



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN DINAMÓMETRO DE BANCO PARA PRUEBAS EN
MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA LIGEROS DE ALTO DESEMPEÑO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JAIME ALEXANDER RUEDA GÓMEZ

TUTOR
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA

Unidad de Alta Tecnología
UNAM - Campus Juriquilla, Querétaro, QRO.
Septiembre de 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Dr. ALEJANDRO RAMÍREZ REIVICH

SECRETARIO: Dr. VICENTE BORJA RAMIREZ

VOCAL: Dr. MARCELO LÓPEZ PARRA

1^{er} SUPLENTE: Dr. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ

2^{do} SUPLENTE: Dr. JORGE ALFREDO FERRER PÉREZ

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Unidad de Alta Tecnología – Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla
Fray Antonio de Monroy e Hjar 260, Villas del Mesón, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. MARCELO LÓPEZ PARRA

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Marcelo', is written over a horizontal line.

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), le agradezco por la beca de maestría otorgada durante mi estancia como estudiante extranjero en México.

Al Posgrado de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, agradezco por la oportunidad brindada al aceptarme como estudiante de maestría de tiempo completo en el programa de maestría en ingeniería mecánica, campo disciplinario ingeniería automotriz.

Al Laboratorio Nacional de Ingeniería Aeroespacial y Automotriz, agradezco, porque allí desarrollé la presente tesis y realicé proyectos académicos asociados, y no hubiese sido posible sin la colaboración de su personal docente, de los equipos, herramientas e instalaciones disponibles.

Agradezco profundamente a mi tutor de tesis, el Doctor Marcelo López Parra, quien fue un guía constante durante todo el proceso de la maestría, y siempre estuvo presto a escuchar y aconsejarme en el camino hacia el conocimiento y hacia la vida en sí misma, aún recuerdo la primera tarea que puso durante el primer día de clase, que fue contestar un par de simples pero trascendentales preguntas: ¿Cómo me veo en 10 años? ¿Cuál es mi plan para alcanzarlo?, preguntas que retumbaron en mi mente y me incentivaron día a día a dar lo mejor de mí en sus clases y en la tesis como aporte a esa prospectiva de vida personal. Larga vida y mil bendiciones

Agradezco al Doctor Ferrer por las clases que tomé con él, aerodinámica y motores de combustión interna, porque me permitió conocer más a fondo temas de mecánica de fluidos y de termodinámica que tenía inconclusos desde mi licenciatura, un excelente docente y persona.

Un especial agradecimiento al Maestro Osiris Ricardo Torres, quien siempre estuvo pendiente de los proyectos y de las necesidades, propendiendo siempre por mi desarrollo académico y profesional, dando celeridad a trámites, y a la solución de dudas o inconvenientes de la tesis y administrativos.

Agradezco al todo el equipo de Insoel IoT: Alejandro, David y Edwin, quienes con su disciplina y dedicación apoyaron técnicamente en el desarrollo de la parte electrónica, de adquisición de datos y visualización de parámetros para el presente proyecto, espero que nos encontremos nuevamente más adelante para futuros proyectos.

Agradezco a mis amigos que conocí en la UAT, que me mostraron un poco de su cultura, idiosincrasia y gastronomía, primero con quienes entré a la par, Alfonso, Milton y Juan, quienes vivieron la misma travesía en las asignaturas cursadas, en los proyectos ejecutados, así como en el esparcimiento, como el fútbol, el gimnasio, las reuniones de convivencia, entre otros, segundo, a Mireya, Giovanna, Sergio, Huato e Isaac, con quienes compartimos y vivimos el en laboratorio y fuera de él.

También agradezco a mis amigos de vida que conocí y conviví en un espacio extracurricular, tales como Yeinner Tarazona, Sharon Villegas, Karina Coronado, y en

general a todos los de LIPATA, asimismo, a mis amigos de casa, Xime, Sergio y Rebe, por compartir experiencias como montar bici, jugar fútbol, hacer asados, ir de fiesta, bailar, ver series, viajar, mercar, hasta hacer aseo o descansar, y principalmente abrir nuestros corazones.

Doy gracias por poner en mi camino a mis grandes amigos de toda la vida, a Chrystian, Faver, Julián, David, Sergio, Augusto, Ronald y Karen, quienes siempre han estado allí para platicar, compartir y crecer juntos a pesar de la distancia.

Agradezco de forma especial a mi gran amiga Eliana Toro, con quien emprendimos la travesía de la maestría desde la aplicación en Colombia en el año 2017, y logramos fortalecer nuestra amistad, la llevo en mi corazón y aprecio mucho cada detalle que ha tenido conmigo desde que nos conocemos.

Por último, agradezco a Bai, Romario y mis amigos de Lúmina, quienes me hicieron crecer espiritualmente en mi relación con Dios, además logramos compartir muchos momentos especiales, desde los juegos de fútbol, hasta cada reunión de grupo donde aprendimos y departimos de nuestra cotidianidad. Gracias porque siempre me llevaron en sus oraciones, son una gran bendición en mi vida.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis de maestría a Dios, a mi madre, a mi hermana, a mi padre y a mi abuelo.

Primeramente, a Dios, porque hace cuatro años me hizo una promesa de vida que en su momento la recibí y no lograba entenderla del todo, está en Josué 1:9 y dice: “Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en donde quiera que vayas”.

A mi mamá Yolanda Gómez Fonseca, quien con su gran amor me ha impulsado a emprender en las experiencias de vida que he decidido tomar, su apoyo incondicional en la distancia y en los altibajos que hacen parte de la sazón de la vida. También, porque me enseñó desde pequeño, a partir de su ejemplo, a trabajar con amor, dedicación, disciplina y pasión, muchas gracias y Dios la guarde y proteja por siempre, la amo mamita.

A mi hermana, Judy Andrea Rueda Gómez, un ser de luz que ha iluminado mis pasos con su amor y consejos, además de que ha sido mi confidente en este tiempo que hemos estado distantes.

A mi padre, porque he aprendido de su creatividad y de su alegría ante la vida a pesar de todo lo que esté en frente nuestro, también es una honra a nuestros ancestros Rueda, a mi nono Rafael, y a mi linaje en general, porque es un apellido con poder y curiosamente está relacionado a todo en lo que me he desempeñado en la vida, porque son personas emprendedoras creativas y curiosas y han inculcado eso en mí de forma inconsciente, muchas gracias.

CONTENIDO

Agradecimientos.....	i
Dedicatoria.....	iii
Contenido	ii
Índice de figuras	iv
Índice de tablas	vi
Lista de abreviaturas	viii
Lista de símbolos.....	ix
Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción	3
Planteamiento del problema.....	6
Objetivos.....	7
General	7
Específicos.....	7
Capítulo 1. Marco teórico	8
1.1 Fundamentos de Motores de Combustión Interna	8
1.1.1 Parámetros presentes en las fichas técnicas de motores y vehículos.	9
1.1.2 Parámetros obtenidos a partir de la información de las fichas técnicas.....	11
1.1.3 Parámetros obtenidos a partir de información de manuales de taller	12
1.1.4 Parámetros específicos o normalizados	15
1.1.5 Parámetros dependientes de la información de manuales de taller.....	16
1.1.6 Eficiencia en motores de combustión interna	18
1.1.7 Curvas típicas en motores de combustión interna.....	19
1.2 Pruebas en estado transitorio y estacionario sobre MCI.....	22
1.2.1 Mediciones en estado transitorio.....	22
1.2.2 Mediciones en estado estacionario:.....	24
1.3 Dinamómetros de banco	25
1.3.1 Tipos de frenos o PAU	25
Capítulo 2. Metodología	28
Capítulo 3. Resultados – Diseño del dinamómetro de banco.....	29
3.1 Establecimiento de necesidades, requerimientos y especificaciones objetivo	29

3.1.1	Declaración de la misión	30
3.1.2	Identificación de las necesidades.....	31
3.1.3	Especificaciones del dinamómetro de banco.....	35
3.2	Diseño conceptual.....	51
3.2.1	Modelos de caja negra y gris	51
3.2.2	Conceptos generados por sistemas y evaluación	53
3.2.3	Concepto final.....	73
3.3	Diseño Detallado.....	76
3.3.1	Diseño a nivel de sistema.....	76
3.3.2	Selección de componentes estandarizados.....	84
3.3.3	Modelos CAD finales y planos de fabricación.....	85
3.4	Fabricación y evaluación del producto	85
3.4.1	Construcción e implementación del diseño.....	85
3.4.2	Evaluación del producto	87
3.4.3	Documentos para el usuario	92
Capítulo 4.	Discusión de resultados.....	96
4.1	Análisis de pruebas de desempeño.....	96
4.2	Análisis de los subsistemas del dinamómetro	98
4.2.1	Sistema hidráulico	98
4.2.2	Sistema de transmisión	98
4.2.3	Estructura de soporte	99
4.2.4	Sistema de adquisición de datos.....	99
4.2.5	Sistema de control.....	100
4.2.6	Sistema de refrigeración.....	100
4.2.7	Sistema de gases de escape	100
Conclusiones	101
Referencias.....		103
Anexo 1. Factores de conversión: Parámetros específicos a normalizados.....		106
Anexo 2. Respuestas cuestionarios – Identificación de necesidades		107
Cuestionario 1. Compilación de respuestas.....		107
Cuestionario 2. Compilación de respuestas.....		108
Anexo 3. Planos de fabricación.....		113
Anexo 4. Histogramas y QQ-Plots celda de carga		133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variables dimensionales de la geometría de un sistema pistón cilindro.....	9
Figura 2. Instrumentos para la medición del torque en un MCI. a) Directa. b) Indirecta.....	10
Figura 3. Medidor de caudal de aire de admisión.....	14
Figura 4. Factores de conversión de parámetros absolutos a parámetros relativos	16
Figura 5. Diagrama Presión - Volumen para un MCI operado bajo un ciclo Otto real.....	17
Figura 6. Curva de presión en la cámara de combustión en función del ángulo del cigüeñal..	20
Figura 7. Curvas de potencia y torque en motores operados con a) Gasolina, b) Diésel.....	20
Figura 8. Mapas de Consumo específico de combustible para MCI.....	21
Figura 9. Mapa de inicio de chispa en un MCI.....	22
Figura 10. Curvas de torque y potencia de motor Otto con admisión 100% y 50% abierta.	23
Figura 11. Ciclo de manejo EPA Federal Test Procedure – FTP, fase de arranque en frío.	23
Figura 12. Comparación de emisiones de NO _x , pruebas en ruta y en dinamómetro.....	24
Figura 13. Puntos de prueba para el ciclo estático ECE R49.	25
Figura 14. Vista de sección dinamómetros hidráulicos a) Llenado fijo b) Llenado variable	26
Figura 15. Gráficas típicas de torque y potencia de un dinamómetro hidráulico.	26
Figura 16. Curvas típicas de torque y potencia de un dinamómetro de corriente Eddy.	27
Figura 17. Curvas típicas de torque y potencia de un dinamómetro de AC/DC.....	27
Figura 18. Metodología de diseño utilizada para el desarrollo del dinamómetro.....	28
Figura 19. Oportunidades identificadas para el diseño del dinamómetro.	29
Figura 20. Curva de potencia y torque del dinamómetro Stuska XS-19.	37
Figura 21. Dimensiones generales del freno hidráulico Stuska XS-19.	38
Figura 22. Fuerza aplicada por el freno hidráulico sobre la celda de carga.....	39
Figura 23. Curvas de presión media efectiva para diferentes motores ligeros.	42
Figura 24. Curvas de potencia específica para diferentes motores ligeros.	43
Figura 25. Ponderación de parámetros para diferentes motores ligeros.	44
Figura 26. Modelo de caja negra del dinamómetro.	51
Figura 27. Modelo de caja gris del dinamómetro.....	52
Figura 28. Variables a medir en el dinamómetro.....	59
Figura 29. Conceptos para la adquisición de datos en el dinamómetro.	70
Figura 30. Concepto 1 del dinamómetro.....	74
Figura 31. Concepto final del dinamómetro	74
Figura 32. Modelado CAD de la estructura de soporte.	76

Figura 33. Diagrama de bloques – Adquisición de datos torque.....	77
Figura 34. Diagrama de bloques – Adquisición de datos velocidad de giro motor	78
Figura 35. Diagrama de bloques – Adquisición de datos flujo de combustible.....	78
Figura 36. Señal del sensor de posición de aceleración del motor Kawasaki ZX6R	79
Figura 37. Diagrama de bloques – Módulo de comunicación a PC.	79
Figura 38. Planos de fabricación del acople para bomba de combustible	80
Figura 39. Acoples para bomba de combustible fabricados utilizando impresión 3D.....	81
Figura 40. Curvas de torque a la salida del cigüeñal y del dinamómetro.....	81
Figura 41. Curvas de potencia a la salida del cigüeñal y del dinamómetro	82
Figura 42. Modelado CAD del eje de transmisión y de los acoples entre el freno y el motor...	83
Figura 43. Circuito hidráulico propuesto	84
Figura 44. Modelo CAD final	85
Figura 45. Estructuras fabricadas para el montaje en el laboratorio	86
Figura 46. Panel de control electrónico e hidráulico	86
Figura 47. Ensamble final del banco de pruebas.....	87
Figura 48. Mediciones celda de carga con pesas patrón	88
Figura 49. Curva de calibración flujómetro de combustible - Según ficha técnica.....	89
Figura 50. Diagrama de pruebas experimentales sobre la línea de combustible	90
Figura 51. Curva del flujómetro medido experimentalmente	90
Figura 52. Error relativo medición de consumo de combustible.....	91
Figura 53. Medición de desalineaciones en los ejes de transmisión.....	92
Figura 54. Personas que utilizan dinamómetros para diferentes tipos de prueba.	107
Figura 55. Porcentaje de entidades que realiza pruebas con dinamómetros.	108
Figura 56. Respuesta: Modificaciones espaciales en las instalaciones de un dinamómetro.	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones técnicas de una motocicleta y un MCI según fichas técnicas.	9
Tabla 2. Parámetros de MCI presentes en las fichas técnicas	10
Tabla 3. Parámetros dependientes obtenidos de la información de las fichas técnicas.....	11
Tabla 4. Parámetros presentes en manuales o medidos directamente.	12
Tabla 5. Parámetros específicos en motores.	15
Tabla 6. Parámetros dependientes obtenidos de la información de las fichas técnicas.....	16
Tabla 7. Eficiencia en motores.	19
Tabla 8. Preguntas realizadas a usuarios de dinamómetros.....	32
Tabla 9. Preguntas realizadas a entidades académicas y centros de pruebas automotrices ..	33
Tabla 10. Necesidades identificadas relacionadas al dinamómetro.....	35
Tabla 11. Matriz de métricas vs. Necesidades identificadas.	36
Tabla 12. Especificaciones de dinamómetro Stuska XS-19.....	37
Tabla 13. Especificaciones técnicas de celda de carga Futek MTA400.	39
Tabla 14. Especificaciones técnicas del amplificador Seneca Z-SG.....	40
Tabla 15. Variables geométricas de los motores a comparar	41
Tabla 16. Parámetros de operación de los motores a comparar	41
Tabla 17. Especificaciones de motor Kawasaki ZX-6R.	44
Tabla 18. Patentes de dinamómetros.	45
Tabla 19. Ejemplos de dinamómetros ofertados en el mercado.	47
Tabla 20. Exactitud requerida para cumplimiento de estándar SAE J1349 de 2004.....	48
Tabla 21. Condiciones de referencia ambientales según estándar SAE J1349 de 2004.	48
Tabla 22. Gasolina de referencia según el estándar SAE J1349 de 2004.....	48
Tabla 23. Valores objetivo del banco de pruebas.....	50
Tabla 24. Conceptos del subsistema 1.1 - Soporte del sistema de refrigeración del motor.....	54
Tabla 25. Ponderación de conceptos del subsistema 1.1	54
Tabla 26. Conceptos de los subsistemas 1.2 y 1.5 - Soporte del freno y del motor	55
Tabla 27. Ponderación de conceptos de los subsistemas 1.2 y 1.5.....	55
Tabla 28. Conceptos del subsistema 1.3 – Sistema de alineación entre el freno y el motor....	56
Tabla 29. Ponderación de los conceptos del subsistema 1.3.....	56
Tabla 30. Conceptos subsistemas 1.4 y 1.6 Soporte componentes eléctricos e hidráulicos ...	57
Tabla 31. Ponderación de los conceptos de los subsistemas 1.4 y 1.6.....	57
Tabla 32. Conceptos del subsistema 1.7 – Soporte para el tanque de combustible	58

Tabla 33. Ponderación de los conceptos del subsistema 1.3.....	58
Tabla 34. Variables para adquisición de datos en el dinamómetro.....	60
Tabla 35. Selección de conceptos para el sistema de adquisición de datos	62
Tabla 36. Conceptos para el sistema de control de parámetros en el dinamómetro.....	64
Tabla 37. Ponderación de conceptos del sistema de control de parámetros.....	65
Tabla 38. Conceptos del sistema 4 – Transmisión entre el motor y el freno hidráulico.....	67
Tabla 39. Ponderación de conceptos del sistema de transmisión de potencia.....	68
Tabla 40. Conceptos del sistema 5 – Sistema hidráulico	68
Tabla 41. Ponderación de conceptos del sistema de refrigeración del freno.....	69
Tabla 42. Ponderación de conceptos del sistema de refrigeración del motor.....	70
Tabla 43. Ponderación de conceptos en sistema de adquisición y procesamiento de datos....	71
Tabla 44. Ponderación de conceptos en la plataforma de visualización de datos.....	72
Tabla 45. Ponderación de conceptos del sistema de aislamiento de ruido	72
Tabla 46. Ponderación de conceptos del sistema de extracción de gases.....	73
Tabla 47. Resultados mecánicos del comportamiento del eje.	82
Tabla 48. Tornillos seleccionados para el banco de pruebas.	84
Tabla 49. Estadística descriptiva de los datos obtenidos por la celda de carga	87
Tabla 50. Especificaciones del flujómetro de combustible- Futurlek FLOWFUEL30L0.....	89
Tabla 51. Ficha técnica del dinamómetro	93
Tabla 52. Información solicitada para las pruebas.	94
Tabla 53. Datos recopilados en pruebas	95
Tabla 54. Curvas de desempeño obtenidas en el dinamómetro de banco.	96

LISTA DE ABREVIATURAS

API	American Petroleum Institute (Instituto americano del petróleo)
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATV	All Terrain Vehicle (Vehículo todo terreno)
BHP	Brake Horsepower (Caballos de fuerza al freno)
BMEP	Brake Mean Effective Pressure (Presión media efectiva al freno)
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption (Consumo específico de combustible al freno)
BTDC	Before Top Dead Center (Ángulo antes del punto muerto superior)
CAD	Computer Aided Desing (Diseño asistido por ordenador)
CADC	Common Artemis Driving Cycles (ciclo de manejo Artemis)
ECU	Electronic Control Unit (unidad electrónica de control)
FTP	Federal Test Procedure (Procedimiento de prueba federal)
GUI	Graphical User Interface (Interfaz gráfica de usuario)
IMEP	Indicated Mean Effective Pressure (Presión media efectiva indicada)
MAF	Mass Air Flow sensor (Sensor de flujo másico de aire)
MCI	Motores de Combustión Interna
MEP	Mean Effective Pressure (Presión media efectiva)
MON	Motor Octane Number (Número de octanos de motor)
NEDC	New European Driving Cycle (Nuevo ciclo de manejo europeo)
OBD	On board Diagnostics (Diagnóstico a bordo)
OEM	Original Equipment Manufacturer (Equipo original de fábrica)
%OT	Percentage of Open Throttle (Porcentaje de apertura de la mariposa)
PEMS	Portable Emission Measurement Systems (Sistemas de medición de emisiones portable)
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle (Vehículo eléctrico híbrido enchufable)
PMI	Punto Muerto Inferior
PMS	Punto Muerto Superior
PAU	Power Absorption Unit (Unidad de absorción de potencia, freno)
RON	Research Octane Number (Número de octanos de investigación)
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices)
TPS	Throttle Position Sensor (Sensor de posición de aceleración)
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter (Receptor-transmisor universal asíncrono)
UAT	Unidad de Alta Tecnología
VVT-i	Variable Valve Timing Intelligence (Sincronización de válvulas variable inteligente)
WHP	Wheel Horse Power (Caballos de fuerza a la rueda)
WLTC	Worldwide harmonized Light-duty vehicles Test Cycles (Ciclo mundial armonizado para vehículos ligeros)
WOT	Wide Open Throttle (Mariposa totalmente abierta)

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Longitud de la manivela	P_i	Potencia indicada
A	Área de sección	P_{i_c}	Potencia indicada corregida
A_{cc}	Área superficial de la cámara	P_{∞}	Presión ambiente
A_{ch}	Área de la cabeza del cilindro	Q	Flujo volumétrico
A_p	Área del pistón	Q_c	Calor de salida
A/F	Relación aire Combustible	Q_h	Calor de entrada
B	Diámetro del pistón	Q_{HV}	Poder calorífico inferior del combustible
BC	Bottom Center (PMI)	r_c	Relación de compresión
CA	Factor de corrección atmosférico	R	Relación biela/manivela
C_D	Coefficiente de descarga	R_{bs}	Relación entre diámetro y carrera
dv	Diferencial de volumen	s	Distancia entre cigüeñal y pin del pistón
D_v	Diámetro de válvulas	S_p	Velocidad instantánea del pistón
g	Gravedad	$\overline{S_p}$	Velocidad lineal media del pistón
H	Diferencia de presiones	S_{xx}	Factor de emisión del contaminante xx
HR	Humedad Relativa	SFC	Consumo específico de combustible
H_a	Entalpía antes de la combustión	t_o	Temperatura de admisión observada
H_b	Entalpía después de la combustión	T_-	Par motor
l	Longitud de la biela	T_b	Par del motor al freno
L	Carrera	T_{bc}	Par del motor al freno corregido
\dot{m}_f	Flujo másico de combustible	T_c	Temperatura mínima
m_f	Masa del combustible total	T_h	Temperatura máxima
\dot{m}_a	Flujo másico de aire	T_{max}	Par máximo
m_a	Masa de aire total	T_{∞}	Temperatura ambiente
MEP	Presión media efectiva	TC	Top Center (PMS)
MEP_{max}	Presión media efectiva máxima	v	Volumen específico
n	Número de cilindros	V	Volumen variable del cilindro
n_v	Número de válvulas	V_c	Volumen de la cámara de combustión
n_R	Revoluciones por ciclo de trabajo	V_d	Volumen de desplazamiento
N	Velocidad del motor	V_t	Volumen total de la cámara.
$N_{P_{max}}$	Velocidad de máxima potencia	W_c	Trabajo indicado por ciclo
$N_{T_{max}}$	Velocidad del par máximo	X, Y, Z	Ejes coordenados
NO_x	Óxidos de nitrógeno	α, β, γ	Ángulos de los planos, X-Z, YZ, X-Y
P	Presión	α	Grado de carga
$P_{adm_{do}}$	Presión de admisión observada aire seco	γ	Relación de calores específicos del aire
P_-	Potencia	λ	Relación aire combustible relativa

P_b	Potencia al freno	η_c	Eficiencia de la combustión
$P_{b_{max}}$	Máxima potencia al freno	η_{carnot}	Eficiencia de Carnot
P_{b_c}	Potencia al freno corregida	η_m	Eficiencia mecánica
P_{b_o}	Potencia al freno observada	$\eta_{th,otto}$	Eficiencia térmica del ciclo Otto
P_c	Presión en el cilindro	η_v	Eficiencia volumétrica
P_E	Potencia específica	$\rho_{a,i}$	Densidad del aire de admisión
P_f	Potencia de fricción	ρ_f	Densidad del combustible
P_{f_o}	Potencia por fricción observada	θ	Ángulo de giro del cigüeñal

RESUMEN

El presente trabajo muestra en forma detallada las fases de diseño y fabricación de un dinamómetro de banco para llevar a cabo pruebas de desempeño sobre motores de combustión interna ligeros, con potencias menores que 200 hp, los cuales son ampliamente utilizados en vehículos de competencia como automóviles de la Fórmula SAE, vehículos todo terreno, motocicletas, entre otros. El diseño parte desde la fase de establecimiento de requerimientos, seguido del diseño conceptual y de detalle para finalmente llegar a la fabricación. En la fase conceptual se consideran todos los sistemas relacionados a un laboratorio de pruebas de motores estacionarios, y la implementación se lleva a cabo en la estructura, adquisición de datos, transmisión de potencia, mecanismo de frenado e interfaz gráfica para el usuario final, con el fin de obtener en primera instancia parámetros de desempeño.

El dinamómetro se conecta directamente al eje de salida de la transmisión del motor o del vehículo y cumple con las especificaciones descritas en el estándar SAE J1349, instrumentado para la obtención de las curvas de torque, potencia y consumo de combustible, además su interfaz se llevó a cabo desde Matlab para la obtención de curvas comparativas y mapas de inyección a partir de parámetros específicos como son la potencia específica, el consumo específico de combustible y la presión media efectiva al freno, las cuales están abiertas para futuras modificaciones en el caso de implementación de instrumentación adicional tales como medidores de gases de escape, temperaturas de agua de refrigeración, presión en la cámara de combustión, flujo de gases de admisión y escape y demás señales utilizadas en el campo de la caracterización en motores.

El dinamómetro es de tipo hidráulico de llenado variable, con una operación manual tanto en la carga del freno como en la mariposa del flujo de admisión del motor, a partir de dos válvulas de control de flujo de agua aprovechando el sistema de refrigeración existente en la Unidad, además los datos del motor como del banco de pruebas son adquiridos en una sola línea para su posterior procesamiento.

El banco de pruebas se fabricó y está operando en la Unidad de Alta Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Querétaro.

ABSTRACT

A dynamometer bench has been designed and built to test light weight and high-performance internal combustion engines that deliver power below 200 hp. These engines are commonly used in competition vehicles such as Formula SAE cars, all-terrain vehicles, motorcycles, etc. The process of design reported herein starts identifying the needs and establishing the design requirements, followed by the conceptual and detailed design stages. Finally, the construction and test-validation of the equipment is realized.

During the conceptual design stage all the systems related with the lab implementation of the dyno are discussed. The detailed design phase comprises the development of the structure, data acquisition, powertrain, brake mechanism, hydraulic circuits and the graphical user interface, in order to achieve the specified performance parameters.

The dynamometer can be connected directly to the output shaft of the engine's transmission, accomplishing SAE J1349 standards, moreover, the user's interface has been developed in Matlab to ease the acquisition of the engine maps and curves. Specific fuel consumption, specific power and mean effective pressure are some of the parameters that are used. The dynamometer is variable fill hydraulic type and incorporates a manual setting of the load.

DESCARGO DE RESPONSABILIDAD

Alguna información producto de la presente tesis es considerada reservada debido a un proceso de patente, por lo cual, en el documento se presentan cuadros de "Información confidencial". Para más información, contactar mediante correo electrónico a la dirección jaruedago@gmail.com o lopezp@unam.mx.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna, en adelante MCI, son la forma de propulsión predominante en fuentes móviles terrestres tales como automóviles, camiones, motocicletas y buses, caso tal que para el año 2015, el número de vehículos de pasajeros en uso ascendió a una cifra de 947 millones de unidades a nivel mundial [1], con un porcentaje anual promedio de automóviles nuevos y en desuso de 7% y 3.3% respectivamente, es decir que el número total sigue en aumento. Asimismo, cerca de un 0.13% del total de vehículos en uso son de tecnologías alternativas como eléctricos o híbridos enchufables (por sus siglas en inglés, PHEV) [2], y considerando la tasa de crecimiento del sector híbrido y eléctrico, se tendría un comportamiento en vehículos con motores de combustión interna predominando el mercado por lo menos en unos 20 años más; además, según estimaciones realizadas, a partir de los vehículos nuevos y en uso [3], se calcula que la vida útil de un automóvil es aproximadamente de 25 años.

Por otra parte, al realizar la comparación y evolución tecnológica específicamente de los MCI de hace dos décadas, han mejorado su desempeño gracias, en parte, a la optimización de parámetros de combustión, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías como el uso de sistemas de inyección directa, y sistemas turbo cargados en motores cada vez más pequeños, como también el desarrollo de motores de carga estratificada, entre otros [4], para lo cual desde siempre se ha requerido bancos de pruebas para su caracterización y análisis. Es así como el uso de dinamómetros en el área automotriz se ha extendido a nivel global desde hace décadas, a partir de la necesidad de caracterizar, controlar y mejorar los sistemas que influyen en el comportamiento de las emisiones de contaminantes atmosféricos, los consumos de combustible, el desempeño y la eficiencia energética sobre motores y vehículos; del mismo modo, hay un uso generalizado de dinamómetros como una herramienta de verificación ambiental a partir de pruebas de revisión de estándares nacionales, así como en inspecciones técnicas periódicas (tales como las que realizan los centros de verificación automotriz), y en casos de investigación como la evaluación de combustibles alternativos, sistemas de control de emisiones, estimación de factores de emisión para alimentar inventarios de emisiones, programación de cajas de velocidades, entre otros.

Los dinamómetros presentes en el mercado se pueden dividir en tres tipos según el punto de medición, el primero es el dinamómetro de banco para motores, el cual mide la potencia directamente a la salida del cigüeñal/volante en MCI (denotada como BHP o potencia al freno por sus siglas en inglés). El segundo es el dinamómetro de cubos, el cuál va unido a la salida de los ejes de tracción de un vehículo, es decir considera la potencia generada por el motor, así como las pérdidas por la transmisión de potencia hasta los ejes de transmisión hacia las ruedas. Por último, se encuentra el dinamómetro de chasis o de rodillos, que mide la potencia directamente en las ruedas del vehículo (denotada como WHP o potencia a la rueda por sus siglas en inglés) y considera las pérdidas del motor, de la transmisión y de rodadura. Los tres tipos de dinamómetros se utilizan para llevar a cabo pruebas de desempeño que simulan el comportamiento del vehículo en condiciones reales o específicas, variando la carga, la velocidad y parámetros de control.

Otra forma de clasificación de los dinamómetros es a partir de su principio de funcionamiento, donde existen dos tipos, hidráulicos y eléctricos, entre los hidráulicos se encuentran los de llenado constante y los de llenado variable de agua, para el caso de los eléctricos se encuentran de tres clases, los de corriente Eddy, los de corriente continua y los de corriente alterna, cada uno con ventajas y desventajas según la aplicación en la que se vaya a usar [5].

En el mercado actual, los dinamómetros presentan un único uso definido, bien sea aquellos dedicados a motores o a los dedicados a vehículos (de cubos y de chasis), por tanto, los laboratorios pueden tener diversos tipos según sus necesidades, demandando un gran espacio y un alto uso de infraestructura energética, causando que los centros de prueba cuenten con dinamómetros para aplicaciones específicas. Para el caso concreto de la Universidad Nacional Autónoma de México, las pruebas sobre los vehículos de competencia que desarrollan los grupos estudiantiles, como es el caso de la Fórmula SAE, lo hacen a través de pruebas en dinamómetros externos de tipo chasis, donde la flexibilidad en la programación de las unidades de control electrónico está dada por la pericia del centro de pruebas y no siempre por el análisis de la información y los datos adquiridos in situ, además no queda trazabilidad de las pruebas al no tener disponibles los datos fuente de las pruebas sino solamente los resultados de las mismas; asimismo, se presentan inconvenientes en pruebas de larga duración por calentamiento y desgaste prematuro de llantas, así como en la estimación de coeficientes de rodadura y de deslizamiento al momento de la obtención final de los resultados.

Por lo anterior, el presente proyecto se centra en el diseño y fabricación de un dinamómetro, para ser usado en motores de combustión interna ligeros, delimitando su aplicación en aquellos de alto desempeño, definidos como aquellos que cumplen con tres características: 1. Alta relación potencia máxima vs desplazamiento, 2. Altas velocidades medias del pistón máximas, 3. Altas presiones medias efectivas, donde usualmente corresponde a motores super cuadrados, es decir a aquellos que tienen una relación diámetro x carrera mayor que uno [6]. El dinamómetro cubre las necesidades de usuarios de este tipo de motores, como en el caso de la escudería de la Fórmula SAE, con un enfoque de modularidad, confiabilidad y bajo costo, asimismo con una plataforma que tenga en cuenta los insumos e instrumentos que se encuentran disponibles en el laboratorio, y una plataforma con la disponibilidad de los datos fuente y la programación abierta para la obtención de resultados de curvas y parámetros de desempeño según las necesidades .

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, para llevar a cabo pruebas de desempeño y mapeo sobre motores de vehículos livianos como los utilizados en la competencia de la Fórmula SAE, Baja SAE, karts, vehículos todo terreno (ATV), entre otros, no se encuentran disponibles dinamómetros exclusivos que permitan probarlos, por el contrario, se encuentran dinamómetros destinados a otras tipologías vehiculares que se adecuan a estos tipos de vehículos, que principalmente son dinamómetros de rodillos para vehículos comerciales, limitando la obtención de datos fuente y la ejecución de pruebas sobre modificaciones realizadas de diseño en los sistemas vehiculares relacionados, por tanto, la pregunta que surge al problema identificado es la siguiente:

¿Qué alternativa para la prueba de motores livianos de alto desempeño se constituye como una opción para cubrir las necesidades de obtención de curvas de desempeño y mapeo en estos motores?

A partir de esta pregunta, se plantea la siguiente hipótesis: Es posible el diseño y la fabricación de un dinamómetro de banco, utilizando herramientas de análisis y síntesis, que permita a investigadores y alumnos la medición de motores livianos de alto desempeño, que cuente con la adquisición de datos de la instrumentación de una forma centralizada, que permita obtener las curvas de desempeño y mapeo de los motores según las necesidades del usuario.

OBJETIVOS

GENERAL

Diseñar y fabricar un dinamómetro de banco para llevar a cabo pruebas de consumo de combustible, potencia, torque y velocidad de giro sobre motores de combustión interna ligeros de alto desempeño, a partir de una metodología de diseño de producto.

ESPECÍFICOS

- Diseñar el banco de pruebas para motores.
- Adecuar el diseño a los componentes e instrumentos disponibles en el Laboratorio de Sistemas Automotrices de la Unidad de Alta Tecnología de la UNAM.
- Adquirir datos de potencia, torque, velocidad angular y consumo de combustible para motores de alto desempeño.
- Seleccionar un motor de prueba de alto desempeño.
- Adecuar el motor para su operación de forma estacionaria.
- Construir el banco de pruebas para la medición del motor.
- Validar la información suministrada por el banco de pruebas.
- Obtener la hoja de especificaciones del dinamómetro de banco diseñado y construido.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

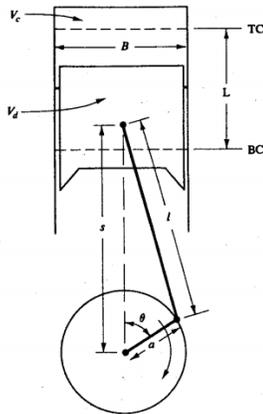
El desarrollo del marco teórico se divide en tres partes, se inicia con los fundamentos de motores de combustión interna, donde se recopilan las variables, parámetros y curvas características principales, una vez recopilados, se explica la forma de obtención de cada uno de ellos; después, en la segunda parte se describen pruebas de desempeño en motores y vehículos, y por último, en tercer lugar se presentan los fundamentos en dinamómetros para motores, allí se muestran las ventajas y desventajas de cada uno de los tipos de dinamómetros que existen en el mercado.

1.1 FUNDAMENTOS DE MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

Un motor de combustión interna es una máquina térmica que transforma la energía química de un combustible en energía mecánica rotacional. La energía química es liberada a partir de la oxidación del combustible y en una cámara de combustión gran parte de dicha energía se transforma en energía cinética en un pistón o rotor según sea el caso y posteriormente en energía rotacional, los dos tipos de motores de combustión interna más comunes son los reciprocantes y los motores de turbina [7]. Los reciprocantes de tipo pistón/cilindro, se divide en dos grandes grupos según la forma de encendido, MCI encendidos por chispa (idealmente tienen expansión a volumen constante) y MCI encendidos por compresión (idealmente el proceso de expansión se lleva a cabo a presión constante).

Para resumir los fundamentos de las variables y parámetros en motores de combustión interna, se clasifican según la forma de obtención; el primer grupo corresponde a parámetros que se especifican en las fichas técnicas de los fabricantes de motores o vehículos, el segundo grupo son aquellos parámetros dependientes que se calculan a partir de los datos anteriores, el tercer grupo se relaciona a aquellos parámetros que se deben medir o calcular a partir de manuales de taller o directamente, debido a que no están dados explícitamente en las fichas técnicas, seguido, se encuentran los parámetros dependientes de las variables presentes en el grupo 3, por último, se presentan parámetros específicos y eficiencias para llevar a cabo comparación en motores.

Para la fundamentación, el presente estudio se centra en MCI reciprocantes de tipo pistón/cilindro, cuyas variables geométricas se describen en la Figura 1.



- V_c Volumen de la cámara de combustión
- V_d Volumen de desplazamiento
- B Diámetro
- L Carrera
- TC Punto muerto superior (en español se denota como PMS)
- BC Punto muerto inferior (en español se denota como PMI)
- l Longitud de la biela
- a Longitud de la manivela
- θ Ángulo de giro del cigüeñal

Figura 1. Variables dimensionales de la geometría de un sistema pistón cilindro
Fuente: [8]

1.1.1 PARÁMETROS PRESENTES EN LAS FICHAS TÉCNICAS DE MOTORES Y VEHÍCULOS.

Este primer grupo hace referencia a los parámetros presentes en fichas técnicas de motores, por tanto, a modo de ejemplo, en la Tabla 1 se muestra una ficha técnica típica de un vehículo y una de un motor de combustión interna de un automóvil, si bien se nota en todos los casos, los fabricantes no brindan la misma información, sin embargo hay datos típicos que proveen.

Tabla 1. Especificaciones técnicas de una motocicleta y un MCI según fichas técnicas.
Fuente: Adaptado de [9] [10]

Especificaciones Técnicas	 1	 2
	Yamaha XT 1200 SUPER TÉNÉRÉ	Toyota 8NR-FTS
Motor	4 tiempos, DOHC, 2 cilindros en línea	4 cilindros en línea, DOHC 16 válvulas con Dual VVT-iW, inyección directa
Cilindrada	1199 cc	1197 cc
Diámetro x carrera	98 x 79.5 mm	71.5 x 74.5 mm
Potencia	82.4KW a 7.250 rpm	114/85 bhp/kW @ 5,200 – 5,600 rpm
Torque Máximo	117.1 Nm a 6000 rpm (86.3 lb-ft)	185 Nm @ 1,500 – 4,000 rpm
Relación de compresión	-	10.0:1
Arranque	Eléctrico	-
Capacidad de combustible	23 l	-
Transmisión	6 velocidades, engrane constante, cardán	-

¹. Imagen tomada de: <http://www.yamaha-motor.com.mx/xt1200zst.php>

². Imagen tomada de: <https://www.autoevolution.com/news/toyota-8nr-fts-12l-turbo-engine-detailed-94147.html>

Los datos típicos que da el fabricante con respecto a la información del motor se resumen en los siguientes nueve parámetros presentes en la Tabla 2. Para el 7, 8 y 9 se especifica su forma de obtención.

Tabla 2. Parámetros de MCI presentes en las fichas técnicas
Fuente: Adaptado de [6] [8]

Nº	Parámetro	Ecuación	Descripción
1	Diámetro, B [mm]	-	Es la dimensión del ancho del pistón.
2	Carrera, L [mm]	-	Es la distancia que hay entre el punto muerto superior y el punto muerto inferior.
3	Número de cilindros, n [-]	-	Valores típicos de 1, 2, 4, 6 y 8.
4	Volumen desplazado total, V_d [cm ³]. Ec. (1)	$V_d = \frac{n\pi B^2 L}{4}$	Coloquialmente conocido como el cilindraje del motor.
5	Relación de compresión, r_c [-]. Ec. (2)	$r_c = \frac{(V_d + V_c)}{V_c}$	Es la relación entre el volumen máximo y mínimo del motor. V_c es el volumen de las cámaras de combustión.
6	Número de válvulas, n_v [-].	-	Valores típicos de 2, 3 y 4 por cilindro.
7	Potencia al freno, P_b [W]. Ec. (3)	$P_b = \frac{2\pi}{60} N T_b$	Producto entre el torque y la velocidad angular. Detalles de su obtención se encuentra en el literal i.
8	Torque al freno, T_b [Nm]	-	Medido como la longitud del brazo y la fuerza hidráulica, mecánica o electromagnética de un dinamómetro.
9	Velocidad del motor, N [rpm]	-	Se considera la velocidad de giro del cigüeñal, las fichas técnicas dan valores de velocidad en la que se genera la potencia y el torque máximo, información detallada de su obtención se encuentra en el literal ii.

i. MEDICIÓN DEL TORQUE Y POTENCIA AL FRENO, PARÁMETROS 7 Y 8:

Para realizar las mediciones del torque y potencia efectiva a la salida del cigüeñal, se requiere un dinamómetro que cubra las especificaciones del rango de velocidad del motor y de potencia esperada. La potencia es un valor dependiente del torque, y se calcula como el producto entre el torque al freno y la velocidad de giro. En el caso del torque, la medición depende del instrumento disponible, hay torquímetros que se acoplan directamente entre el punto de medición del MCI y el freno, o de forma indirecta a partir del uso de celdas de carga. En la Figura 2 se muestran los dos instrumentos en mención.



a. Sensor de par¹



b. Celda de carga²

¹. Imagen tomada de: <https://www.kistler.com/es/producto/type-4520a/>

². Imagen tomada de: <https://sensing.honeywell.com/060-P662-01-s-z-beam-style-load-cells>

Figura 2. Instrumentos para la medición del torque en un MCI. a) Directa. b) Indirecta

ii. MEDICIÓN DE VELOCIDAD DEL MOTOR, PARÁMETRO 9

Se puede obtener de tres formas, tal como se muestra a continuación:

1. Externa: A partir de un encoder acoplado directamente al cigüeñal o al freno, hay absolutos, que miden la posición del cigüeñal y al dividirse en el tiempo se obtiene la velocidad angular, mientras que los encoder relativos miden únicamente la velocidad.
2. Externa: A partir de un tacómetro óptico o de efecto hall, que sensa la posición de una guía ubicada sobre un elemento rodante como una polea o eje del motor.
3. Interna: A partir de los sensores que lleva el motor como son el de posición de eje de levas o el sensor de posición del cigüeñal, usualmente son de tipo efecto Hall e inductivo respectivamente.

La diferencia entre los sensores externos e internos radica en la precisión, siendo mayor para el caso de los encoder, seguido de los de tipo inductivos, efecto hall y por último los tacómetros ópticos.

1.1.2 PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE LA INFORMACIÓN DE LAS FICHAS TÉCNICAS

A partir de la información presente en las fichas técnicas, recopilada en la Tabla 2, se pueden calcular los siete parámetros presentes en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros dependientes obtenidos de la información de las fichas técnicas.

Fuente: Adaptado de [6] [8]

N°	Parámetro	Ecuación	Descripción
10	Revoluciones x ciclo de trabajo, n_R [-]. Ec. (4)	Para motores 4T $n_R = 2$ Para motores 2T $n_R = 1$	Es el número de vueltas que da el cigüeñal por cada ciclo de trabajo, para motores de 2 tiempos es igual a 1 y de 4 tiempos es igual a 2. En el caso de automóviles de pasajeros y más grandes, se omite porque los motores son de 4 tiempos, para el caso de motores de aplicaciones ligeras se especifica.
11	Volumen cámara, V_c [cm ³]. Ec. (5)	$V_c = \frac{V_d}{r_c - 1}$	Es el volumen que hay en las cámaras de combustión asumiendo que los pistones se encuentran en el punto muerto superior.
12	Volumen total, V_t [cm ³]. Ec. (6)	$V_t = V_c + V_d$	Es el volumen total de los cilindros asumiendo que los pistones se encuentran en el punto muerto inferior.
13	Relación entre diámetro y carrera, R_{bs} [-]. Ec. (7)	$R_{bs} = \frac{B}{L}$	Si el motor tiene un $R_{bs} = 1$ significa que es un motor cuadrado, si $R_{bs} > 1$ es un motor supercuadrado y permite mayores velocidades de operación, si $R_{bs} < 1$ es un motor subcuadrado y permite operaciones de altos torques a bajas velocidades de operación.
14	Longitud manivela, a [mm]. Ec. (8)	$a = \frac{L}{2}$	La manivela, es decir el cigüeñal, tiene una longitud igual a la mitad de la carrera del pistón.
15	Área del pistón, A_p [mm ²]. Ec. (9)	$A_p = \frac{\pi B^2}{4}$	Es el área superficial del pistón considerando que idealmente es un cilindro de diámetro B

1.1.3 PARÁMETROS OBTENIDOS A PARTIR DE INFORMACIÓN DE MANUALES DE TALLER

Alguna información de los motores no se encuentra disponible únicamente en las fichas técnicas, sin embargo, se pueden medir directamente a partir del uso de equipos externos al MCI o se pueden obtener a partir de información disponible en manuales de taller o en planos de los MCI o vehículos, tales parámetros están descritos en la Tabla 4. Posteriormente se detalla la forma de obtención de los parámetros 20, 21 y 23.

Tabla 4. Parámetros presentes en manuales o medidos directamente.

Fuente: Adaptado de [4] [7]

N°	Parámetro	Ecuación	Descripción
16	Longitud biela, l [mm]	-	La longitud de la biela no es un valor dado en las fichas técnicas, y es un valor asociado al comportamiento de las vibraciones del motor. Usualmente se encuentra presente en los diagramas de los motores o se puede estimar a partir de la medición de la longitud entre el centro del cigüeñal y el empaque de la culata, restando la longitud de la manivela, a , se encuentra en manuales dimensionales del motor o como una de las cotas de repuestos para motores.
17	Ángulo del cigüeñal – CAD, θ [°, rad]	-	El ángulo de giro del cigüeñal comprende un rango que va de 0° a 720°, correspondiente a dos vueltas dadas por el cigüeñal por cada ciclo de trabajo para motores de 4 tiempos. En este rango, se ajustan los tiempos de ignición de la bujía, de apertura de los inyectores de combustible y de apertura de las válvulas de admisión y escape.
18	Área de la cabeza del cilindro, A_{ch} [mm ²]	-	Normalmente las cámaras de combustión y la superficie superior de los pistones son de formas irregulares, por lo cual es tedioso su cálculo numérico y se recomienda el uso de scanner 3D para obtener un dato preciso de su área superficial y los volúmenes reales.
19	Diámetro de válvulas, D_v [mm]	-	Es el diámetro externo de la cabeza de las válvulas, se consideran dos diámetros, debido a que las válvulas de admisión usualmente tienen dimensiones mayores a las válvulas de escape. El valor se encuentra disponible en los manuales de taller o se puede medir directamente sobre válvulas de repuesto.
20	Presión instantánea en el cilindro, P_c [Pa]	-	Es la presión a la que se encuentra el fluido de trabajo dentro de la cámara de combustión para cada instante del ciclo de trabajo. Se mide a partir de un sensor de presión ubicado dentro de la cámara de combustión. Se describe su obtención en el literal <i>i</i> .
21	Flujo másico de combustible, \dot{m}_f [g/s]	-	Es una magnitud escalar que representa el consumo másico de combustible por unidad de tiempo de un motor. Su obtención se detalla en el literal <i>ii</i> .
22	Masa del combustible total, m_f [g]	-	Es el combustible consumido durante una prueba definida, tal como un ciclo de manejo. m_f permite

N°	Parámetro	Ecuación	Descripción
			comparar el consumo de diferentes motores bajo las mismas condiciones.
23	Flujo másico de aire, \dot{m}_a [g/s]	-	Es una magnitud escalar que representa el consumo másico de aire por unidad de tiempo, existe estimaciones indirectas a partir de la medición de parámetros como la velocidad del flujo, la densidad y el área transversal por donde pasa el aire, o también a partir de la medición de presiones a través de un tanque de reposo de aire. Detalle de su obtención se encuentra en el literal <i>iii</i> .
24	Masa de aire total m_a [g]	-	En un ciclo de manejo o en una prueba donde t es constante, m_a es un parámetro que permite la comparación entre motores.
25	Densidad del aire de admisión, $\rho_{a,i}$ [g/cm ³]	-	Se mide en el punto más cercano a la cámara de combustión, antes de la mezcla con el combustible. Usualmente su cálculo es indirecto, a partir de la ecuación de gases ideales, por tanto, es necesario conocer las condiciones de presión y temperatura del aire.

i. MEDICIÓN DE LA PRESIÓN INSTANTÁNEA EN LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN:

La presión en la cámara de combustión junto a la señal de velocidad del motor son el insumo para la obtención del trabajo por ciclo, es decir el diagrama presión - volumen, para la obtención de la presión es necesario tener un sensor de presión que va ubicado internamente en la cámara de combustión, por lo cual es necesario modificar la culata para incluir el sensor, o también existen sensores que están incluidos en las bujías. Por otra parte, se debe tener en cuenta que, para motores de múltiples cilindros, se puede hacer dos cosas, tener la señal de presión sobre uno de los cilindros y estimarla de forma aritmética sobre los demás, o tener un sensor para cada uno de los cilindros.

Los sensores de presión comúnmente son análogos, por lo cual, para la adquisición de datos de las señales de presión es necesaria una tarjeta con entradas análogas proporcionales al número de sensores. Para la selección es importante tener un estimativo de la presión máxima que se puede obtener en el cilindro.

ii. MEDICIÓN DEL FLUJO MÁSCO DE COMBUSTIBLE:

Se puede realizar a partir de tres formas:

1. A partir de la medición gravimétrica del combustible, para ello es necesaria una balanza de precisión que permita adquirir datos a la misma frecuencia de las demás señales adquiridas, es usada para pruebas en banco donde el reservorio de combustible permanece estático durante la ejecución de las pruebas.

2. A partir de la caracterización del flujo de los inyectores, es un método indirecto donde a partir de las curvas características de cada uno de los inyectores en relación con las señales de entrada que dan paso a su apertura, se puede calcular un flujo másico. Este método tiene validez al considerar que el inyector no varía su comportamiento a través del tiempo. Con este tipo de estimación se puede hacer mediciones en ruta o en dinamómetro.

3. De forma directa a partir del uso de un flujómetro de combustible, el cual mide el flujo volumétrico, Q , que, multiplicado por la densidad del combustible, ρ_f , da como resultado el flujo másico, tal y como se presenta en la ecuación Ec. (10):

$$\dot{m}_f = Q \times \rho_f \quad \text{Ec. (10)}$$

En el mercado se encuentran diferentes tipos de flujómetros tales como los diferenciales, acústicos, piezoeléctricos, de paletas, de engranajes, entre otros. Para su medición se deben considerar las pérdidas de presión a través de la línea de inyección de combustible debido a la inclusión del sensor, además, requiere un sistema de adquisición de datos de sus señales. La ventaja de este tipo de medición es que permite pruebas en ruta y en dinamómetro.

iii. MEDICIÓN DEL FLUJO MÁSSICO DE AIRE:

Se puede realizar a partir de tres formas:

1. Tubo Pitot: A partir de la medición de la diferencia de presión en un tubo Pitot y conociendo el área transversal del tubo se puede calcular el flujo volumétrico de aire a partir del caudal, que multiplicado por la densidad estimada del aire se obtiene el flujo másico, para ello se debe estimar la densidad a partir de la medición de la temperatura y presión en la admisión.

2. Sensor MAF, que lo llevan consigo algunos motores y es otra forma indirecta de medir el flujo másico de aire, éstos calculan directamente el flujo y la señal de salida está relacionada directamente con el flujo másico y no con el volumétrico como el caso de los tubos Pitot.

3. Caja de aire con orificio de pared delgada, es un método donde se tiene un tanque de aire con un volumen 500 o 600 veces mayor al del motor, el tanque tiene un orificio en la parte superior y en su interior tiene obstáculos, la caída de presión es medida mediante un manómetro ubicado al lado de la entrada de aire, tal como se muestra en la Figura 3.

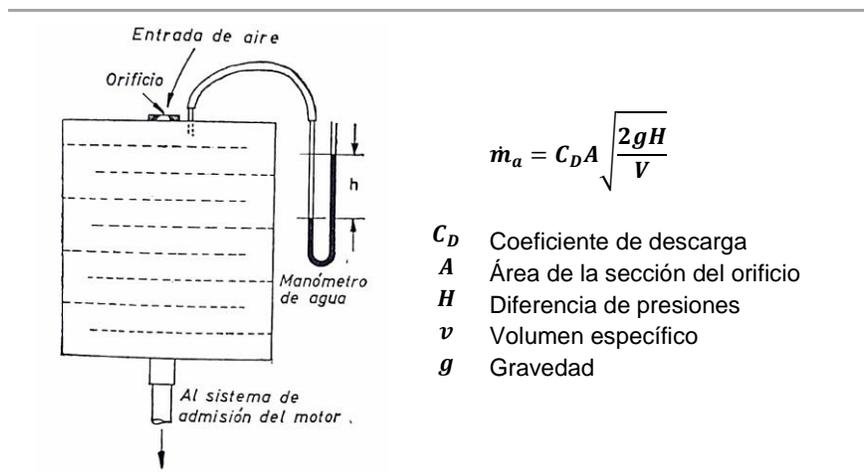


Figura 3. Medidor de caudal de aire de admisión.

Fuente: [11]

1.1.4 PARÁMETROS ESPECÍFICOS O NORMALIZADOS

Cuando se desea conocer el comportamiento de un solo motor, se pueden obtener, entre otros, los cuatro parámetros usuales de desempeño tales como el torque, la potencia, el consumo de combustible y la velocidad de giro del motor, sin embargo, para el caso de comparación de motores, es necesario normalizar los parámetros, es decir dejarlos en términos de una variable independiente y común, por tanto, ajustando los valores a partir de las ecuaciones presentes en la Tabla 5, se obtienen valores específicos como la presión media efectiva, la potencia específica, el consumo específico de combustible y la velocidad lineal media del motor respectivamente.

Existen otra infinidad de parámetros que se pueden normalizar, según el tipo de análisis que se le realizaría al motor, un ejemplo de ellos son las emisiones de contaminantes atmosféricos, donde se establece emisiones específicas del contaminante a evaluar, usualmente para motores de carga pesada se normaliza en función de la energía unitaria generada, y para motores livianos se normaliza en función de la distancia unitaria recorrida, que a su vez depende del ciclo de manejo que se lleva a cabo [6]. El presente trabajo solamente abarca parámetros de desempeño, por tanto, no se profundiza en la obtención experimental de los demás.

Tabla 5. Parámetros específicos en motores.

Fuente: Adaptado de [6] [8]

N°	Parámetros específicos	Ecuación	Descripción
36	Presión Efectiva, MEP [kPa]. Ec. (11)	$MEP = \frac{P_b n_R}{V_d N}$	El MEP es un parámetro comparativo de desempeño del par generado de motores independientemente de su cilindraje o de su ciclo de operación, Si la potencia es al freno o indicada se denota $BMEP$ o $IMEP$ respectivamente
37	Potencia específica, P_E [kW/m ²] Ec. (12)	$P_E = \frac{P_b}{n A_p}$	Es la potencia por unidad de área de la cabeza del pistón.
38	Consumo específico de combustible, SFC [g/kWh] Ec. (13)	$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P}$	Es un parámetro que permite comparar el flujo de combustible consumido por motores independientemente de su tamaño o tipo, solamente en relación a la potencia generada.
39	Velocidad media del pistón, \bar{S}_p [m/s] Ec. (14)	$\bar{S}_p = 2LN$	Es una variable de operación que sirve para comparar las velocidades de giro de diferentes motores.

Otro punto de vista simplificado se presenta en la Figura 4, donde se encuentran los factores para la conversión de parámetros absolutos (izquierda) a parámetros normalizados (derecha).

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 4. Factores de conversión de parámetros absolutos a parámetros relativos
Fuente: Elaboración propia.

1.1.5 PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA INFORMACIÓN DE MANUALES DE TALLER

A partir de las variables presentadas en los numerales 1.1.1, 1.1.2 y 1.1.3 se obtienen los valores descritos en la Tabla 6, hay unos que, si bien se pueden calcular a partir de la información anterior, tienen sensores específicos para su medición, como es el caso del factor lambda.

Tabla 6. Parámetros dependientes obtenidos de la información de las fichas técnicas.
Fuente: Adaptado de [6] [8]

N°	Parámetro	Ecuación	Descripción
26	Trabajo indicado x ciclo, W_c [J]. Ec. (15)	$W_c = \oint P_c dv$	Es el trabajo generado por un ciclo completo de trabajo. Corresponde al área que se encuentra dentro de la superficie generada en el diagrama de presión-volumen para el ciclo de trabajo de un motor. Se subdivide en dos, trabajo indicado bruto y trabajo indicado neto, más información se encuentra en el literal <i>i</i> .
27	Volumen del cilindro, V [cm ³]. Ec. (16)	$V = V_c + \frac{\pi B^2}{4} (l + a - s)$	Es un parámetro que depende únicamente de la variación de la posición del cigüeñal.
28	Relación biela/manivela, R [-]. Ec. (17)	$R = \frac{l}{a}$	Entre menor sea la relación, es menor la altura del motor; R tiende a ser mayor en motores más grandes, por ejemplo, sube a valores de 5 a 9 en grandes mientras que para motores pequeños y medianos está en un rango entre 3 y 4.
29	Velocidad instantánea del pistón, S_p [mm/s]. Ec. (18)	$S_p = \frac{ds}{dt}$	Es un parámetro más apropiado para relacionar el comportamiento del motor con la velocidad de rotación del cigüeñal.
30	Área superficial de la cámara de combustión, A_{cc} [mm ²]. Ec. (19)	$A_{cc} = A_{ch} + A_p + \pi B (l + a - s)$	Es la sección disponible donde los gases ejercen presión, incluye la suma del área superficial del pistón, del cilindro en la parte donde está el gas y de la cámara donde se encuentra la culata.

31	Potencia indicada P_i [kW]. Ec. (20)	$P_i = \frac{W_c N}{n_R}$	Es la potencia máxima lograble del motor, sin considerar las pérdidas por fricción.
32	Potencia de fricción, P_f [kW]. Ec. (21)	$P_f = P_i - P_b$	Es la energía consumida por efectos de la fricción, vaciado y llenado de la cámara de combustión, la inercia de los componentes y los accesorios.
33	Relación aire / combustible, $\left(\frac{A}{F}\right)$ [-]. Ec. (22)	$\left(\frac{A}{F}\right) = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$	Es un cociente que permite establecer condiciones de operación del motor, es decir, mezclas ricas o pobres de combustible.
34	Factor lambda, λ [-]. Ec. (23)	$\lambda = \frac{\dot{m}_{a\text{ real}}}{\dot{m}_{a\text{ teórica}}}$	Si $\lambda > 1$, se tiene que la mezcla es pobre, si $\lambda = 1$, es una mezcla estequiométrica y si $\lambda < 1$, es una mezcla rica. Para su medición hay sensores que lo hacen directamente, y es ampliamente utilizado en la puesta a punto de motores.
35	Grado de carga, α [%]. Ec. (24)	$\alpha = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_{a\text{ max}}} \times 100$	Es un parámetro que cuantifica el aire que es proporcionado al motor en comparación al máximo nivel que se puede dar. Se especifica en detalle en el literal ii.

i. MEDICIÓN DEL TRABAJO INDICADO POR CICLO

Para llevar a cabo la medición del trabajo indicado por ciclo se calcula el área bajo la curva del diagrama Presión vs. Volumen del motor, el diagrama tiene un comportamiento similar al que se muestra en la Figura 5, y consta de dos regiones, la primera región es la superior y es donde se genera el trabajo por parte del cilindro, a partir de la compresión del aire o mezcla aire combustible, seguido de la ignición y expansión del gas hasta llegar el pistón nuevamente al punto muerto inferior; y la segunda región, considerada pérdidas por bombeo, es aquella donde el pistón vuelve a subir para liberar los gases residuales de la combustión y posteriormente realiza la admisión de aire o la mezcla combustible-aire, que está por ingresar al motor.

Hay dos tipos de trabajo indicado por ciclo en motores de cuatro tiempos, uno es el trabajo indicado bruto, donde se considera únicamente el trabajo realizado durante las fases de compresión y expansión del motor, que equivale a la región descrita por los puntos B-C-A, ver Figura 5, y el otro es el trabajo indicado neto, donde se considera el ciclo completo, es decir los cuatro tiempos del motor, región B-C-A menos región A-D-B.

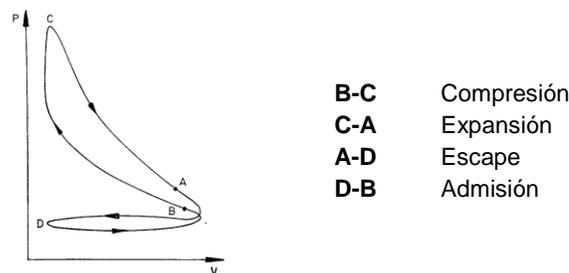


Figura 5. Diagrama Presión - Volumen para un MCI operado bajo un ciclo Otto real.

Fuente: [11]

Este diagrama es uno de los más importantes en el análisis de motores, y para su obtención es necesario contar con un sensor de presión en la cámara de combustión, asimismo como

un medidor del ángulo del cigüeñal para conocer el punto exacto del volumen de la cámara de combustión.

ii. MEDICIÓN DEL GRADO DE CARGA DEL MOTOR

Hay varias formas para la medición del porcentaje de carga en un MCI, en el presente trabajo se especifican tres:

- A partir de la ecuación 22, que es la relación del flujo másico de aire real entre el flujo máximo de aire, para obtenerlo a partir de esta forma, se necesita caracterizar el flujo másico máximo para todo el régimen de velocidades del motor y medir el flujo másico instantáneo para el régimen a evaluar.
- A partir de la posición de apertura de la mariposa del motor (para MCI con ciclo Otto), lo cual es poco preciso pero útil al considerar simplificaciones sobre el flujo de entrada, para ello se considera el punto cero de la mariposa cuando está en ralentí y el punto 100% cuando la mariposa está totalmente abierta. [6]
- A partir de la relación entre la presión media efectiva medida y la presión media efectiva máxima. La ecuación 25 lo describe

$$\alpha = \frac{MEP}{MEP_{max}} \times 100 \quad \text{Ec. (25)}$$

1.1.6 EFICIENCIA EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

El límite de máxima eficiencia lograda de un MCI está dado por el ciclo de Carnot, η_{carnot} [-]. Ec. (26), descrita la eficiencia en la ecuación 26, donde Q_c hace referencia a la cantidad de calor recibida y Q_h a la cantidad de calor entregada bajo condiciones adiabáticas y reversibles [12]. Para el caso de MCI, la eficiencia de Carnot máxima oscila entre un 60 y 70%, en los motores de ciclo Otto de inyección indirecta están alrededor de 25% de eficiencia, es decir 40% de la de Carnot, mientras que para motores diésel encendidos por compresión la eficiencia es mayor, llegando a valores de 30-35% y cercana a 50-60% de la eficiencia de Carnot. Las pérdidas de un MCI se deben a cuatro factores: la transferencia de calor hacia el bloque y sistema de refrigeración, pérdidas por bombeo, por fricción y pérdidas inerciales [8].

La mejora en la eficiencia en los MCI ha sido un tema de constante evolución en los motores, haciendo énfasis en un análisis sobre los sistemas de inyección, en el caso de motores encendidos por chispa, hasta finales de los años 80 se tenía predominio de sistemas de inyección por carburador, elemento mecánico que ha pasado a ser parte de la historia del automóvil (al menos en vehículos de pasajeros y de mayor tamaño) y que fue reemplazado por sistemas electrónicos de inyección indirecta de combustible (donde los inyectores se encuentran ubicados en el múltiple de admisión del MCI) y recientemente, se ha migrado a sistemas de inyección directa, basado principalmente en la mejora en la eficiencia y consumo de combustible del motor, a pesar que el incremento en emisiones de partículas se dispara significativamente [13]. Para el caso de los motores diésel, la historia es similar, se ha llevado una evolución pasando de sistemas de inyección mecánica, a sistemas de inyección electrónica, aumento de la presión de inyección y atomización del

combustible en la cámara de combustión, pero conservando los problemas con sus altas emisiones de material particulado y óxidos de Nitrógeno, haciendo imperativo el uso de sistemas de control de emisiones tales como los filtros de partículas, catalizadores oxidativos diésel y catalizadores de reducción selectiva, que a pesar de generar restricciones al flujo de salida se priorizan para tener bajas emisiones de contaminantes ambientales.

La Tabla 7 recopila las ecuaciones de eficiencia para MCI:

Tabla 7. Eficiencia en motores.

Fuente: [6] [8]

N°	Parámetros geométricos	Ecuación	Descripción
40	Eficiencia de Carnot η_{carnot} [-]. Ec. (26)	$\eta_{carnot} = \frac{W_c}{Q_h}$ $= 1 - \frac{Q_c}{Q_h} = \frac{T_h - T_c}{T_h}$	Es la eficiencia máxima lograda por un motor de combustión interna. Depende únicamente de las temperaturas.
41	Eficiencia térmica ciclo Otto con aire estándar, $\eta_{th,otto}$ [-]. Ec. (27)	$\eta_{th,otto} = 1 - \frac{1}{r_c^{\gamma-1}}$	Considerando aire estándar es decir que la relación de calores específicos del aire γ es 1.4, entonces la eficiencia térmica solamente depende de la relación de compresión del motor.
42	Eficiencia mecánica, η_m [-]. Ec. (28)	$\eta_m = \frac{P_b}{P_i} = 1 - \left(\frac{P_f}{P_i}\right)$	Es la relación entre la potencia de salida, es decir la potencia al freno y la potencia indicada.
43	Eficiencia volumétrica η_v [-]. Ec. (29)	$\eta_v = \frac{2 \dot{m}_a}{\rho_{a,i} V_d N} = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d}$	Es la medición de la efectividad del proceso de admisión de aire y se define como la tasa de flujo volumétrico de la admisión, dividido entre el volumen que es desplazado por el pistón.
44	Eficiencia de la combustión η_c [-]. Ec. (30)	$\eta_c = \frac{H_a - H_b}{m_f Q_{HV}}$	Es la fracción de la energía del combustible disponible, la cual es liberada en el proceso de combustión
45	Eficiencia del combustible η_f [-]. Ec. (31)	$\eta_f = \frac{W_c}{m_f Q_{HV}}$	Es la relación entre el trabajo generado por ciclo en función de la energía disponible del combustible
46	Eficiencia térmica η_t [-]. Ec. (32)	$\eta_t = \left(\frac{Q_h - Q_c}{Q_h}\right)$	Es el trabajo obtenido con respecto a la energía suministrada

1.1.7 CURVAS TÍPICAS EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA

i. CURVA DE INICIO DE LA COMBUSTIÓN

El inicio de la combustión se caracteriza a partir de la presión en la cámara de combustión en función del ángulo del cigüeñal, al igual que la curva de Presión vs. Volumen descrita anteriormente en el literal *i* del numeral 1.1.4. Es necesario tener un sensor de presión dentro de la cámara de combustión junto a un medidor de ángulo del cigüeñal, además conocer el tiempo de apertura y cierre de válvulas en el motor.

Como ejemplo, en la Figura 6 se muestran cuatro curvas superpuestas, donde se presenta la presión en la cámara de combustión a diferentes ángulos de inicio de chispa para un motor de ciclo Otto, solamente se consideran 360° de los cuatro tiempos del motor, es decir, la fase de compresión y de expansión del cilindro; se tiene en cuenta que el pico de la ignición debe estar después del ángulo 0° pero entre más atrasado esté, menor es la presión alcanzada en el cilindro, asimismo, entre más adelantada esté la chispa pueden generarse problemas porque la presión generada puede frenar la subida del pistón. Con estas gráficas se pueden analizar problemas de autoencendido de la mezcla (knock) y optimizar los parámetros para obtener el máximo desempeño de los MCI.

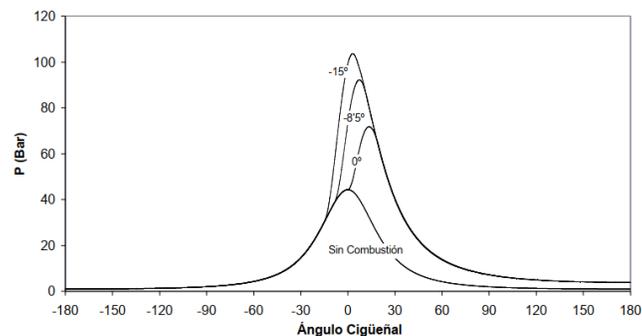


Figura 6. Curva de presión en la cámara de combustión en función del ángulo del cigüeñal.
Fuente: [14]

ii. CURVAS CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA Y TORQUE

Son curvas típicas en las pruebas de homologación vehicular; para la obtención se opera el motor a plena carga (WOT, por sus siglas en inglés, mariposa totalmente abierta) mientras se mide la potencia y el torque al aumentar la velocidad del motor. En la Figura 7, se presentan dos curvas típicas de potencia y torque de motores a gasolina y diésel respectivamente, también hay otra curva característica usual que es el consumo específico de combustible. Otra forma de representación de las curvas características es a partir de parámetros específicos, según lo visto en la sección 1.1.5

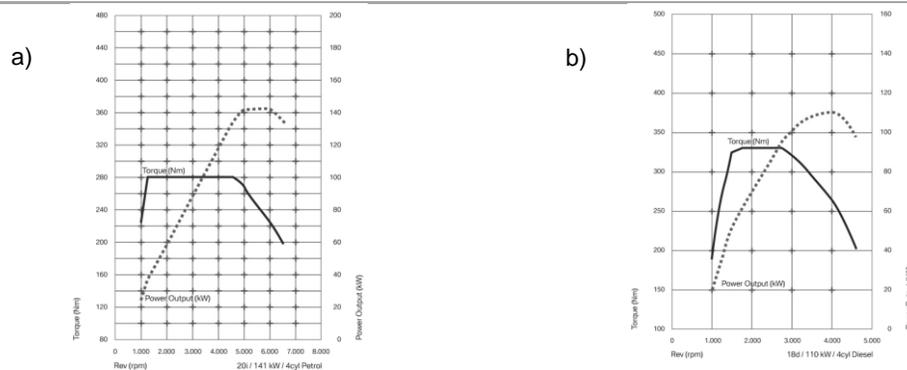


Figura 7. Curvas de potencia y torque en motores operados con a) Gasolina, b) Diésel.
Fuente: [15]

iii. MAPAS DE DESEMPEÑO Y DE CONTROL EN MOTORES

Otra forma de describir el comportamiento de un MCI es a partir de los mapas de desempeño, que básicamente son curvas multiparamétricas donde se evalúan variables del motor a diferentes condiciones de carga, un ejemplo de ello se presenta en la Figura 8, donde para diferentes cargas del motor, ajustadas a partir de la presión media efectiva, y a varias velocidades de operación, se establecen isopletas o curvas de nivel del consumo específico de combustible, permitiendo, a partir de su análisis, conocer los puntos de mayor y menor consumo de combustible de los motores.

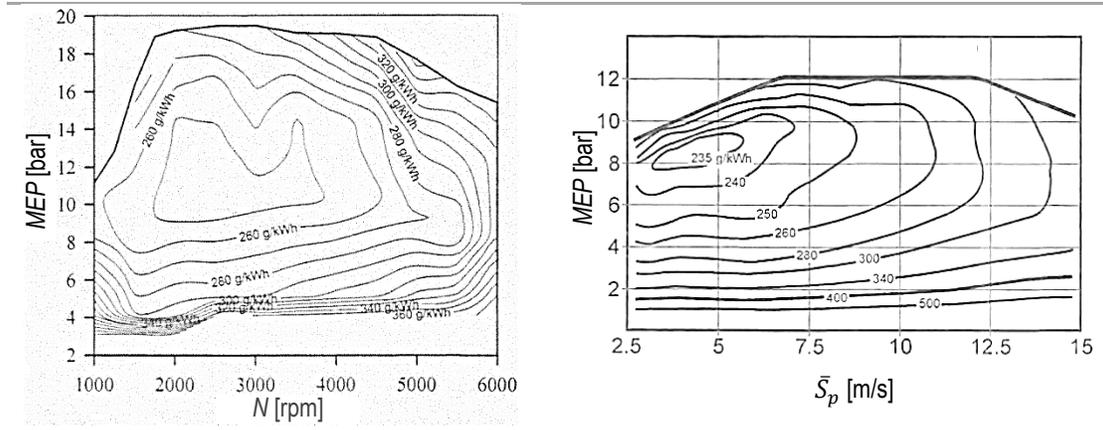


Figura 8. Mapas de Consumo específico de combustible para MCI.

Fuente: [6]

Analizando la Figura 8, para el caso de la gráfica de la izquierda, el menor consumo específico de combustible se tiene en la región de velocidad comprendida entre 2.000-3.000 rpm y una presión media efectiva en un rango de 10 a 13 bar, mientras que, para la gráfica derecha están en un rango de 2.5 a 7 m/s y de 8 a 9.5 bar respectivamente, asimismo se puede ver que para ciertas regiones de operación, el motor de la izquierda tiene menores consumos específicos en comparación al motor de la derecha.

Los mapas de desempeño cuentan con tres variables:

1. En el eje X va la variable asociada a la velocidad de giro del motor, en la Figura 8, la gráfica de la izquierda muestra el mapa en función de la velocidad del motor, N , mientras que en la gráfica de la derecha se muestra en función de la velocidad lineal media del pistón, \bar{S}_p .
2. En el eje Y va la variable de carga sobre el motor, como se muestra en el literal *ii* de la sección 1.1.3, se puede a partir del flujo másico de aire de admisión, a partir de la presión media efectiva, de la potencia específica o de la posición de la mariposa del ducto de admisión.
3. En el eje Z, va la variable a evaluar o a controlar, como eficiencia térmica, mecánica, consumo de combustible, potencia específica, emisiones de contaminantes, etcétera.

Por otra parte, se tienen mapas de control que a diferencia de los de desempeño, relacionan las variables de los ejes X y Y, con variables del control de la combustión, por ejemplo, el avance o retraso de la chispa, el tiempo de inyección, el porcentaje de apertura de la válvula

EGR, entre otras, y así se pueden comparar y ajustar los parámetros para llevar a cabo procesos de optimización según la aplicación deseada.

La Figura 9 muestra un ejemplo de un mapa de inicio de chispa, donde en el eje X se tiene la velocidad del motor, en el eje Y la carga y en el eje Z el ángulo de inicio de la chispa, BTDC, el mapa va cargado en la unidad electrónica de control (por sus siglas en inglés, ECU). Para ciertas ECU se pueden modificar los parámetros, y se denominan ECU programables, en ellas, al modificar los parámetros, es decir los mapas de control, cambian los mapas de desempeño descritos anteriormente.

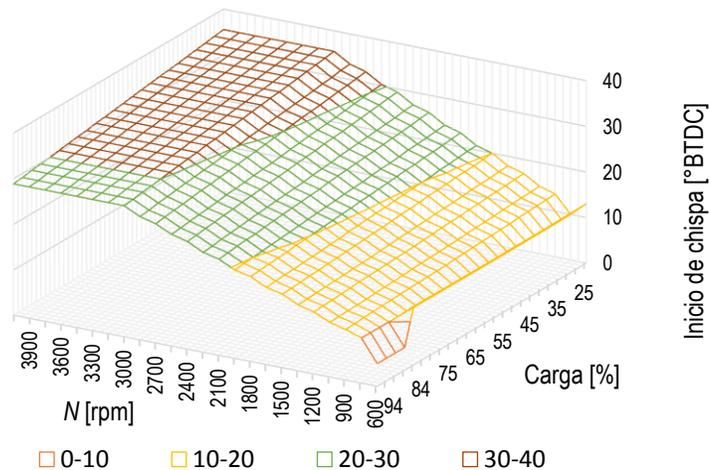


Figura 9. Mapa de inicio de chispa en un MCI.
Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de: [16]

1.2 PRUEBAS EN ESTADO TRANSITORIO Y ESTACIONARIO SOBRE MCI

Las pruebas sobre MCI se pueden clasificar en dos tipos según la variación en la carga y la velocidad, cuando se varía una u otra se denominan pruebas en estado transitorio o transiente, mientras que cuando se mantienen constantes durante la medición de parámetros se denominan pruebas en estado estacionario, a continuación, se explican:

1.2.1 MEDICIONES EN ESTADO TRANSITORIO

En las cuales la velocidad del motor y la carga sobre el motor cambian a través del tiempo, se explican tres tipos de mediciones típicas:

Primero, se encuentran las curvas de potencia y torque máximo, que son las más frecuentes en estudios, obtenidas a partir de una medición con la mariposa totalmente abierta (por sus siglas en inglés, WOT); aunque también se pueden obtener a carga parcial, tal como se presenta en la Figura 10, donde se muestran las curvas al 100% y 50% de apertura de la mariposa, se nota que para todo el régimen de velocidad de giro, es menor si la apertura es menor.

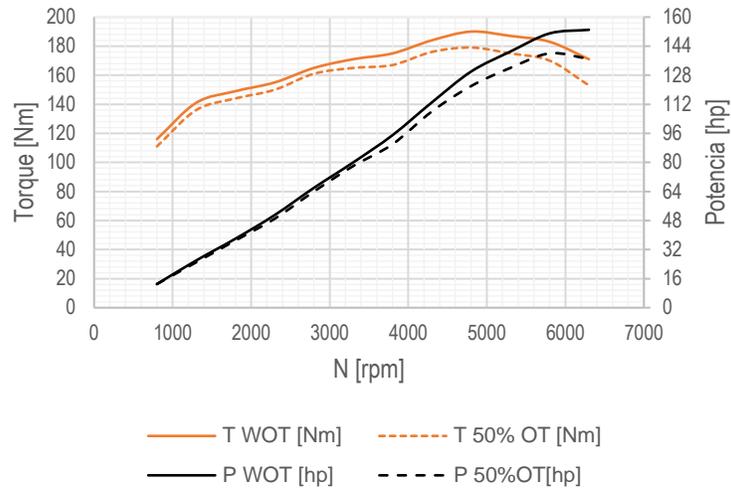


Figura 10. Curvas de torque y potencia de motor Otto con admisión 100% y 50% abierta.
Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de: [17]

Segundo, se tienen las mediciones en estado transitorio que dependen de un ciclo de manejo, ampliamente utilizados para pruebas de homologación y verificación de emisiones de contaminantes vehiculares. En las pruebas se opera el vehículo para que siga el ciclo de manejo descrito, mientras que, en paralelo se realizan mediciones de emisiones, al terminar, se obtienen las emisiones totales, seguido de una comparación con los límites presentes en la norma y a partir de allí se aprueba o se rechaza. En la Figura 11 se presenta como ejemplo el ciclo de manejo estadounidense para vehículos ligeros FTP-75, en su primera fase, que consta de 505 segundos para pruebas de arranque en frío. Otros ciclos ampliamente utilizados son el Nuevo Ciclo de Manejo Europeo (NEDC), el Ciclo Mundial Armonizado para Vehículos Ligeros (WLTC) y el Ciclo de Manejo Artemis (CADC).

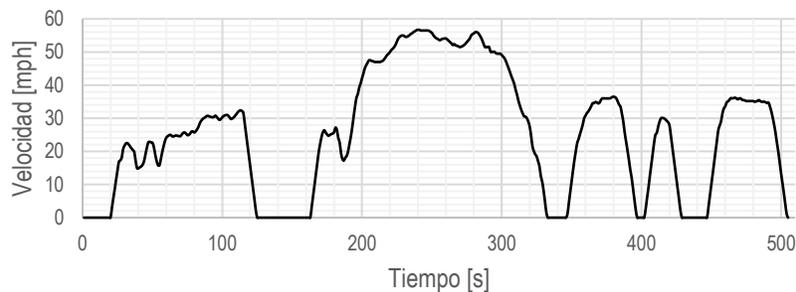


Figura 11. Ciclo de manejo EPA Federal Test Procedure – FTP, fase de arranque en frío.
Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de [18]

Por último, el tercer tipo de prueba en estado transitorio es aquella que se realiza en ruta, donde se prueban los vehículos en condiciones de tráfico convencionales, bajo rutas preestablecidas, tiene ventajas como la no simulación o estimación de las cargas dinámicas, inerciales, de rodadura y aerodinámicas, y las desventajas son la baja repetibilidad en las pruebas, además, la susceptibilidad de cambios durante la prueba por

imprevistos como niveles de tráfico atípicos o accidentes presentes en la vía, que da una alta dispersión de los datos obtenidos [19].

Los parámetros medidos en pruebas en ruta son los mismos que para pruebas en laboratorio como emisiones de contaminantes, consumo de combustible, entre otros, que se utiliza ampliamente para ser comparados entre sí; por ejemplo, las pruebas en ruta presentan valores mayores en emisiones de NO_x, CO y PN, tal como se muestra en [19], [20] [21], o específicamente para emisiones de NO_x representado en la Figura 12.

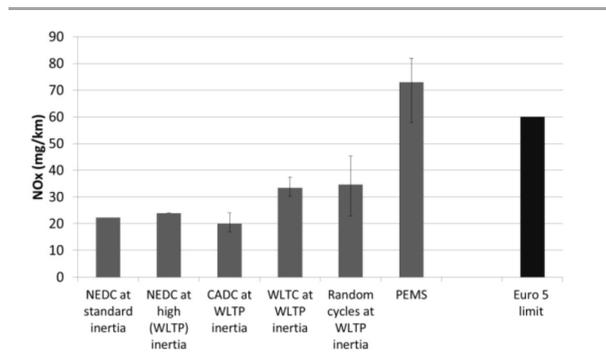


Figura 12. Comparación de emisiones de NO_x, pruebas en ruta y en dinamómetro.

Fuente: [19]

Allí se muestran diferentes ciclos de manejo tales como el NEDC, el CADC y el WLTC, y se evidencia que, para pruebas en ruta, o PEMS en la gráfica (del inglés, Portable Emission Measurement Systems), son mayores las emisiones, cercanas al doble, asimismo la desviación estándar es de ± 10 mg/kg mientras que para los ciclos es menor que $\pm 4\%$.

Otro ejemplo que muestra el uso de pruebas en ruta es la evaluación de la estimación de cargas dinámicas vehiculares tal como se muestra en [22].

1.2.2 MEDICIONES EN ESTADO ESTACIONARIO:

En este tipo de pruebas, la velocidad del motor y la carga permanecen constantes a través del tiempo, es típico tener esta clase de mediciones al momento de la obtención de mapas de inyección en motores, tal y como se mostró en la Figura 9, donde se varía punto a punto la velocidad y carga y se encuentra la configuración más adecuada de las variables a controlar como el tiempo y ángulo de apertura de los inyectores, el ángulo de descarga de la chispa, etcétera.

En estado estacionario se pueden desarrollar pruebas sin dinamómetro a 0% de carga del motor, por ejemplo, para pruebas de opacidad y de ruido, no obstante, para pruebas de consumo de combustible y desempeño no es apropiado, debido a que la operación del motor usualmente se desarrolla en otros rangos de carga.

También se pueden desarrollar pruebas en estado estacionario con dinamómetro a cargas diferentes de 0%, son las más frecuentes para la obtención de mapas de inyección en MCI, porque define los parámetros de control como son el tiempo de inyección, y la chispa para todo el rango de velocidades y de carga del motor, a partir de la obtención de resultados de

potencia y de emisiones. Asimismo, este tipo de pruebas es comúnmente utilizado para pruebas de verificación automotriz.

Existen pruebas estandarizadas en estado estacionario a diferentes cargas, como la ECE R49, como se muestra en la Figura 13, para el caso europeo o US-13 para el caso de Estados Unidos, donde se operan bajo 13 modos de carga y velocidad diferentes, cada uno de ellos con un valor de ponderación (presentes en los recuadros al lado de las burbujas) que en su totalidad suman 1. Esta prueba aplica para vehículos de carga pesada, donde en el eje X se tiene la velocidad del vehículo en porcentaje, siendo 0% la velocidad en ralentí y el 100% la velocidad a la máxima potencia, mientras que en el eje Y se tiene el porcentaje de carga expresado como la presión media efectiva al freno, siendo 0% el BMEP en ralentí y 100% la BMEP máxima, relacionada con el punto de torque máximo del motor.

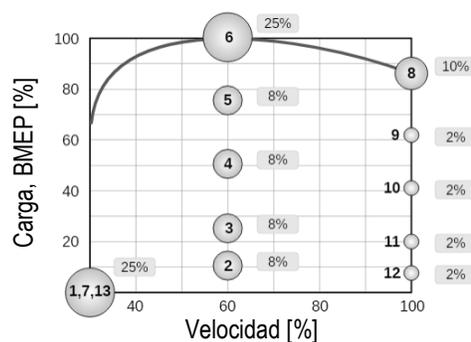


Figura 13. Puntos de prueba para el ciclo estático ECE R49.
Fuente: [23].

1.3 DINAMÓMETROS DE BANCO

Al hablar de dinamómetros, se hace referencia a los instrumentos de medición de par motriz en motores, compuesto por la instrumentación, equipamiento e instalaciones necesarias para la medición de variables operacionales en motores de combustión interna o vehículos, tales como el par motriz, la potencia generada, entre otros, y cuya función principal es arrojar resultados de homologación o estandarizados del desempeño de las máquinas en mención.

Específicamente, el instrumento para generar la carga en el motor se conoce como unidad de absorción de potencia (por sus siglas en inglés, PAU) o freno, a continuación, se abarcan brevemente diferentes tipos de PAU y su aplicación.

1.3.1 TIPOS DE FRENOS O PAU

Hay tres tipos de PAU utilizados en pruebas de motores y vehículos, primero se encuentran los frenos hidráulicos, los cuales absorben potencia a partir del agua que circula a través de ellos, segundo los frenos eléctricos que a partir del control sobre la corriente se ejerce una fuerza en contra de la entregada por el par del motor y por ende se realiza el frenado, por último, se encuentran los frenos de inercia, donde la inercia de un elemento rodante como rodillos son los que ejercen el frenado [5], éste tipo de dinamómetro se utiliza en otras

aplicaciones como en pruebas de frenado vehicular, por tanto, únicamente los dos primeros se abordarán en la fundamentación del presente documento.

i. FRENOS HIDRÁULICOS

Son utilizados ampliamente en especial en aplicaciones de altas velocidades o de altas cargas, como en motores de la Fórmula 1 (que llegan a 20.000 rpm aproximadamente), turbinas o en motores de hasta 10.000 kW [5]. Se clasifican en dinamómetros de llenado fijo y de llenado variable, ver Figura 14, donde en el primer caso, tiene placas entre el rotor y el estator que cambia las condiciones del flujo sobre las cavidades a partir del desarrollo de vórtices toroidales, este tipo de dinamómetros ya se encuentran obsoletos. En el segundo caso, los de llenado variable tienen el control de la carga a partir del cambio del flujo másico de agua, a partir de válvulas a la entrada y la salida, su ventaja en comparación a los de llenado fijo es que la carga se puede variar mucho más rápido. [24], y son considerados dinamómetros de dos cuadrantes, es decir, absorben energía en ambas direcciones de giro del eje del motor más no entregan energía para el giro del mismo; mayor información sobre el control y la cuantificación de la carga se encuentra en [25] [26] [27].

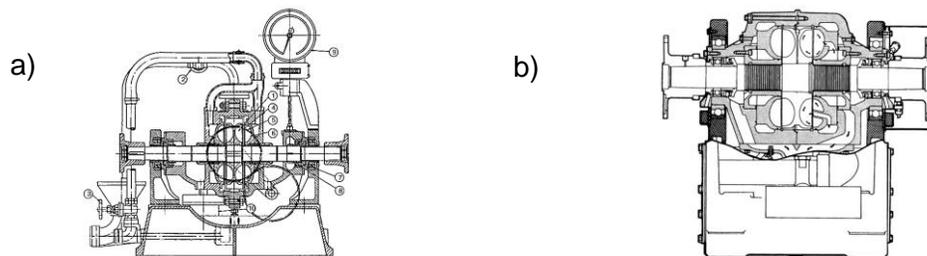


Figura 14. Vista de sección dinamómetros hidráulicos a) Llenado fijo b) Llenado variable
Fuente: [24]

Las curvas típicas de dinamómetros hidráulicos se presentan en la Figura 15, que consta de tres regiones, una región de incremento cuadrático en la absorción de potencia, seguido de una región lineal y por último una región constante de absorción, el motor debe estar cubierto por la curva del freno, en el caso de la figura de ejemplo, se muestra un motor que está cubierto después del 30% de la velocidad [21]. Para contrarrestar este efecto se puede aplicar un mecanismo para el incremento de velocidad en el eje de salida del motor para que sus curvas de potencia y torque se muevan hacia la derecha.

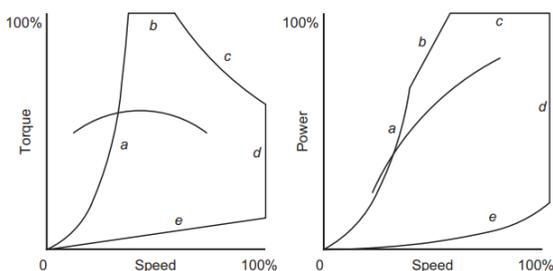


Figura 15. Gráficas típicas de torque y potencia de un dinamómetro hidráulico.
Fuente: [24]

ii. FRENOS ELÉCTRICOS

En el caso de dinamómetros eléctricos, se clasifican en dos tipos, de corriente Eddy y dinamómetros generadores, AC o DC. En el dinamómetro de corriente Eddy el motor gira con el rotor, mientras que en el estator se controla la carga a partir de la excitación de los magnetos, provocando una fuerza de arrastre opuesta al giro del rotor, tiene ventajas como la baja inercia, simplicidad mecánica y adaptabilidad para ser controlado y desventajas como la refrigeración a altas cargas. Al igual que los dinamómetros hidráulicos se considera como un freno de dos cuadrantes, es decir que absorbe energía en ambos sentidos de giro del motor.

En la Figura 16 se presentan las curvas típicas de un dinamómetro de corriente Eddy, tiene dos regiones de potencia de frenado, una lineal hasta su punto máximo, y posteriormente presenta un comportamiento constante.

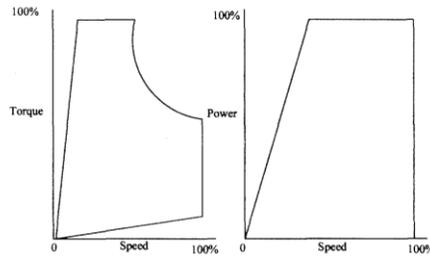


Figura 16. Curvas típicas de torque y potencia de un dinamómetro de corriente Eddy.

Fuente: [5]

En el segundo caso, los dinamómetros AC o DC, tienen la ventaja de operar en cuatro cuadrantes, es decir que puede absorber energía y dar energía al motor en ambas direcciones de giro, ventaja que permite realizar pruebas de “*motoring*”, para la obtención de potencia por fricción en los motores, o simulación de condiciones de regeneración en vehículos eléctricos, otra ventaja es que permite medir altos torques a bajas velocidades, aunque a altas velocidades su curva de frenado decrece. Su principal desventaja es el alto costo de fabricación e implementación, casi el doble de dinamómetros de corriente Eddy. La Figura 17 muestra las curvas de torque y potencia de frenado de un dinamómetro AC/DC, que básicamente son las mismas que las de un motor eléctrico, allí se ven dos regiones, una de incremento lineal de la potencia, hasta que se estabiliza, se resalta que el torque máximo de frenado se da desde una velocidad de cero.

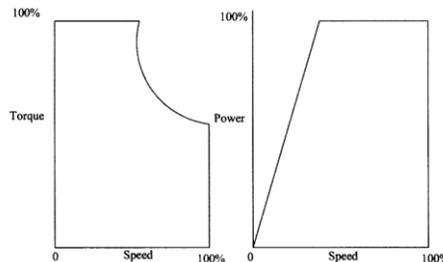


Figura 17. Curvas típicas de torque y potencia de un dinamómetro de AC/DC.

Fuente: [5]

CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

La metodología de diseño utilizada está basada en partes de las referencias [28], [29], y consta de cuatro etapas, ver Figura 18; la primera es el establecimiento de las necesidades, requerimientos y especificaciones del dinamómetro, donde se genera la propuesta de valor, se consideran los criterios dados por potenciales usuarios, se estudia el mercado existente, los lineamientos descritos en el estándar SAE J1349 que contiene los valores de precisión y exactitud de los equipos de medición y las consideraciones para tener pruebas de torque y potencia estandarizadas [30].

En la segunda etapa, se desarrolla el diseño conceptual, partiendo de una identificación de subsistemas que cubran los requerimientos establecidos, seguido de una generación conceptual para cada uno, posteriormente, se lleva a cabo una ponderación y evaluación de los conceptos y se obtiene uno final de todo el sistema.

En la tercera etapa, se realiza el diseño detallado, donde se llevan a cabo los cálculos mecánicos, hidráulicos, eléctricos, entre otros, según la cantidad de subsistemas generados en la fase previa; asimismo se realiza el cálculo de componentes estandarizados, la modelación de piezas y elaboración de planos de fabricación.

Por último, en la cuarta etapa, se lleva a cabo la fabricación del banco de pruebas, y se evalúa el desempeño del producto obteniendo los valores de rangos de operación, regímenes de trabajo y especificaciones finales, asimismo se realiza una documentación como la ficha técnica y el manual de operación del dispositivo.

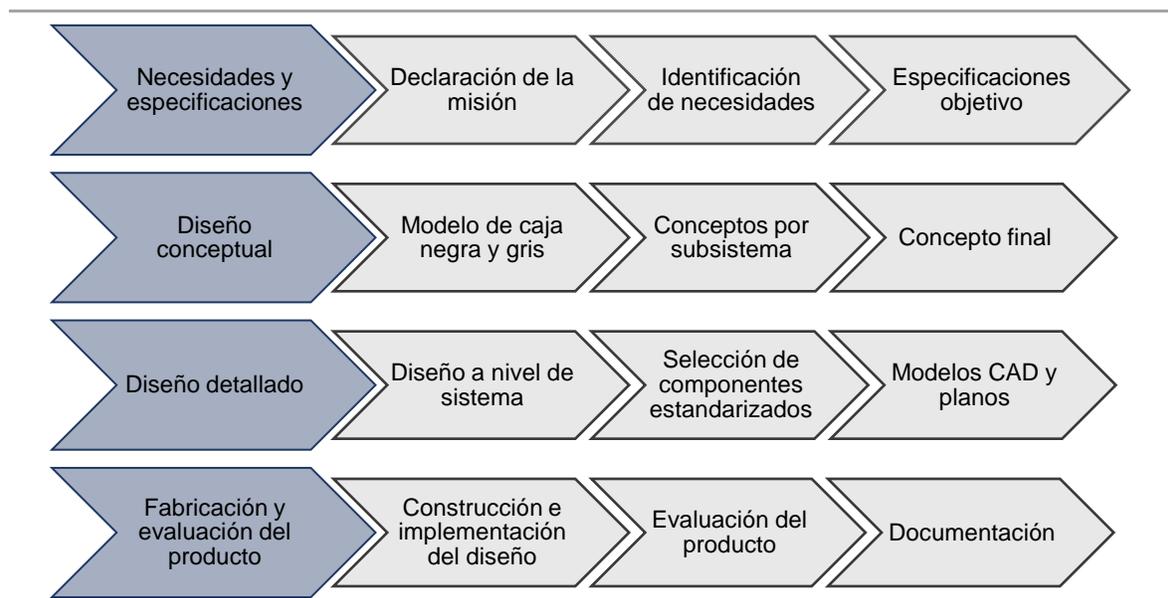


Figura 18. Metodología de diseño utilizada para el desarrollo del dinamómetro.

Fuente: Elaboración propia. Basado en [28], [29]

CAPÍTULO 3. RESULTADOS – DISEÑO DEL DINAMÓMETRO DE BANCO

3.1 ESTABLECIMIENTO DE NECESIDADES, REQUERIMIENTOS Y ESPECIFICACIONES OBJETIVO

Las oportunidades identificadas en el proyecto de diseño del dinamómetro radican en un mercado existente a nivel mundial, principalmente dirigido a vehículos livianos y a motocicletas, relacionado a la ejecución de pruebas de desempeño, emisiones y eficiencia energética, mercado que actualmente ya cuenta con soluciones tecnológicas para suplir sus necesidades; asimismo, el conocimiento de las soluciones está bastante bien trabajado por parte de las empresas que ofrecen soluciones tecnológicas. Por tanto, el horizonte de oportunidades está enmarcado, tal y como se presenta en la Figura 19, en el grupo 1 donde Ulrich recomienda mejoras, extensiones, variantes y reducciones de costos sobre los diseños disponibles a la fecha [28]. El planteamiento del problema se trató al inicio del presente documento, y se presenta nuevamente la pregunta de diseño a resolver:

¿Qué alternativa para la prueba de motores livianos de alto desempeño se constituye como una opción para cubrir las necesidades de obtención de curvas de desempeño y mapeo en estos motores?

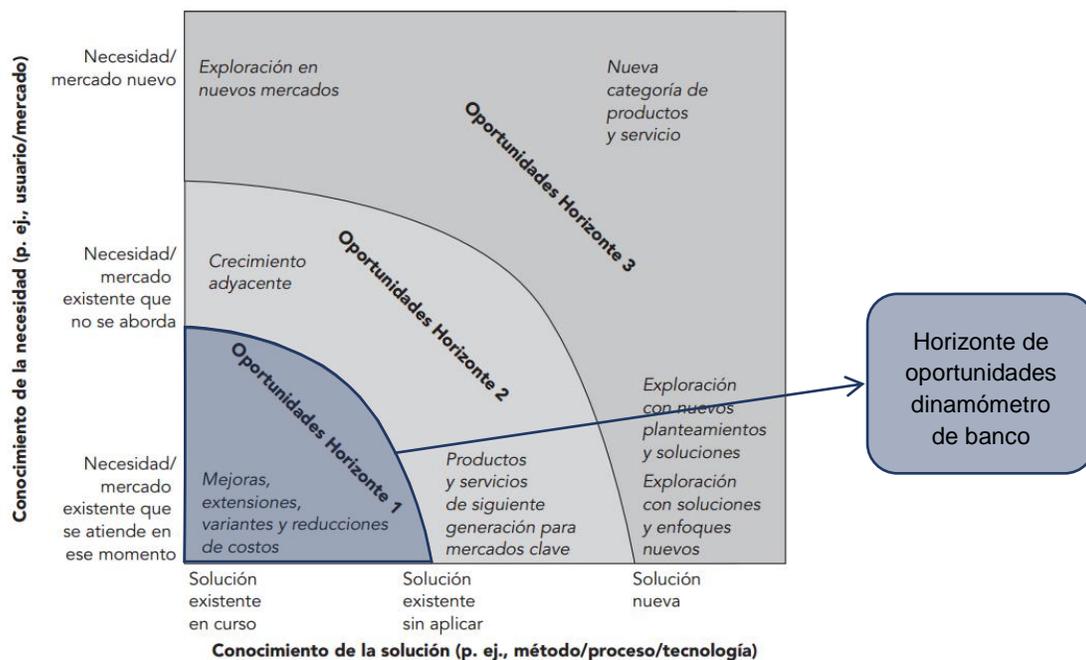


Figura 19. Oportunidades identificadas para el diseño del dinamómetro.

Fuente: [28].

3.1.1 DECLARACIÓN DE LA MISIÓN

i. DESCRIPCIÓN DEL DINAMÓMETRO DE BANCO

Dispositivo que se conecta a motores de combustión interna livianos de hasta 200 hp para obtener resultados de su desempeño.

ii. PROPUESTA DE VALOR

El dinamómetro de banco mide torque, potencia, velocidad angular, consumo de combustible y variables de operación de motores ligeros, con código abierto en el procesamiento de datos, bajas pérdidas inerciales y de deslizamiento, con versatilidad para trabajar sobre distintas plataformas vehiculares y portabilidad.

iii. METAS CLAVES

Para junio del año 2019, la Unidad de Alta Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México tendrá el dinamómetro de banco operando en un motor del laboratorio, que será utilizado en la competencia de la Fórmula SAE.

iv. MERCADO OBJETIVO

El mercado primario es el laboratorio de la Unidad de Alta Tecnología (UAT) de la UNAM, donde se necesita un dinamómetro para pruebas específicas en vehículos tipo Fórmula SAE.

Los mercados secundarios son otras universidades que también desarrollan vehículos de competencia, además de laboratorios, centros de investigación, centros de verificación vehicular y talleres donde prueben vehículos con motores ligeros de alto desempeño como ATV, motocicletas, karts o tipo Fórmula.

v. SUPOSICIONES

- Se acopla a motores de menos de 200 hp al eje de salida de la transmisión o al cigüeñal.
- La unidad de absorción de potencia soporta velocidades de hasta 14.000 rpm.
- Se encuentra un sistema en la UAT para la refrigeración del agua en equipos de prueba.
- Se encuentra disponible instrumentación en la UAT para la implementación del banco de pruebas, específicamente una celda de carga triaxial.

vi. INVOLUCRADOS

- Unidad de Alta Tecnología de la UNAM.
- Escudería UNAM Motorsports.
- Talleres de fabricación de piezas, de tableros eléctricos y de control.
- Distribuidores de materia prima, instrumentos de medición y demás insumos necesarios.

3.1.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS NECESIDADES

Se establecieron diferentes tipos de persona, es decir, usuarios potenciales del producto en cuestión, posteriormente se llevó a cabo una recopilación de los datos crudos con cada a partir de la formulación de dos cuestionarios, seguido de una interpretación de la información obtenida, para finalmente realizar la identificación, análisis y clasificación de necesidades.

i. PERSONAS

- José es estudiante de ingeniería mecánica de la Universidad Andina y se encuentra adscrito a la escudería de la Fórmula SAE de su universidad, trabajando en el área de motor y tren de potencia. Dentro de sus actividades tiene el apoyo en el diseño del múltiple de admisión de motor, para lo cual quiere llevar a cabo pruebas de cuatro prototipos propuestos, para ello requiere armar el motor junto a su equipo, para posteriormente llevar a cabo pruebas de desempeño, donde la escudería las realiza en ruta con ajustes según la experiencia del conductor, o en el mejor de los casos realizan pruebas en dinamómetro de rodillos, destinado para vehículos de mayor tamaño. Todo lo anterior conlleva cerca de 60 horas/hombre y todo un plan logístico para el armado y el envío del vehículo al centro de pruebas.

Cuando José conoció del dinamómetro de banco para motores ligeros, ahora puede realizar pruebas y ajustes durante largos periodos de tiempo, obteniendo así datos objetivos de sus propuestas de múltiples de admisión diseñados.

- Juan es investigador en el área de motores de combustión interna y requiere analizar una mezcla con un nuevo combustible a condiciones de operación controladas.

Con el dinamómetro de banco, logró obtener resultados repetibles del uso del combustible a diferentes mezclas identificando y modificando así los parámetros de inyección para una óptima operación.

- Julián está viendo su clase de Motores de Combustión Interna y en las prácticas de laboratorio le pidieron obtener la región de operación del motor donde el consumo de combustible sea menor, para ello llevó a cabo un desarrollo experimental en el dinamómetro de banco para obtener la información que le permitiera recabar tales resultados.
- Marco tiene un taller de servicio a motocicletas y ATVs, donde las ajusta o modifica a partir de la modificación de mapas de inyección o modificaciones físicas para la mejora de su desempeño. Dentro de sus servicios al cliente, les da un análisis comparativo de la potencia ganada al realizar las modificaciones, Marco lleva los motores a probar en el dinamómetro de banco y obtiene las curvas y cifras de línea base y línea con modificaciones para llevar a cabo sus análisis.

ii. RECOPIACIÓN DE DATOS SIN PROCESAR

Se recopilaron datos sin procesar a partir de dos tipos de cuestionarios formulados en línea, complementados con llamadas telefónicas para la profundización de respuestas. Los cuestionarios se realizaron sobre un formato en línea donde las respuestas eran abiertas y se devolvían por escrito de forma digital.

En paralelo, durante el proceso iterativo de diseño, se realizó una visita al laboratorio de motores de la UNAM y al laboratorio donde se diseña y fabrica el vehículo de competencia para la Fórmula SAE, para recopilar información que eventualmente haya quedado oculta en las entrevistas

A continuación, se detallan los resultados recopilados:

Cuestionario 1: Enlace - <https://es.surveymonkey.com/r/QPRKF7V>

Persona a quien va dirigida:

Usuarios de dinamómetros, propietarios de vehículos, motores y compañías que prueban vehículos, miembros del equipo UNAM Motorsports y de otras escuderías de competencia automotriz.

Objeto presentado:

“La presente encuesta busca identificar necesidades en usuarios que acuden a pruebas en motores de combustión interna o de vehículos automotores donde se utilizan dinamómetros”.

Preguntas presentadas:

En la Tabla 8 se presentan 6 preguntas planteadas en la encuesta al primer grupo de personas.

Tabla 8. Preguntas realizadas a usuarios de dinamómetros.

No.	Pregunta
1	Preséntate, comenta tu profesión, dedicación, entidad a la que perteneces, gustos, así como tu relación con pruebas en vehículos y motores.
2	¿Qué pruebas realizas sobre tus vehículos/motores al llevarlos al dinamómetro? 1. Pruebas de desempeño. 2. Pruebas de calibración de parámetros de inyección. 3. Pruebas de emisiones. 4. Pruebas de eficiencia energética. 5. Otro (especifique)
3	¿Qué consideras se puede mejorar en el proceso de ejecución de las pruebas sobre tu vehículo/motor?
4	¿Cuánto es el precio promedio por cada una de las pruebas que ofrecen? ¿Crees que el precio de este servicio es alto, bajo o justo?
5	¿Qué inconvenientes o disgustos has tenido durante las pruebas con dinamómetros?
6	¿Tienes algún comentario, pregunta o inquietud?

Respuestas obtenidas:

Las respuestas obtenidas se presentan en el Anexo 2, como resultado, se tiene que las pruebas que más realizan los usuarios son de emisiones y de desempeño, principalmente en pruebas de verificación vehicular y modificación en motores respectivamente. Por otra parte, se muestran inconvenientes relacionados a:

- Lecturas erróneas en equipos, repetibilidad y confiabilidad.
- Capacidades técnicas del personal que realiza las pruebas.
- Precios excesivos, pruebas básicas entre 25 USD y 66 USD y pruebas de todo un día entre 1.000 y 5.000 USD.
- Mediciones de flujo de combustible no correctas y pueden intervenir en los parámetros del motor al restringir el flujo.

Cuestionario 2 – Enlace <https://es.surveymonkey.com/r/SKKFJH8>

Persona a quien va dirigida:

- Estudiantes e investigadores.
- Entidades académicas y centros de prueba automotriz.

Objeto presentado:

“La presente encuesta busca identificar necesidades en entidades, talleres, centros de prueba y compañías que se encuentran involucradas en la ejecución de pruebas en motores de combustión interna o de vehículos automotores donde se utilizan dinamómetros.”

Preguntas presentadas:

En la Tabla 9 se presentan diez preguntas planteadas en el cuestionario al segundo grupo de personas.

Tabla 9. Preguntas realizadas a entidades académicas y centros de pruebas automotrices

No.	Pregunta
1	Preséntate, comenta tu profesión, dedicación, gustos, así como tu relación con pruebas en vehículos y motores.
2	¿Qué pruebas realizas o gestionas sobre los vehículos/motores en dinamómetro? 1. Pruebas de desempeño. 2. Pruebas de calibración de parámetros de inyección. 3. Pruebas de emisiones. 4. Pruebas de eficiencia energética. 5. Otro (especifique)
3	De los dinamómetros que conoces para la evaluación de vehículos o motores, ¿Han requerido modificaciones en la bodega/laboratorio para la instalación? ¿Qué modificaciones?
4	¿Cuánto es el costo de las adecuaciones en las instalaciones en comparación al costo del dinamómetro? (especifica el tipo de dinamómetro)
5	¿Qué inconvenientes has tenido durante pruebas con dinamómetros en vehículos?
6	¿Qué mejoras le harías a los dinamómetros que tienes actualmente en tu laboratorio o en los laboratorios que conoces?

No.	Pregunta
7	¿Podrías comentar el proceso y tiempo de alistamiento de los vehículos/motores y del dinamómetro para hacer las pruebas esperadas?
8	¿Qué tan versátil son los dinamómetros cuando requieres cambiar los vehículos de prueba o los motores de prueba?
9	Cuéntame el proceso de mantenimiento de tus dinamómetros 1. ¿Qué se requiere durante el mantenimiento? 2. ¿Lo realizas tú mismo? 3. ¿Has tenido fallas para mantenimiento correctivo? 4. ¿Documentas el mantenimiento que le haces a los equipos?
10	De los siguientes tipos de dinamómetros, ¿cuáles prefieres y por qué? (Marca los que apliquen) 1. Dinamómetro de motor. 2. Dinamómetro de cubos. 3. Dinamómetro de rodillos. 4. Pruebas en ruta. 5. Otro.

Respuestas:

El cuestionario fue resuelto por siete personas y los resultados se presentan de forma general a continuación, mientras que un mayor detalle en las respuestas se presenta en el Anexo 2. Al igual que en el caso del cuestionario anterior, las pruebas de emisiones y de desempeño son las más requeridas para el uso de dinamómetros, seguido de pruebas de eficiencia energética, asimismo hay un nuevo tipo de prueba identificado como es el caso de la programación de cajas automáticas. Se identificaron inconvenientes de pruebas como el calentamiento de las ruedas para pruebas de larga duración, sobrecalentamiento de la PAU, falta de adecuación para diferentes tamaños de vehículos y limitación para la ejecución de pruebas sobre tipologías vehiculares eléctricas e híbridas

Asimismo, se identificaron oportunidades de mejora como en la cantidad y tipo de pruebas a ejecutar, mejoras en la gestión y procedimientos a seguir, rigurosidad en el mantenimiento, capacitación del personal, además en la baja versatilidad al cambio de vehículos, aunque cuando son tipologías vehiculares similares se tiene mayor facilidad.

También se trató un tema relacionado al tiempo de alistamiento de los vehículos y las respuestas fueron muy variadas, donde para pruebas simples puede llevar entre 15 minutos y 1:30 horas del alistamiento, pero para pruebas complejas puede tardar hasta 8 horas, dependiendo de la cantidad de equipos y accesorios a montar.

Por otra parte, se indagó en el mantenimiento en equipos, Los resultados presentan que se realizan acciones de mantenimiento de alineación de ejes, engrase de rodamientos, verificaciones de calibración de celdas de carga, inspecciones dimensionales y visuales de los componentes, verificaciones eléctricas, cambio de correas y accesorios.

Por último, con respecto al tipo de dinamómetro que prefieren utilizar, del total de personas indagadas tienen preferencia por pruebas en ruta un 72%, seguido por pruebas en dinamómetro de banco en un 57%.

iii. NECESIDADES IDENTIFICADAS Y ORGANIZACIÓN JERÁRQUICA

A partir de la información recopilada de los diferentes tipos de persona, se identificaron 23 necesidades, presentes en la Tabla 10.

Tabla 10. Necesidades identificadas relacionadas al dinamómetro.

#	Notación	Necesidad
1	ND_1	La estructura soporta un dinamómetro hidráulico.
2	ND_2	La estructura soporta motores de combustión interna o vehículos ligeros.
3	ND_3	El costo de fabricación e implementación es bajo
4.	ND_4	El banco de pruebas resiste vibraciones generadas durante su uso.
5.	ND_5	El banco de pruebas permite configuraciones de MCI, híbridos y eléctricos.
6.	ND_6	El banco de pruebas permite la prueba a diferentes tipos de vehículos o motores.
7.	ND_7	El dinamómetro está conectado a la celda de carga.
8.	ND_8	El dinamómetro prueba motores ligeros de alto desempeño.
9.	ND_9	El dinamómetro permite hacer pruebas de desempeño dinámicas.
10.	ND_10	El dinamómetro permite hacer pruebas de desempeño estáticas.
11.	ND_11	El dinamómetro permite modificar mapas de inyección en MCI.
12.	ND_12	El dinamómetro controla la carga del motor y la PAU.
13.	ND_13	El dinamómetro disipa el calor generado por la PAU.
14.	ND_14	El dinamómetro adquiere valores de los parámetros de desempeño del MCI.
15.	ND_15	El dinamómetro adquiere y almacena las señales del MCI.
16.	ND_16	El dinamómetro es seguro al ser utilizado.
17.	ND_17	El dinamómetro cumple con lineamientos de pruebas estandarizadas.
18.	ND_18	El dinamómetro permite el arranque y aceleración del motor.
19.	ND_19	El proceso de alistamiento de los sistemas para realizar las pruebas es fácil y rápido.
20.	ND_20	El dinamómetro es fácil de ensamblar y de realizarle mantenimiento.
21.	ND_21	El dinamómetro extrae las emisiones de contaminantes atmosféricos generadas por los motores.
22.	ND_22	El dinamómetro refrigera el motor del vehículo.
23.	ND_23	El dinamómetro mide condiciones atmosféricas de uso.

3.1.3 ESPECIFICACIONES DEL DINAMÓMETRO DE BANCO

Para la obtención de especificaciones, se definieron métricas para cubrir las necesidades identificadas previamente, seguido de un estudio de mercado, donde se definen los valores objetivo de cada métrica.

i. LISTA DE MÉTRICAS

A partir de las necesidades identificadas, se asignaron varias posibles métricas y se correlacionaron, tal como se presenta en la Tabla 11, donde en las columnas se encuentra la numeración de las necesidades identificadas en el numeral 3.1.2, y en las filas se proponen 28 métricas para cuantificar las necesidades. Cuando la necesidad es cubierta por la métrica, la celda de cruce se denota con un marca de comprobación y validación.

Tabla 11. Matriz de métricas vs. Necesidades identificadas.

Métricas			Necesidades																							
No.	Descripción	Ud.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
1	Dimensiones del montaje con vehículo	m³	✓	✓																						
2	Dimensiones del montaje sin vehículo	m³	✓	✓																						
3	Rango de altura de acoplamiento	m	✓	✓		✓																				
4	Rango de aproximación horizontal	m	✓	✓			✓																			
5	Peso	kg			✓																					
6	Número de acoples para motores	#			✓	✓	✓																			
7	Rigidez	N/m			✓																					
8	Frecuencia de vibración admisible	Hz				✓																				
9	Desalineación entre ejes, axial y angular	mm / °					✓	✓																		
10	Rango y error en medición del torque	Nm						✓	✓	✓	✓	✓	✓													
11	Rango y error en medición de la velocidad angular	rpm						✓		✓	✓	✓	✓													
12	Rango y error de medición de potencia	kW						✓	✓	✓	✓	✓	✓													
13	Rango y error de medición del flujo de combustible	g/s								✓				✓												
14	Tiempo máximo de operación continua	min									✓	✓														
15	Frecuencia de adquisición de datos	Hz											✓				✓	✓								
16	Temperatura del agua del dinamómetro	°C												✓	✓											
17	Presión y caudal del agua del dinamómetro	kPa / L/h												✓	✓											
18	Capacidad de almacenamiento de datos	MB														✓	✓									
19	Cumplimiento de estándares de calidad y seguridad	Si / No																✓	✓							
20	Voltaje de alimentación eléctrica	V																		✓						
21	Períodos de mantenimiento	h																			✓	✓				
22	Tiempo de montaje y alistamiento de motor y equipos	min																			✓	✓				
23	Caudal de flujo de extracción de gases	m³/s																						✓		
24	Concentración de CO y NO _x	% / ppm																						✓		
25	Temperatura de operación del motor	°C																								✓
26	Rango y error de medición de HR y temperatura ambiente	% / °C																								✓

ii. VALORES OBJETIVO Y MARGINALMENTE ACEPTABLES

Para obtener los valores objetivo de las especificaciones de ingeniería se tuvieron en cuenta características donde el diseño va a ser operado, tales como:

- Dimensiones marginales del laboratorio.
- Tipos de motores que soportará.
- Tipo de freno a utilizar.
- Equipos e instrumentación con los que el laboratorio cuenta actualmente, sin que estos equipos sean limitantes en el diseño, es decir, se tienen en cuenta desde las especificaciones y en el diseño conceptual y detallado se comparan con otras posibles soluciones y se decide si se utilizan para el desarrollo del dispositivo.
- Dinamómetros existentes en el mercado, para conocer sus especificaciones.
- Patentes de dinamómetros, para identificar qué tipo de soluciones conceptuales llevaron a cabo para medir los parámetros.

Unidad de absorción de potencia. Dinamómetro hidráulico Stuska XS-19

Como se esperan altas velocidades de giro y altas potencias de motores ligeros, la unidad de absorción de potencia seleccionada para desarrollar el banco de pruebas es un freno hidráulico de llenado variable marca Stuska XS-19, refrigerado por agua.

La Tabla 12 presenta las especificaciones técnicas y requerimientos para su operación.

Tabla 12. Especificaciones de dinamómetro Stuska XS-19

Especificaciones Stuska XS-19	Valor	Unidades
Potencia máxima	200	Hp
Velocidad máxima	12.000	rpm
Torque máximo	160	Nm
Flujo mínimo de agua requerido	10 por cada 100 hp	gpm
Diámetro manguera línea de suministro	15.875 (5/8)	mm (in)
Máxima temperatura de agua de entrada	21 (70)	°C (°F)
Máxima temperatura de agua a la salida	54 (130)	°C (°F)

En la Figura 20 se presentan las curvas de potencia y torque máximo de frenado del dinamómetro en función de la velocidad de giro. Es importante tener en cuenta que, para efectos de las pruebas, las curvas de torque y potencia de los motores estén contenidas en las curvas del dinamómetro. Para ello, según el manual del dinamómetro, controlando el flujo de agua a la salida y a la entrada, así como la presión, el torque de frenado cambia para el régimen de velocidad específico, por tanto, se puede tener una mayor pendiente de las curvas para tener un mejor desempeño en el frenado a bajas velocidades, sacrificando la velocidad máxima de operación.

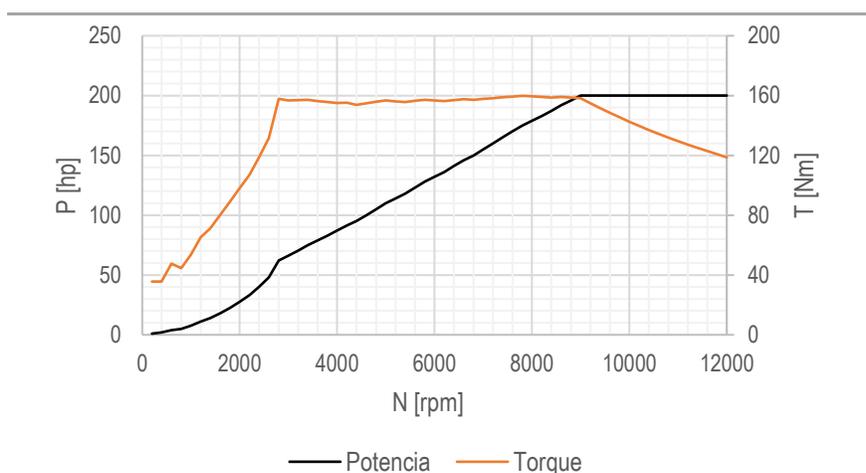


Figura 20. Curva de potencia y torque del dinamómetro Stuska XS-19.
Elaboración propia. Datos tomados de: [31]

Por lo anterior, el punto de referencia de carga del dinamómetro está determinado por la relación de diámetros de las dos válvulas, de entrada y salida respectivamente, en las que el motor sea cargado en la mínima velocidad. El tamaño del orificio de salida se deja fijo y se varía el flujo de la entrada, un orificio de salida muy pequeño resulta en un aumento excesivo de la temperatura del dinamómetro y una rápida actuación de la válvula de control, mientras que un orificio de salida grande no permite la carga completa del dinamómetro a bajas velocidades y hace que la válvula de control tenga una respuesta lenta.

En la Figura 21, se muestran las dimensiones principales del dinamómetro, este cuenta con tres espigas donde fluye el agua, la primera de entrada es de 5/8" de diámetro, que va

después de la válvula de control, la segunda espiga, va unida a una manguera de $\frac{1}{2}$ " de diámetro y es la ventilación del freno y un seguro ante altos flujos, es decir que cuando sale agua por dicho orificio es necesario cerrar la válvula de flujo de agua de entrada o abrir más el orificio de salida. Por último, la tercera espiga corresponde a la salida de agua del freno hidráulico, el manual recomienda que la manguera de retorno siempre esté por debajo del punto de salida.

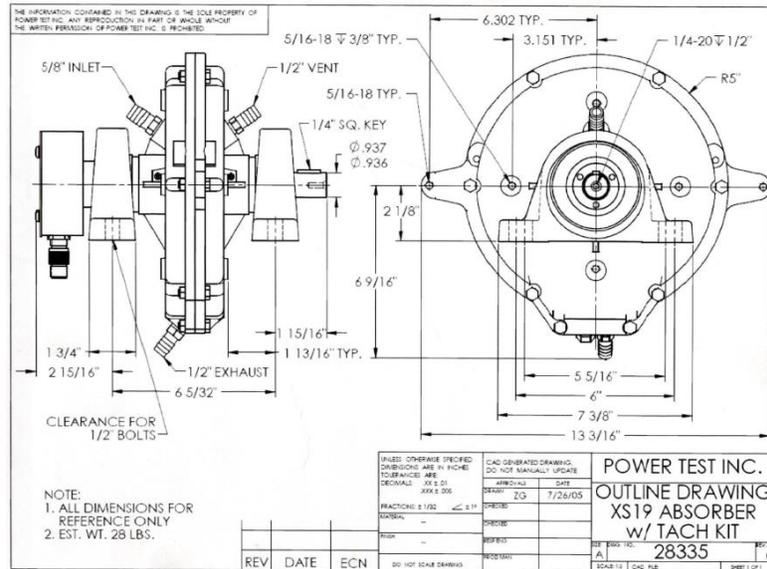


Figura 21. Dimensiones generales del freno hidráulico Stuska XS-19.

Fuente: [32]

Asimismo, se presentan dos longitudes de brazo donde puede conectarse una celda de carga, una a 6.302 in (160.07 mm) y otra más corta a 3.151 in (80.03 mm), es decir que la fuerza que percibiría una celda de carga acoplada al brazo corto es del doble en comparación a la del brazo largo.

Por último, otra característica del dinamómetro hidráulico Stuska XS-19, es que su eje de entrada se encuentra a ambos lados y puede ser operado en los dos sentidos de giro, asimismo solamente permite disipar energía, mas no entregarla, por tanto, pruebas de *motoring* no sería posible realizarlas.

Celda de carga Futek MTA-400

El laboratorio cuenta con una celda de carga triaxial Futek MTA-400 disponible para ser utilizada en el proyecto junto a un conversor de señal de *Strain Gauge* Seneca Z-SG para amplificación de la señal, usualmente los dinamómetros cuentan con celdas de carga de un solo eje para las configuraciones típicas de brazo de palanca accionando en una sola dirección sobre la celda o torquímetros acoplados colineales al eje del freno, tal como se presentaron en la Figura 2, por tanto, para efectos de la muestra de las especificaciones, solamente se considera el canal Z de la celda de carga Futek MTA-400, que es el canal que va en dirección vertical sobre el plano horizontal, la Tabla 13 muestra las especificaciones en detalle.

Tabla 13. Especificaciones técnicas de celda de carga Futek MTA400.

Fuente: Adaptado de [33].

Especificaciones celda de carga Futek MTA 400 – Canal Z	Valor	Unidades
Capacidad eje z	500	lb
Peso	2	lb
Voltaje de excitación	1 - 18	Vdc
Resistencia de entrada	760	Ohms
No linealidad	±0.25	% de R.O.
Histéresis	±0.25	% de R.O.
No repetibilidad	±0.1	% de R.O.
Temperatura de operación	-60 – 200	°F
Sobrecarga admisible	150	% de R.O.
Cambio de temperatura	±0.01	% de carga/°F
Cambio de temperatura en el cero	±0.01	% de R.O./°F
Balance del cero	±3	% de R.O.
R.O. (salida nominal)	0.75	mV/V
Excitación de calibración	10	Vdc

De forma preliminar se muestra cuando el freno hidráulico le aplica un par a la celda de carga a dos longitudes de brazo de palanca diferentes y que llegue al punto máximo de medición de la celda (500 lb), tal como se muestra en la Figura 22, para el caso a), el torque máximo que se podría medir con la celda de carga en ese sistema sería de 356 Nm, mientras que para el caso b), el torque máximo que se podría medir con la celda de carga en esa configuración sería la mitad, es decir, 178 Nm.

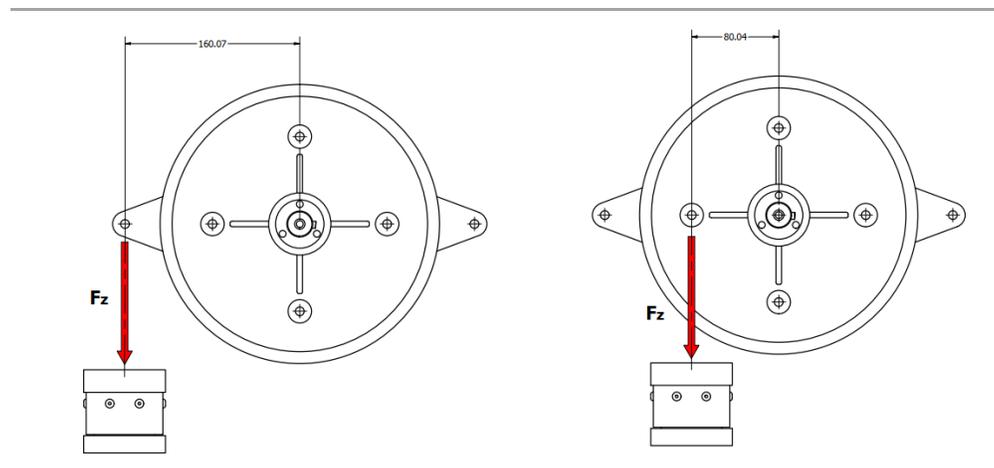


Figura 22. Fuerza aplicada por el freno hidráulico sobre la celda de carga
a) Brazo de 160 mm. b) Brazo de 80 mm

Fuente: Elaboración propia.

Es importante definir el mecanismo de transmisión del par, para que no se consideren las otras dos direcciones de la celda de carga, teniendo en cuenta que el par se transmita de forma perpendicular al brazo de acción por parte del freno hidráulico, o en el caso que se consideren los otros dos canales, se podría analizar vibraciones o golpeteos en las dos direcciones del plano horizontal.

Amplificador de señal para celdas de carga, Seneca ZS-G

Como se mencionó anteriormente, otro de los equipos disponibles en el laboratorio es el amplificador de la señal entregada por la celda de carga, las especificaciones técnicas del amplificador de la señal que sale de la celda de carga se muestran en la Tabla 15, se evidencia la versatilidad del amplificador al poder trabajar con salidas digitales y análogas según requerimientos, además de tener múltiples valores de entrega de frecuencia para datos digitales, por tanto, es necesario definir en las fases de diseño conceptual y detallado la configuración más adecuada para la aplicación del banco de pruebas para motores.

Tabla 14. Especificaciones técnicas del amplificador Seneca Z-SG

Fuente: [34].

Especificaciones amplificador de Strain gauges Seneca Z-SG	Valor	Unidades
<i>Generales</i>		
Suministro de energía	10 – 40	Vdc
	19 – 28	Vac
Consumo de potencia	2.0 máx	W
Puertos de comunicación	RS485, 2400 – 115200	Baud
	RS232, 2400	Baud
Protocolo	MODBUS-RTU	-
<i>Entrada análoga</i>		
Tipo de entrada análoga	6 o 4 cables de entrada diferencial	-
Impedancia de entrada	>1	MΩ
Escala total	±5 - ± 320	mV
Error de calibración	0.01	% de R.O.
Error de linealidad	0.01	% de R.O.
Estabilidad térmica	0.0025	%/°C de R.O.
<i>Características del strain gauge</i>		
Suministro de voltaje a Strain gauge	5	Vdc
Impedancia mínima	87	Ω eq
Sensibilidad del Strain gauge	De ± 1 a ±64	mV/V
<i>Salida análoga</i>		
Voltaje de salida	0 – 10, 0 – 5	Vdc
Corriente de salida	0 – 20, 4 – 20	mA
Error	0.1	% del rango máximo
Tiempo de respuesta (10%...90%)	5	ms
<i>Otros</i>		
Convertor análogo digital	24	bit
Deslizamiento térmico	25	ppm/K
Frecuencia de muestreo	Ajustable de 12.53 a 151.71	Hz
Rechazo de interferencia	De 50 y 60	Hz
Protección	IP20	-
Condiciones ambientales	Temp. -10 – 65	°C
	HR: 30 – 90	%
	Altitud: hasta 2000	m.s.n.m

Motor de combustión interna

Un motor de combustión interna de alto desempeño se definirá como aquel que tiene una alta relación potencia/desplazamiento (P/V_d), una alta velocidad media del pistón (\bar{S}_p) y una alta presión media efectiva (MEP), usualmente son motores súpercuadrados. Por otra parte, la definición de motores livianos se relaciona con el desplazamiento del motor, donde el rango límite se considerará aquellos de un cilindraje menor o igual a 1.100 cm³.

Para establecer las especificaciones del banco de pruebas, se realiza una comparación entre diferentes motores ligeros utilizados en la Fórmula SAE, seguido de una puntuación para seleccionar uno que se usaría en la competencia y llevar a cabo el diseño del banco, considerando que, cualquiera de ellos puede ser utilizado en el banco de pruebas. Los motores preseleccionados fueron los siguientes:

- Suzuki DR 650 SE 2006
- Suzuki GSX R 600 2006
- Yamaha FZ6 2009
- Yamaha YZF R6 2008
- Kawasaki ZX 650 R 2006
- Suzuki SV 650 S 2003
- Honda CBR 600 RR 2006
- Kawasaki ZX 6 R 2007

Las especificaciones técnicas fueron tomadas de [35] y se tuvo en cuenta motores de diferentes configuraciones como número de cilindros, desplazamiento, etc. La Tabla 15 y la Tabla 16 presenta las variables y los parámetros de operación para los motores.

Tabla 15. Variables geométricas de los motores a comparar

	Variables geométricas	ud	DR 650	GSXR 600	FZ6	YZF R6	ZX 650	SV650	CBR 600	ZX 6R
1	B	mm	100	67	65.5	67	83	81	67	67
2	L	mm	82	42.5	44.5	42.5	60	62.6	42.5	42.5
3	V_t	cc	719.8	651.1	653.6	648.5	712.0	706.4	653.5	645.4
4	V_d	cc	644	599	600	599	649	645	599	599
5	V_c	cc	75.8	52.1	53.6	49.5	63.0	61.4	54.5	46.4
6	r	-	9.5	12.5	12.2	13.1	11.3	11.5	12	13.9
7	B/L	-	1.22	1.58	1.47	1.58	1.38	1.29	1.58	1.58
8	l	mm	-	92.27	-	90.5	-	-	91.8	94.5
9	a	mm	41	21.25	22.25	21.25	30	31.3	21.25	21.25
15	\bar{S}_p	m/s	19.1	20.3	19.6	20.1	18.6	19.4	20.1	21.1
16	n	-	1	4	4	4	2	2	4	4
17	V_{max}	rpm	7000	14300	13200	14200	9300	9300	14200	14900

Tabla 16. Parámetros de operación de los motores a comparar

	Parámetros de operación	UD	DR 650	GSXR 600	FZ6	YZF R6	ZX 650	SV650	CBR 600	ZX 6R
1	$P_{b,max}$	hp	43.44	113.53	95.7	118.7	70.23	85.76	114.15	117.74
	@ $N_{P,max}$	rpm	6400	13500	12100	13100	8500	7200	13100	12300
2	T_{max}	Nm	54.5	69.4	64.0	69.4	67.2	86.5	67.1	71.4
	@ $N_{T,max}$	rpm	4600	11100	6400	11200	6600	7000	10800	11300
3	MEP	kPa	943.5	1256.8	1180.0	1354.2	1139.7	1653.2	1302.3	1430.6
4	W_c		0.608	0.753	0.708	0.811	0.740		0.780	0.857

Asimismo, en la Figura 23 se muestran las gráficas normalizadas de MEP vs \bar{S}_p para llevar a cabo la comparación entre los motores, donde los tres con mejores comportamientos son la Yamaha FZ6, que tiene altos valores de MEP a bajas rpm lo cual hace que el llenado de los cilindros no se vea alterado por el restrictor (uno de los componentes a modificar establecidos en la competencia de Fórmula SAE) a la entrada del flujo de aire requerido por la competencia; el segundo es el motor Suzuki SV 650, el cual tiene la mayor presión media efectiva y también cuenta con una alta MEP a bajas velocidades del pistón; por último, de los motores de altas rpm, se encuentra que el Kawasaki ZX6R es el que cuenta con una mayor MEP , aunque varía menos de un 10% con respecto a los demás del mismo tipo.

Se resalta que los valores analizados son según los datos encontrados en la referencia [35] y pueden variar inclusive para motores de las mismas referencias.

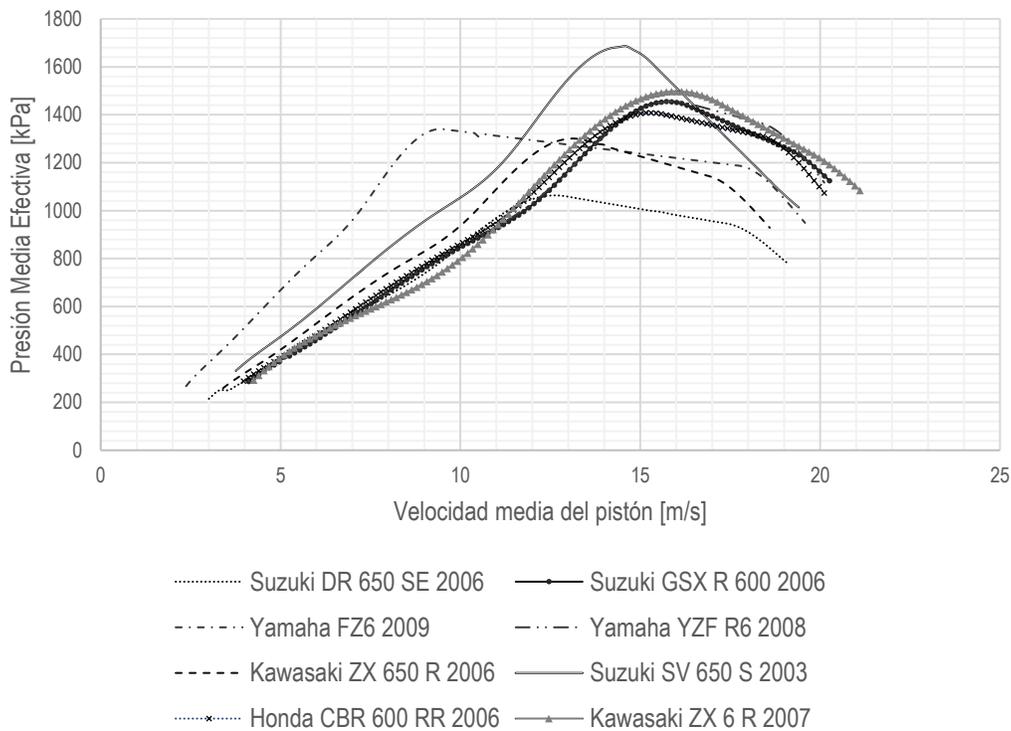


Figura 23. Curvas de presión media efectiva para diferentes motores ligeros.

Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de [35].

Para el caso de la potencia, con los parámetros normalizados, se evidencia que los motores con un mejor comportamiento son el Kawasaki ZX 6R, tal como se muestra en la Figura 24, por su potencia continua en un régimen de velocidad media del pistón de 5 m/s y el Suzuki SV650, porque su crecimiento hace que el comportamiento a bajas velocidades sea mejor que los demás en gran parte de la velocidad media del pistón. Los motores de altas revoluciones en general presentan curvas similares. Varían principalmente en el pico donde se genera la máxima potencia.

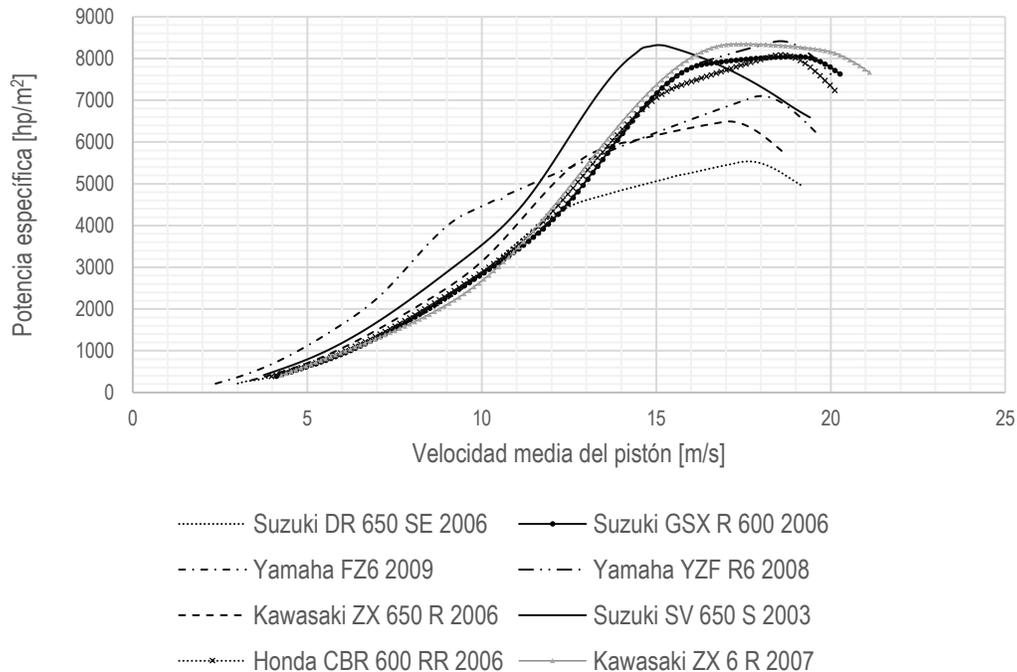


Figura 24. Curvas de potencia específica para diferentes motores ligeros.

Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de [30]

Para realizar una calificación del comportamiento de los motores y evaluar los que mejor se ajusten a las aplicaciones de la Fórmula SAE, se consideraron 5 parámetros:

1. Potencia específica - P_E : Como parámetro normalizado de la potencia del motor, un alto valor significa que el motor genera mayor potencia para el mismo desplazamiento en el régimen de velocidad evaluado.
2. Presión media efectiva al freno – $BMEP$: Como parámetro normalizado del torque del motor. Vehículos con motores aspirados naturalmente tienen valores máximos típicos de $BMEP$ en el rango de 950 kPa y 1.400 kPa, mientras que vehículos con sistemas de sobrealimentación tienen valores mucho mayores, con un rango aproximado entre 1.600 kPa a 2.000 kPa aproximadamente.
3. Velocidad Media del pistón - \bar{S}_p : Como parámetro normalizado de la velocidad de giro del motor. Un comportamiento elevado de torque o potencia en un amplio rango de velocidad o a bajas velocidades es deseable para los motores de esta aplicación.
4. Volumen: El volumen es el espacio que ocupa el motor junto a sus sistemas como el de refrigeración. A mayor número de cilindros el volumen se ve afectado por un incremento en el ancho del motor que dificulta su ubicación sobre la parte posterior del vehículo, aquellos motores más grandes, tienen una puntuación menor en este aspecto.
5. Peso: Está relacionado al volumen, motores de cuatro cilindros pesan aproximadamente 75 kg, mientras que un monocilíndrico puede estar en 60 kg o menos, es decir que, tan solo por tener una configuración diferente, se incrementa en 15 kg el peso del vehículo, que como ejemplo, es cerca de un 5 % del peso total promedio para los vehículos de la competencia.

La Figura 25 presenta la ponderación de todos los motores en los cinco parámetros mencionados anteriormente. Al considerar un igual peso ponderado de cada una de las características, se evidencia que el motor Suzuki SV650 es aquel que tiene una valoración más equilibrada, asimismo, para el caso de los motores de alto régimen de velocidad de operación se muestra que las desventajas radican en su alto volumen y peso, y el que presenta unas calificaciones más altas es el Kawasaki ZX6R. Por último, para el caso del motor Suzuki DR 650, se presenta un comportamiento de bajo desempeño en las variables específicas y alto en el peso y volumen que ocupa, por lo cual, para equilibrar el desempeño muchas escuderías utilizan turbocargadores en este tipo de motores monocilíndricos.

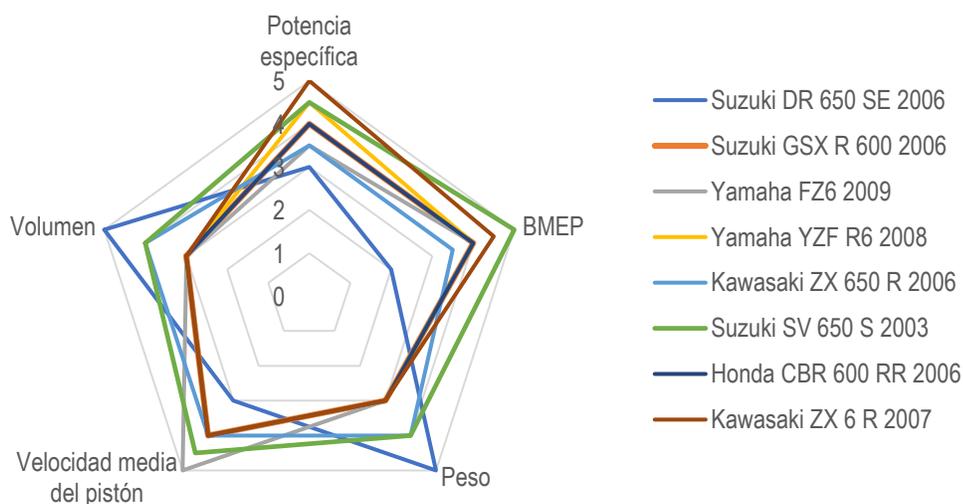


Figura 25. Ponderación de parámetros para diferentes motores ligeros.

Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo anterior se muestra que los dos motores que presentan mejores características según los parámetros evaluados, son el Suzuki SV 650 S 2003 y el Kawasaki ZX-6R 2007, para la selección final entre ellos dos, se optó por aquel que tiene un menor tiempo de uso en el mercado que incide en la disponibilidad de autopartes en el mercado mexicano, por tanto, ha sido el seleccionado el Kawasaki ZX 6R como motor referencia para el diseño del banco de pruebas, las especificaciones técnicas del motor se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Especificaciones de motor Kawasaki ZX-6R.

Fuente: [35]

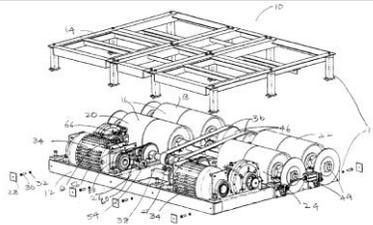
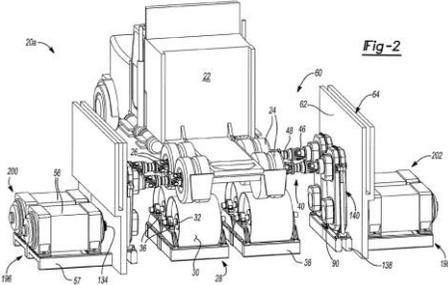
Especificaciones	Valor	Unidades
Kawasaki ZX-6R		
Potencia máxima	115.6@14000	hp
Torque máximo	68.9@12000	Nm
Peso sin accesorios	60.3	kg
Peso con accesorios	75	kg
Diámetro pistón	67	mm
Carrera	42.5	mm
Relación de compresión	13.9	-
Relación primera marcha	2.7143 (38/14)	-

Especificaciones	Valor	Unidades
Kawasaki ZX-6R		
Relación segunda marcha	2.2 (33/15)	-
Relación tercera marcha	1.85 (37/20)	-
Relación cuarta marcha	1.6 (32/20)	-
Relación quinta marcha	1.4211 (27/19)	-
Relación sexta marcha	1.3 (26/20)	-
Reducción primaria	1.9 (76/40)	-

Patentes de dinamómetros

En las patentes se describen equipos con algún grado de innovación o invención, dándoles exclusividad sobre el uso de los diseños planteados, sin embargo, para la obtención de valores objetivo y marginalmente aceptables no se definen explícitamente los valores de las métricas en los documentos patentados, no obstante, son una fuente de información importante como revisión de conceptos solución para sistemas. A continuación, en la Tabla 18 se presenta la descripción de cinco patentes de algunos dinamómetros de distintos tipos, para así conocer sus configuraciones y la solución entregada como parte del estudio de mercado existente y fuente de información para la fase conceptual del diseño del banco de pruebas.

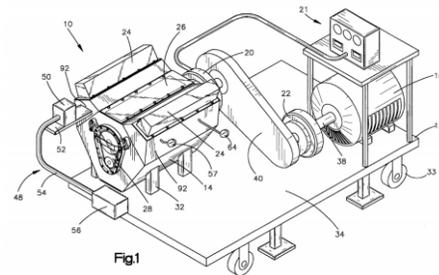
Tabla 18. Patentes de dinamómetros.

Descripción	Esquema
<p>PATENT US 6860145B2 – CHASSIS DYNAMOMETER / 2005</p> <p>En esta patente, de la compañía Power Test Inc, se presenta un dinamómetro de rodillos para aplicaciones vehiculares con dos motores y 4 rodillos, seguido de un marco de soporte, no está relacionado a dinamómetro de motores, pero se puede resaltar que el dinamómetro no es concéntrico a los rodillos, caso contrario tiene una transmisión a través de una banda acoplada únicamente a uno de los rodillos.</p>	 <p>Fuente: [36]</p>
<p>PATENT US 9752961 B2 – DUAL-PURPOSE DYNAMOMETER / 2017</p> <p>En esta patente, de la compañía AVL, se muestra un banco de pruebas dual, en donde el vehículo puede ir acoplado directamente a los ejes de transmisión o también las unidades de absorción de potencia pueden acoplarse a los rodillos. Al igual que en el caso anterior, no es propiamente un banco de motores, pero se resalta la solución dual, tanto para operación directa en el eje del freno como a través de una caja de transmisión propia del banco. El dispositivo de pruebas cuenta con 4 unidades de absorción de potencia.</p>	 <p>Fuente: [37]</p>

Descripción**Esquema**

PATENT US 5515712 A - APPARATUS AND METHOD FOR TESTING COMBUSTION ENGINES / 1996

En la patente se presenta un banco de pruebas eléctrico para motores de combustión interna, acoplados a partir de un sistema de reducción de torque, el sistema incluye medición de torque y velocidad a la salida del eje del motor, asimismo presenta un sistema de medición del flujo volumétrico de aire, además cuenta con un embrague para acoplar y desacoplar el motor cuando sea requerido.

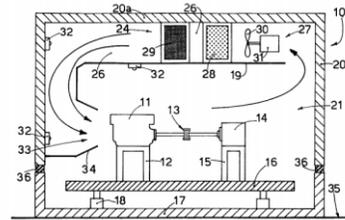


Fuente: [38]

PATENT US 6023890 A - TEST CHAMBER FOR MOTOR VEHICLE ENGINES / 2000

En esta patente de la compañía Angelantoni Industrie SpA se presenta un banco de pruebas con cámara de aislamiento que incluye una base antisísmica, con un piso térmicamente aislado, que incluye un sistema donde se cubre el motor y freno, así como un sistema de control de temperatura humedad y presión.

Tipo de freno: No especifica

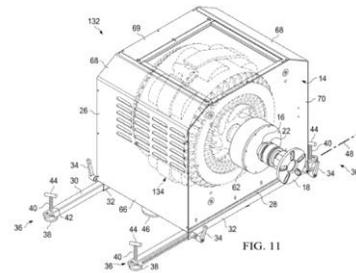


Fuente: [39]

PATENT US8505374 - PORTABLE ON VEHICLE DYNAMOMETER

En esta patente de la compañía Dynocom Industries Inc., se muestra un dinamómetro de cubos que cuenta con unas patas que se extraen a los lados y se ajustan por medio de tornillos al suelo, asimismo posee ruedas para moverse, la configuración para medición en vehículos es por medio de un cuerpo por cada eje de tracción.

Tipo de freno: Corriente Eddy.



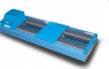
Fuente: [40]

Benchmarking – Dinamómetros presentes en el mercado

A diferencia de las patentes, en las fichas técnicas de dinamómetros presentes en el mercado hay información técnica que permite establecer valores típicos de métricas en estos dispositivos. A continuación, en la Tabla 19 se presentan algunos de ellos para aplicaciones generales vehiculares o de motores, donde se especifican los parámetros identificados.

Se identificó que para dinamómetros de tipo rodillos principalmente se encuentran con frenos de corriente Eddy refrigerados por aire, y para aplicaciones de banco, son principalmente de tipo hidráulicos o de corriente Eddy refrigerados por agua. Con respecto a los precios del mercado, los de menor costo son los de rodillos, aunque en ningún caso se consideran precios de instalación, por otro lado, los de mayor costo son los dinamómetros de cubos, porque se requiere un par de ellos para mediciones en vehículos de dos ruedas motrices y se requieren cuatro cubos para aplicaciones en vehículos de doble transmisión, con ventajas en el bajo nivel de modificaciones para su adecuación en laboratorios. Los precios en general oscilan entre 15.000 USD y 200.000 USD según la instrumentación requerida y el tamaño.

Tabla 19. Ejemplos de dinamómetros ofertados en el mercado.

Unidad	Dynocom ¹	Dynocom ¹	Dynocom ¹	Mustang Dynamometer ²	Mustang dynamometer ²	Dynomite ³	Dynomite ³	
								
Referencia	-	2WD 5000 series	3500 series DC POD	Dyno X DC POD	MD-150	EC997-MC/QUAD	850lite 2WD EC	800 engine dyno Kit
Aplicación	-	Vehículos 2WD	Vehículos 2WD-4WD	Vehículos 2WD-4WD	Vehículos 2WD	Motocicletas-ATV's	Vehículos	Motores
Tipo		Rodillos	Axle Hub	Axle Hub	Rodillos	Rodillos	Rodillos	Banco
Precio	USD	26995	49995	34995	-	-	13950	30450
Rodillos	No.	2	1 pod	1 pod	2	1 o 2	2	0
Torque máximo	Lb ft	5000	1700	1368	-	-	-	920
Potencia máxima	hp	-	900	1800	625	450	850	800
Tipo de freno		Corriente eddy	Corriente eddy	Corriente eddy	Corriente eddy	Corriente eddy MDK 70	Corriente Eddy	Hidráulico toroidal
Alimentación eléctrica	A - V	20 - 220 Vac	25A - 240 Vac	19 A - 192 Vdc - 240 Vac	40 A - 230 Vac	40 A - 230 Vac	20 A - 240 Vac	N/A
Máxima velocidad	mph / rpm	175 mph	3000 rpm	200 mph	165 mph	200 mph MC / 150 mph ATV	5 - 95 mph	10000 rpm
Peso máximo en el eje	lb	6500	1800	1300	6000	-	8000	2000
Diámetro rodillos	in	8.5	-	-	8.575	12.625	8.5	N/A
longitud rodillos	in	35	-	-	35	12	-	N/A
Rango distancia ancho entre ruedas	in	36 - 86	-	-	18 - 88	15.63 - 66	28 - 87	N/A
Dimensiones Largo-Ancho-Alto	in	116 - 35.5 - 12	-	-		19.8	120 - 35 - 20	32 - 22 - 44.5
Peso	lb	2200	950	-	3000	1000	1900	800
Requerimientos aire	psi	90	-	-	100	100	90	-
Inercia	kg m ²	-	8	4.9	-	204 lb	-	-
Frecuencia de muestreo	datos/s	-	-	-	-	-	200 - 1000	200 - 1000

¹ Imágenes tomadas de: <http://www.dynocom.net/catalog/type.asp?iType=29>

² Imágenes tomadas de <https://mustangdyne.com/products-and-services/Chassis-Dynamometers>

³ Imágenes tomadas de: https://www.dynomitedynamometer.com/_selector/dyno-selector.htm

Estándar SAE J1349 de 2004

El estándar SAE J1349 establece la metodología y requerimientos para la obtención de pruebas de desempeño de torque y potencia en motores, enmarcando parámetros como la temperatura, presión atmosférica, calidad del combustible, equipamiento del motor, del laboratorio, y procedimientos de pruebas.

Con respecto a la exactitud de los equipos de medición, se establecen los requerimientos presentes en la Tabla 20, donde se muestra que directamente se tienen tres valores de medición, uno es el torque, la velocidad y el flujo de combustible, la potencia se considera una variable dependiente.

Tabla 20. Exactitud requerida para cumplimiento de estándar SAE J1349 de 2004.

Fuente: [30]

Parámetro	Valor
Torque	± 0.5% del valor medido
Velocidad	± 0.2% del valor medido
Flujo de combustible	± 1% del valor medido
Mediciones generales de temperatura	± 2 °C
Temperatura de aire de admisión	± 0.5 °C
Presiones de aire de admisión y escape	± 0.1 kPa
Presiones de otros gases	± 0.5 kPa

Para el caso de las condiciones ambientales de referencia, se presentan en la Tabla 21, allí se muestra una presión de admisión fija, que para el caso de la ciudad de Querétaro que es donde se encuentra el equipo estaría en el rango. Por otra parte, a excepción de la humedad relativa, no se pueden realizar modificaciones a la composición del aire de admisión, además se llevarán a cabo acciones para minimizar el uso de factores de corrección llevando las condiciones del aire tan cerca como sea posible a las condiciones atmosféricas de referencia.

Tabla 21. Condiciones de referencia ambientales según estándar SAE J1349 de 2004.

Fuente: [30]

Parámetro	Condición estándar	Rango límite de prueba
Presión de admisión (absoluta)	100 kPa	-
Presión de aire seco	99 kPa	90 – 105 kPa
Temperatura de aire de admisión	25 °C	15 – 35 °C

Para el caso del combustible de referencia, se tienen las especificaciones descritas en la Tabla 22 para gasolinas. Si se utilizan combustibles alternativos para pruebas de potencia neta, no se pueden realizar correcciones a condiciones de combustible de referencia, en dado caso se debe especificar el combustible alternativo utilizado.

Tabla 22. Gasolina de referencia según el estándar SAE J1349 de 2004.

Fuente: [30]

Parámetro	Regular	Grado medio	Premium
RON	92 ± 0.5	93 ± 0.5	97 ± 0.5
MON	83 ± 0.5	85 ± 0.5	87 ± 0.5
LHV [MJ/kg]	43.3 ± 0.1	43.3 ± 0.1	43.1 ± 0.1

Existen factores de corrección de la potencia y torque neto en las variables del aire y las características del combustible, para cuando no es posible tener las condiciones estándar como tal, esto no aplica para motores que tienen control sobre la presión absoluta.

Si las condiciones de prueba están fuera de los parámetros, el estándar da unas fórmulas para llevar a cabo la corrección de la potencia, pero no debe exceder en 3% el valor de las variables del aire de entrada o 3% para el combustible.

Los factores de corrección para hallar la potencia y torque neto son solo aplicables para pruebas con el acelerador totalmente abierto (WOT), a continuación, se describen las variables de corrección seguido de las ecuaciones:

C se refiere a datos corregidos a aire y combustibles de referencia.

O se refiere a datos observados en condiciones de prueba reales.

D se refiere a la porción de aire seco del aire de admisión total a la presión de admisión.

R se refiere a las condiciones de prueba de referencia para las condiciones de prueba.

Potencia al freno corregida, P_{bc}

$$P_{bc} = P_{ic} - P_{fo} \quad \text{Ec. (33)}$$

Potencia indicada corregida, P_{ic}

$$P_{ic} = CA * P_{io} = CA * (P_{bo} + P_{fo}) \quad \text{Ec. (34)}$$

Factor de corrección atmosférico, CA

$$CA = \left(\frac{99}{P_{admado}} \right) \left(\frac{t_o + 273}{298} \right)^{0.5} \quad \text{Ec. (35)}$$

Si la fricción es medida, entonces la potencia al freno puede calcularse como

$$P_{bc} = CA \times P_{bo} + (CA - 1) \times P_{fo} \quad \text{Ec. (36)}$$

Si la fricción no es medida y se asume un 85% de eficiencia mecánica, entonces:

$$P_{fo} = \frac{(1 - \eta_m) \times P_{bo}}{\eta_m} = \frac{(1 - 0.85) \times P_{bo}}{0.85} = 0.176 \times P_{bo} \quad \text{Ec. (37)}$$

Por tanto, se podría calcular la potencia al freno considerando una eficiencia de 85% como:

$$P_{bc} = (1.176 \times CA - 0.176) \times P_{bo} \quad \text{Ec. (38)}$$

En el estándar, también se presentan lineamientos en el equipamiento del motor y del laboratorio de pruebas, las características ambientales para los fluidos de trabajo, entre otros.

Asimismo, el estándar muestra requerimientos para la presentación de resultados con cierta información mínima, en el capítulo de documentación se muestra en detalle el formato propuesto para llevar a cabo pruebas según los requerimientos del estándar SAE J1349.

Valores objetivo

A partir de la información recopilada, se obtuvieron valores objetivo para el banco de pruebas, descritos de forma detallada en la Tabla 23.

Tabla 23. Valores objetivo del banco de pruebas.

No	Métricas	Ud	Valores	Observaciones
1	Dimensiones del montaje con motor/vehículo	m ³	2 x 3 x 2	Considerando dimensiones típicas de un motor, un ATV, una motocicleta o un vehículo de F-SAE.
2	Dimensiones del montaje sin motor/vehículo	m ³	2 x 1 x 0.5	Considerando solamente el dinamómetro.
3	Rango de altura de acoplamiento	m	0.3 – 0.8	Considerando el eje de salida de la transmisión de un ATV, una motocicleta, o un vehículo de F-SAE.
4	Rango de aproximación horizontal	m	0.2 – 0.5	Considerando distancia entre chasis y eje de salida de las diferentes clases de vehículos.
5	Peso	kg	200	Como la mitad del peso de un dinamómetro de banco para motores de mayores dimensiones
6	Número de acoples para motores	#	>1	Al menos con acople para el motor de F-SAE seleccionado. (Kawasaki ZX-6R)
7	Rigidez	kN/mm	5	Valor típico en estructuras metálicas para esfuerzos combinados, axial, torsional, flexionante.
8	Frecuencia de vibración admisible	Hz	20	En ralentí, es el valor más crítico para motores.
9	Desalineación entre ejes, axial y angular	mm / °	0.1 / 1	Asociado a los instrumentos de ajuste en el montaje.
10	Rango y error en medición del torque	Nm	0-350 ± 0.5%	Considerando el motor, la celda de carga y el brazo de palanca del dinamómetro presente en el laboratorio. El error es para dar cumplimiento al estándar SAE J1349.
11	Rango y error en medición de la velocidad angular	rpm	0-12.000 ± 0.2%	Para que cubra velocidades típicas de motores súpercuadrados en la salida del cigüeñal. El error es para dar cumplimiento al estándar SAE J1349.
12	Rango y error de medición de potencia	kW	0-150 ± 0.7%	Considerando que el dinamómetro tiene una potencia máxima de frenado de 200 hp y multiplicando los errores del torque y la potencia.
13	Rango y error de medición del flujo de combustible	g/s	0-1 ± 1%	Considerando un motor con un consumo medio de 80 km/gal, una densidad de combustible de 0.68 g/cm ³ y un error según el estándar SAE J1349.
14	Tiempo máximo de operación continua	min	60	Según pruebas en estado transitorio
15	Frecuencia de adquisición de datos	Hz	< 10	Hasta 10 datos por segundo para todos los sensores internos y externos, según los requerimientos del estándar SAE J1349
16	Temperatura del agua del dinamómetro	°C	Entrada < 21 Salida < 54	Según las especificaciones del dinamómetro Stuska XS-19

No	Métricas	Ud	Valores	Observaciones
17	Presión y caudal del agua del dinamómetro	kPa / gpm	>275 / 20	Según el manual del dinamómetro Stuska XS-19, se debe trabajar a presiones mayores a 40 psi y a 10 gpm por cada 100 hp de frenado
18	Capacidad de almacenamiento de datos	Mb	34	Considerando un almacenamiento de 30 variables de 32 bits cada una a 10 Hz y durante una hora
19	Cumplimiento de estándares de calidad y seguridad	Si – No	EN62061 SAE J1349 EC 1999/99	Para seguridad en maquinaria. Para pruebas de desempeño. Para pruebas de potencia en Europa.
20	Voltaje de alimentación eléctrica	V	12 Vdc 120 Vac	Típico de alimentación en motores. Típico en instalaciones de laboratorios.
21	Periodos de mantenimiento	h	500	Valor usual para cambio de aceite en motores estacionarios.
22	Tiempo de alistamiento de motor y equipos	min	30	Considerando encendido, y calentamiento de equipons, montaje de accesorios entre otras actividades
23	Caudal de flujo de extracción de gases	$\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$	0-20	Considerando el flujo máximo de combustible descrito anteriormente
24	Concentración de CO y NO ₂	ppm ppm	< 35 < 5	Según los lineamientos de OSHA (Entidad de salud ocupacional de USA)
25	Temperatura de operación del motor	°C	< 80	Considerando la medición de la temperatura del refrigerante en el bloque.
26	Rango y error de medición de HR y temperatura ambiente	% °C	0-100 0-50 ± 2	No se especifica un error asociado. Según estandar SAE J1349

3.2 DISEÑO CONCEPTUAL

3.2.1 MODELOS DE CAJA NEGRA Y GRIS

Para llevar a cabo el modelo de caja negra se partió de forma general de las señales, materiales y energía disponible o resultante que se desea en el dinamómetro de banco, tal como se presenta en la Figura 26.

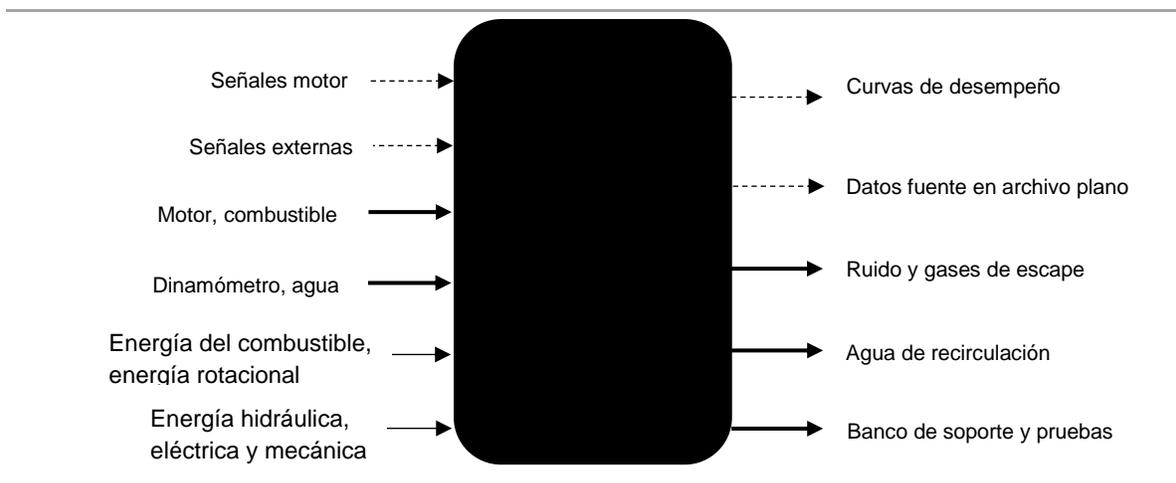


Figura 26. Modelo de caja negra del dinamómetro.

Seguido de este modelo general de entradas y salidas, en el modelo de caja gris, Figura 27, se muestran de forma detallada la interacción entre las entradas identificadas para la obtención de las salidas. El material de entrada es el motor de combustión interna, el dinamómetro hidráulico, el aire, el combustible y el agua de refrigeración, y las energías de entrada son la energía química del combustible antes de ser quemado, la energía eléctrica de la batería o fuente de alimentación del motor, la energía mecánica para el movimiento y variación de parámetros como el cambio de velocidades o el accionamiento del embrague y la energía hidráulica del sistema de disipación de energía del freno.

Las salidas de señales del dinamómetro son las curvas de desempeño del motor, los parámetros de operación del dinamómetro y del motor, así como los factores de emisión, que se enuncian, pero no se trabajan en el presente diseño. Las salidas de material son la estructura de soporte de todos los sistemas, el ruido generado durante la operación, las emisiones de contaminantes generados y el agua de salida del freno.

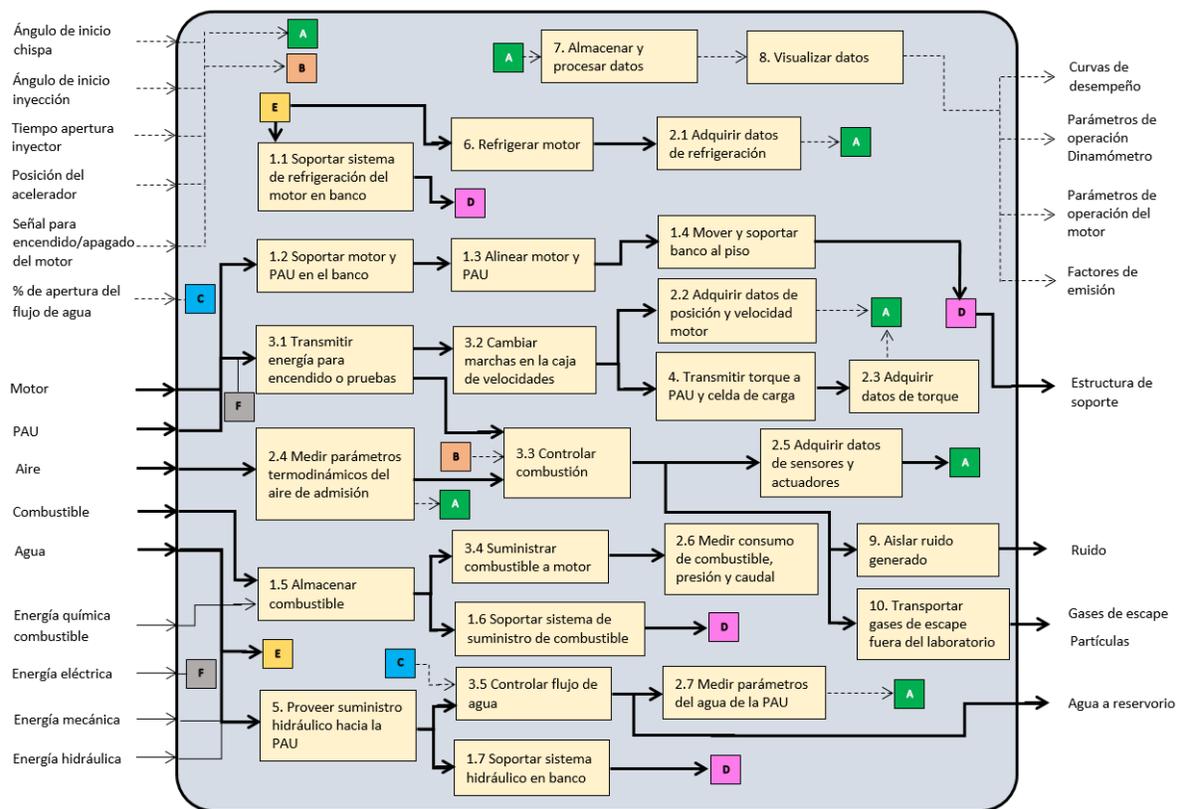


Figura 27. Modelo de caja gris del dinamómetro.

En el interior de la caja se encuentran las acciones e interacciones para la obtención de cada una de las salidas. Se identificaron 26 funciones necesarias, para tener las variables de salida, las cuales se agruparon y se obtuvo un total de diez sistemas del banco de pruebas. Por ejemplo, los numerales 1.1, 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 y 1.6 son funciones contenidos en el sistema 1, denominado sistema multifuncional, correspondiente al sistema de la estructura de soporte. En un segundo ejemplo, la función # 4 del modelo, equivale a transmitir el torque a la PAU y celda de carga, es un sistema monofuncional,

correspondiente al sistema de transmisión de potencia. Por lo anterior, en el siguiente capítulo se generan los conceptos para cada uno de los sistemas identificados.

Los diez sistemas generados a partir del modelo de caja gris son:

1. Estructura de soporte. (Multifuncional)
2. Sistema de adquisición de datos. (Multifuncional)
3. Sistema de control de parámetros. (Multifuncional)
4. Transmisión de potencia. (Monofuncional)
5. Sistema hidráulico del dinamómetro. (Monofuncional)
6. Sistema de refrigeración del motor. (Monofuncional)
7. Sistema de almacenamiento y procesamiento de datos. (Multifuncional)
8. Plataforma de visualización de datos. (Monofuncional)
9. Sistema de aislamiento de ruido. (Monofuncional)
10. Sistema de transporte de gases de escape (Monofuncional)

3.2.2 CONCEPTOS GENERADOS POR SISTEMAS Y EVALUACIÓN

Por cada uno de los sistemas generados en el modelo de caja gris, se proponen conceptos creativos de solución a la función, para ello se realizan tablas donde se encuentran bocetos hechos a mano, descritos de una forma breve y con una lista de componentes simplificada; posteriormente se selecciona un concepto dominante a partir de la calificación y evaluación de cada uno, considerando parámetros importantes. Esta selección es realizada a partir de la creatividad, el criterio y la experiencia del diseñador y de información adicional como la recabada en el estudio de mercado.

El número total de grupos conceptuales es de 27, con un total de 80 conceptos generados, la combinatoria de dichos conceptos solución da como resultado un conjunto de soluciones posibles de $1.96E+12$, para lo cual con la evaluación se simplifica el número de soluciones y se define así un concepto final. Se especifica que el proceso es iterativo, por tanto, si en las fases de diseño posteriores se contemplan cambios por algún criterio no considerado en la parte conceptual, se puede probar con otros conceptos hasta llegar a aquel que cubra a cabalidad la función deseada.

i. ESTRUCTURA DE SOPORTE:

La estructura de soporte se divide en 7 subsistemas que soportan algo específico, tales como:

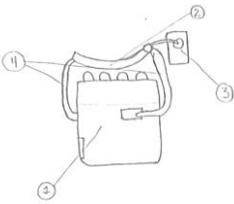
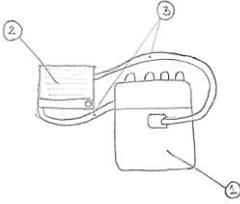
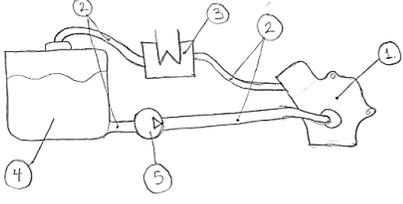
- Soporte del sistema de refrigeración.
- Soporte del motor.
- Soporte del freno.
- Alineación entre freno y PAU.
- Soporte de componentes eléctricos.
- Soporte para accesorios hidráulicos del freno.
- Soporte de los componentes de la alimentación de combustible,

A continuación, se presentan los conceptos generados para cada uno de los subsistemas.

Subsistema 1.1 – Soporte del sistema de refrigeración del motor

El primer subsistema corresponde a la estructura de soporte del sistema de refrigeración del motor, descrito en la Tabla 24, donde se generaron 3 conceptos.

Tabla 24. Conceptos del subsistema 1.1 - Soporte del sistema de refrigeración del motor

1.1.1 Frente al motor OEM	1.1.2 Al lado del motor, F-SAE	1.1.3 Fuera del banco de soporte del motor
		
Componentes		
1. Motor 2. Radiador 3. Tanque auxiliar refrigerante 4. Mangueras entrada y salida	1. Motor 2. Radiador 3. Mangueras entrada y salida	1. Motor 2. Mangueras y uniones hidráulicas 3. Intercambiador de calor 4. Tanque de agua 5. Bomba de alimentación
Descripción		
El soporte de este tipo de sistemas está restringido por las dimensiones de fábrica de las mangueras, del radiador y el tanque auxiliar.	El soporte únicamente considera el radiador, las mangueras deben tener la flexibilidad para unir los dos puntos.	Es un sistema de refrigeración externo que va acoplado a las entradas y salidas del motor, los costos son más elevados pero permiten modularidad al poderse instalar en diferentes motores.

Se realizó una evaluación de los tres conceptos según los parámetros presentes en la Tabla 25 descritos a continuación: el costo de implementación: con menores costos en el sistema de fábrica porque solo requiere cambios en la estructura de soporte, mientras que en los otros casos se requiere la compra de dispositivos adicionales; la facilidad del montaje en la estructura; el peso y el tiempo de montaje, que es similar en los dos primeros conceptos, mientras que en el concepto 1.1.3 tiene mayor dificultad porque incluye un sistema hidráulico completo; y la cantidad de componentes, siendo menor para el concepto 1.1.2, seguido del concepto 1.1.1.

El concepto seleccionado fue el 1.1.1, correspondiente a llevar a cabo un montaje del sistema de refrigeración del motor conservando los componentes de fábrica y solamente adecuando la estructura a los puntos de apoyo del radiador, y del tanque auxiliar.

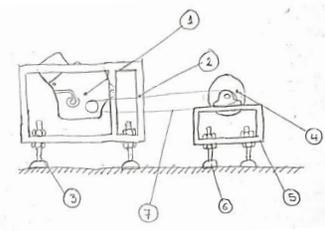
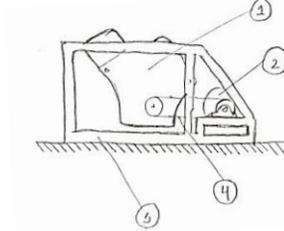
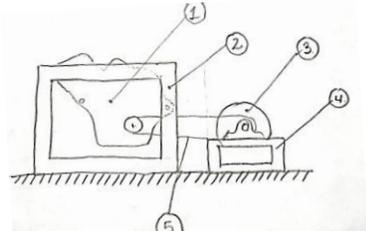
Tabla 25. Ponderación de conceptos del subsistema 1.1

Subsistema 1.1 Soporte del sistema de refrigeración del motor	Ponderación	Conceptos		
		1.1.1	1.1.2	1.1.3
Costo de implementación	20%	5	4	3
Facilidad de montaje en el banco	20%	4	4	2
Cantidad de componentes	20%	4	5	3
Peso	10%	5	5	4
Tiempo de montaje	10%	4	4	3
Modificaciones al motor	20%	5	4	4
Promedio		4.5	4.3	3.1
Total	100%			

Subsistemas 1.2 y 1.5 – Soporte del freno y del motor

El subsistema 1.2, comparte las soluciones con el subsistema 1.5, por tanto, los conceptos solución se presentan en conjunto en la Tabla 26.

Tabla 26. Conceptos de los subsistemas 1.2 y 1.5 - Soporte del freno y del motor

1.2.1 Estructuras independientes ajustables en altura	1.2.2 Una sola estructura de soporte	1.2.3 Estructuras independientes fijas
		
<i>Componentes:</i>		
1. Motor 2. Estructura motor 3. Elevadores motor 4. Freno 5. Estructura freno 6. Elevadores freno 7. Transmisión	1. Motor 2. Freno 3. Estructura 4. Transmisión	1. Motor 2. Estructura motor 3. Freno 4. Estructura freno 5. Transmisión
<i>Descripción</i>		
Consta de dos estructuras, por ejemplo puede considerarse la estructura del vehículo de pruebas, y la otra, la del freno que se ajusta en altura para ser alineado	Consta de una sola estructura metálica para el motor y el freno.	Consta de dos estructuras fijas que no se ajustan, con limitantes en la alineación directa.

Para la selección de los tres conceptos propuestos, se realizó una ponderación y una calificación según los parámetros descritos en la Tabla 27. El concepto con una mayor puntuación y por ende el seleccionado es el 1.2.1 con ventajas en la facilidad de montaje, de movimiento y alineación entre ejes y desventajas en el costo de implementación en comparación a los otros dos conceptos propuestos.

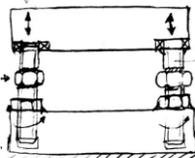
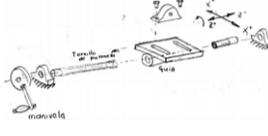
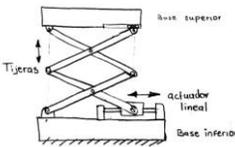
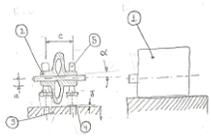
Tabla 27. Ponderación de conceptos de los subsistemas 1.2 y 1.5

Subsistemas 1.2 y 1.5	Conceptos			
	Ponderación	1.2.1	1.2.2	1.2.3
Costo de implementación	15%	3	4	4
Facilidad de montaje	20%	4	3	3
Facilidad para moverla	10%	5	4	5
Peso	15%	4	4	4
Rigidez	20%	4	5	4
Alineación entre ejes	20%	4	3	2
Promedio		4.0	3.8	3.5
Total	100%			

Subsistema 1.3 – Sistema de alineación entre el freno y el motor.

Para la alineación entre los dos ejes, se consideran desalineaciones axiales, es decir entre ejes paralelos y desalineaciones angulares, considerando ideal un ángulo de 90° entre el plano que corta el eje transversalmente y el eje de simetría de este. Se llevaron a cabo cuatro conceptos presentes en la Tabla 28, se debe tener en cuenta que el plano X-Y es el plano horizontal, y el eje Z es perpendicular a ese plano y da la cota de ajuste en altura, en el caso de los ángulos, se relacionan con los ejes, y con el giro del eje X con respecto a Y, β con el giro del eje Y con respecto a Z y α con el giro del eje X con respecto a Z.

Tabla 28. Conceptos del subsistema 1.3 – Sistema de alineación entre el freno y el motor

1.3.1 Con tornillos para variación de altura en la PAU	1.3.2 Soportes móviles con traslación en el plano horizontal	1.3.3 Ajuste por medio de tijeras	1.3.4 Alineación a partir de láminas de ajuste y holguras en agujeros
			
Componentes			
1. Estructura inferior 2. Estructura superior 3. Espárragos 4. Accionador llave fija 5. Contratuercas	1. Manivela 2. Rodamientos o bujes 3. Base de soporte 4. Tornillo de potencia	1. Estructura inferior 2. Estructura superior 3. Tijeras 4. Bujes de tijeras 5. actuador lineal	1. Motor 2. Freno 3. Estructura con pasadores de diámetro mayor 4. Galgas de espesor δ 5. Chumaceras
Descripción			
Permite la elevación de la estructura superior Traslación: Eje Z Angular: en α y β	Solución en estructuras fijas, Traslación: Plano X-Y Angular: en β	Permite exclusivamente traslación en un eje Traslación: Eje Z Angular: N/A	Para ajuste fino en la alineación. Traslación: Ejes X-Y-Z Angular: en α y γ

El concepto con mayor puntuación y seleccionado fue el 1.3.4, Permitiendo un alto grado de ajuste en 5 grados de libertad, con la limitante de que el ajuste es fino únicamente, el segundo concepto de mayor puntaje es el 1.3.1, para efectos del diseño conceptual se pueden considerar las dos soluciones, los resultados se detallan en la Tabla 29.

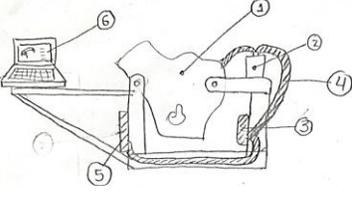
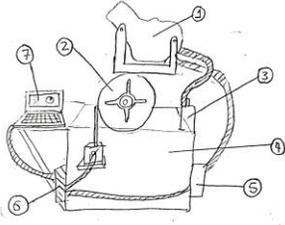
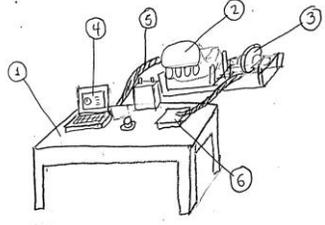
Tabla 29. Ponderación de los conceptos del subsistema 1.3

Subsistema 1.3	Conceptos				
	Ponderación	1.3.1	1.3.2	1.3.3	1.3.4
Costo de implementación	20%	4	3	2	4
Facilidad de ajuste entre ejes	15%	4	3	2	4
Grados de libertad	30%	4	4	2	5
Rigidez	20%	5	4	3	5
Tiempo de montaje	15%	4	3	4	3
Promedio		4.2	3.5	2.5	4.4
Total	100%				

Subsistema 1.4 y 1.6 – Soporte de componentes eléctricos e hidráulicos

Los componentes eléctricos que debe soportar el banco consta de los sensores, actuadores, arnés eléctrico, batería, tarjetas de adquisición de datos, computadores, entre otros, y los hidráulicos, de mangueras, válvulas, reguladores de presión, etc. En la Tabla 30, se muestran de forma general configuraciones del montaje eléctrico e hidráulico.

Tabla 30. Conceptos subsistemas 1.4 y 1.6 Soporte componentes eléctricos e hidráulicos

1.4.1 En la estructura del motor	1.4.2 En la estructura de la PAU	1.4.3 Panel de instrumentos independiente
		
Componentes:		
1. Motor 2. Batería 3. ECU 4. Conexiones eléctricas 5. Datalogger 6. Computador	1. Motor 2. Freno 3. Batería - cableado 4. Estructura freno 5. ECU 6. Datalogger 7. Computador	1. Mesa de control 2. Motor 3. Freno 4. Computador 5. ECU y batería 6. Control hidráulico
Descripción		
Extensión en la estructura para el soporte de los dispositivos eléctricos. El cableado está dentro de la estructura. Los accesorios hidráulicos van en la parte del freno.	Extensión de la estructura del freno hidráulico para el soporte de los dispositivos eléctricos. Los accesorios del sistema hidráulico van en la misma estructura	Es una estructura independiente con todos los componentes eléctricos aislados del motor y del freno, a excepción de los cables que van hacia sensores y actuadores. Los componentes de control hidráulico van sobre la misma estructura.

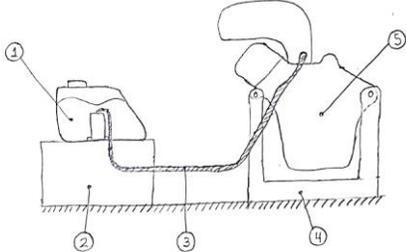
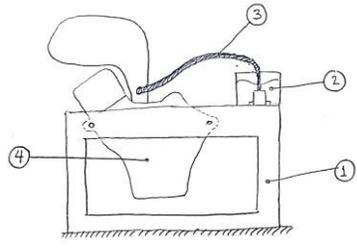
El concepto con mayor puntuación es el 1.4.3 que muestra una mesa independiente a la estructura del motor y del freno hidráulico, con ventajas en la seguridad sobre el operario, aunque el costo puede ser significativamente mayor, otra desventaja es el tiempo de implementación, porque acarrea la fabricación y el cableado adicional para la operación. En la Tabla 31 se muestran los resultados de la calificación de los conceptos planteados.

Tabla 31. Ponderación de los conceptos de los subsistemas 1.4 y 1.6

Subsistemas 1.4 y 1.6	Conceptos			
	Ponderación	1.4.1	1.4.2	1.4.3
Seguridad de operación	25%	3	3	5
Costo	20%	5	5	4
Modificaciones eléctricas	15%	4	3	4
Control y operación	25%	4	4	5
Tiempo de implementación	15%	4	4	3
Promedio		4.0	3.8	4.4
Total	100%			

Subsistema 1.7 – Soporte para el tanque de combustible

En el motor seleccionado, el tanque de combustible está ubicado encima del múltiple de admisión, con una conexión de la línea de combustible corta, cercana a 20 cm, que limita la manipulación para el caso de incluir medidores de flujo y otro tipo de instrumentación, por tanto, se realizan dos conceptos diferentes al que viene de fábrica, tal como se muestra en la *Tabla 32*.

Tabla 32. Conceptos del subsistema 1.7 – Soporte para el tanque de combustible	
1.7.1 Estructuras independientes	1.7.2 Una sola estructura para soportar los dos sistemas
	
Componentes	
<ul style="list-style-type: none"> 1. Tanque de combustible 2. Estructura tanque 3. Línea de combustible 4. Estructura motor 5. Motor 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Estructura motor 2. Tanque de combustible 3. Línea de combustible 4. Motor
Descripción	
Este concepto consta de dos estructuras, con la línea de suministro de combustible conectada entre los dos puntos. En el caso de requerir instalación de sensores externos se pondrían sobre la estructura del tanque.	En este caso el tanque está montado sobre la misma estructura metálica, la línea de combustible es más corta y es menos susceptible a desconexión por accidentes, las vibraciones generadas por el motor se transmitirían al tanque y puede reducir

Los dos conceptos obtuvieron una calificación final similar, ganando por una décima el concepto 1.7.1, con ventajas en el aislamiento de vibraciones y por ende una mayor confiabilidad en los datos de consumo adquiridos porque se evita evaporación del combustible, la desventaja radica en que el tanque al tener una estructura independiente, la manguera que conecta entre las dos estructuras puede ser más susceptible a imprevistos y accidentes.

Tabla 33. Ponderación de los conceptos del subsistema 1.3

Subsistema 1.7	Ponderación	Conceptos	
		1.7.1	1.7.2
Seguridad de operación	25%	3	5
Aislamiento de vibraciones	15%	5	3
Costos de implementación	10%	3	4
Facilidad de instalación	10%	4	4
Ubicación de sensores externos	20%	5	4
Confiabilidad de datos de consumo	20%	4	3
Promedio		4.0	3.9
Total	100%		

ii. ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el caso del presente trabajo se adquirirán los datos únicamente de los sensores relacionados a la obtención de las curvas características de potencia específica, consumo específico de combustible, presión media efectiva al freno y velocidad de giro del motor, por lo que se dejan señales para adquirir en futuros proyectos académicos, tales como la obtención de la presión en la cámara de combustión, las concentraciones de contaminantes atmosféricos y los flujos de aire de admisión y escape.

En la Figura 28 se presentan las variables de forma gráfica, las variables resaltadas en rojo son las que no se tendrán en cuenta para el presente proyecto.

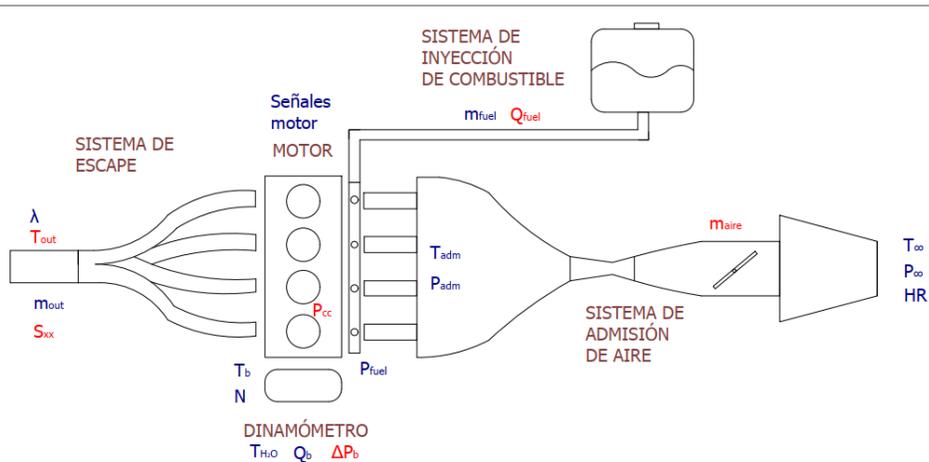


Figura 28. Variables a medir en el dinamómetro.

Conceptos

Las variables identificadas para adquirir datos y por ende para generación de conceptos se dividen en 9 subsistemas, presentes en la Tabla 34, donde en la primera columna se define cada subsistema de adquisición de datos según área específica del banco de pruebas, en la segunda columna se detallan los parámetros a medir de cada subsistema y por último, en la tercera, se presentan los conceptos para dar solución a la adquisición.

A diferencia del sistema 1, en este caso no se desarrollaron bocetos a mano alzada teniendo en cuenta que no se evalúan mecanismos de solución físicos, sino se centra solamente en la adquisición en sí, sin embargo, en algunos de los casos se detallan técnicamente los conceptos para dar mayor claridad al lector y que así no deba recurrir a fuentes externas adicionales para conocer sobre los dispositivos mencionados.

Son un total de 45 variables a adquirir, de las cuales 2 son dependientes, tales como la velocidad de giro del cigüeñal, que es la derivada del ángulo de giro del cigüeñal y la segunda es la potencia al freno, que depende del torque medido y de la velocidad de giro, por tanto, hay dos variables que se repiten en subsistemas diferentes, como son el caso del ángulo de giro del cigüeñal (parámetros 4 y 14) y la presión atmosférica (parámetro 21 y 43), por tanto, el número total de variables a sensor en el banco de pruebas es de 43.

Tabla 34. Variables para adquisición de datos en el dinamómetro.

Subsistema	Parámetros para medir	Conceptos
2.1 Refrigeración del motor	1. Temperatura de agua de entrada al motor 2. Temperatura del agua de salida del motor 3. Caudal de agua de refrigeración	1. OEM - A partir de los sensores de temperatura de agua en el bloque y del aceite en el carter. 2. Termopares y caudalímetro externos con acoples hidráulicos adicionales.
2.2 Posición y velocidad del motor.	4. Ángulo de giro del cigüeñal. 5. Velocidad de giro del cigüeñal (Variable dependiente)	1. Encoder externo 2. Señal del cigüeñal y señal de posición del punto muerto superior
2.3 Torque del motor	6. Torque al freno 7. Potencia al freno	1. Con celda de carga triaxial Futek MTA400 Fz=500 lb, Fy, Fx=250 lb 2. Con torquímetro Kistler 4520A T=1.000 Nm, N hasta 10.000 rpm 3. Con celda de carga en S Honeywell 151 MQ para 5.000 N
2.4 Consumo de combustible	8. Presión de la línea de combustible 9. Caudal del combustible 10. Flujo másico de combustible	1. Medición másica a partir de una balanza digital de presión 2. Medidor de flujo DFM 100C Q (2-100 L/h) 3. Futurlec FLOWFUEL30L0 3/8" Precio (32.9 USD), Q (2-30 L/h), P (up to 85 psi) 4. ONO-SOKKI FP-213S Q (0.06-60 L/h), Precisión (0.1%), Precio (16000 USD) 5. Medidor de flujo AVL Q (0-165 L/h), Precisión (0.12%)
2.5 Agua de la PAU	11. Temperatura de salida de agua del freno hidráulico hacia el reservorio. 12. Temperatura de entrada del agua hacia el freno hidráulico. Caudal del freno. 13. Diferencial de presión entre la entrada y la salida de agua del freno.	1. Termopar NPT para Tin y Tout Caudal estimada de diferencial de presión Medición de presión diferencial 2. Diferencial de presión medido desde equipo Frigel Temperaturas medidas desde Frigel Caudal estimado por Frigel
2.6 Motor – Señal Sensores	14. Posición del cigüeñal. 15. Posición del eje de levas. 16 Presión de aceite lubricante. 17. Posición de la marcha de la caja de velocidades. 18. Posición de aceleración principal. 19. Posición de aceleración secundario. 20. Presión del aire de admisión. 21. Presión atmosférica. 22. Temperatura de aire de admisión. 23. Temperatura de agua de refrigeración en el bloque.	1. Equipo de diagnóstico no OEM Healtech OBD tool kawasaki Comunicación directa con puerto de diagnóstico de Kawasaki, Salida USB hacia PC (Precio: 229 USD) 2. Adquisición de datos con tarjetas de código abierto (Precio: 2.000 USD) 3. Uso de tarjeta de adquisición de datos de National Instruments con módulo para protocolo KWP 2000. (Precio: 15.000 USD)
2.7 Motor – Señal Actuadores	24. Alimentación de energía bomba de combustible. 25. Alimentación de energía motor de ventilador del radiador.	1. Con ECU OEM

Subsistema	Parámetros para medir	Conceptos
	26. Temperatura de accionamiento del motor del ventilador del radiador. 27. Alimentación de energía bobinas. 28. Tiempo y ángulo de inicio de chispa 29. Alimentación de energía inyectores primarios. 30. Tiempo y ángulo de apertura de inyectores primarios. 31. Alimentación de energía de inyectores secundarios. 32. Tiempo, ángulo de apertura de inyectores secundarios. 33. Régimen de operación de carga - velocidad de inyectores secundarios. 34. Porcentaje de apertura de la válvula actuadora de mariposa secundaria de aire. 35. Régimen de operación de carga - velocidad de la mariposa secundaria de aire. 36. Alimentación de los interruptores de encendido. 37. Alimentación del botón de encendido.	2. Con ECU PE3 programable. 3. Con tarjeta de adquisición de datos externa.
2.8 Estado de la combustión	38. Sensor Lambda 39. Presión en las cámaras de combustión 40. Flujo másico de aire de admisión 41. Flujo másico de gases de escape 42. Concentraciones de CO, NOx y PM	1. Lazo abierto sin sensor de oxígeno 2. Sensor de oxígeno o lambda
2.9 Condiciones atmosféricas	43. Presión atmosférica 44. Temperatura atmosférica 45. Humedad relativa	1. Termohigrómetro digital y presión atmosférica con sensor OEM ECU 2. Sensor de humedad y temperatura de bajo costo, presión atmosférica medida con el sensor OEM de la ECU

Selección de conceptos

Para la selección de conceptos, se realiza la misma ponderación que en el caso anterior, a diferencia que los parámetros a evaluar son los mismos para los 9 subsistemas, simplificados en:

1. La facilidad de instalación del dispositivo para sensar junto a todo lo electrónico que lleva consigo,
2. El costo de implementación, donde en algunas casillas de la tabla anterior muestra los valores actuales en el mercado de instrumentación,
3. La confiabilidad de los datos, relacionado a la robustez ante alteraciones intrínsecas del proceso y ambiente de medición, tales como ambientes de vibraciones, condiciones ambientales de operación, entre otras según sea el caso,
4. Precisión – Resolución, según las fichas técnicas, donde aquellos con mayor resolución, tienen una mayor puntuación.
5. Rango de medición, asociado a la aplicación específica del banco de pruebas para medir motores de características similares a las del motor Kawasaki ZX-6r.

La Tabla 35 presenta la evaluación y selección de conceptos:

Tabla 35. Selección de conceptos para el sistema de adquisición de datos

	Facilidad de instalación	Costo de implementación	Confiabilidad datos	Precisión - Resolución	Rango de medición	Promedio
Ponderación	15%	20%	20%	25%	20%	
<i>Refrigeración del motor</i>						
2.1.1	5	5	4	4	4	4.4
2.1.2	4	3	4	5	4	4.1
<i>Posición y velocidad del motor.</i>						
2.2.1	3	3	5	5	5	4.3
2.2.2	5	5	3	3	4	3.9
<i>Torque del motor</i>						
2.3.1	4	4	5	5	5	4.7
2.3.2	3	3	5	5	4	4.1
2.3.3	4	3	5	5	5	4.5
<i>Consumo de combustible</i>						
2.4.1	3	4	2	4	4	3.5
2.4.2	5	3	4	3	4	3.7
2.4.3	5	5	3	4	3	4.0
2.4.4	3	1	5	5	5	3.9
2.4.5	3	1	5	5	5	3.9
<i>Agua de la PAU</i>						
2.5.1	4	3	4	4	4	3.8
2.5.2	5	5	4	4	4	4.4
<i>Motor – Señal Sensores</i>						
2.6.1	5	4	4	4	3	4.0
2.6.2	4	3	5	4	5	4.2
2.6.3	4	1	5	5	5	4.1
<i>Motor – Señal Actuadores</i>						
2.7.1	3	3	4	5	5	4.1
2.7.2	3	4	5	5	5	4.5
2.7.3	4	3	5	5	5	4.5
<i>Estado de la combustión</i>						
2.8.1	5	5	3	3	3	3.7
2.8.2	4	3	5	4	4	4.0
<i>Condiciones atmosféricas</i>						
2.9.1	5	4	4	4	5	4.4
2.9.2	4	4	5	5	5	4.7

Los resultados dieron la selección de los siguientes conceptos:

- Refrigeración del motor, a partir del sensor de temperatura del agua disponible en el bloque del motor, ganando sobre la otra opción porque básicamente ya se tiene el montaje realizado y no se debe modificar el motor para incluir sensores adicionales, y por tanto el costo de implementación en hardware es nulo.
- Posición y velocidad del motor a partir de un encoder externo, debido a que se evidenció que cuentan con una mayor resolución y también la precisión es explícita en los manuales a diferencia de los sensores que ya trae el motor de fábrica.
- Torque del motor, A partir de la celda de carga triaxial, los puntajes fueron similares entre este tipo de celda y la de tipo S, y levemente mayores a los del torquímetro axial,

debido principalmente a ventajas en el montaje, porque en el caso del axial, el montaje debe ser minucioso para evitar desalineaciones entre los acoples.

- Consumo de combustible, en este caso, la solución que tuvo mayor puntuación fue aquella que considera un medidor de flujo de bajo costo, porque en comparación a los costos de las otras soluciones está 1000 veces por debajo, además para efectos de la precisión requerida por el estándar SAE J1349 estaría dentro de los límites admisibles.
- Agua del freno, con mayor puntuación por parte de la adquisición de los datos arrojados por el Chiller Frigel principalmente porque los costos de implementación son nulos y no se requiere ningún tipo de instalación adicional.
- Señales de sensores y actuadores, A pesar de haber sido una calificación independiente, el mayor puntaje fue solidario y el concepto solución es utilizar tarjetas de adquisición de datos externas de código abierto, principalmente porque la confiabilidad de los datos es mayor, porque se tiene pleno conocimiento del algoritmo que toma las señales y las modifica para entregárselas al usuario, en los otros casos se considera como una caja negra.
- Estado de la combustión, el concepto con mayor puntuación es el que considera un sensor de oxígeno o uno Lambda para la medición post combustión, su implementación queda para futuros trabajos y actualmente se contempla el lazo abierto que viene de fábrica en el motor. Cabe resaltar que no se consideraron conceptos para la medición de los parámetros 39 a 42 y también quedan para futuros trabajos de diseño en la unidad.
- Condiciones atmosféricas, a partir de sensores de bajo costo de temperatura y humedad relativa y la presión atmosférica tomada de uno de los sensores existentes en el arnés del motor., las puntuaciones fueron similares siendo el factor diferenciador la confiabilidad de los datos, relacionado al almacenamiento en tiempo real durante las pruebas.

iii. CONTROL DE PARÁMETROS

Conceptos

El sistema de control de parámetros está dividido en cinco subsistemas correspondiente a todo tipo de control que tiene el banco de pruebas, tanto control electrónico sobre el encendido, como control hidráulico sobre el freno y control mecánico sobre las palancas de cambios, de accionamiento del embrague y del acelerador. Los conceptos se desarrollan detalladamente en la *Tabla 36*.

Al igual que en el caso anterior, no se realizan bocetos a mano alzada para el detalle de cada concepto, sino solamente se describe de forma general cada concepto solución.

Tabla 36. Conceptos para el sistema de control de parámetros en el dinamómetro.

Sistema	Parámetros para controlar	Conceptos
3.1 Control del encendido	Contempla variables como la apertura del interruptor para iniciar el motor de arranque, el botón de starter, el interruptor de apertura del flujo de corriente desde la batería hacia los sistemas.	1. Control manual a partir de botones e interruptores físicos 2. Control electrónico a partir del uso de software.
3.2 Control del embrague	En el motor, se encuentra un mecanismo de giro que sirve para accionar el embrague, el cual de forma original se acciona a partir de una palanca con la mano izquierda en los mandos de las motocicletas, actualmente ese mecanismo completo no se encuentra disponible por tanto hace parte de la fase de diseño conceptual.	1. Accionamiento manual con cable y mecanismo de palanca 2. Accionamiento OEM con cable y manija 3. Accionamiento automático con servomotor.
3.3 Control del cambio de velocidades	El motor lleva consigo la caja de velocidades, y se acciona a partir de un elemento giratorio que va unido a una palanca que convencionalmente se mueve con el pie, el motor actualmente no cuenta con ese accionador por tanto se considera en la fase conceptual.	1. Accionamiento manual con pinzas de presión. 2. Accionamiento con brazo de palanca conectado al eje estriado 3. Accionamiento con servomotor colineal al eje estriado
3.4 Suministro combustible al motor	El control del suministro de combustible se realiza a través de varias acciones como el encendido de la bomba de combustible, ángulo de inicio de la inyección, ángulo de inicio de la chispa, tiempo de apertura del inyector y la posición de la mariposa.	1. A partir de la Unidad Electrónica de Control (ECU) de fábrica. 2. A partir de una ECU programable. 3. A partir de un circuito y controlador iniciado desde cero.
3.5 Control del flujo de agua	El dinamómetro al ser de tipo llenado variable puede cambiar su carga siendo controlado por válvulas a la entrada y a la salida	1. Control manual con una válvula a la entrada y una válvula a la salida 2. Control manual con una válvula a la entrada y una salida fija 3. A partir de electroválvulas a la entrada y la salida
3.6 Control del acelerador	El motor cuenta con un mecanismo manual y uno automático para la apertura de las mariposas para la admisión del flujo de aire, centrándonos en el control sobre el accionador manual, es de tipo giratorio y de fábrica va acoplado a un cable que a su vez va unido al mando del acelerador en la manija derecha de la motocicleta.	1. Control a partir de una manija OEM 2. Control con un cable instalado y actuado de forma remota en un panel de instrumentos. 3. Control a partir de un servomotor conectado directamente sobre la mariposa del cuerpo de aceleración y manipulado a través de software

Selección de conceptos

La evaluación y selección de los conceptos se presenta en la Tabla 37, donde para cada subsistema se calificaron parámetros particulares, como por ejemplo la facilidad de programación, que es específico para sistemas programables, así como parámetros generales como el costo de implementación en el laboratorio.

Tabla 37. Ponderación de conceptos del sistema de control de parámetros

Subsistema 3.1		Conceptos		
Control del encendido	Ponderación	3.1.1	3.1.2	
Modificaciones eléctricas	15%	3	5	
Costos de implementación	20%	4	4	
Facilidad en el montaje	15%	4	5	
Seguridad	25%	5	2	
Confiabilidad	25%	5	3	
Promedio		4.4	3.6	
Total	100%			
Subsistema 3.2		Conceptos		
Control del embrague	Ponderación	3.2.1	3.2.2	3.2.3
Modificaciones al motor	15%	4	5	4
Costo de fabricación	20%	4	5	3
Confiabilidad	25%	5	5	4
Facilidad de operación	15%	5	2	5
Seguridad	25%	4	3	4
Promedio		4.4	4.1	4.0
Total	100%			
Subsistema 3.3		Conceptos		
Control del cambio de velocidades	Ponderación	3.3.1	3.3.2	3.3.3
Modificaciones al motor	15%	5	4	4
Costo de fabricación	20%	5	4	3
Confiabilidad	25%	4	5	5
Facilidad de operación	15%	4	4	4
Seguridad	25%	1	5	5
Promedio		3.6	4.5	4.3
Total	100%			
Subsistema 3.4		Conceptos		
Suministro combustible	Ponderación	3.4.1	3.4.2	3.4.3
Costo de instalación	15%	5	4	3
Facilidad para programación	25%	2	5	2
Posibilidad de modificar variables	20%	2	5	5
Modificaciones al motor	20%	5	4	4
Tiempo de instalación	20%	5	4	2
Promedio		3.7	4.5	3.2
Total	100%			
Subsistema 3.5		Conceptos		
Control del flujo de agua	Ponderación	3.5.1	3.5.2	3.5.3
Control sobre la carga	35%	5	3	5
Número de componentes	20%	4	5	4
Costo de implementación	20%	3	4	2
Seguridad	25%	4	4	4
Promedio		4.2	3.9	4.0
Total	100%			
Subsistema 3.6		Conceptos		
Control del acelerador	Ponderación	3.6.1	3.6.2	3.6.3
Control sobre la mariposa	35%	2	5	5
Costo de implementación	20%	5	4	3
Confiabilidad	25%	5	5	4
Modificaciones al motor	20%	5	4	3
Promedio		4.0	4.6	4.0
Total	100%			

Los conceptos seleccionados fueron los siguientes:

- Control del encendido del motor de forma manual a partir de interruptores físicos, donde a pesar de tener que realizarse modificaciones eléctricas, el puntaje en confiabilidad y seguridad es mucho mayor, al estar alejado del motor antes y durante la operación.
- Control del accionador del embrague a partir de un mecanismo de palanca manual con cable. Que permite el control de forma remota desde un panel de instrumentos o desde un protector físico ante el motor en operación, la puntuación es cerca de 5 décimas mayor a las otras opciones destacándose por la facilidad de operación y la seguridad con el operador del banco.
- Control del cambio de la caja de velocidades a partir de un accionamiento con un brazo de palanca conectado al eje estriado de salida de la transmisión. Que obtuvo puntuación similar a la del control electrónico a un servomotor, con la ventaja, para el caso manual, que tiene un menor costo de fabricación, desarrollo e implementación
- Suministro de combustible a partir de una ECU programable, para lo cual, se encuentra disponible en el laboratorio una ECU Performance Electronics PE3 con software incluido, y permite un ajuste total de los mapas del motor a partir de la modificación de valores manualmente desde el software [41], a diferencia de la solución de fábrica que directamente no permite modificación alguna.
- Control del flujo de agua a partir de dos válvulas, una a la entrada del freno y una a la salida. Las calificaciones son similares a las otras dos soluciones, dejando como parámetro diferenciador una mayor posibilidad de control sobre la carga.
- Control del acelerador a partir de un cable instalado y actuado de forma remota, el cual tiene un mecanismo de palanca para su accionamiento, las variables con respecto a las otras soluciones son mínimas, con ventajas en el control preciso sobre la mariposa, porque se realiza la solución sobre los recorridos dimensionales del cable para moverla de la posición totalmente cerrada a totalmente abierta.

Para el caso del diseño detallado de las soluciones obtenidas, el presente trabajo se centra solamente en el control del flujo de agua, en el encendido del motor y el accionador del acelerador, las otras tres quedan pendientes para futuros trabajos en el laboratorio.

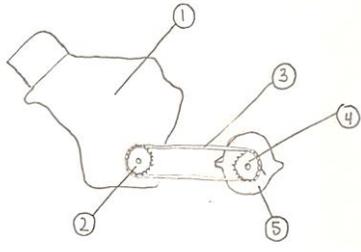
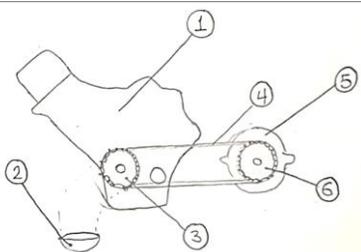
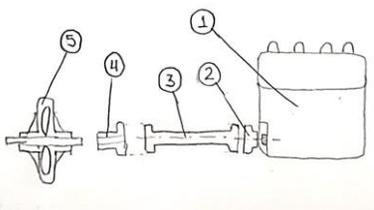
iv. TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Conceptos

Este sistema se encarga de transmitir el torque y la velocidad angular generados por el motor o el generador hacia la PAU, se tiene en cuenta parámetros del sistema como son la alineación angular y axial entre los ejes del freno hidráulico y del motor, así como la capacidad de transmisión de torque por parte del mecanismo y la menor generación de vibraciones posible, además debe soportar altas velocidades de motores súpercuadrados, tener una baja inercia, bajo o nulo deslizamiento entre los elementos de transmisión y que el mantenimiento sea sencillo de realizar.

A continuación, en la Tabla 38, se presentan bocetos de 3 conceptos solución para la transmisión de potencia entre el motor y el freno.

Tabla 38. Conceptos del sistema 4 – Transmisión entre el motor y el freno hidráulico.

4.1 Cadena a la salida del eje de la caja de transmisión.		
Concepto	Componentes	Descripción
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Motor 2. Catarina conductora 3. Cadena o correa 4. Catarina conducida 5. Freno hidráulico 	<p>Consta de tomar la catarina existente de la motocicleta y acoplarla a otra que a su vez va conectada a un eje paralelo al eje de transmisión del motor. El freno quedaría cercano al tubo de escape en tal configuración, sin embargo se puede ubicar al otro lado de la catarina conducida.</p>
4.2 Cadena a la salida del cigüeñal de la caja de transmisión.		
Concepto	Componentes	Descripción
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Motor 2. Tapa cigüeñal 3. Catarina conductora 4. Cadena o correa 5. Freno 6. Catarina conducida 	<p>Es similar a la solución 4.1, a diferencia que el acoplamiento va directamente desde el cigüeñal, la desventaja es que al sacar las tapas que cubren el cigüeñal se derramaría aceite durante las pruebas, por lo que faltaría una tapa nueva donde quepa esa catarina.</p>
4.3 Acople en sentido axial al eje de la caja de transmisión		
Concepto	Componentes	Descripción
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Motor 2. Acople de motor a eje 3. Eje de transmisión 4. Acople de eje a freno 5. Freno 	<p>En este caso, un eje junto a acoples, van unidos de forma colineal con el eje de salida de la caja de velocidades y el freno, existen varios tipos de acoples tales como de tipo araña, flexibles, de cadena, entre otros, variando en la capacidad de transmisión, la velocidad de giro máxima y las desalineaciones máximas que soportan en el montaje.</p>

Selección de conceptos

La selección de conceptos se realizó a partir del análisis de 7 parámetros tales como la facilidad de alineación axial y angular, con ventajas en el caso de acoples de algunos tipos, como de tipo flexible o uniones tipo cardan para el caso del concepto 4.3, la resistencia a vibraciones, con desventajas evidenciadas en transmisiones por cadena, al tener un diámetro relativo por el movimiento de la cadena sobre la Catarina, la operación a altas velocidades e inercia, también con desventajas en transmisiones por cadena y por correa, la capacidad de transmisión del par, que depende de la velocidad que vaya el motor y en el caso de transmisiones axiales de las dimensiones del eje transmisor y en las de ejes paralelos de las dimensiones y tipo de transmisión a utilizar en el eje conductor y el conducido [42], por último la selección según el mantenimiento del tipo de transmisión donde para el caso 4.2 es el que lleva una menor puntuación, porque requerirá una mayor frecuencia de mantenimiento al tener al descubierto el eje del cigüeñal, por tanto un mecanismo o una tapa que permita el sello y el aislamiento del sistema de lubricación del motor.

El concepto con una mayor puntuación fue el 4.3, ya en el diseño detallado se definirá el tipo de acople a utilizar y las características del eje de transmisión. La Tabla 39 presenta los resultados detallados de la evaluación.

Tabla 39. Ponderación de conceptos del sistema de transmisión de potencia.

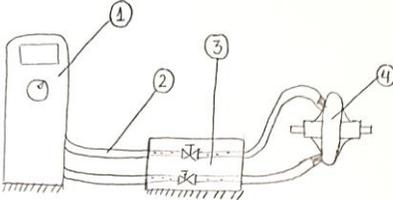
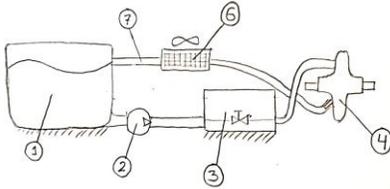
Sistema 4	Ponderación	Conceptos		
		4.1	4.2	4.3
Facilidad de alineación	15%	4	3	4
Resistencia a las vibraciones	20%	3	3	4
Operación a altas velocidades	15%	3	4	4
Capacidad de transmisión de par	15%	4	5	5
Costos de fabricación	10%	5	2	3
Inercia	15%	3	4	4
Mantenimiento	10%	4	2	4
Promedio		3.6	3.4	4.1
Total	100%			

v. SISTEMA HIDRÁULICO

Conceptos

Para el desarrollo conceptual, el sistema hidráulico debe cumplir con requerimientos de presión y flujo de agua, según lo descrito en la sección 3.1.3 – ii. Se proponen tres conceptos, presentes en la Tabla 40.

Tabla 40. Conceptos del sistema 5 – Sistema hidráulico

5.1 Circuito hidráulico utilizando sistema Frigel de la Unidad		
Concepto	Componentes	Descripción
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Frigel Microgel RCD 80 12 SP con torre de enfriamiento 2. Líneas de alimentación y retorno 3. Panel de control hidráulico 4. Freno 	<p>Uso del sistema de refrigeración Frigel Microgel RCD 80 12 SP existente en la UAT, el cual se encuentra en funcionamiento y tiene una línea de refrigeración sin operar y la otra se encuentra conectada a una de las máquinas del laboratorio.</p>
5.2 Circuito hidráulico exclusivo para el dinamómetro		
Concepto	Componentes	Descripción
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Tanque de almacenamiento. 2. Bomba centrífuga 3. Panel de control hidráulico 4. Freno 6. Intercambiador de calor 7. Líneas de alimentación y retorno 	<p>Es un típico sistema hidráulico cerrado para control del caudal, con un tanque mayor a 1 m³ según las recomendaciones del fabricante del freno, además cuenta con un panel de control donde se encuentran las válvulas, reguladores de presión entre otros accesorios hidráulicos para llevar a cabo la correcta operación del freno, y en el retorno un intercambiador de</p>

calor para el enfriamiento del agua de salida del freno.

4.3 Circuito hidráulico con el contenedor de agua de la unidad

Concepto	Componentes	Descripción
	1. Contenedor de agua UAT	La unidad cuenta con un contenedor de agua que por sus dimensiones permite obviar el sistema de refrigeración de agua del freno, el tercer concepto aprovecha este reservorio y transporta el agua hacia el freno, la desventaja principal es la distancia que hay entre el banco de pruebas y el tanque.
	2. Bomba centrífuga	
	3. Panel de control hidráulico	
	4. Freno	
	5. Líneas de alimentación y retorno	

Selección de conceptos

Los parámetros por evaluar en los tres conceptos y los resultados se encuentran descritos en la Tabla 41, donde tiene más peso la seguridad de operación. Las puntuaciones obtenidas para los tres conceptos son similares, y al final el concepto con mayor puntuación fue el 5.1, con desventajas en la facilidad de operación en comparación a los otros dos.

Tabla 41. Ponderación de conceptos del sistema de refrigeración del freno

Sistema 5	Ponderación	Conceptos		
		5.1	5.2	5.3
Facilidad de operación	20%	3	5	5
Costos de implementación	20%	5	3	4
Facilidad en instalación	15%	5	3	3
Seguridad en operación	25%	5	5	4
Capacidad de refrigeración	20%	4	4	4
Promedio		4.6	4.3	4.1
Total	100%			

vi. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DEL MOTOR

Conceptos

Para el sistema de refrigeración, se tienen los siguientes cuatro conceptos:

- 6.1 Radiador más grande y con el mismo ventilador.
- 6.2 Radiador y ventilador OEM.
- 6.3 Radiador y ventilador OEM con ventilador centrífugo externo para incremento de flujo cruzado.
- 6.4 Uso de la línea del sistema de refrigeración Frigel Microgel RCD 80 12 SP.

Selección de conceptos

En la selección de conceptos se evaluaron los parámetros descritos en la primera fila de la Tabla 42, en donde los cuatro conceptos tuvieron calificaciones similares y el de mayor puntuación, por tres décimas, es el uso del radiador y ventilador OEM, que en el caso en que las pruebas aumenten la temperatura del motor más allá de la capacidad de refrigeración del motor, se optaría por la segunda opción que cambia básicamente en la

inclusión de un ventilador centrífugo para disipar el calor del intercambiador de calor de flujo cruzado que lleva de fábrica el motor.

Tabla 42. Ponderación de conceptos del sistema de refrigeración del motor.

Sistema 6	Ponderación	Conceptos			
		6.1	6.2	6.3	6.4
Capacidad de refrigeración	25%	4	4	5	5
Costos de implementación	20%	4	5	3	4
Facilidad en instalación	15%	4	5	4	3
Seguridad en operación	25%	5	5	5	5
Volumen	15%	5	5	5	3
Promedio		4.4	4.8	4.5	4.2
Total	100%				

vii. SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Conceptos

Para el almacenamiento y procesamiento de datos se tiene un motor con un sistema de diagnóstico a bordo KWP 2000; se requiere tener las señales del motor y además las señales de tres sensores externos, tales como la celda de carga, el medidor de velocidad y el medidor de flujo de combustible, para ello se propone un solo sistema de adquisición solidario que reúna todos los datos en un archivo fuente para el procesamiento y obtención de resultados según las necesidades del usuario. En la Figura 29 se presentan los conceptos para la obtención de los datos fuente de los sensores.

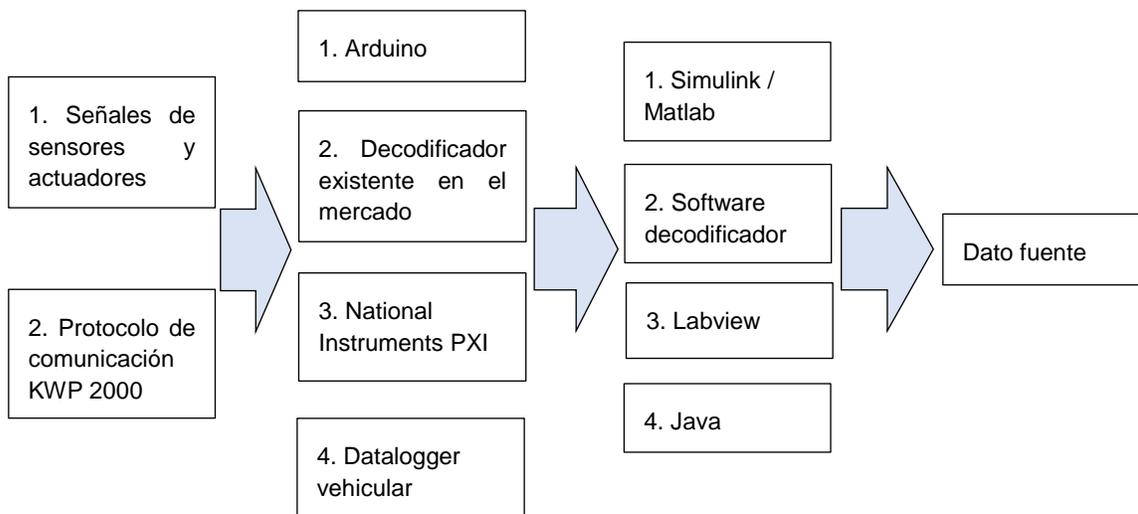


Figura 29. Conceptos para la adquisición de datos en el dinamómetro.

Los conceptos parten desde donde se pueden adquirir las señales de los sensores, para ello hay dos puntos de partida, uno, es a partir de la medición directa de la señal sobre cada sensor, donde el manual de la motocicleta tiene descritos de forma detallada los diagramas eléctricos, así como las especificaciones y las operaciones de chequeo y calibración de sensores y actuadores; el segundo punto de partida es a partir del protocolo de comunicación KWP 2000 de la motocicleta, que requiere el conocimiento de las direcciones

exactas de cada sensor para solicitarlas a la ECU y que esta envíe la información de forma serial.

Seguido de las señales, se tienen varias formas de adquisición, donde se agrupan en dos formas, a partir de tarjetas y dispositivos de adquisición que trabajan con software libre y el segundo grupo son aquellas que requieren un software con licencia, software de suma importancia, porque actualmente la Universidad cuenta con algunos de ellos con licencias activas como es el caso de Matlab. En la Figura 29 se muestra algunos de los conceptos propuestos para dar solución a la adquisición y procesamiento de datos.

Selección de conceptos

Para este caso, la selección de un concepto se llevó a cabo a partir de la consideración de cuatro rutas del diagrama,

Concepto 7.1: 1-1-1 Señales de sensores y actuadores -> Arduino -> Simulink / Matlab

Concepto 7.2: 1-3-3 Señales de sensores y actuadores -> NI PXI -> LabView

Concepto 7.3: 2-2-2 Protocolo de comunicación KWP 2000 -> Decodificador existente en el mercado -> Software del decodificador

Concepto 7.4: 1-1-4 Señales de sensores y actuadores -> Arduino -> Java

La ponderación y calificación se presenta en la Tabla 43, con una calificación mayor para el caso del concepto 7.1, aunque con diferencias mínimas en comparación a los demás contemplados.

Tabla 43. Ponderación de conceptos en sistema de adquisición y procesamiento de datos.

Sistema 7	Ponderación	Conceptos			
		7.1	7.2	7.3	7.4
Estabilidad en la adquisición	15%	3	5	4	3
Facilidad de operación	25%	5	4	5	5
Facilidad modificación lenguaje fuente	25%	5	4	2	4
Costo	15%	5	1	4	5
Tiempo de implementación	20%	3	5	5	3
Promedio		4.3	3.9	4.0	4.1
Total	100%				

viii. PLATAFORMA DE VISUALIZACIÓN DE DATOS

Conceptos

La plataforma de visualización de datos está relacionada al sistema de almacenamiento y procesamiento de datos descrito en el literal anterior, aunque difiere en la interfaz, porque puede considerar manejos de datos más ligeros dedicados exclusivamente a visualización, por tanto, se considera como un sistema independiente. Los conceptos contemplados son:

- 8.1 Programa en Java.
- 8.2 Programa GUI de Matlab.
- 8.3 Interfaz GUI de Simulink.
- 8.4 Datos en tiempo no real a través de Excel.
- 8.5 LabView

Selección de conceptos

El concepto con mayor puntuación y por ende el seleccionado es el 8.1, con ventajas en el consumo de recursos y desventajas en la facilidad para modificación de la interfaz, porque se requieren conocimientos en tal lenguaje de programación para realizar cambios. En la Tabla 44 se detalla la calificación y evaluación.

Tabla 44. Ponderación de conceptos en la plataforma de visualización de datos

Sistema 8	Ponderación	Conceptos				
		8.1	8.2	8.3	8.4	8.5
Tiempo de postprocesamiento	25%	4	3	3	2	4
Calidad gráfica	20%	4	4	3	2	4
Consumo de recursos del PC	15%	5	2	2	4	3
Costo de implementación	15%	4	4	4	5	2
Facilidad de operación y modificación	25%	3	5	5	5	5
Promedio		3.9	3.7	3.5	3.5	3.8
Total	100%					

ix. SISTEMA DE AISLAMIENTO DE RUIDO

Conceptos

El motor de combustión interna es un alto generador de ruido, por tanto, los laboratorios con dinamómetros de banco tienen cabinas para el aislamiento de ruido, en el manual del dinamómetro Stuska XS-19 vienen recomendaciones dimensionales para el cuarto. En la presente tesis se desarrolla solamente hasta el diseño conceptual del aislamiento de ruido y queda para futuros trabajos, la implementación del concepto seleccionado.

Los conceptos generados son:

- 9.1 Caseta de pruebas insonorizada según dimensiones de Stuska.
- 9.2 Caseta de pruebas en las afueras del laboratorio.
- 9.3 Pruebas sin caseta al exterior del laboratorio.

Selección de conceptos

El concepto con mayor puntuación es el 9.1 correspondiente a la implementación de una caseta insonorizada dentro del laboratorio de la UAT. En la Tabla 45 se presenta de forma detallada la calificación de los conceptos.

Tabla 45. Ponderación de conceptos del sistema de aislamiento de ruido

Sistema 9	Ponderación	Conceptos		
		9.1	9.2	9.3
Volumen	20%	3	5	5
Costo de implementación	20%	3	1	5
Nivel de ruido en el laboratorio	25%	5	5	2
Facilidad para desarrollar pruebas	20%	5	3	4
Seguridad	15%	5	5	4
Promedio		4.2	3.8	3.9
Total	100%			

Conceptos

Para el sistema de extracción de los gases y partículas de escape generadas por la combustión se tienen los siguientes dos conceptos:

- Manguera flexible para expulsar gases.
- Extractor de gases estacionario ubicado en una caseta de pruebas aislada

Selección de conceptos

Para la evaluación se analizaron 5 parámetros como el nivel de extracción de contaminantes, el aislamiento del laboratorio ante las emisiones generadas, el costo de la implementación, el volumen y la seguridad del operador al utilizar uno y otro.

El concepto de mayor valor obtenido es el extractor de gases dentro de una caseta aislada, su desarrollo queda para un proyecto futuro en el laboratorio, por tanto, considerando los tiempos de implementación, se contempla la solución 4.1.

Tabla 46. Ponderación de conceptos del sistema de extracción de gases

Sistema 10	Conceptos		
	Ponderación	10.1	10.2
Nivel de extracción de contaminantes	25%	3	5
Aislamiento del laboratorio	25%	3	5
Costo de implementación	20%	5	2
Volumen	15%	4	4
Seguridad	15%	4	5
Promedio		3.7	4.3
Total	100%		

3.2.3 CONCEPTO FINAL

Durante la ejecución de los conceptos finales se realizaron bocetos con posibles conceptos finales, como es el caso del presentado en la Figura 30, que consta de una estructura solidaria, donde se encuentra el motor, el tanque de combustible y el freno hidráulico en la misma, la transmisión es a partir de un mecanismo de cadena y el panel de control e instrumentos se encuentra ubicado en frente de motor.

Este concepto global tiene dos desventajas, una es relacionada al flujo de aire que entra al radiador, el cual está bloqueado por el panel de instrumentos, otra, es que al tener la configuración del freno detrás del motor, va a tener unas temperaturas altas en las inmediaciones debido a los gases de escape del motor, ya que pueden salir a más de 200 °C.

En el diseño detallado se refinaron y modificaron algunos componentes, como parte del proceso iterativo de diseño.

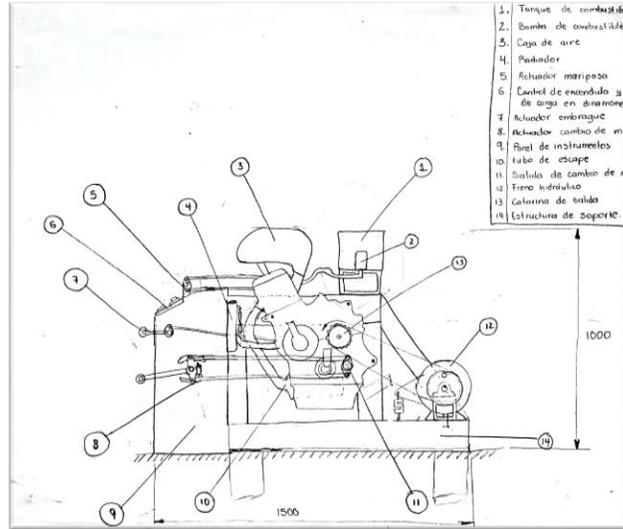


Figura 30. Concepto 1 del dinamómetro

Posteriormente después de una refinación y al terminar todas las puntuaciones de los conceptos, se logra obtener el concepto final,

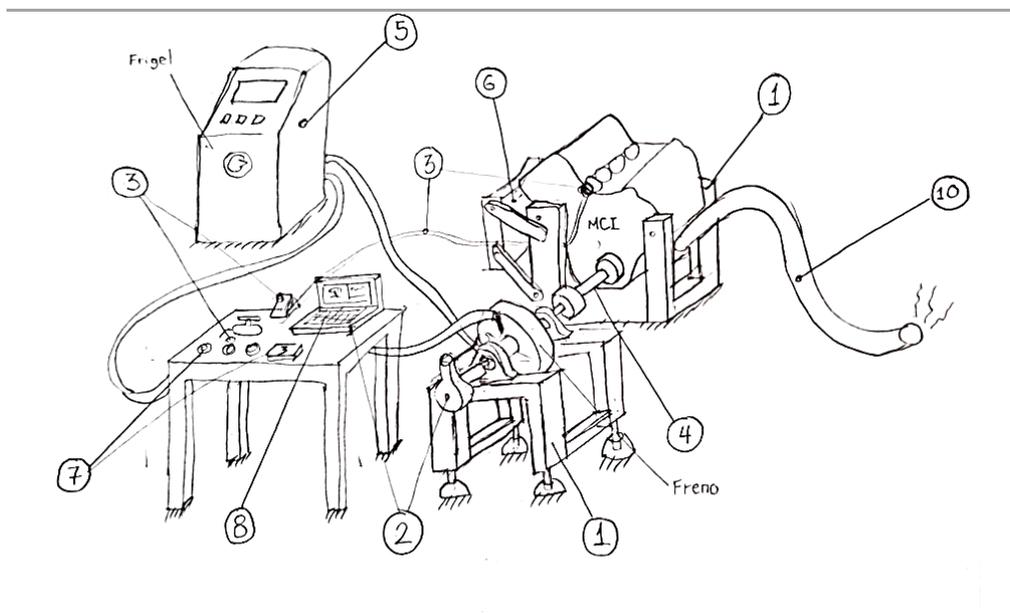


Figura 31. Concepto final del dinamómetro

Los resultados conceptuales de mayor puntuación y por ende los escogidos, según lo presentado en la sección 3.2.2, se enuncian a continuación:

- 1.1 Sistema de refrigeración del motor ubicado en frente del motor.
- 1.2 – 1.5 Estructuras de soporte del freno y del motor independientes y ajustables en altura.
- 1.3 Alineación a partir de láminas de ajuste y holguras en agujeros y tornillos para la variación en altura.

- 1.4 – 1.6 Soporte de componentes hidráulicos a partir de un pane de instrumentos independiente.
- 1.7 Estructuras del tanque de combustible y del motor independientes.
- 2.1 Sensores para medir el estado de refrigeración del motor a partir de los que vienen de fábrica en el motor.
- 2.2 Encoder externo para la medición de velocidad y posición. Pendiente selección detallada.
- 2.3 Medición de par a partir de una celda de carga triaxial Futek MTA400.
- 2.4 Consumo de combustible a partir de un medidor de flujo de bajo costo, Futurlec FLOWFUEL30L0 3/8”
- 2.5 Medición de temperatura de entrada y salida a partir del equipo de refrigeración de agua Frigel RCD 80.
- 2.6 Señales del motor medidas a partir de una tarjeta de código abierto.
- 2.7 Medición de las señales de los actuadores a partir de una tarjeta de adquisición de datos externa.
- 2.8 Medición del estado de la combustión a partir de un sensor de oxígeno o lambda (Para futuros trabajos).
- 2.9 Medición de condiciones atmosféricas a partir de sensor externo de humedad relativa y de temperatura de bajo costo.
- 3.1 Control de encendido manual a partir de botones e interruptores físicos.
- 3.2 Control del embrague a partir de un mecanismo de palanca accionado manualmente a través de un cable.
- 3.3 Control de cambio de velocidades a partir de un accionamiento con un brazo de palanca conectado al eje estriado.
- 3.4 Control del suministro de combustible a partir de una ECU programable (Para trabajo futuro).
- 3.5 Control del flujo de agua de forma manual a partir de una válvula de entrada y una de salida.
- 3.6 Control del acelerador del motor a partir de un cable conectado a la mariposa y actuado desde el panel de instrumentos.
- 4. Transmisión de potencia a partir de un eje acoplado en sentido axial al eje de la caja de transmisión.
- 5. Sistema hidráulico considerando el uso del dispositivo de enfriamiento Frigel microgel RCD 80
- 6. Sistema de refrigeración del motor de fábrica
- 7. Adquisición de datos de señales y sensores a partir de tarjetas de arduino, para ser compiladas y procesadas a partir del uso de Matlab/Simulink
- 8. Interfaz entre operario y máquina a partir de un aplicativo en Java
- 9. Caseta de pruebas insonorizada dentro del laboratorio (Para desarrollo futuro)
- 10. Extractor de gases estacionario ubicado en la caseta de pruebas aislada (Para trabajo futuro), para las primeras pruebas se seleccionó concepto de manguera flexible acoplada en el escape.

3.3 DISEÑO DETALLADO

3.3.1 DISEÑO A NIVEL DE SISTEMA

i. ESTRUCTURA DE SOPORTE

Para la estructura de soporte se considera un peso estático de 70 kg del motor y 20 kg del freno y sus accesorios, además un par de torsión en sentido antihorario en el eje de salida de la caja de velocidades del motor, con un valor máximo de 350 Nm, asimismo se considera una velocidad de ralentí de 1.500 rpm.

La estructura propuesta se presenta en la Figura 32, y se contempla en dos secciones, una para el soporte del motor y sus accesorios y la otra para el soporte del freno y la instrumentación como la celda de carga triaxial y el encoder.

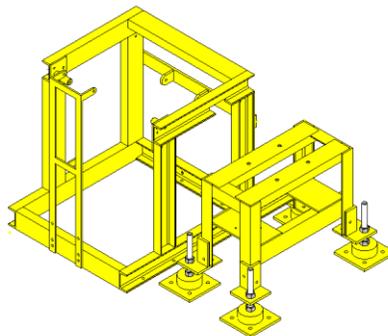


Figura 32. Modelado CAD de la estructura de soporte.

La estructura que soporta el motor va anclada directamente al suelo del laboratorio a partir de uniones atornilladas y taquetes, asimismo, los soportes del motor son removibles y se unen a partir de tres puntos roscados para poder llevar a cabo cambio de motores sobre la misma estructura. En el caso de la segunda estructura, se puede mover a partir de cuatro tornillos de graduación, cada uno en una de las patas.

ii. ADQUISICIÓN DE DATOS

Señales del motor

Para el sistema de adquisición de datos se utilizaron tres sensores externos, una celda de carga para la medición del par a partir del brazo de palanca, un encoder relativo para la medición de la velocidad de giro del motor y un flujómetro de combustible. La frecuencia de muestreo deseable para los sensores es de 100 datos/s. A continuación, se muestran diagramas de caja de la configuración de la adquisición de datos partiendo de la variable física a sensar hasta llegar a la visualización en el computador, los recuadros negros representan los dispositivos del sistema, las palabras y las líneas rojas representan la forma y protocolo de comunicación entre dispositivos, las palabras verdes representan las señales y cómo se convierten al pasar por cada uno de los dispositivos, y por último, las líneas moradas corresponden a la alimentación eléctrica de los dispositivos.

Señal de par del motor

En la Figura 33 se presenta el diagrama de bloques para la obtención del par del motor, para ello la variable fuente a medir es el peso que soporta la celda de carga, que multiplicado por el brazo de palanca del freno se obtiene el torque, ese peso es convertido a una señal análoga por la celda de carga Futek MTA400, que está alimentada con una fuente de 5 Vdc, como la celda tiene una resolución de 0.75 mV/V entonces el rango de 0 a 500 lb se traduce en una señal de 0 a 3.75 mV a la salida del sensor

Después, esa señal es amplificada por un módulo Séneca exclusivo para celdas de carga, en el capítulo 3.1.3 – literal *ii* se encuentran las especificaciones del amplificador. Éste se utilizó para alimentar los 5 Vdc al sensor y para amplificar la señal de entrada utilizando el canal digital de 32 bit flotantes como salida, el módulo arroja la señal en valores transformados directamente a peso sin necesidad de interpretar los 32 bits, la señal es transmitida a partir de un protocolo RS485 que pasa por un conversor a UART para tener comunicación digital con la tarjeta de adquisición de datos ESP32. La señal de salida de la ESP32 es Wi-Fi y transmite hacia un módulo de comunicación con el computador.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 33. Diagrama de bloques – Adquisición de datos torque

Señal de la velocidad de giro del motor

Para la adquisición de datos de la velocidad de giro del motor, se utilizó una configuración como la presente en la Figura 34 donde la variable a sensar es la velocidad de giro del motor, para ello se utilizó un encoder relativo Allen Bradley 847T, que gira a la misma velocidad del freno hidráulico, como el valor es el correspondiente a la velocidad de la salida de transmisión, se multiplica por la relación de transmisión a la que se encuentra la caja de velocidades para obtener así la velocidad del cigüeñal.

El sensor arroja en uno de sus canales 2 pulsos por revolución y en otro da 2500 pulsos por revolución, el canal utilizado en la adquisición de la velocidad es el de 2 ppr, señal que fue conectada directamente a una segunda tarjeta ESP32, independiente de la utilizada para la celda de carga, allí se cuentan los pulsos y se transforma en un valor de rpm a partir de la constante a multiplicar para pasar a valores reales del cigüeñal.

Una vez adquirida la señal, se transmite a través de Wi-Fi al mismo módulo de comunicación con el computador utilizado en las demás señales.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 34. Diagrama de bloques – Adquisición de datos velocidad de giro motor

Señal del flujo de combustible

El flujo de combustible es la variable física por monitorear, a partir de un medidor de flujo de tipo turbina y marca Futurlec FLOWFUEL30L0 con un rango que oscila entre 2 y 30 L/h, y una sensibilidad de 0.38 mL/pulso para bajos caudales, $Q < 4$ L/h, mientras que para caudales arriba de 4 L/h la sensibilidad es de 0.5 mL/pulso, asimismo cuenta con una precisión de $\pm 10\%$.

Los pulsos de salida son adquiridos con una tercera tarjeta ESP32 que recibe la señal en uno de los canales digitales, allí cuenta los pulsos y los convierte en litros por hora. La tarjeta envía los datos a través de Wi-Fi al módulo de comunicación con el computador utilizado en los dos casos anteriores. La *Figura 35* presenta el diagrama de bloques para la obtención de los valores de flujo de combustible.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 35. Diagrama de bloques – Adquisición de datos flujo de combustible.

Señal de posición de aceleración

La señal del sensor de posición de aceleración principal se adquirió utilizando una tarjeta ESP32 considerando una de las entradas análogas y conectada al módulo de comunicación al PC., cuyo comportamiento teniendo en cuenta una señal de alimentación de 0 a 5 voltios, da una señal de salida de 1.1 V para la mariposa totalmente cerrada y de 4.53 V para la

mariposa totalmente abierta, en la *Figura 36* se muestra una prueba sobre el sensor utilizando un osciloscopio.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 36. Señal del sensor de posición de aceleración del motor Kawasaki ZX6R

Módulo de comunicación hacia el computador

El módulo de comunicación recibe las señales Wi-Fi de las tres tarjetas ESP32 montadas cada una en los sensores externos a partir de un módem, el cual se comunica a un servidor que reúne toda la información, posteriormente se comunica a la interfaz del computador para llevar a cabo su visualización, almacenamiento y procesamiento. La Figura 37 muestra el diagrama de bloques del módulo de comunicación entre las tarjetas de adquisición de datos de los sensores y el computador o dispositivos móviles.

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

Figura 37. Diagrama de bloques – Módulo de comunicación a PC.

iii. CONTROL DE PARÁMETROS

Control del encendido de la motocicleta

Para que el motor Kawasaki ZX-6R pudiera operar de forma estacionaria, fue necesario realizar modificaciones eléctricas sobre algunos sensores, el primero es el sensor de inclinación de la motocicleta que corta la inyección cuando el vehículo o motor se encuentra a un ángulo mayor a 20°, el segundo es el sensor del soporte de parqueo de la motocicleta, que no permite el encendido en una posición diferente a neutral. Una vez realizadas dichas modificaciones, se llevaron a cabo las labores de la instalación del arnés, junto a los sensores, asimismo se cambió de aceite al motor, se puso aceite refrigerante y se instaló la batería. Después de varias pruebas, el motor encendió.

A continuación, se presentan los detalles de las modificaciones

Se puso una resistencia de 10 kΩ y ¼ W como una derivación del sensor de soporte de parqueo. Con esa resistencia, el valor que llega a la ECU es de 4,2 V y está dentro del rango de los valores para los cuales el motor puede encenderse.

Suministro de combustible al motor

Para el suministro de combustible se adquirió una bomba de combustible sin carcaza, y se adecuó a un tanque de aluminio existente de un vehículo de Fórmula SAE.

Por otra parte, se llevó a cabo la adecuación en la bomba de combustible y se diseñó el acople entre la manguera y la salida de la bomba tal como se presenta en la Figura 38.

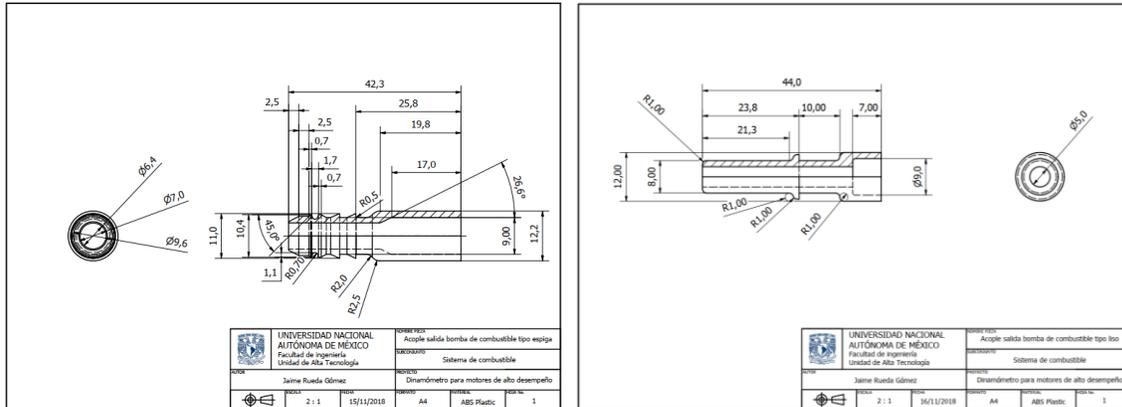


Figura 38. Planos de fabricación del acople para bomba de combustible

Una vez presentados los planos se llevaron a fabricar en impresión 3D, el resultado se ve en la Figura 39. Los acoples no se pusieron en la bomba y en la instalación provisional se puso directamente la manguera a la salida. Para adecuación en un vehículo que se vaya a mover, es imperativo realizar los ajustes del acople para la bomba de combustible.

La bomba de combustible es sumergible y se ubica dentro del tanque de combustible, posteriormente se cuenta con un medidor de presión de la línea de combustible, que llega a 90 psi en operación de calentamiento y en operación normal baja a 60 psi controlado directamente por la ECU del motor. Seguido del manómetro, se encuentra el flujómetro de

combustible Futurlec, y de ahí la línea va directamente acoplada a los rieles de inyectores primarios y secundarios OEM.



Figura 39. Acoples para bomba de combustible fabricados utilizando impresión 3D

iv. TRANSMISIÓN DE POTENCIA

Para el diseño de la transmisión de potencia se consideró inicialmente la medición directa en el cigüeñal del motor y de ahí se seleccionó el régimen de operación del freno hidráulico, que llega a 14.000 rpm según los requerimientos dados al fabricante. Por facilidad en el montaje, se optó por la opción de medir la potencia a la salida de la caja de velocidades, la cual viene solidaria con el bloque del motor. Por tanto, se realizó la simulación de torque y potencia a la salida de la caja de velocidades para cada una de las seis marchas del motor, además se incluyó la curva de frenado del dinamómetro para conocer si cubre cada una de las marchas.

En la Figura 40 y Figura 41 se presentan las curvas de torque y potencia respectivamente, para cada una de las velocidades de la caja, así como para el cigüeñal y el freno hidráulico.

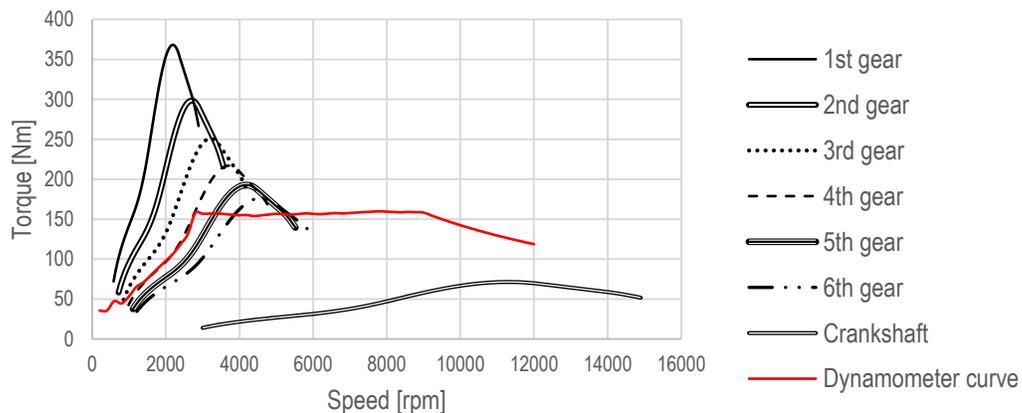


Figura 40. Curvas de torque a la salida del cigüeñal y del dinamómetro.

Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de [31] [35]

Se muestra para la configuración de relaciones a la salida de la transmisión, que el freno en su configuración inicial no cubre en su totalidad ninguna de las curvas de frenado, a excepción de cuando se considera la medición directamente en el cigüeñal; asimismo, para el caso de las curvas de potencia, el freno no las cubre en su totalidad, por tanto, se debe controlar la válvula de salida de agua para que la curva de frenado cambie.

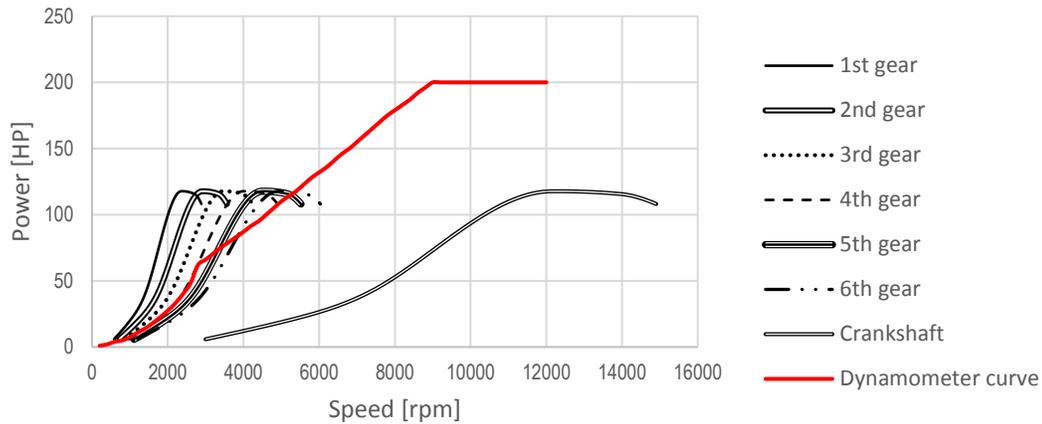
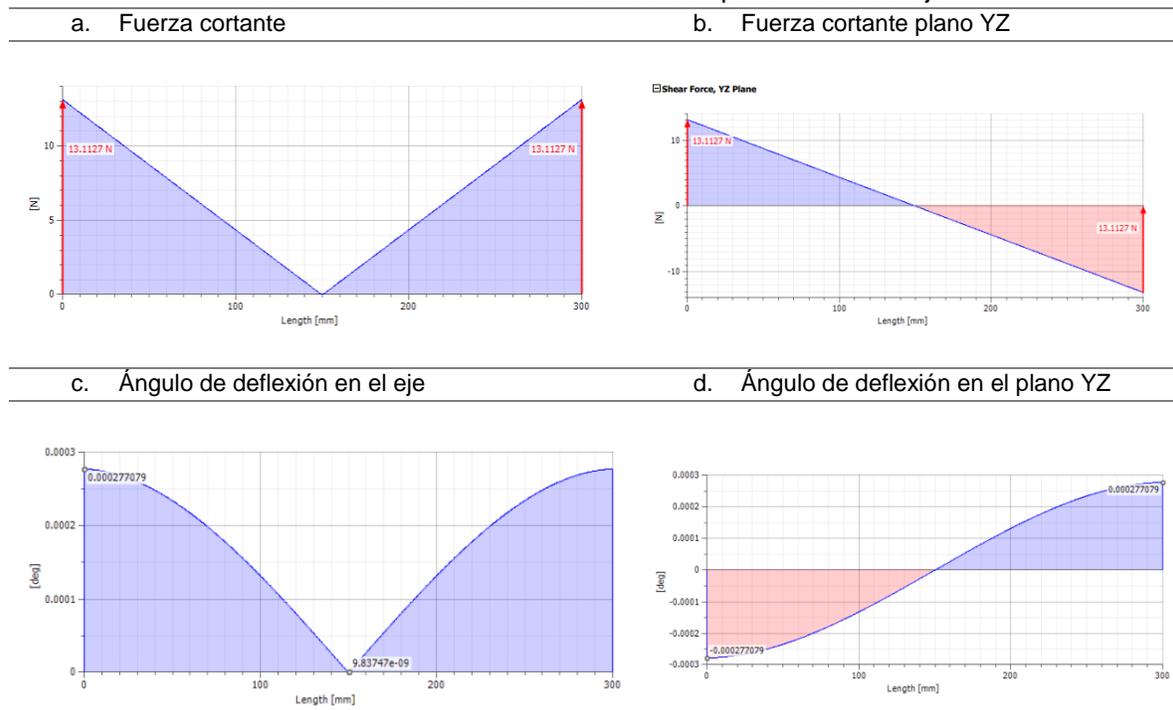
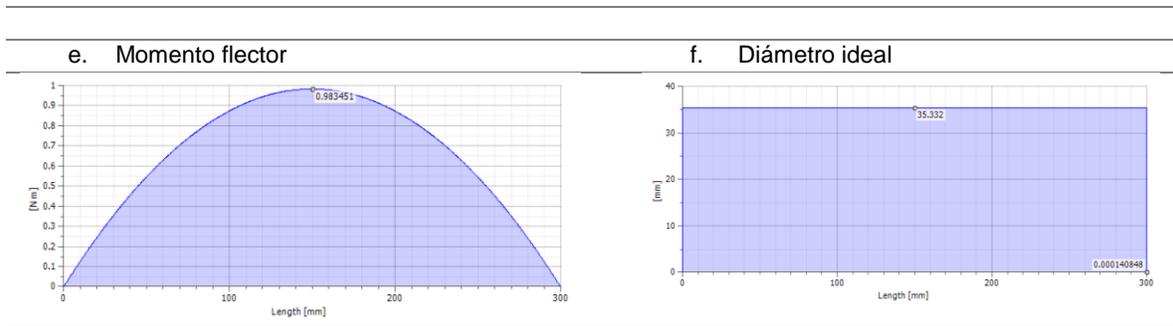


Figura 41. Curvas de potencia a la salida del cigüeñal y del dinamómetro
Fuente: Elaboración propia. Datos tomados de [31] [35]

Una vez realizado el análisis de potencias y pares a la salida del motor, se realizó el cálculo del eje utilizando Autodesk Inventor, con los resultados presentes en la Tabla 47. La longitud de cálculo fueron 300 mm y un diámetro de 38.1 mm.

Tabla 47. Resultados mecánicos del comportamiento del eje.





El acople flexible seleccionado es un Rotex EN-GJL-250 98 ShA, el cual está diseñado para soportar un par torsional de 325 Nm nominales y una velocidad de 9.500 rpm. La Figura 442 describe el modelo del eje de acople entre el freno y el motor. Esta solución solamente sirve para motores con salida en el eje de velocidades de 15 dientes, para otro tipo de motores, es necesario realizar un nuevo acople exclusivo para el motor.

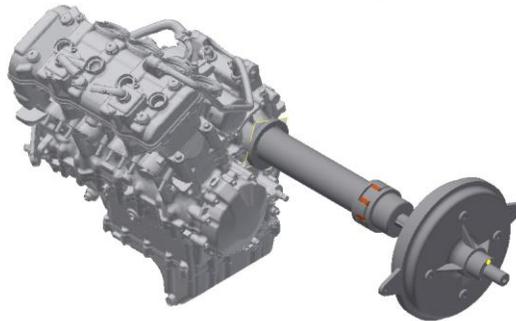


Figura 42. Modelado CAD del eje de transmisión y de los acoples entre el freno y el motor.

V. SISTEMA HIDRÁULICO

El esquema del sistema hidráulico se presenta en la Figura 43 y consta de la bomba incluida en el Frigel que cubre el rango de 40 a 80 psi para toda la línea y el chiller envía agua a temperatura ajustable por el usuario, después del Frigel, va un regulador de presión marca Wilkerson R18-04 F0G0 para regular de 0 a 125 psi, seguido de una válvula de aguja para el control del flujo, de marca Parker 8F-V12LR-SS. Después de la válvula de aguja, el flujo va directo al freno, dispositivo que tiene dos salidas, una de retorno a tanque y una de alivio de sobreflujo de agua, en el caso del retorno, se ubicó un sensor de presión y una válvula de esfera seguido de una válvula antirretorno para así llegar a la entrada del Frigel nuevamente.

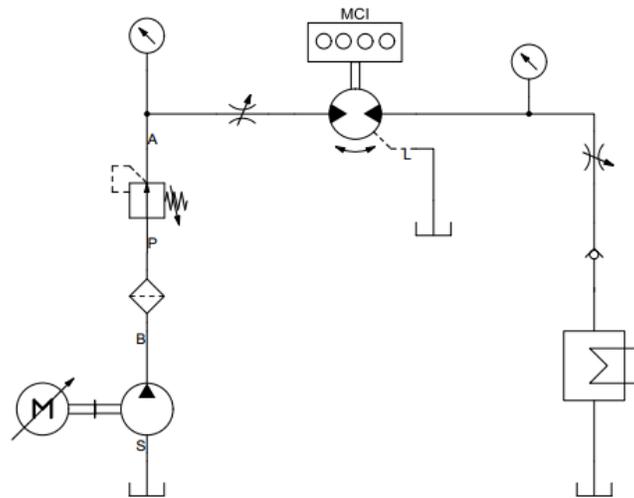


Figura 43. Circuito hidráulico propuesto

3.3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES ESTANDARIZADOS

i. TORNILLERÍA NECESARIA

Tabla 48. Tornillos seleccionados para el banco de pruebas.

Ítem	Sistema	Descripción	Uso	Cantidad	Referencia
1	Soporte trasero	Tornillo cabeza hexagonal-tuerca-roldana-arandela de presión	Pasante orejas	1	AS 1111 - M10 x 200 Grado 8
2		Tornillo cabeza Allen-roldana	Unión entre estructura y soporte trasero	4	AS 1111 - M8 x 20 Grado 8
3	Soporte izquierdo	Tornillo cabeza hexagonal-roldana	Unión entre estructura y motor	1	AS 1111 - M10 x 90 Grado 8
4		Tornillos- tuerca - roldana	Soporte de motor a banco	3	AS 1110 - M8 x 20 Grado 5
5	Soporte derecho	Tornillo soporte derecho	Unión entre estructura y motor	1	AS 1111 - M10 x 110 Grado 8
6		Tornillos- tuerca - roldana	Soporte de motor a banco	3	AS 1111 - M8 x 20 Grado 5
7	Soporte chumaceras	Tornillo cabeza hexagonal-tuerca-roldana - chumaceras	Unión entre chumaceras y motor	4	ANSI/ASME B18.2.1 - 1/2-13 UNC - 1.75
8	Soporte patas	Tornillos de cabeza hexagonal	Unión patas y soporte freno	12	3/8-16 UNC - 1.25
9	Placas chumacera	Tornillos de cabeza avellanada para llave Allen	Placas rodamiento-freno	6	1/4-20 UNC - 0.75
10	Unión encoder	Tornillo cabeza hexagonal-2 roldanas-tuerca	Unión encoder soporte	4	AS 1110 - M4 x 16 Grado 5
11	Cople freno-encoder	Tornillo cabeza Allen	Unión cople de encoder a freno	1	1/4-20 UNC - 7/8 - Maquinar cabeza a 8mm

12	Celda de carga	Tornillo-roldana	Unión a placa superior e inferior	8	1/4-28 UNF - 0.75
13	Brazo de articulación	Tornillo- tuerca	Unión superior e inferior brazos de articulación	2	5/16-18 UNC - 1.25
14	Radiador	Tornillo- tuerca- roldana	Pasante orejas superior radiador	1	AS 1111 - M10 x 180 Grado 5
15		Tornillo- tuerca- roldana	Pasante orejas inferior radiador	1	AS 1111 - M10 x 30 Grado 5
16	Soporte piso laboratorio	Tornillo cabeza hexagonal- Tuerca- roldana	Union soporte a estructura	8	AS 1111 - M10 x 30 Grado 5
17		Tornillo roldana y taquete	Union soporte motor al suelo	16	7/16- 14 UNC -1.5
18		Tornillo roldana y taquete	Soporte freno al suelo	16	3/8-16 UNC - 1.5

3.3.3 MODELOS CAD FINALES Y PLANOS DE FABRICACIÓN

En el Anexo 3 se presentan los planos de fabricación realizados para la fabricación de los componentes del banco, el ensamble final se presenta de forma esquemática en la Figura 44.

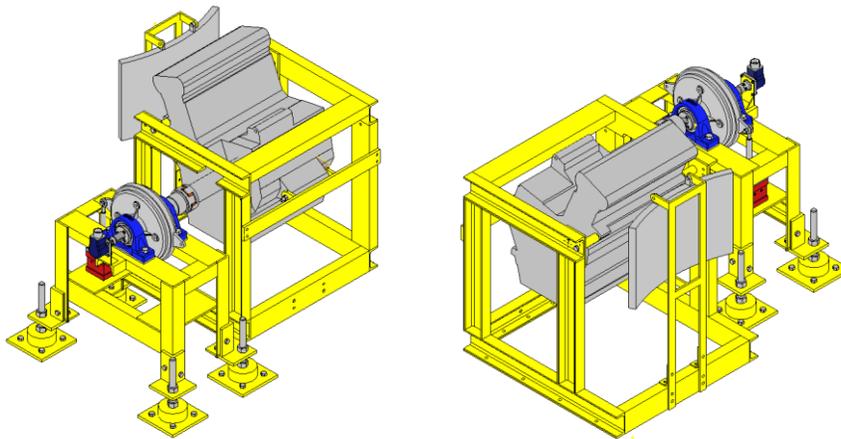


Figura 44. Modelo CAD final

3.4 FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL PRODUCTO

3.4.1 CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO

i. ESTRUCTURA DE SOPORTE

Para la elaboración de las estructuras del freno, del motor, así como los mecanismos de soporte y transmisión se llevó a cabo en un taller de metalmecánica en Querétaro, llamado MAIA, Mecatrónicos Asociados para la Innovación y Automatización, los resultados de la fabricación se muestran en la Figura 45. El proceso de fabricación tomó 8 semanas.

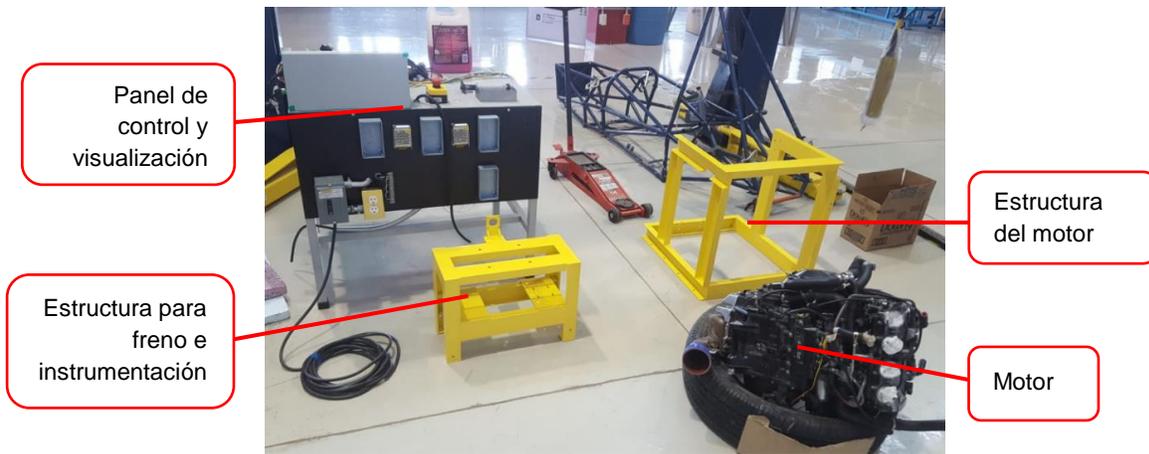


Figura 45. Estructuras fabricadas para el montaje en el laboratorio

ii. PANEL DE CONTROL E INSTRUMENTACIÓN

Para la elaboración del panel de control electrónico e hidráulico se utilizó una estructura metálica independiente, diseñada por la empresa INSOEL IoT, además realizaron el montaje eléctrico del banco de pruebas y la adquisición de datos de los sensores externos, celda de carga, flujómetro de combustible, encoder y sensor de condiciones ambientales, así como algunos sensores del motor, tales como el TPS principal, el sensor del cigüeñal, el sensor del eje de levas y el de temperatura de agua de refrigeración.

En la Figura 46 se presentan fotografías del panel de instrumentos, donde se ve en la fotografía izquierda la estructura de control iniciando con la válvula de aguja para el control del flujo de agua, en el centro el computador que cuenta con la interfaz gráfica para la adquisición de datos y se almacena la información recopilada de los sensores y al lado derecho tres interruptores (Uno para energizar el sistema, el otro para encender la bomba de combustible y el tercero para encender la ECU) y un botón para el encendido del motor. En la fotografía de la derecha se ve de fondo la parte posterior del panel de instrumentos, donde se encuentran las tarjetas de adquisición de datos ESP 32 de software libre, así como instalaciones eléctricas en general y en primer plano se ve el encoder incremental.



Figura 46. Panel de control electrónico e hidráulico

iii. ENSAMBLE FINAL



Figura 47. Ensamble final del banco de pruebas

3.4.2 EVALUACIÓN DEL PRODUCTO

i. PRUEBAS SOBRE LA CELDA DE CARGA

Se realizaron pruebas sobre la celda de carga a diferentes pesos, a 0, 5, 10 y 15 kg, para tres frecuencias de muestreo dado por parte del amplificador, 151.71, 15.17 y 16.65 Hz respectivamente, En la Tabla 49 se presentan los valores estadísticos descriptivos para cada una de las muestras realizadas.

Tabla 49. Estadística descriptiva de los datos obtenidos por la celda de carga

Peso [lb]	0			11.02			22.05			33.07		
Frecuencia	151.71	15.17*	16.65	151.71	15.17*	16.65	151.71	15.17*	16.65	151.71	15.17*	16.65
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
Exactitud	0.25	0.23	0.24	-0.11	-0.11	-0.06	-0.16	-0.13	-0.10	-0.15	-0.16	-0.12
Error estandar promedio	0.00162	0.00432	0.00406	0.00159	0.00442	0.00432	0.00157	0.00450	0.00435	0.00158	0.00455	0.00422
Numero datos	14000	1900	2000	13700	1800	2000	13700	1800	1804	13700	1804	1804
Promedio	0.25	0.23	0.24	10.91	10.91	10.96	21.89	21.92	21.95	32.92	32.91	32.95
Mínimo	-0.47	-0.43	-0.34	10.12	10.33	10.24	21.20	21.27	21.35	32.22	31.93	32.42
Cuartil 1	0.13	0.11	0.11	10.79	10.77	10.82	21.77	21.79	21.82	32.78	32.78	32.82
Mediana	0.24	0.22	0.24	10.92	10.90	10.96	21.89	21.92	21.96	32.92	32.92	32.95
Cuartil 2	0.37	0.35	0.35	11.03	11.03	11.09	22.01	22.05	22.07	33.05	33.03	33.07
Máximo	0.87	0.83	0.88	11.60	11.54	11.58	22.58	22.54	22.47	33.79	33.71	33.60
Desviación estandar	0.19	0.19	0.18	0.19	0.19	0.19	0.18	0.19	0.18	0.19	0.19	0.18
Varianza	0.037	0.036	0.033	0.035	0.035	0.037	0.034	0.036	0.034	0.034	0.037	0.032
Curtosis	-0.06	0.03	-0.10	0.03	-0.22	0.03	-0.06	-0.15	0.06	0.04	0.42	0.04
Asimetría	0.05	0.04	0.04	-0.03	0.02	-0.04	-0.01	-0.02	-0.04	0.04	0.00	-0.02
Rango	1.34	1.26	1.22	1.48	1.21	1.34	1.38	1.27	1.12	1.57	1.78	1.18
Coefficiente de variación	0.77	0.82	0.76	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

Para el análisis de los datos, primero se llevó a cabo una prueba de normalidad para corroborar que los datos arrojados obedecen a una distribución normal, a partir de un análisis gráfico estadístico, histogramas y diagramas de cuantil-cuantil, donde se muestra que los datos tienen un comportamiento normal, los resultados gráficos se muestran en el Anexo 4.

Una vez comprobada la normalidad de los datos, se compara el valor patrón con la media y la desviación estándar para conocer el comportamiento de la exactitud y precisión de la celda de carga. Por ejemplo, para el caso de 11.02 lb, el valor arrojado por la celda de carga a 151.71 Hz es de 10.91 ± 0.19 lb que es el mismo que para 15.17 Hz, mientras que para 16.65 Hz cambia levemente a un valor de 10.96 ± 0.19 lb

Para todas las muestras independientemente del peso y de la frecuencia, la desviación estándar es de 0.18 a 0.19 lb, es decir que el error de medición de torque cuando la celda se encuentra montada es de 1.19 lb-in de 0.134 Nm que en términos relativos el error de la medición es de 0.04%

En la *Figura 48* se muestran los resultados de los diagramas de bloques para las diferentes muestras tomadas, en verde se encuentra el valor del peso patrón que se encontraba sobre la celda, se corrobora gráficamente el nivel de precisión de la celda de carga que varía entre 0.06 y 0.15 lb por debajo del valor nominal para pesos diferentes de cero, en el caso del valor de cero, la precisión es de 0.23 a 0.25 lb por encima del valor nominal y se encuentra por fuera del rango intercuartílico.

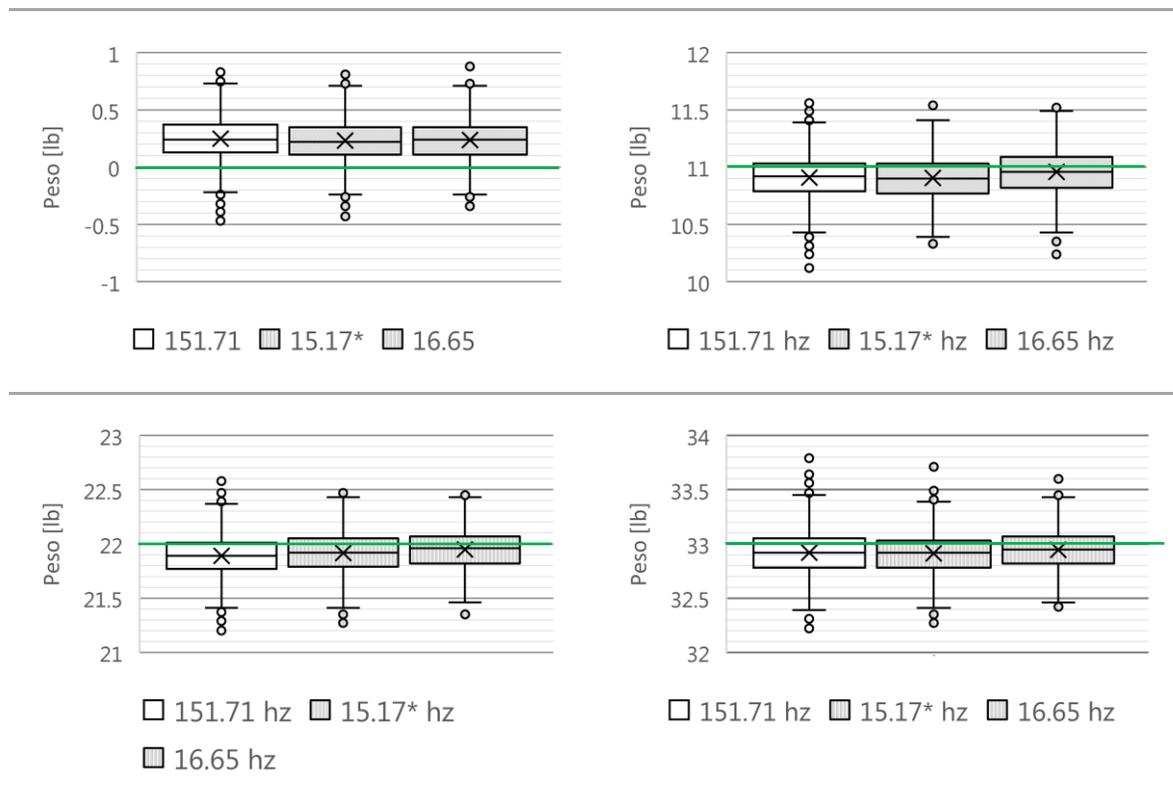


Figura 48. Mediciones celda de carga con pesas patrón

ii. PRUEBAS SOBRE EL FLUJÓMETRO DE COMBUSTIBLE

El flujómetro de combustible del banco de pruebas es de marca Futurlec FLOWFUEL30L0 con las especificaciones resumidas en la *Tabla 50*.

Tabla 50. Especificaciones del flujómetro de combustible- Futurlec FLOWFUEL30L0

Fuente: [43]

Especificaciones Futurlec FLOWFUEL30L0	Valor	Unidades
Rango de caudal	2.0 – 30	L/h
Exactitud	± 10	%
Temperatura de operación	0 – 60	°C
Presión	Max. 85	psi
Voltaje de alimentación	2.4 – 26	V
Corriente	2.8, max: 8	A
Tiempo de salida – Pulso subida	1, max: 10	µs
Tiempo de salida – Pulso bajada		
<i>Calibración</i>		
Caudal, Q [L/h]		Señal [L/pulso]
2.0		0.00038
4.0		0.00050
12.0		0.00050
30.0		0.00050

Analizando la información de calibración, no es claro en la hoja de especificaciones del sensor, qué valor se debe tomar si el caudal es de 4 L/h, por tanto se realizó una gráfica (ver *Figura 49*) que describiera la información de la calibración presente en la hoja de especificaciones, donde se muestran las dos condiciones de caudal, denominada Q1 para valores menores que 2 L/h y Q2 para los mayores que 2 L/h, la discontinuidad en el sensor para el flujo de 4 L/h y con una diferencia de 2.520 pulsos/h en el rango de 8.000 a 10.520 pulsos/h, caso que daría un error de 0.95 L/h en el flujo medido en el caso de tomar cualquiera de las dos líneas.

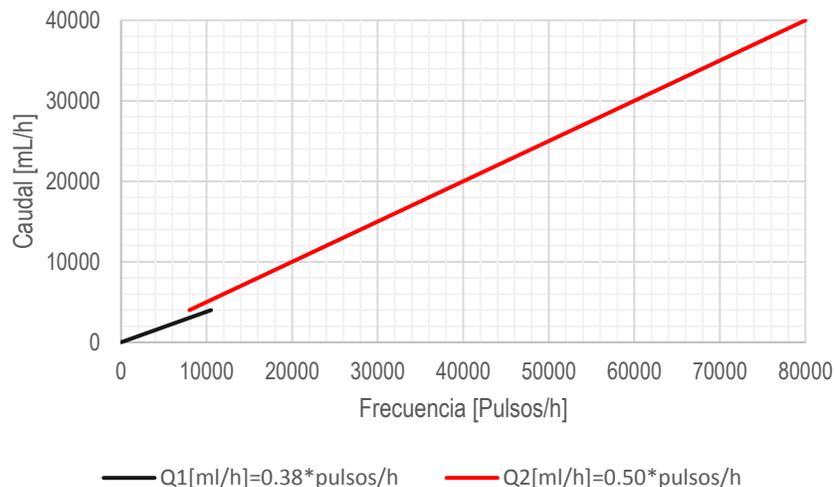


Figura 49. Curva de calibración flujómetro de combustible - Según ficha técnica.

Por tanto, se llevaron a cabo pruebas experimentales para reproducir la misma gráfica, para ello se revisaron los flujos reales de combustible en comparación a los medidos con el flujómetro instalado, a partir de una medición volumétrica, partiendo de un sistema como el descrito en la *Figura 50*, donde se inicia con el control del encendido de la bomba de combustible, accionado con un interruptor conectado directamente entre la batería y el polo positivo de la bomba, mientras que en la parte hidráulica, a la salida de la bomba se encuentra un medidor de presión, seguido de un flujómetro de combustible y una válvula de aguja, después, se mide el flujo real utilizando una probeta de 1.000 ± 10 mL y un cronómetro. El valor medido de forma física se contrasta con el valor en pulsos obtenido por parte del sensor instalado en la línea, el cual también se cuantifica por unidad de tiempo, es decir, la frecuencia en pulsos/tiempo.

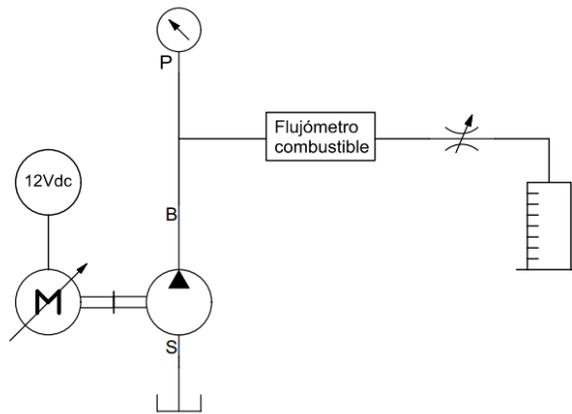


Figura 50. Diagrama de pruebas experimentales sobre la línea de combustible

Se realizaron 14 mediciones a diferentes aperturas de la válvula de aguja para obtener el flujo volumétrico real vs pulsos por unidad de tiempo del sensor, los resultados, presentes en la *Figura 51*, muestran una alta correlación con un valor del coeficiente de determinación $R^2=0.9996$ entre la frecuencia de los pulsos del sensor y el caudal real medido.

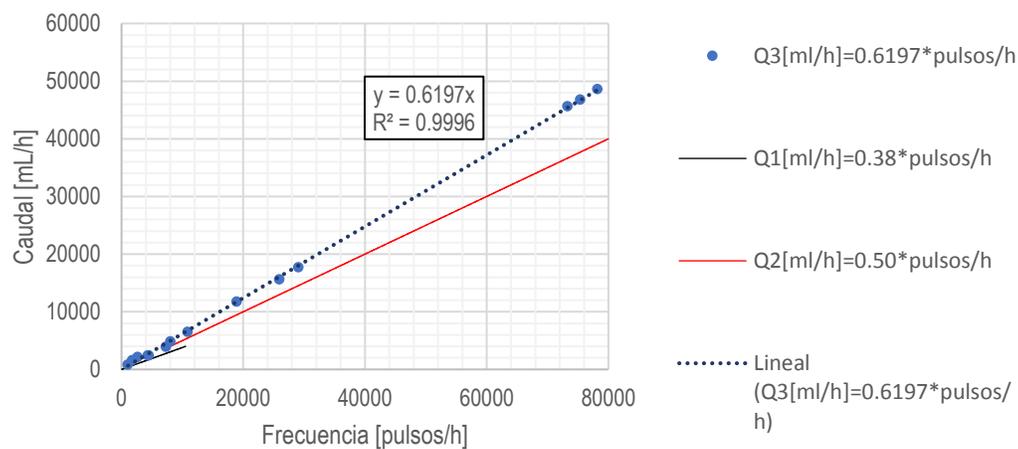


Figura 51. Curva del flujómetro medido experimentalmente

En comparación a las curvas del sensor graficadas según la hoja de especificaciones, se tiene una amplia diferencia en el valor de la señal de caudal real, con valores 24% por encima, por tanto, los valores de calibración presentes en la tabla de especificaciones no se consideran, y la ecuación que describe el comportamiento real del sensor es:

$$Q_{real} \left[\frac{\text{mL}}{\text{h}} \right] = 0.6197 \times \text{Frecuencia} \left[\frac{\text{pulsos}}{\text{h}} \right] \quad \text{Ec. (39)}$$

A partir de lo anterior, se llevó a cabo un análisis del error del flujo considerando la nueva ecuación del comportamiento a partir de los mismos datos recopilados, para así definir el rango admisible del sensor considerando un límite máximo de 10% en el error relativo. La *Figura 52* muestra la ecuación del error relativo, que tiene una correlación de Pearson alta ($R=0.915$), en donde el rango admisible del sensor es de 2.93 – 50 L/h.

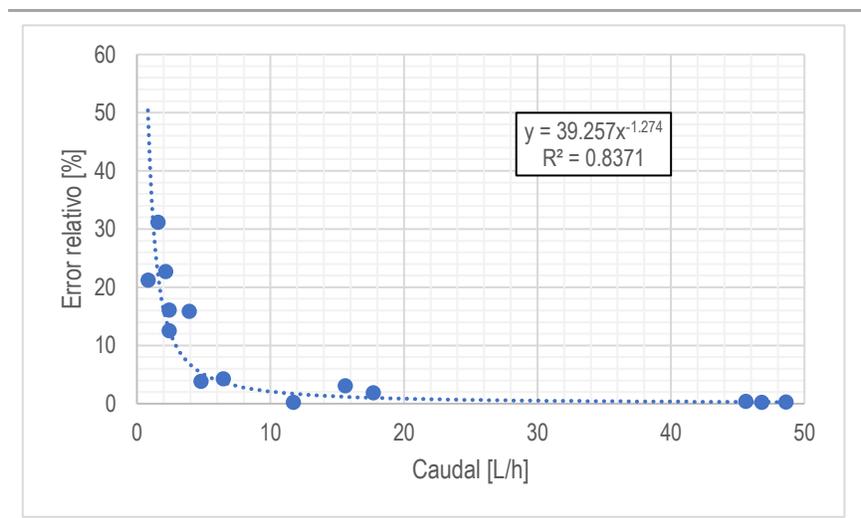


Figura 52. Error relativo medición de consumo de combustible

Finalmente, se ajustó la relación de calibración que se utilizará para la programación en la adquisición de datos, la relación es la siguiente:

Caudal, Q [L/h]	Señal [L/pulso]	Error
2.93 - 50	0.00062	2 – 10 % para Q (2.93:10 L/h) < 2% para Q > 2 L/h

iii. PRUEBAS SOBRE EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Una vez realizado el montaje del sistema de transmisión, se realizaron pruebas de desalineación utilizando un comparador de carátula con una exactitud de 0.01 mm. Se midieron las desalineaciones de:

- La flecha conectada al eje de transmisión del motor: con una desalineación de 0.17 mm medida a 222 mm del punto de apoyo, por tanto, corresponde a una desalineación angular de 0.4°. Ver Figura 53, Foto 1

- Flecha del freno: El valor de desalineación es de 0.02 mm. Valor mostrado en la Figura 53, Foto 2.
- Acople que va del freno al motor, soportado sobre el eje del freno, la desalineación medida fue de 0.16 mm, tal como se muestra en la Figura 53, foto 3.
- Acople entre el eje del freno y el eje del encoder: Inicialmente se había instalado un acople tipo araña de aluminio como el de la Figura 53, foto 3, sin embargo la desalineación era extremadamente alta, de más de 0.40 en una longitud inferior a 30 mm, por tanto, se decidió cambiar el acople a uno estandarizado, seleccionando así un acople tipo araña marca Martin MS 050, el cual tuvo una desalineación de 0.02 mm para el cubo acoplado en el eje del encoder tal como se muestra en la Figura 53, foto 4.

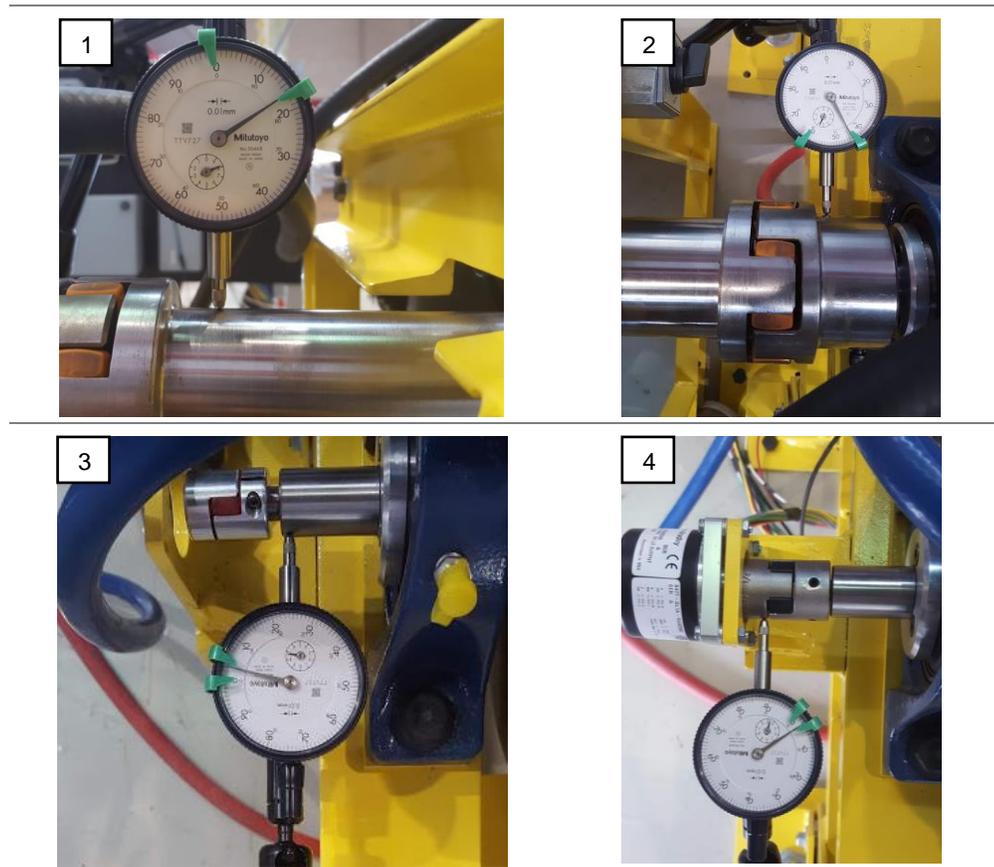


Figura 53. Medición de desalineaciones en los ejes de transmisión.

3.4.3 DOCUMENTOS PARA EL USUARIO

i. FICHA TÉCNICA DEL DINAMÓMETRO

A partir del diseño realizado y construido, en la Tabla 51 se lleva a cabo una comparación entre los valores obtenidos en el diseño final y los planteados en las especificaciones establecidas en el numeral 3.1.3 del Capítulo 3 – Establecimiento de necesidades, requerimientos y especificaciones

Tabla 51. Ficha técnica del dinamómetro

Parámetro	Unidades	Valor final	Valor propuesto
Dimensiones del montaje con motor/vehículo	m ³	1.8 x 1.7 x 1	2 x 3 x 2
Dimensiones del montaje sin motor/vehículo	m ³	1.8 x 1.2 x 1	2 x 1 x 0.5
Rango de altura de acoplamiento	m	0.51 – 0.65	0.3 – 0.8
Rango de aproximación horizontal	m	0.35	0.2 – 0.5
Peso	kg	140 sin motor	200
Número de acoples para motores	#	1	>1
Rigidez	kN/mm	N/A	5
Frecuencia de vibración admisible	Hz	No medida	20
Desalineación entre ejes, axial y angular	mm / °	0.18 / 0.4°	0.1 / 1
Rango y error en medición del torque	Nm	0-350 ± 0.04%	0-350 ± 0.5%
Rango y error en medición de la velocidad angular	rpm	0-9.000	0-12.000 ± 0.2%
Rango y error de medición de potencia	kW	0-200 ± 0.04%	0-150 ± 0.7%
Rango y error de medición del flujo de combustible	g/h	2.93-50 ± 10%	0-1 ± 1%
Tiempo máximo de operación continua	min	30	60
Frecuencia de adquisición de datos	Hz	100 máx	> 10
Temperatura del agua del dinamómetro	°C	Entrada < 21 Salida < 25	Entrada < 21 Salida < 54
Presión y caudal del agua del dinamómetro	psi / gpm	40 - 80 / 20	>27.5 / 20
Capacidad de almacenamiento de datos	Mb	100	34
Cumplimiento de estándares de calidad y seguridad	Si – No	SAE J1349	EN62061 SAE J1349 EC 1999/99
Voltaje de alimentación eléctrica	V	12 Vdc - MCI 120 Vac – Panel	12 Vdc 120 Vac
Periodos de mantenimiento	h	500 h – hoja de bitácora	500
Tiempo de alistamiento de motor y equipos	min	20	30
Caudal de flujo de extracción de gases	$\frac{\text{cm}^3}{\text{s}}$	N/A	0-20
Concentración de CO y NO ₂	ppm ppm	N/A N/A	< 35 < 5
Temperatura de operación del motor	°C	< 80	< 80
Rango y error de medición de HR y temperatura ambiente	% °C	0-100 -10-700 ± 1	0-100 0-200 ± 1

ii. HOJA DE RESULTADOS PARA EL USUARIO

La información de la hoja de resultados se basó en los requerimientos mínimos presentes en el estándar SAE J1349. En la *Tabla 52* se muestran los parámetros fijos a considerar para las pruebas con ejemplo los valores obtenidos en una prueba del motor Kawasaki.

Tabla 52. Información solicitada para las pruebas.

<i>Información General</i>	
Parámetro	Valor
Fecha de la prueba	27/06/2016
Número de serial del motor	ZX600PE001097
Número de prueba	1
Ubicación	Unidad de Alta Tecnología
Equipamiento adicional al presente en el numeral 6.1 del estándar	Radiador, Alternador, ventilador de refrigeración, motor de arranque,
<i>Descripción del motor</i>	
Desplazamiento, V_d [cm ³]	599
Diámetro x carrera, $B \times L$ [mm]	67 x 42
Número y configuración de cilindros, n	4 en línea
Tipo de ignición (Chispa, Diésel)	Chispa
Ciclo de combustión (2tiempos, 4 tiempos)	4 T
Sistema de combustible	Inyección indirecta
Tren de válvulas	16 válvulas
Tipo de admisión	Aspiración natural
Carga de refrigeración de aire	N/A
Sistema de ventilación del motor	Refrigeración líquida
Sistema de control de golpeteo	N/A
Mínimo contenido de octanaje recomendado por fabricante	95
<i>Combustible líquido – Motor encendido por chispa</i>	
Tipo de combustible o mezcla	Gasolina
Octanaje combustible (RON, MON)	93
Relación H:C	2.25
Densidad de combustible, [kg/m ³] / gravedad específica a 15°C	680 / 0.68
Poder calorífico inferior, [MJ/kg]	42
<i>Combustible gaseoso – motor encendido por chispa</i>	
Tipo de combustible	N/A
Composición	N/A
Densidad a 15°C y 101 kPa	N/A
Poder calorífico inferior	N/A
<i>Combustible diésel</i>	
Grado del combustible ASTM	N/A
Densidad a 15°C	N/A
Viscosidad a 40°C	N/A
Poder calorífico inferior (opcional)	N/A
<i>Aceite lubricante</i>	
Clasificación API	SM/SL/SJ
Grado de viscosidad SAE	SAE 10w-40
Marca	Lucas
<i>Refrigerante del motor</i>	
Tipo de refrigerante	Líquido
Porcentaje de mezcla	50 / 50
Marca	Autozone

<i>Calibraciones y mediciones en el banco de pruebas</i>	
Presión del sistema de escape	N/A
Calibración de la celda de carga	27/06/2016
Calibraciones de transductores de presión	N/A
Calibraciones de termopares	N/A
Calibración del medidor de flujo de combustible	10/06/2017

Para el caso de parámetros medidos y obtenidos del banco de pruebas, que se considera la segunda parte de la hoja de resultados, se enuncian en la *Tabla 53*, los valores registrados corresponden a valores máximos o mínimos, para un mayor detalle del comportamiento de la prueba, se recomienda revisar las curvas características obtenidas.

Tabla 53. Datos recopilados en pruebas

<i>Mediciones</i>	
Velocidad del motor, N [rpm]	15420 max
Torque al freno [Nm]	37.4 @ 13240 rpm
Torque de fricción	N/A
Relación aire combustible	NO
Avance de chispa, tiempo de inyección	NO
Temperatura y presión ambiente [°C, kPa]	22 / 100.8
Temperatura y presión aire admisión	NO
Presión de vapor de agua de admisión	NO
Temperatura del combustible en el medidor de flujo	NO
Temperatura y presión del riel de combustible [psi]	80
Temperatura de entrada y salida del refrigerante de motor	NO
Temperatura y presión de aceite a bombear	NO
Temperatura de gases de escape	NO
Presión en el múltiplo de escape	NO
Opacidad (Opcional diésel)	N/A
<i>Cálculos</i>	
Torque corregido, T_{bc} [Nm]*	36.4 max
BMEP observada, $BMEP$ [kPa]	784 kPa
BMEP corregida, $BMEP_c$ [kPa]	763 kPa
Potencia al freno observada, P_{bo} [kW]	52 @ 13283 rpm
Potencia al freno corregida, P_{bc} [kW]	50.62
Factor de corrección SAE J1349, CA	0.977**
Flujo de masa de aire, \dot{m}_a [g/s]	N/A
Flujo volumétrico de combustible, [L/h]	33.4 max
Flujo másico de combustible, [g/s]	6.31 max
Consumo específico de combustible, BSFC [g/kWh]	1.32 min
Velocidad lineal del pistón, \bar{S}_p [m/s]***	21.5 m/s

* Se calcula adicionalmente el torque estimado en el cigüeñal.
** Utilizando los valores atmosféricos generales según la red de monitoreo de calidad del aire de Querétaro.
*** Se incluyó a pesar de no estar en el estándar, para llevar a cabo las gráficas de parámetros normalizados.

CAPÍTULO 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

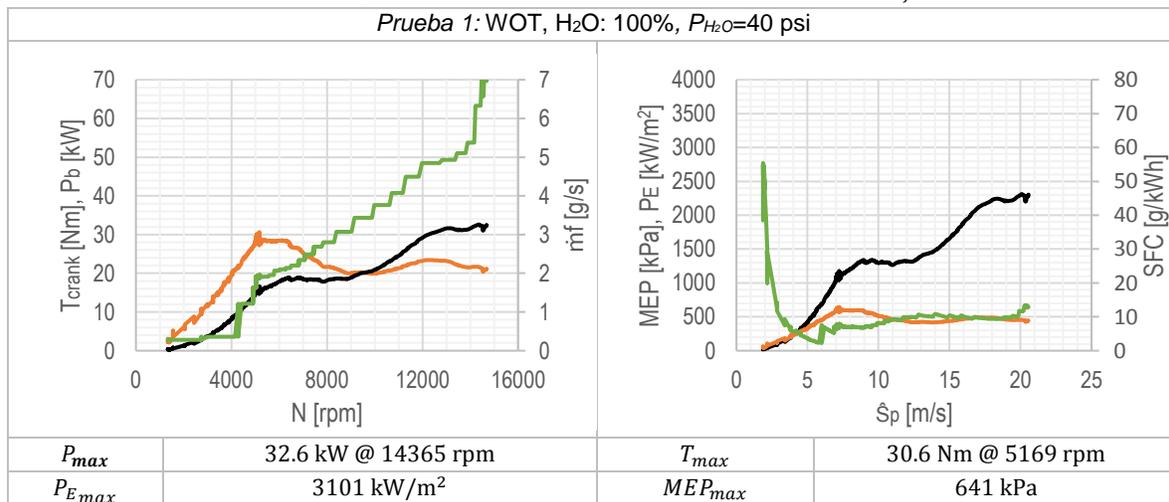
El banco de pruebas diseñado y construido se constituye como una alternativa para la prueba de motores livianos de alto desempeño, y a la fecha se encuentra operativo y caracterizado en su totalidad, a partir del montaje sobre un MCI, de uso típico en Fórmula SAE; el banco cuenta con una versatilidad en las pruebas a realizar, ya que permite la obtención de datos en tiempo real de potencia, torque, velocidad de giro y consumo de combustible, este último un plus que los dinamómetros ofrecidos en el mercado no cubren. El banco está en la capacidad de desarrollar pruebas estáticas como dinámicas, asimismo mediciones de larga duración evitando problemas identificados como el deslizamiento y recalentamiento de ruedas. Se identificaron desventajas en la versatilidad para ser usado en otros motores, en el comportamiento del frenado a bajas velocidades de giro de la PAU, en el complejo control de la carga y en la alimentación de agua sobre la PAU.

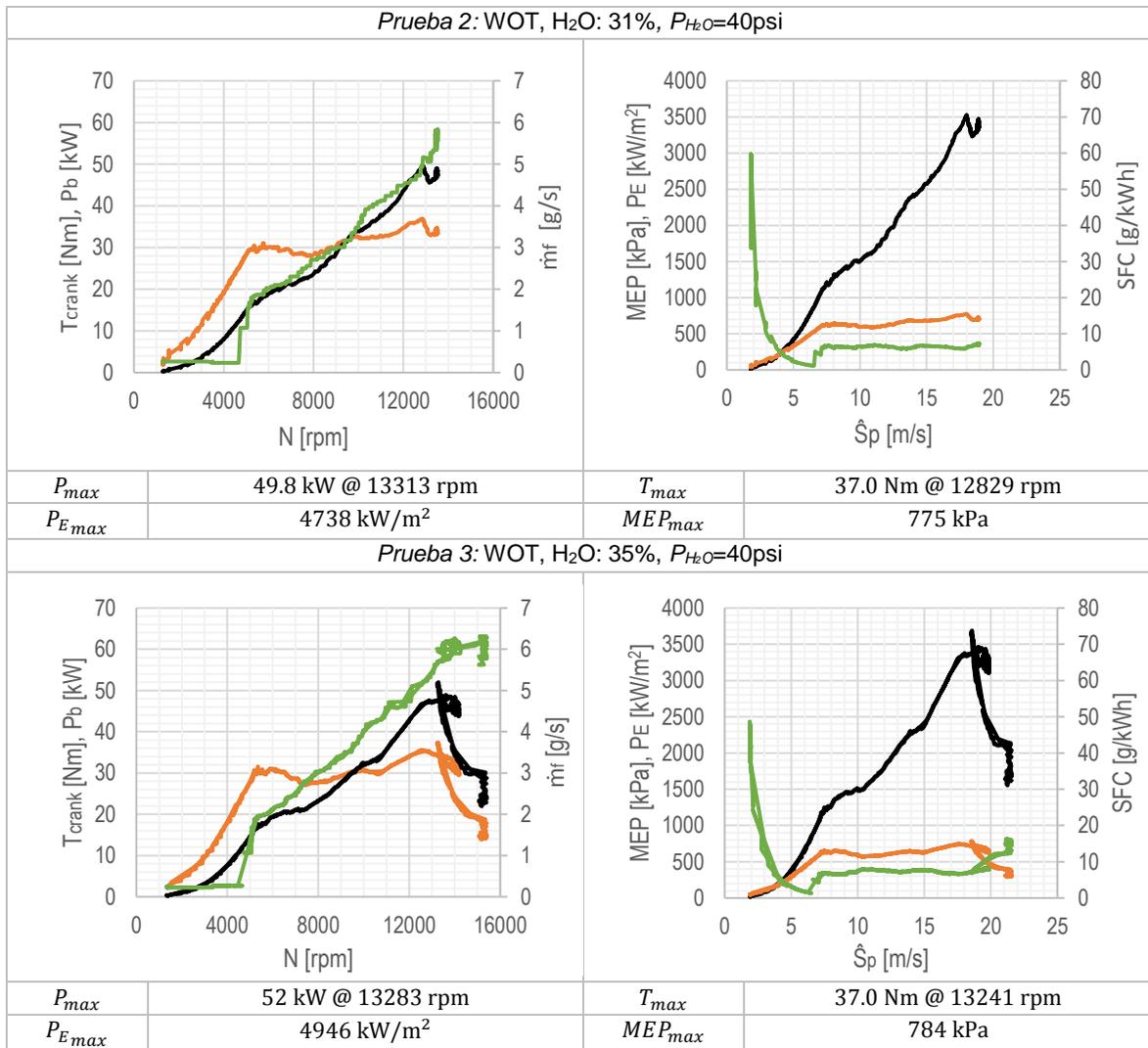
En éste capítulo, se profundiza en el análisis y discusión de resultados, los cuales se extienden sobre dos secciones, la primera se centra en el análisis de los datos obtenidos del banco en las pruebas de desempeño dinámicas y estáticas del motor evaluado, donde se enmarca el alcance que se puede tener a la fecha con el dispositivo; la segunda, en el análisis del comportamiento de los subsistemas del banco de pruebas, donde se muestran los aportes y limitaciones del diseño, formulando así recomendaciones para quienes continuarán con el uso del dinamómetro.

4.1 ANÁLISIS DE PRUEBAS DE DESEMPEÑO

Para analizar el banco de pruebas se llevaron a cabo pruebas dinámicas y estáticas, en el caso de las pruebas dinámicas fueron curvas de desempeño con la mariposa totalmente abierta, en sexta velocidad y a diferentes cargas (% apertura de la válvula de entrada del agua) del dinamómetro, tal como se muestra en la Tabla 54 bajo 3 condiciones, 1. WOT con 100% apertura, 2. WOT con 31% de apertura y 3. WOT con 35% de apertura.

Tabla 54. Curvas de desempeño obtenidas en el dinamómetro de banco.
 Línea negra: $P_b - P_E$. Línea naranja: $T_{crank} - MEP$. Línea verde: $\dot{m}_f - SFC$





En términos generales, para ningún caso de las pruebas realizadas se logró obtener las potencias y pares máximos esperados para el motor, que según lo visto en el Capítulo 3.1.3, literal ii, los valores deberían estar cercanos a 87 kW a 12300 rpm y 71 Nm a 11300 rpm respectivamente, esto se sustenta en el hecho del bajo nivel de flujo de agua obtenido del sistema de refrigeración y alimentación de agua del freno, que según los parámetros presentados en la pantalla del Frigel, llegan a valores de 23 L/min, inferiores a los recomendados por el fabricante del freno, que son 37.8 L/min por cada 74.5 kW (100 hp) a disipar.

Por otra parte, analizando los valores obtenidos, la curva de potencia máxima para la prueba 1 está por debajo un 40% en comparación a los otros dos casos, a pesar de tener el 100% del agua circulando desde el inicio de la prueba, esto sucede porque la carga sobre el freno fue decreciendo al momento de estar a 5100 rpm aproximadamente, y al momento del par del motor ser mayor se incrementa la velocidad abruptamente con la carga constante. Para los casos 2 y 3 las curvas son similares, donde únicamente lo que se varió fue la carga de la válvula, llegando a los mismos valores de torque a diferentes regímenes.

Por otra parte, en el caso de las velocidades de operación, se calcularon como la velocidad real medida multiplicada por la relación de transmisión para así obtener los datos de la velocidad del cigüeñal, en el caso del par motor se operó de la misma forma, con la desventaja que este tipo de correcciones no es admisible según el estándar SAE J1949, pero se optó en llevarlas a cabo ante la imposibilidad de una transmisión directa al eje del cigüeñal al tener un embrague húmedo y optar así por una transmisión directa al eje de salida de la caja de velocidades.

De lo anterior, se identifican dos aspectos, primero es el alto impacto del control del flujo del agua sobre el dinamómetro, para lo que el sistema Frigel queda limitado en su control, no obstante, está pendiente la revisión del comportamiento de la carga del freno a mayores flujos, para conocer si cubre las potencias a disipar para todo el régimen de velocidad de operación del motor a la salida del eje de la caja de velocidades.

4.2 ANÁLISIS DE LOS SUBSISTEMAS DEL DINAMÓMETRO

4.2.1 SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico implementado, tiene limitantes en el suministro de agua a altas cargas del motor, quedando subdimensionado para las aplicaciones del frenado en motores de más de 50 kW, por tanto, es necesaria la consideración de la instalación independiente al chiller del circuito de refrigeración, optando como segunda opción la presentada en el diseño conceptual que es tener una bomba conectada directamente al tanque de almacenamiento con las líneas de retorno y de alivio conectadas directamente sin restricciones.

4.2.2 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

El sistema de transmisión implementado sirve para acoplar únicamente motores con eje de salida de 13 dientes, para otros ejes es necesario contar con un nuevo eje maquinado a las especificaciones de la salida. Las ventajas de tener un solo eje se muestran en la menor cantidad de piezas requeridas en una flecha de conexión, además de que no se tienen elementos de unión como bridas que estén en la parte externa que puedan desaflojarse en operaciones continuas y de alta exigencia, ya que la unión se hace internamente del eje con una tuerca soportada directamente a la flecha de salida de la caja de velocidades.

Al tener un acople que no está directamente unido al cigüeñal, las correcciones de potencia y torque presentes en el estándar SAE J1349 no son aplicables, desde un principio se conocía las incidencias de no acoplar el freno directamente a la salida del cigüeñal expresando como ventajas que la intervención sobre el motor es menor en el caso de la unión sobre la caja de velocidades que si hubiese sido directo al cigüeñal, donde se requeriría el cambio de la tapa de sellado del embrague, que es de tipo húmedo.

4.2.3 ESTRUCTURA DE SOPORTE

La estructura de soporte del freno es independiente de la que soporta el motor, con ventajas en las menores vibraciones que llegan al freno, ya que se disipan por el acople flexible que une los dos cubos de transmisión, por ende, los instrumentos de medición presentan un buen comportamiento de las señales obtenidas.

Por otra parte, con la actual estructura se pueden alojar motores de cuatro cilindros similares al Kawasaki ZX6R montado actualmente, tales como el motor Yamaha R6 con el que cuenta actualmente el vehículo de UNAM Motorsports, u otros como el Suzuki CBR600.

Para otro tipo de motores es necesario diseñar y construir soportes nuevos, para lo cual todas las juntas de soporte de la estructura son atornilladas y permite un intercambio sencillo y rápido.

La estructura del freno puede ser utilizada en futuros proyectos como en dinamómetros de rodillos o de cubos, ya que toda la instrumentación está acoplada sobre esta y no sobre el motor o vehículo a evaluar.

Es necesario aislar las estructuras de prueba, por motivos de seguridad con quienes operan el banco de pruebas.

4.2.4 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Los datos se adquieren a una frecuencia de muestreo de 100 Hz, para todos los sensores, la adquisición se hace en tiempo real, donde se obtiene un archivo fuente en extensión *.csv para su posterior procesamiento, está pendiente para trabajo posterior, llevar a cabo el procesamiento instantáneo de los datos adquiridos para que se presenten las curvas de desempeño en un menor tiempo una vez se termine cada prueba.

Por otra parte, en el caso de los sensores, todos están caracterizados y cubren completamente las especificaciones presentes en el estándar SAE J1349, con valores inclusive 10 veces por debajo de los valores permitidos en el estándar.

En el caso del sensor de flujo de combustible, las curvas reales obtenidas fueron completamente diferentes a las presentadas en la hoja de especificaciones, para tener una mayor refinación del comportamiento del sensor en bajos flujos, inferiores a 3 L/h se recomienda llevar a cabo pruebas comparativas entre flujos, utilizando probetas de mayor resolución o ampliando el tiempo de medición, asimismo es necesario acortar la línea de combustible para disminuir el efecto de las mangueras sobre el volumen medido.

Para la celda de carga, su calibración se realiza cuando se desmonta de la palanca del freno, por lo cual, para futuras mejoras en el banco de pruebas, se recomienda instalar un soporte removible para calibrar la celda montada sobre el freno, utilizando las pesas patrón existentes.

Para futuro trabajo, se recomienda obtener las señales del motor, caso que se ha realizado de forma independiente para cada uno de los sensores con los que cuenta el motor, sin embargo, no están consolidados aún para su adquisición en una sola tabla.

4.2.5 SISTEMA DE CONTROL

El dinamómetro cuenta con un panel de instrumentos donde se llevan a cabo las acciones de encendido del motor, aceleración del motor, control del flujo de agua, control de la presión del agua y visualización de los datos adquiridos.

El encendido del motor se lleva a cabo abriendo todos los interruptores, uno es para energizar la ECU y los sistemas, otro es para el encendido de la bomba de combustible y un último para habilitar la operación del motor en condiciones estáticas, recordando que tiene sensores para inhabilitar su funcionamiento en el caso de estar detenido si estuviera montado sobre una motocicleta, además de los interruptores, presionando un botón de encendido se acciona el motor de arranque, Si llega a haber algún inconveniente donde se necesite apagar el motor de forma imprevista e instantánea, el panel cuenta con un botón de pánico, el cual está a la mano del operador del dinamómetro.

La aceleración del motor se lleva a cabo con un mando manual que girando acciona la mariposa el cual regresa a la mínima posición cuando no se está accionando, Para trabajo futuro, se recomienda diseñar el mecanismo para mantener la manija en un punto fijo a conveniencia del usuario.

El control del flujo y presión del agua se encuentran en el panel de instrumentos, para ello se aislaron completamente los componentes eléctricos y electrónicos en el caso de que accidentalmente se llegara a presentar fugas.

Hay dos subsistemas de control pendientes de diseño y fabricación, los cuales son el mecanismo de control del embrague y el mecanismo para el cambio de las velocidades de la transmisión.

4.2.6 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN

El sistema de refrigeración es el OEM, y ha funcionado adecuadamente, no obstante, para pruebas de larga duración o de altas cargas, es recomendable tener un ventilador centrífugo instalado en frente del radiador para mejorar la transferencia de calor y tener temperaturas adecuadas de funcionamiento en el motor

4.2.7 SISTEMA DE GASES DE ESCAPE

Actualmente, se utiliza una manguera metálica flexible para la extracción de gases de escape del laboratorio, solución que ha permitido desarrollar todas las pruebas durante la ejecución del presente trabajo, por lo que para su operación siempre es necesario abrir la cortina del laboratorio, mover la manguera y acoplarla al motor. Por tanto, para futuras mejoras, se recomienda realizar un sistema fijo de extracción de los gases.

CONCLUSIONES

Se desarrolló el diseño y la fabricación de un banco de pruebas para motores ligeros de alto desempeño, adecuado específicamente para un motor Kawasaki ZX-6R modelo 2008, el cual fue seleccionado a partir de la comparación entre motores típicos utilizados en la competencia de Fórmula SAE, el motor se adecuó al banco conservando sus sistemas de admisión, escape y refrigeración de fábrica, mientras que se modificaron el sistema de control sobre la mariposa principal de aceleración, la palanca de cambios, el accionador del embrague y el arnés eléctrico para que su funcionamiento se pudiera llevar a cabo en la forma estacionaria.

El diseño del banco de pruebas se llevó a cabo en cuatro etapas, partiendo de la identificación de necesidades y definición de especificaciones de diseño, seguido de las etapas de diseño conceptual y de detalle y por último la fabricación y pruebas sobre el diseño final. El banco de pruebas mide torque, potencia, velocidad de giro del motor, consumo de combustible cumpliendo con los requerimientos del estándar SAE J1349 de 2004 para pruebas de desempeño.

Para la medición del torque se utilizó una celda de carga triaxial disponible en la UAT, que en la configuración diseñada con el freno hidráulico, tiene un rango de medición de torque de 0-350 Nm y una precisión de 0.04%, por tanto se pueden probar motores como los especificados en el capítulo 3.1.3 y en general, idealmente a vehículos o motores de hasta 200 hp y 350 Nm de torque, la medición del torque se validó a partir de pruebas independientes a la celda de carga y pruebas con la celda de carga montada en el sistema y con diferentes pesas calibradas, de 5, 10 y 15 kg respectivamente, una vez realizadas las pruebas se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo de los resultados, mostrando la variabilidad del par medido y también del error de la medición, con valores de 0.69 lb-in por debajo del valor nominal y un error de ± 1.19 lb-in.

El dispositivo de absorción de potencia es un freno hidráulico de llenado variable de hasta 200 hp que se acopló directamente al eje de salida de la caja de velocidades del motor, y a su vez está acoplado a través de un brazo de palanca de 160 mm a la celda de carga, además se encuentra unido a través de un acople coaxial al encoder para la medición de velocidad angular; el control de la carga se resolvió a partir de dos válvulas que modifican el flujo de entrada y salida de agua, una de aguja a la entrada y una de tipo esfera a la salida, además, un regulador de la presión del flujo ubicado aguas arriba del freno. Se caracterizó el comportamiento hidráulico a partir de la medición del motor, con resultados de potencias máximas de frenado de 52 kW @ 5000 rpm (medido en sexta marcha) y una velocidad máxima de operación en el banco de pruebas de 6100 rpm

La transmisión de potencia entre el motor y el freno hidráulico se llevó a cabo a partir de un acople directo entre el eje de salida de la caja de velocidades y el freno, suprimiendo así accesorios de transmisión como cadenas, poleas y otros elementos rodantes, para el

montaje, se llevó a cabo la alineación a partir de un comparador de carátula los valores máximos de desalineación de 0.16 mm y angular de 0.4°.

La medición de la velocidad de giro del motor se realizó a partir de un encoder relativo de 2500 pulsos por revolución, que permite la medición a una velocidad máxima de 9.000 rpm, a partir de allí se establece el límite superior de la operación del banco de pruebas, la información de la velocidad medida por el encoder se validó a partir de la comparación con la velocidad tomada a partir del sensor del cigüeñal que viene de fábrica con el motor.

La medición del consumo de combustible se adquirió con un flujómetro de turbina de bajo costo, que tiene un rango de medición de 2.93 - 50 L/h a una precisión de $\pm 10\%$, se validó la información a partir de pruebas directas en la bomba de combustible a diferentes flujos medidos con una probeta y un cronómetro.

Se definieron las características de un motor de pruebas de alto desempeño y se escogió e implementó en el diseño un motor de motocicleta Kawasaki ZX-6R, ampliamente utilizado en aplicaciones de Fórmula SAE, el motor se adecuó de forma estacionaria a partir de una estructura metálica fijada al piso del laboratorio de forma independiente a la estructura del freno y la instrumentación, conservando el sistema eléctrico y de refrigeración del motor de fábrica.

La estructura de soporte del banco de pruebas consta de tres partes, la primera concerniente al soporte del motor y sus accesorios como el sistema de refrigeración, la batería, la computadora, el tanque de combustible y el regulador; la segunda parte es la estructura de soporte del freno hidráulico, donde además se encuentran soportados la celda de carga, el mecanismo para su accionamiento el encoder, el flujómetro de combustible y el medidor de presión de combustible; la tercera parte es la estructura que tiene los dispositivos de control y visualización de las variables del dinamómetro y el motor, allí se divide en el control sobre el encendido del motor, el control de la carga del freno, el control de la mariposa del motor y el computador donde se encuentra la plataforma de visualización de los resultados.

Se desarrollaron dos documentos para los futuros usuarios, el primero es la hoja de especificaciones del banco de pruebas, que en comparación a bancos de pruebas ya existentes se concluye que el diseño está por encima de las especificaciones, y el segundo, la hoja de resultados entregada al usuario al realizar las pruebas deseadas.

Para futuros trabajos queda la implementación de sensores no contemplados como el sensor de presión en la cámara de combustión, el sensor de oxígeno, los sensores de temperatura del freno hidráulico, entre otros, además de la cabina de insonorización junto al extractor de gases contaminantes.

REFERENCIAS

- [1] International Organization of Motor Vehicle Manufacturers, «OICA - Worldwide vehicles in use,» 02 2018. [En línea]. Available: <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>.
- [2] International Energy Agency, «Global EV outlook 2017,» OECD, IEA, 2017.
- [3] OICA, «International Organization of Motor Vehicle Manufacturers,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.oica.net/category/vehicles-in-use/>. [Último acceso: 13 05 2018].
- [4] Massachusetts Institute of Technology, On The Road toward 2050. Potential for Substantial Reductions in Light-Duty Vehicle Energy Use and Greenhouse Gas Emissions, J. Heywood y D. MacKenzie, Edits., Boston, Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2015.
- [5] R. Atkins, An Introduction to Engine Testing and Development, Warrendale, PA.: SAE International, 2009.
- [6] F. Payri y J. Desantes, Motores de combustión interna alternativos, Barcelona: Editorial Reverté, 2011.
- [7] R. Malhotra (ed.), Fossil Energy: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology, Springer, 2013.
- [8] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, McGraw-Hill, 1988.
- [9] Yamaha Motor de México , «Yamaha,» [En línea]. Available: <http://www.yamaha-motor.com.mx/xt1200zst.php>. [Último acceso: 01 04 2019].
- [10] Toyota GB, «Toyota media site,» [En línea]. Available: https://media.toyota.co.uk/wp-content/files_mf/1479303199TOYOTACHRTechSpec.pdf. [Último acceso: 04 01 2019].
- [11] D. Marter, Termodinámica y motores térmicos, Barcelona: Unión tipográfica editorial hispanoamericana, 1965.
- [12] M. Moran, H. Shapiro, D. Boettner y M. Bailey, Fundamentals of Engineering Thermodynamics., John Wiley and Sons, Inc., 2011.
- [13] B. Giechaskiel, M. Maricq, L. Ntziachristos, C. Dardiotis, X. Wang, H. Axmann, A. Bergmann y W. Schindler, «Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number,» *Journal of Aerosol Science*, vol. 67, pp. 48-86, 2014.
- [14] J. (. Álvarez y I. (. Callejón, Motores alternativos de combustión interna, Barcelona: Edicions UPC, 2005.

- [15] BMW, «BMW,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.bmw.com.kh/asia/en/newvehicles/x/x1/2015/showroom/engines.html>. [Último acceso: 10 04 2019].
- [16] L. Gardiner, «Bowling and Grippo,» BGSoflex, 2011. [En línea]. Available: <http://www.useasydocs.com/theory/spktable.htm>. [Último acceso: 03 04 2019].
- [17] x-engineer, «x-engineer.org,» [En línea]. Available: <https://x-engineer.org/automotive-engineering/internal-combustion-engines/performance/power-vs-torque/>. [Último acceso: 09 04 2019].
- [18] United States Environmental Protection Agency, «EPA,» [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-10/ftpcol.txt>. [Último acceso: 09 04 2019].
- [19] J. May, D. Bosteels y C. Favre, «An Assessment of Emissions from Light-Duty Vehicles using PEMS and Chassis Dynamometer Testing,» *SAE International Journal Engines*, vol. 7, nº 3, pp. 1326-1335, 2014.
- [20] G. Triantafyllopoulos, A. Dimaratos, L. Ntziachristos, Y. Bernard, J. Dornoff y Z. Samaras, «A study on the CO₂ and NO_x emissions performance of Euro 6 diesel vehicles under various chassis dynamometer and on-road conditions including latest regulatory provisions,» *Science of the Total Environment*, vol. 666, pp. 337-346, 2019.
- [21] J. Mantilla, J. Roncancio y H. Acevedo, «Análisis comparativo del desempeño y emisiones de un motor diesel de gran capacidad operando bajo dos escenarios: trabajo en ruta activa y trabajo en banco,» *INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN*, vol. 30, nº 1, pp. 118-124, 2010.
- [22] R. B. Carlson, J. Wishart y K. Stutenberg, «On-Road and Dynamometer Evaluation of Vehicle Auxiliary Loads,» *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, vol. 9, nº 1, pp. 260-268, 2016.
- [23] DieselNet, «DieselNet,» 17 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.dieselnets.com/standards/>.
- [24] A. Martyr y M. Plint, Engine testing, the design, building, modification and use of powertrain test facilities, 4th ed ed., Elsevier, 2012.
- [25] P. Hodgson y J. Raine, «Computer simulation of a variable fill hydraulic dynamometer Part 3: closed loop performance,» *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 206, pp. 327-336, 1992.
- [26] P. Hogdson y J. Raine, «Computer simulation of a variable fill hydraulic dynamometer. Part 2.: steady state and dynamic open-loop performance,» *Journal of Mechanical Engineering Science*, pp. 49-56, 1991.

- [27] M. Vetr, T. Passenbrunner, H. Trogmann, P. Ortner, H. Kokal, M. Schmidt y M. Paulweber, «Control oriented modeling of a water brake dynamometer,» *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 222-227, 2010.
- [28] K. Ulrich y S. Eppinger, *Product Design and Development*, Quinta ed., McGraw Hill, 2012.
- [29] D. Ullman, *The Mechanical Design Process*, Cuarta ed., McGraw Hill, 2010.
- [30] SAE International, «SAE J1349. Engine Power Test Code - Spark ignition and Compression ignition - Net Power Rating,» SAE Power Test Code Committee, 2004.
- [31] Stuska Dynamometers, «Stuska Water Brakes.,» [En línea]. Available: <http://www.stuskadyno.com/wp-content/uploads/2015/11/waterbrake2.pdf>. [Último acceso: 2018].
- [32] Stuska Dynamometers, «XS-19 High-Performance Engine Dynamometer. Installation and Operator's Manual,» 2005.
- [33] Futek Advanced Sensor Technology, Inc., «Futek - Products,» 2018. [En línea]. Available: <http://www.futek.com/product.aspx?t=multicomponent&m=mta400>. [Último acceso: 12 10 2018].
- [34] SENECA s.r.l, «Z-SG Strain Gauge Converter,» Seneca MI00120 -E, Padova - Italia.
- [35] Motorcycle Performance Analyzer, 2018. [En línea]. Available: <http://motorcycleperformanceanalyzer.com/>.
- [36] A. Bergst, J. Childers, J. Petelinsek, A. D. Petelinsek, D. Strain y G. Johnson, «CHASSIS DYNAMOMETER». United States Patente US 6,860,145 B2, 01 03 2005.
- [37] K. Barnes y S. Gibson, «DUAL-PURPOSE DYNAMOMETER». United States Patente US 9,752,961 B2, 05 09 2017.
- [38] H. Yunick, «APPARATUS AND METHOD FOR TESTING COMBUSTION ENGINES». United States Patente US 5,515,712 A, 14 05 1996.
- [39] M. Zenobi, «TEST CHAMBER FOR MOTOR VEHICLE ENGINES». United States Patente 6,023,890, 15 02 2000.
- [40] P. Arseneau, «PORTABLE ON VEHICLE DYNAMOMETER». United States Patente US8505374B1, 13 08 2013.
- [41] Performance Electronics Ltd., «The PE3 Series User Manual».
- [42] R. Mott, *Machine Elements in Mechanical Design*, Cuarta ed., New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2004.
- [43] Futurlec, «Futurlec.com,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.futurlec.com/FLOWFUEL30L0.shtml>. [Último acceso: 10 2018].

ANEXO 1. FACTORES DE CONVERSIÓN: PARÁMETROS ESPECÍFICOS A NORMALIZADOS

De torque a presión media efectiva MEP:

$$MEP = \frac{P_b n_R}{V_d N}$$

De potencia a potencia específica:

$$P_E = \frac{P_b}{n A_p}$$

De velocidad angular a velocidad media del pistón, \bar{S}_p :

$$\bar{S}_p = 2LN$$

De consumo de combustible a consumo específico de combustible, SFC:

$$SFC = \frac{\dot{m}_f}{P}$$

ANEXO 2. RESPUESTAS CUESTIONARIOS – IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES

CUESTIONARIO 1. COMPILACIÓN DE RESPUESTAS

El cuestionario fue respondido por siete personas, se resaltan las siguientes respuestas:

Pregunta 2. ¿Qué pruebas realizas sobre tus vehículos/motores al llevarlos al dinamómetro?

Más del 50% de las personas realiza dos tipos de prueba, de emisiones y de desempeño, usualmente las de emisiones se relacionan a pruebas de verificación automotriz obligatoria, mientras que en el caso de desempeño se realizan por modificaciones a los motores

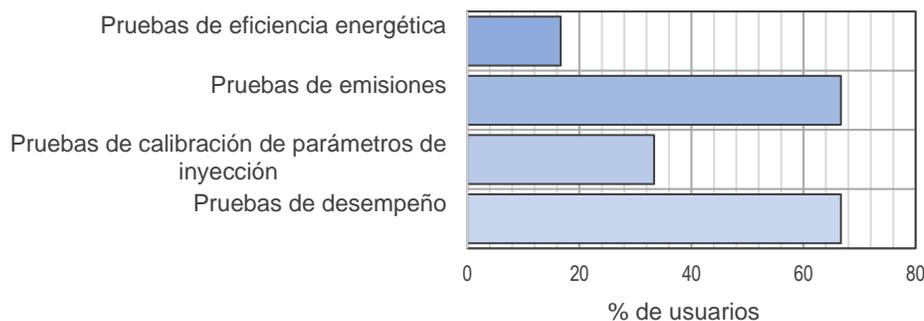


Figura 54. Personas que utilizan dinamómetros para diferentes tipos de prueba.
Fuente: Elaboración propia.

Pregunta 3. ¿Qué consideras se puede mejorar en el proceso de ejecución de las pruebas sobre tu vehículo/motor?

- (1) “Se podría mejorar el tema de emisiones de contaminación, aunque algunos talleres ya cuentan con ductos e insonorizantes la gran mayoría sigue como hace muchos años.”
- (2) “La repetibilidad y confiabilidad, así como facilitar el montaje de equipos de emisión.”
- (3) “Portabilidad del dinamómetro ya que al ser equipo especializado (al menos para el usuario común) es difícil encontrar uno.”
- (4) “La veracidad en los resultados.”

Pregunta 4. ¿Cuánto es el precio promedio por cada una de las pruebas que ofrecen?
¿Crees que el precio de este servicio es alto, bajo o justo?

¹Según los resultados de los encuestados, el precio en el que se encuentran las pruebas en dinamómetro oscila entre 25 USD y 166 USD para pruebas básicas y para pruebas de todo un día están entre 1.000 y 5.000 USD.

Pregunta 5. ¿Qué inconvenientes o disgustos has tenido durante las pruebas con dinamómetros?

- (5) “Las sondas de medición de combustible están demasiado contaminadas y las lecturas no son correctas, haciendo que los motores queden pobres y se lleve a daños internos.”
- (6) “La confiabilidad del equipo, la disponibilidad del equipo y del personal de operación. La recolección de datos del banco vs los equipos de emisiones.”
- (7) “Falta de ventilación, falta de elementos de seguridad, precios excesivos y personal muy mal capacitado.”
- (8) “El costo y que no se les tiene mucha confianza a los verificadores.”

Pregunta 6. ¿Tienes algún comentario, pregunta o inquietud?

- (9) “¿Cómo resolver la dificultad presentada respecto de los ciclos urbanos con el comportamiento en vía y la tendencia a dinamizar las pruebas en ruta en detrimento de las pruebas en Banco?”
- (10) “¿Por qué es tan caro utilizar un dinamómetro?”
- (11) “¿A qué se debe que estén incrementando las verificaciones vehiculares?”

CUESTIONARIO 2. COMPILACIÓN DE RESPUESTAS

La encuesta fue resuelta por siete personas y los resultados se presentan de forma general a continuación:

Pregunta 2. ¿Qué pruebas realizas o gestionas sobre los vehículos/motores en dinamómetro?

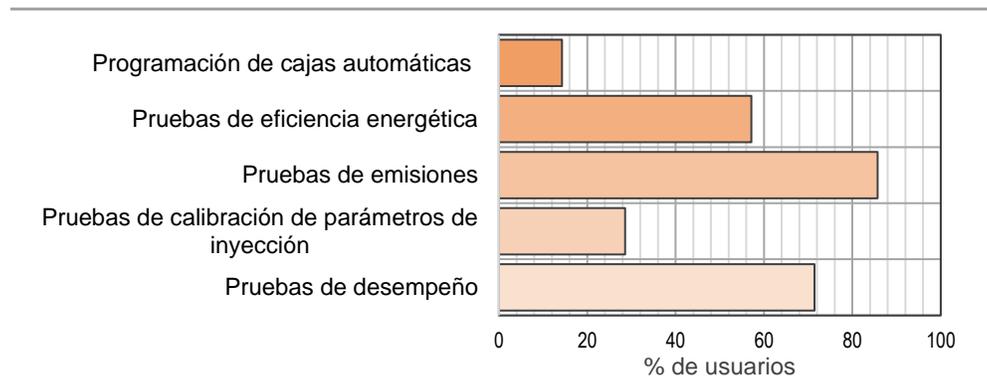


Figura 55. Porcentaje de entidades que realiza pruebas con dinamómetros.

Fuente: Elaboración propia.

Pregunta 3. De los dinamómetros que conoces para la evaluación de vehículos o motores, ¿Han requerido modificaciones en la bodega/laboratorio para la instalación?

En la Figura 56 se muestra el resultado de la pregunta, siendo parejo con un 43% de respuestas que sí han requerido modificaciones en el espacio de trabajo y otro 43% respondió que no.

¹Los resultados relacionados a costos se unificaron en dólares estadounidenses - USD.

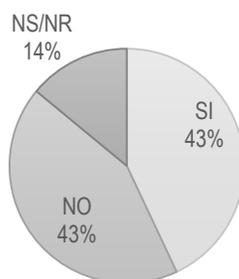


Figura 56. Respuesta: Modificaciones espaciales en las instalaciones de un dinamómetro.

A continuación se presenta de forma detallada las respuestas literales a la pregunta ¿Qué modificaciones?:

- (12) “Sí. Se requiere realizar el montaje del dinamómetro en una estructura lo suficientemente robusta para su uso”
- (13) “Conocí dos: i) Dyno mite Motorcycle & ATV, el cual se empleó durante la ejecución de las pruebas controladas de ciclos de manejo realizadas para la medición de emisiones en motocicletas de cuatro (4T) tiempos, y el ii) Dinamómetro de Chasis MD-250 Mustang empleado para medir emisiones en vehículos de transporte público de 160 pasajeros. Para éste último, fue necesario reparar un pieza completa donde el eje va solidario al rodillo, retrasando la campaña de medición.”
- (14) “No, las modificaciones que se hicieron necesarias han sido por mala instalación y mantenimiento nulo.”
- (15) “Sí, adecuación para manejo de fluidos, adecuación para gases de escape, adecuaciones para cumplir normativas de seguridad”

Pregunta 4. ¿Cuánto es el costo de las adecuaciones en las instalaciones en comparación al costo del dinamómetro?

- (16) “Es casi del mismo valor. Dinamómetro de rodillos”
- (17) “La operación diaria del dinamómetro de chasis MD-250 Mustang oscila en 250 USD² (año 2013). Ahora bien, el costo de los servicios de la calibración es del orden de los 4.700 USD (año 2013)”
- (18) “El costo del espacio es menor que el equipo para cualquier tipo de dinamómetro, pienso que en ultimas se necesita el mínimo espacio para el vehículo y que este cubierto de la intemperie. Asumiendo que el dinamómetro comprende (freno, control, fuente de energía y sistema de refrigeración).”

Pregunta 5. ¿Qué inconvenientes has tenido durante pruebas con dinamómetros en vehículos?

Se identificaron problemas de sobrecalentamiento de ruedas además de inconvenientes relacionados al calentamiento de la PAU y adecuación para diferentes tipos de vehículos. A continuación se resaltan las respuestas literales obtenidas de las personas que respondieron el cuestionario.

- (19) “Sobrecalentamiento de llantas, del sistema de frenado, del sistema de bloqueo de rodillos para retirar el vehículo.”
- (20) “Reparación de piezas - Calentamiento de neumáticos - Falta de calibración de la PAU”
- (21) “Desgaste excesivo de las ruedas, calentamiento alto de la unidad de frenado, sistema de refrigeración limitado o insuficiente.”
- (22) “Calibración de equipos, adecuación a tamaños y tipologías de vehículos”
- (23) “No he tenido inconvenientes directamente, peros si se ha evidencia que la estimación de factores de emisión en bancos dinamométricos no representa en muchos casos las condiciones a las que los vehículos se encuentran expuestos en las calles, como cambios continuos de las condiciones de carga (para vehículos de transporte público), diferentes condiciones de tráfico.”

² Los resultados fueron dados en COP y se convirtieron a USD.

Pregunta 6. ¿Qué mejoras le harías a los dinamómetros que tienes actualmente en tu laboratorio o en los laboratorios que conoces?

Las mejoras presentadas son en tres grandes aspectos, relacionada a la cantidad de pruebas tipo a ejecutar, mejoras mecánicas y mejoras de gestión relacionadas a procedimientos. Algunas respuestas literales se muestran a continuación:

- (24) "Mejorar el sistema de refrigeración de la unidad de frenado y ruedas. Sistema de climatización para simular más condiciones. Posibilidad de realizar pruebas de coastdown . Evaluar regeneración de energía en vehículos híbridos y eléctricos."
- (25) "En los laboratorios ya construidos, es indispensable el desarrollo y la implementación juiciosa de protocolos que garanticen, condiciones seguras en el montaje, la instalación de equipos de medición; así como la calidad el procesamiento de calibración de la unidad PAU y la recolección y procesamiento de datos, etc."
- (26) "Mejorar sistema de refrigeración, implementar plan de mantenimiento apropiado y capacitación de personal."
- (27) "Mejor disposición del cableado de componentes, facilidad de mantenimiento y flexibilidad de las mediciones"
- (28) "Ojalá estos bancos, pudieran ser trasladados fácilmente, ya que la adquisición de los vehículos para las pruebas está condicionada a la disponibilidad del dueño del vehículo. Por ejemplo, poder ser trasladados a los patios de mantenimiento y parqueo de los vehículos de transporte"

Pregunta 7. ¿Podrías comentar el proceso y tiempo de alistamiento de los vehículos/motores y del dinamómetro para hacer las pruebas esperadas?

"Alistamiento de dinamómetro: 30 min. Montaje de vehículo en dinamómetro: 15 min. Instrumentación del vehículo para pruebas de emisiones: 1 hora. Realizar varias repeticiones en diferentes condiciones de carga: 3 - 5 horas. Desmontaje de instrumentos: 30 min. Desmontaje de vehículo. 15 min."

"El tiempo destinado para ejecución de las pruebas de emisiones era de 1-2 día/vehículo aprox., dependiendo la disponibilidad de los propietarios de los vehículos. El ing. Luis Guillermo, integrante del grupo de investigación, desarrolló un procedimiento detallado que para las pruebas sobre dinamómetro. El procedimiento contaba con las siguientes actividades: 1. Diligenciar los respectivos formatos de caracterización antes de iniciar montaje 2. Retirar las piedras, excesos de mugre en las ruedas y revisar su estado y labrado. 3. Calibrar la celda de carga antes del montaje del vehículo sobre el DYNO 4. Montar el vehículo sobre los rodillos del DYNO con el elevador arriba y garantizar que el vehículo esta lo más alineado posible con el DYNO 5. Centrar el vehículo rodando sobre los rodillos y de forma controlada (vel. <10 km/h). Nota: el vehículo tiende a oscilar por un momento, preste atención y evite accidentes, NO olvide bajar el elevador previo a cualquier prueba 6. Apagar el vehículo 7. Anclar el vehículo al DYNO utilizando el juego de eslingas y cadenas del DYNO, preferiblemente ancle del chasis del vehículo, evite ejes u elementos no portantes, utilice mínimo cuatro (4) puntos para vehículos de dos (2) ejes y seis (6) puntos para vehículos de tres (3) ejes 8. Fijar las cuñas de caucho y madera a las ruedas del eje no tractor, de este modo evita el exceso de movimiento oscilatorio del vehículo e introduce seguridad a la prueba 9. Adecuar el ventilador de refrigeración del DYNO apuntando hacia el sistema de refrigeración del vehículo 10. Montar el medidor de RPM óptico al vehículo siguiendo los protocolos de "Pruebas sobre banco dinamométrico para determinación de factores de emisión" 11. Rodear el perímetro de trabajo del DYNO y de la unidad PAU con cinta de seguridad 12. Reunir a todo el personal, incluido asistentes para recordarles las mínimas normas de seguridad y comportamiento dentro del espacio limitado para el DYNO 13. Mantener al personal y los asistentes a una distancia moderada de los rodillos y la unidad PAU del DYNO 14. Mantener controlada la temperatura de los componentes, así: Ruedas: a. Rin <17.5 [in] y

rueda de labrado alto <100 [°C], Temp. Normal 70 [°C]. b. Rin <17.5 [in] y rueda de labrado bajo < 90 [°C] (Labrado <1 [cm]), Temp. Normal 70[°C]. c. Rin <22.5 [in] <110 [°C], Temp. Normal 95 [°C]. Discos de la unidad PAU: Máxima temperatura 460 [°C] por un intervalo de tiempo NO mayor a 5 [min]. 15. Par la calibración: i) Calibre con el vehículo montado un el DYNO las RPM del motor, ii) Tome las muestras de las emisiones de fondo previo al desarrollo de las pruebas, iii) El momento de la unidad PAU con el procedimiento de calibración le debe presentar un valor de 100[Nm]+-2[Nm], iii) El velocímetro del vehículo de presentar un error relativo mayor al 10% se considera en mal estado, iv) El peso del eje corresponde al eje sin carga. Se recomienda para vehículos livianos montar algunos galones de agua para evitar que el vehículo salte en exceso durante la prueba. 16. Las curvas características del motor se deben sacar bajo la última marcha del vehículo, se recomienda llegar a esta velocidad con el motor bajo en RPM, una vez alcance esta velocidad si se procede a poner el acelerador a fondo. 17. Para las pruebas a carga constantes se recomienda desarrollarlas en el siguiente orden: 25% - 50 % - 75% y finalmente 0 % en carga, tal ejercicio permite calentar tanto el vehículo como el DYNO de manera escalonada. 18. El aumento progresivo de la carga en el DYNO se debe hacer tal que tanto como Potencia y momento motor se estabilicen, esto evitara ciclos de carga excesivos sobre los ejes del DYNO.”

“Alistamiento vehículo y verificación operación vehículo 10 min, montaje vehículo 10min, calibración 10 min, calentamiento 5-15 min.”

“Alistamiento de equipos, calentamiento de estos, sujeción del vehículo a los anclajes... Un estimado en tiempo de 1 hora a 1 hora y media”

Pregunta 8. ¿Qué tan versátil son los dinamómetros cuando requieres cambiar los vehículos de prueba o los motores de prueba?

“Poco versátil. Bajo las condiciones de operación descritas, las pruebas de alta carga normalmente requerían entre dos o tres repeticiones porque eran difíciles de obtener.”

“Cuando hay que cambiar de vehículo es sencillo, si es motor toma mucho más tiempo. Cambiar de prueba es sencillo, es únicamente programación.”

“Para clasificaciones vehiculares similares, no hay inconveniente. Para banco motor, solo he trabajado en dinamómetros hechos a la medida y pueden aplicar para varios tipos de motor, pero no son muy versátiles para motores de gran tamaño.”

Pregunta 9. Cuéntame el proceso de mantenimiento de tus dinamómetros, 1. ¿Qué se requiere durante el mantenimiento? 2. ¿Lo realizas tú mismo? 3. ¿Has tenido fallas para mantenimiento correctivo? 4. ¿Documentas el mantenimiento que le haces a los equipos?

“1. Alineación de ejes, engrase, verificación de sensórica, verificación de control, verificación de calibración, verificación de línea eléctrica, verificación de línea hidráulica y neumática. Operatividad de programas de computador.

2. si.

3. Si he roto ejes, he roto frenos, he hecho cortos, he sobrecalentado cables, he destrozado rodamientos, he desconfigurado los programas de control.

5. Si lo he hecho”

“1. Se debe lubricar chumaceras. Cambiar correa de tiempo. Calibrar sensores de carga y velocidad. Revisar estado de rodillos y ejes.

2. No lo haría yo mismo.

3. Si se rompió un eje de un rodillo porque fue golpeado al momento de montarlo en la estructura. Nunca fue anotado y la falla surgió meses después.
4. Se debe hacer pero el responsable no lo hace.”

Pregunta 10. ¿Cuáles dinamómetros prefieres y por qué?

No hay una clara preferencia por un tipo de dinamómetro, pero los encuestados responden los usos y sus condiciones, del total de personas que respondieron el cuestionario, los dos tipos de dinamómetro de preferencia son:

Dinamómetro de motor: 57%

Pruebas en ruta: 72%

“Dinamómetro de motor Es el único para pruebas de motor.

Pruebas en ruta Prefiero pruebas en ruta para la evaluación de emisiones y eficiencia energética del vehículo”

“Pruebas en ruta”

“Dinamómetro de rodillos. Sólo tuve la oportunidad de conocer este tipo de tecnología”

“Dinamómetro de motor: Es mi favorito porque mi tema de interés son los motores. A diferencia de los de rodillos la potencia medida en el eje es la total entregada por el motor y es un dato real de motor mientras un dyno de rodillos entrega un valor asociado con pérdidas por rodadura y deslizamiento. Igual la aplicación y el objeto de interés de cada equipo difiere, luego es clave tener el objeto de la medición claro antes de seleccionar el tipo de dyno.”

“Dinamómetro de cubos: No tengo claro el tipo”

“Dinamómetro de rodillos: Es apropiado para hacer evaluaciones de eficiencia energética, de emisiones y para hacer puestas a punto o mejoras en tecnologías de vehículos.

Pruebas en ruta: Son las que presentan un dato más real, sin embargo, el costo y la cantidad de repeticiones que deben hacer para tener un valor representativo elevan el costo demasiado.”

“Dinamómetro de motor Independiente del régimen es posible establecer los factores de emisión más críticos.”

Dinamómetro de rodillos Es posible obtener un estimado rápido de los factores de emisión en unidades de g/km aplicables directamente a ruta.”

“Pruebas en ruta: Presenta las condiciones reales de manejo, dentro de las que se encuentra involucrado el tráfico, el modo de conducción, condiciones ambientales, topografía, entre otras, que permiten obtener resultados más cercanos a la realidad.”

“Pruebas en ruta: Aunque las pruebas dinámicas se ejecutan de una forma más sencilla en laboratorio, las pruebas en ruta permiten considerar factores externos que no se consideran pruebas dinámicas (ejemplo, tráfico, estado de la vía, entre otros) que pueden afectar directamente las emisiones medidas. Las pruebas en ruta permiten obtener valores de emisión más cercano a la realidad.”

ANEXO 3. PLANOS DE FABRICACIÓN

LISTA DE PLANOS DE FABRICACIÓN

Hoja	Nombre	Subconjunto	Cantidad
I	Ensamble total – Dimensiones generales	General	-
II	Ensamble total – Vista explosionada	General	-
1.1	Estructura freno hidráulico	Estructura freno	1
1.2	Placa chumacera	Estructura freno	2
2.1	Estructura de soporte del motor	Estructura motor	1
2.2	Soporte izquierdo del motor	Estructura motor	1
2.3	Soporte derecho del motor	Estructura motor	1
2.4	Soporte del radiador	Estructura motor	1
2.5	Refuerzo base del radiador	Estructura motor	2
2.6	Larguero superior izquierdo	Estructura motor	1
3.1	Eje de transmisión – cubo de acople a eje estriado	Transmisión motor a freno	1
3.2	Cubo de acople a freno hidráulico	Transmisión motor a freno	1
3.3	Pieza para unión entre chumacera y freno	Transmisión motor a freno	1
4.1	Ensamble de patas niveladoras	Patas niveladoras	1
5.1	Placa superior celda de carga	Celda de carga	1
6.1	Subensamble encoder freno	Encoder / freno	-
6.2	Buje de acoplamiento	Encoder / freno	1
6.3	Soporte encoder	Encoder / freno	1
6.4	Tornillo de sujeción entre buje y freno	Encoder / freno	1

INFORMACIÓN CONFIDENCIAL

ANEXO 4. HISTOGRAMAS Y QQ-PLOTS CELDA DE CARGA

