensional que genera una adecuada parametrización debido a la simpleza geométrica de los componentes de esta.

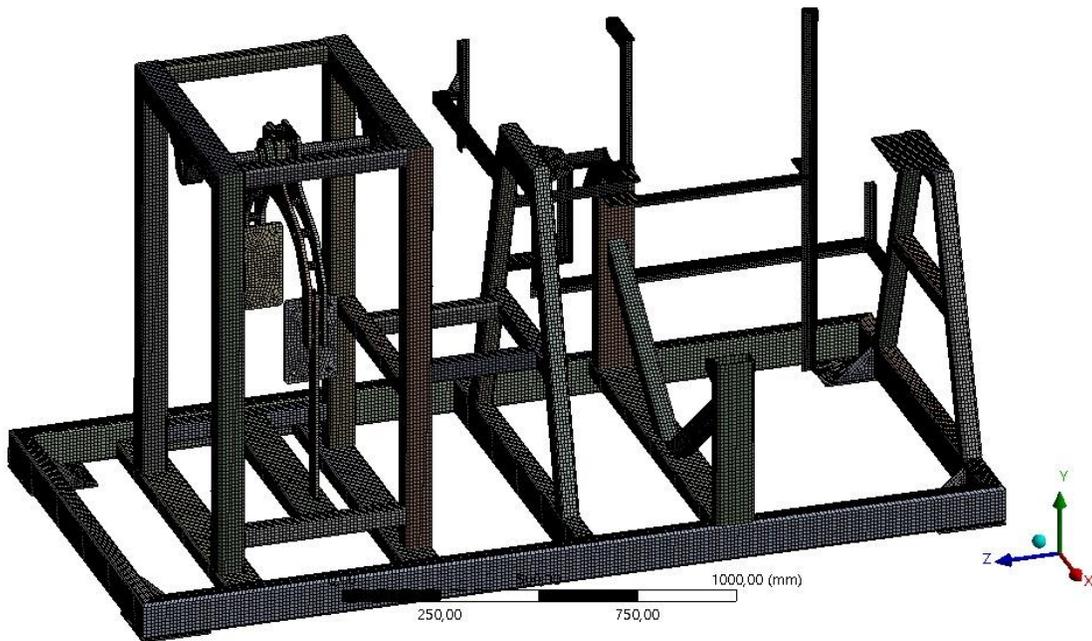


Figura 38: Discretización mayado del chasis

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Figura Ansys, mallado parametrizado cuadrado, como se nota en la figura, esta correctamente parametrizado y no se encuentran nodos que obstaculicen o disminuyan la calidad del análisis.

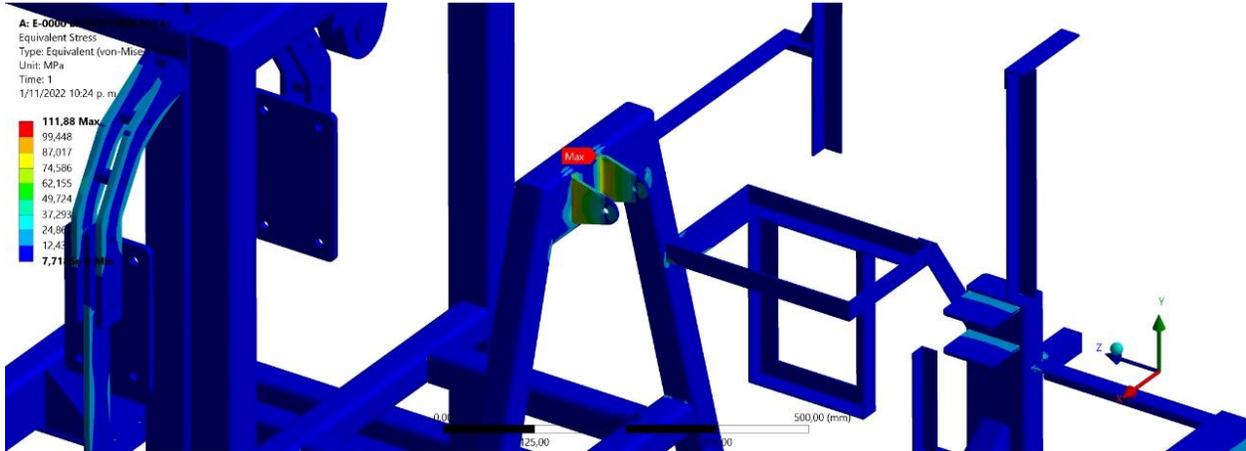


Figura 39: Esfuerzo máximo en la estructura soporte 1

Según el cálculo de estrés por el criterio de Von Mises, se tiene un esfuerzo de 111.18 Mpa, lo que no es algo despreciable, sin embargo, el material SAE 1020 tiene un esfuerzo a la fluencia de 264.8 Mpa, por lo que se puede determinar con el factor de seguridad lo siguiente:

$$f_s = \frac{\text{Esfuerzo del material a la fluencia}}{\text{Esfuerzo máximo aplicado}}$$

de lo que encontramos

$$f_s = \frac{345 \text{ MPa}}{111.18 \text{ MPa}} \quad f_s = 3.1$$

Tabla 2: Especificaciones técnicas tubería ASTM 500 grado C

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS					
ASTM A500		Resistencia a la Fluencia mínima		Resistencia a la Tracción mínima	
		Mpa	psi	Mpa	psi
Redondo	Grado A	230	33000	310	45000
	Grado C	315	46000	425	62000
Cuadrado y Rectangular	Grado A	270	39000	310	45000
	Grado C	345	50000	425	62000

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

La deflexión máxima que se obtuvo en la simulación fue de 1.506 mm, algo despreciable en el soporte donde se apoya la caja filtro o admisión.

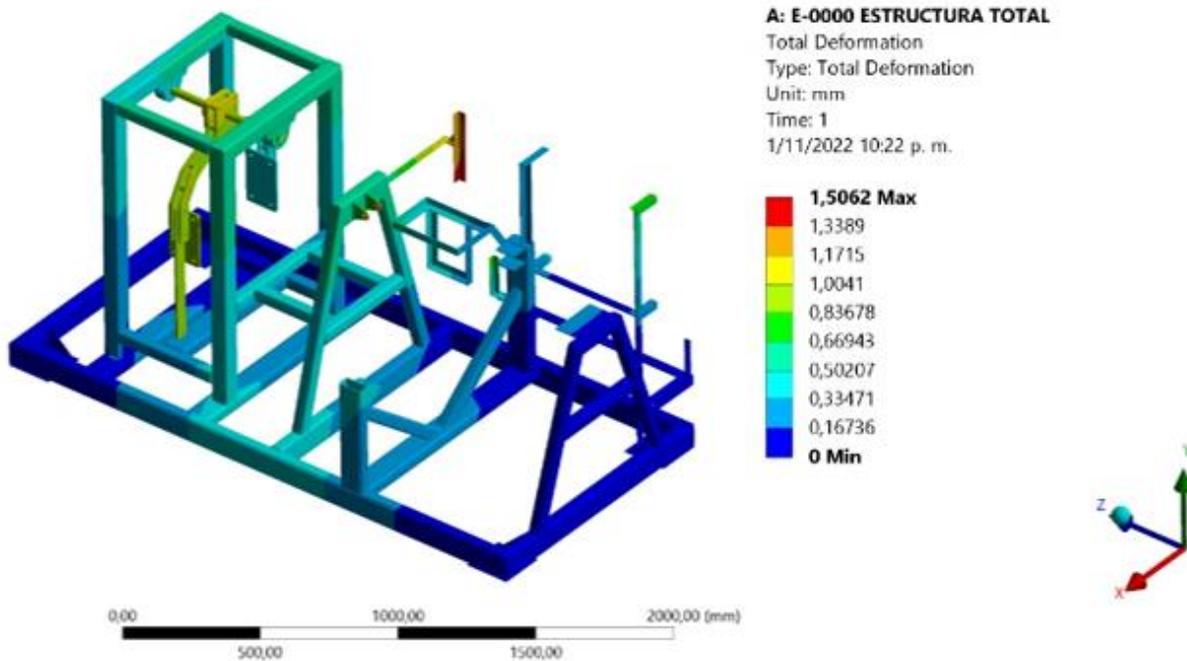


Figura 40: Deflexión máxima en la estructura

5.4 Diagrama eléctrico del montaje

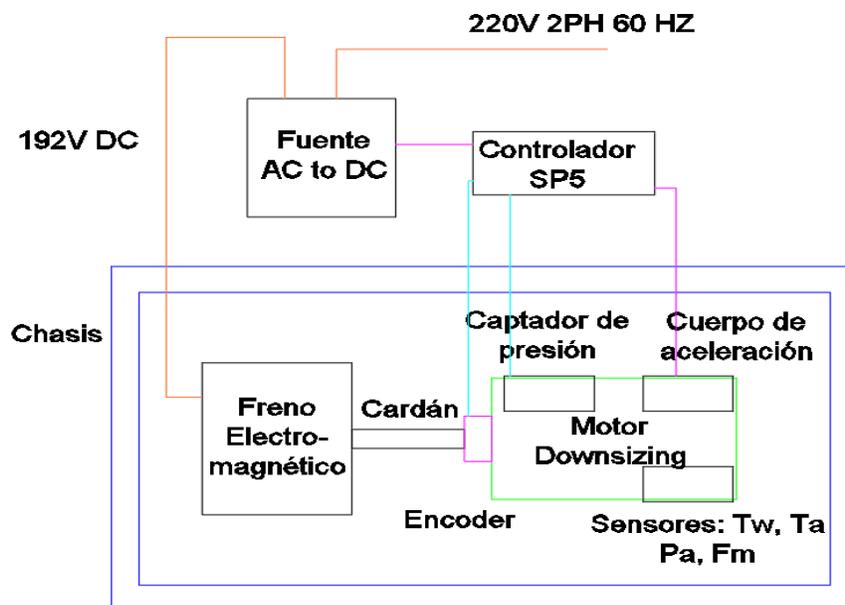


Figura 41: Diagrama eléctrico simplificado motor de combustión GDI y retardador electromagnético.

IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se obtuvo un banco de pruebas estacionario con un freno de motor apto para la prueba de motores (encendido provocado o encendido por compresión) que el grupo GASURE tenga para el estudio, donde el freno dinamométrico acoplado a los diferentes tipos de motores de combustión interna tengan una versatilidad de medida en cuanto a la velocidad de giro y pueda ser medido su torque para así poder sacar datos de relevancia en la investigación y finalidad del grupo que es generar conocimiento de índole social y pertinente para el desarrollo de la comunidad.

5.5 Resultado del banco.



Figura 42: Banco de pruebas finalizado

6 Conclusiones

- El factor de seguridad cumple de manera correcta con la necesidad en una estructura industrial ya que supera el recomendado de 2 y este se calculó con el límite a la fluencia.
- El mallado del banco de pruebas para realizar análisis de elementos finitos, fue suficiente para indicar los principales puntos o lugares de estrés de la estructura, no fue necesario realizar un mallado más estructurado y de costo computacional para llegar a un buen resultado, así lo permitía la fácil geometría y composición del banco en discusión.
- El esfuerzo mayor se evidenció en el soporte 2 de motor, con 111.18 Mpa de resultado, este no tiene ningún inconveniente con las propiedades del material donde su esfuerzo a la fluencia no es superado.
- El factor de seguridad de la estructura es de 3.18, contando con el esfuerzo a la fluencia donde se debe igualar o superar el factor de seguridad igual a 2.
- La deflexión y el estrés de las zonas denotadas en los análisis de modelación muestran que la estructura tiene un correcto funcionamiento, incluso condicionándola a la potencia máxima erogada como si el motor estuviese a nivel del mar, esta, por lo tanto, genera la estabilidad y el desempeño en los rangos de factores de seguridad deseados.
- El freno dinamométrico tiene una capacidad de generar el máximo torque de frenado durante 20 minutos, después de esto se genera un declive en su eficiencia debido a la suba de temperatura de los platos que pierden permeabilidad magnética, sin embargo, el motor a medir (FORD GDI) tiene un torque máximo de 275 Nm, que equivalen a un poco más del 25% de desempeño total del retardador, por lo tanto, un sistema de ventilación para generar una convección forzada es suficiente.
- Para generar un plan de mantenimiento del freno, se remite a cambiar las bobinas o enramado eléctrico de posición para generar un desgaste uniforme de estas, por otro lado, es inherente tener un montaje con las mejores tolerancias en el acople cardánico.
- Debido a tiempos de entrega en los repuestos del motor FORD, no fue posible realizar la calibración del sistema dinamométrico y de la captación de la fuerza en la celda de carga para determinar el torque en la misma.

7 Referencias

- [1] B. S. Soundarraaj, *Development of a Hybrid Vehicle Powertrain Test Laboratory By A Thesis Submitted to the College of Engineering Department of Mechanical Embry-Riddle Aeronautical University*. 2013.
- [2] A. Rose, “Application of a Continuously Variable Transmission to Engine Boosting and Exhaust Energy Recovery Systems,” 2013.
- [3] J. B. Heywood, *Internal Combustion Engine Fundamentals*. N. York: McGraw-Hill. 1988.
- [4] L. Perchín García, “Diseño mecánico de un banco de potencia para la prueba del prototipo de la Shell Eco-marathon,” *Esc. Politécnica Super. Univ. Carlos III*, 2014, [Online]. Available: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/22950>.
- [5] A. J. Martyr and M. A. Plint, *Engine Testing Theory and Practice*, Third edit. 2007.
- [6] A. F. J. Andrés, C. A. Ismael, and F. F. Sergi, *Máquinas térmicas motoras - I Máquinas térmicas*. 2002.
- [7] R. D. Atkins, *An Introduction to Engine Testing and Development*. 2009.
- [8] S. End and U. License, “PWS3 . x (SCR Based) / HS-PWS (IGBT Based) Eddy Current Power Supply with Current Control Contents,” 2021.
- [9] M. Á. Cruz Villachica, “El SCR y sus aplicaciones.,” pp. 20–30, 2017.
- [10] V. Sportdyno, “Sportdyno v4.0 manual del usuario,” pp. 1–87, 2018.
- [11] X. Zi *et al.*, “Ultrasensitive and stable pressure sensor based on tapered optical fibres,” *Opt. Commun.*, vol. 518, no. January, p. 128337, 2022, doi: 10.1016/j.optcom.2022.128337.
- [12] D. Zhang *et al.*, “Pressure-driven Eu²⁺-doped K₃Sc(PO₄)₂: A broad cyan-green emitting phosphor for closing the cyan cavity in solid-state lighting and applying in optical pressure sensor,” *J. Lumin.*, vol. 245, no. February, p. 118798, 2022, doi: 10.1016/j.jlumin.2022.118798.
- [13] J. P. Holman, *Transferencia de calor*. 1999.
- [14] R. I. Rincon-Jara, R. Ambrosio, and J. Mireles, “Análisis y caracterización de un acelerómetro capacitivo fabricado con tecnología polymump’s,” *Superf. y vacío*, vol. 23, no. 3, pp. 26–31, 2010, [Online]. Available: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-

35212010000300006&lng=es&nrm=iso&tlng=es.

- [15] M. Arenas, “Sistema Para la Adquisicion y monitorizacion de aceleracion mediante microprocesador,” *Univ. Sevilla*, pp. 39–54, 2008.
- [16] M. Kratzsch and M. Günther, “Knocking in Gasoline Engines,” *Knocking Gasol. Engines*, 2018, doi: 10.1007/978-3-319-69760-4.
- [17] J. T. Celigüeta Lizarza, *Método de los Elementos Finitos para Análisis Estructural*. 2011.
- [18] Fordauthority.com, “FORD 1.6L ECOBOOST ENGINE.”
<https://fordauthority.com/fmc/ford-motor-company-engines/ford-ecoboost-family/ford-1-6l-ecoboost-engine/>.
- [19] Y. Freedman and S. Zemansky, “Física universitaria.”
- [20] K. J. BUDYNAS, RICHARD G. NISBETT, “Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley,” *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [21] C. Pacheco and A. Soto, “Corrientes de Foucault . Medida de conductividad eléctrica por inducción electromagnética,” pp. 1–15, 2009.
- [22] T. Sp and D. Acquisition, “Sp5 Installation and Setup Manual,” 2016.
- [22] Lapuerta, Magín, Armas, Octavio, Agudelo, John R, & Sánchez, Carlos A. (2006). Estudio del Efecto de la Altitud sobre el Comportamiento de Motores de Combustión Interna. Parte 1: Funcionamiento. *Información tecnológica*, 17(5), 21-30. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000500005>

8 Anexos

Anexos_Patiño_Daniel_DiseñoSistemadeFrenado.pdf