

RAE

1. **TIPO DE DOCUMENTO:** TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO AERONÁUTICO.
2. **TÍTULO:** DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA NO MAYOR A 120 hp
3. **AUTORES:** MIGUEL ÁNGEL LEÓN MARROQUÍN, DAVID ESTEBAN QUINTERO NÚÑEZ
4. **LUGAR:** Bogotá D.C.
5. **FECHA:** Junio de 2015
6. **PALABRAS CLAVE:** Banco de pruebas, Motores, Combustión, Bosch, Probeta, Adquisición, Datos, Diseño Conceptual, Conexión, Adecuación, Pugh, QFD, Bancada, Rotax 912, Ultraliviano.
7. **DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO:** El objetivo principal de este proyecto es el diseño de un banco de prueba para un motor de combustión interna de hasta 120 hp, teniendo en cuenta el diseño de la estructura, el diseño del sistema de adquisición de datos y finalmente la adecuación del laboratorio de motores existentes en la Universidad de San Buenaventura, para la incorporación de este banco; esto para suplir la carencia de herramientas experimentales que permitan estudiar a fondo los motores de combustión interna, logrando complementar el trabajo académico en las diferentes áreas relacionadas.
8. **LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN:** Línea de Investigación de la USB: Energía y Vehículos. Sub línea de Facultad de Ingeniería: sistemas de propulsión. Campo temático del programa: Bancos de prueba.
9. **METODOLOGÍA:** Es de carácter sistémico-analítico, con base en el desarrollo del diseño conceptual para establecer la directriz del proyecto durante su desarrollo, teniendo en cuenta la bibliografía relacionada a los bancos de pruebas.
10. **CONCLUSIONES:** Se logró diseñar un banco de pruebas para motores no mayores a 120 hp mediante la aplicación de la metodología de diseño conceptual, la cual se encargó de encaminar el proyecto hacia la adecuada justificación en la selección de los componentes que conformarían el banco de pruebas, por medio de las herramientas de filtrado y de depuración existentes en la teoría del diseño conceptual. Se obtuvo un concepto global definitivo para el banco de pruebas con la ayuda del diseño conceptual, el cual cumplió con los requerimientos de operación propuestos y de esta manera desarrollar el diseño de una estructura con perfiles Bosch. Se logró evidenciar que la presión total ejercida por la estructura del banco sobre el suelo del laboratorio de trabajo no representa ningún inconveniente, ya que los valores de presión son demasiado bajos y por ende no es posible causar efectos negativos sobre el suelo del laboratorio de pruebas. El desarrollo del diseño de un sistema de adquisición de datos consistió en la ubicación espacial, disposición e interconexión de los correspondientes elementos seleccionados.

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA NO MAYOR A 120 hp**

**DAVID ESTEBAN QUINTERO NÚÑEZ
MIGUEL ÁNGEL LEÓN MARROQUÍN**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA**

Bogotá, Colombia.

2015

**DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
INTERNA NO MAYOR A 120 hp**

**DAVID ESTEBAN QUINTERO NÚÑEZ
MIGUEL ÁNGEL LEÓN MARROQUÍN**

Proyecto de grado presentado para optar por el título de Ingeniero Aeronáutico

Asesor

PhD. Ing. Oscar Hernando Venegas Pereira

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA SEDE BOGOTÁ
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA**

Bogotá, Colombia

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

JURADO 2

AGRADECIMIENTOS

Al finalizar esta etapa de mi vida, doy un especial agradecimiento a mis padres y hermano por su gran apoyo y acompañamiento durante el desarrollo de esta tesis. Agradezco a nuestro tutor por acompañarnos y apoyarnos con su conocimiento durante el tiempo de desarrollo de este proyecto.

MIGUEL ÁNGEL LEÓN MARROQUÍN

Cada oportunidad de crecimiento profesional y personal, viene acompañada por la presencia de personas que de alguna manera han aportado a nuestras vidas; por esta razón doy gracias a mi familia, en especial a mi madre Deissy por apoyarme durante el desarrollo de este proyecto, a mi padre José Esteban por su inmensa colaboración para llegar a esta última parte de mi formación académica y a mi hermano Juan Manuel por ser un apoyo incondicional en todas las etapas de crecimiento personal y profesional de mi vida. Agradezco adicionalmente al tutor de tesis, el Doctor Oscar Venegas por orientarnos de manera satisfactoria a lo largo del desarrollo de esta tesis, ya que sin su ayuda, hubiese sido difícil su culminación.

DAVID ESTEBAN QUINTERO NÚÑEZ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Descripción y formulación del problema	9
1.3. Justificación	9
1.4. Objetivos de la Investigación.....	10
1.4.1. Objetivo General.....	10
1.4.2. Objetivos Específicos.	10
1.5. Alcances y Limitaciones del Proyecto.....	10
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1. Actividades a desarrollar.....	14
3. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL.....	17
3.1. Motor de combustión interna alternativo (MCIA).....	17
3.2. Banco de pruebas de MCIA.	18
3.2.1. Freno para banco motor.....	19
3.3. Aeronaves LSA	21
3.3.1. Planta motriz para aeronaves LSA.	22
4. DESARROLLO DE INGENIERÍA	25
4.1. Requerimientos del cliente.....	25
4.2. Diseño Conceptual.....	26
4.2.1. Marco Funcional.....	26
4.2.2. Conceptos por cada subfunción.....	31
4.2.3. Proceso de filtrado	35
4.2.4. Matriz pasa o no pasa.....	38
4.2.5. Estudio de factibilidad.....	41

4.2.6.	Matriz de decisión Pugh	43
4.2.7.	Casa de la Calidad	47
4.3.	Cálculos estructurales.	54
4.3.1.	Cálculo de vibraciones.	54
4.3.2.	Cálculos Estructurales para estante del motor.....	58
4.3.3.	Comportamiento según Ansys.	63
4.4.	Selección de componentes.	65
4.4.1.	Freno dinamométrico hidráulico.....	66
4.4.2.	Conexión del motor al freno.....	67
4.5.	Sistema de Sensores.....	68
4.5.1.	Termistores.....	69
4.5.3.	Caudalímetro.....	70
4.5.4.	Sistemas de adquisición de datos.	72
4.5.5.	Accesorios para sistema de adquisición de datos.	74
4.6.	Diseño del sistema de adquisición de datos.	76
4.6.1.	Coordenadas del motor Rotax 912US.	76
4.6.2.	Medición de rpm en el motor.	78
4.6.3.	Medición de Temperatura.....	79
4.6.4.	Conexión del sensor de temperatura y rpm al sistema de adquisición de datos.....	82
4.6.5.	Medición de flujo de aire.....	83
4.6.6.	Control de carga y sensor de par.....	85
4.6.7.	Conexión al carburador de la palanca de potencia.....	86
4.6.8.	Conexión de la probeta de combustible al motor.	87
4.6.9.	Panel de instrumentación.	89
4.7.	Propuesta de adecuación de la habitación para el banco de pruebas.....	91
4.7.1.	Distribución de la habitación.	91
4.7.2.	Acondicionamiento del suelo.....	94
4.7.4.	Extracción de gases.	95

4.7.6.	Visualización final del banco de pruebas.	98
4.8.	Absorción de Vibraciones.	100
5.	COSTOS Y PRESUPUESTOS.	103
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	105
6.1.	Conclusiones.....	105
6.2.	Recomendaciones.....	107
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	109
8.	ANEXOS.	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Banco de prueba CT110.	4
Figura 2. Banco de pruebas DS2 para motores de 800hp marca SAENZ.....	5
Figura 3. Banco de pruebas CT400 para motores de 100hp marca G.U.N.T.	6
Figura 4. Banco de prueba 66 Series de la empresa Easy Run	7
Figura 5. Banco de pruebas 1300111 de la empresa PRW	7
Figura 6. Banco de Pruebas para Medir Fricción Motor.....	8
Figura 7. Banco de pruebas para motores de un solo cilindro y potencia de 10hp.....	8
Figura 8. Metodología a seguir para el diseño del banco de pruebas.	14
Figura 9. Etapas de combustión para el ciclo Otto.....	18
Figura 10. Funcionamiento del Freno Hidráulico	20
Figura 11. Esquema del freno eléctrico.....	21
Figura 12. Aeronave de categoría LSA.....	22
Figura 13. Motor Rotax 912 ULS	23
Figura 14. Motor Rotax 912US en un ultraliviano MSP-STOL 740.	24
Figura 15. Estructura del diagrama funcional.	27
Figura 16. Diagrama funcional para el ejemplo descrito anteriormente.	28
Figura 17. Diagrama funcional del banco de pruebas a diseñar.....	30
Figura 18. Relación casa de la calidad.	47

Figura 19. Requerimientos y evaluación de los requerimientos del cliente.....	49
Figura 20. Requerimientos funcionales para el concepto global 2.	50
Figura 21. Requerimientos funcionales para el concepto global 4	51
Figura 22. Valor o meta operacional para concepto global 2.	52
Figura 23. Valor o meta operacional para concepto global 4.	52
Figura 24. Evaluación comparativa entre la competencia y los conceptos globales.	53
Figura 25. Diagrama para el motor en V.....	55
Figura 26. Modelo dinámico simplificado de masa concentrada.....	57
Figura 27. Comportamiento del momento en función del tiempo.	58
Figura 28. DCL Banco de prueba.	59
Figura 29. Diagrama de cuerpo libre para momento sobre la estructura.	60
Figura 30. Deformación del banco ante el peso del motor.	64
Figura 31. Concentración de esfuerzos sobre la estructura del motor.	65
Figura 32. Eje de tipo cardánico 1810 series.	68
Figura 33. Dimensiones para acople del motor al eje.	68
Figura 34. Probeta de medición.	70
Figura 35. Vista lateral para motor Rotax 912US.....	77
Figura 36. Vista frontal 912US.	78
Figura 37. Conexión del sensor de rpm en el motor Rotax 912US.....	79

Figura 38. Ubicación para el sensor de temperatura en la bomba de aceite.	80
Figura 39. Ubicación del sensor de temperatura en la cabeza del cilindro.	81
Figura 40. Sensor de temperatura en el colector de admisión de aire.	82
Figura 41. Conexión al sistema de adquisición de datos de los sensores de temperatura y rpm. .	83
Figura 42. Entrada para sistema de admisión de aire en el motor Rotax 912US.	84
Figura 43. Conexión del flujómetro a la tarjeta de adquisición de datos.	85
Figura 44. Conexión de la manguera de agua al freno y el sensor de medición de par al panel de control.	85
Figura 45. Carburador del motor Rotax 912US.	86
Figura 46. Conexión del carburador a la palanca de aceleración y a la tarjeta de adquisición de datos.	87
Figura 47. Conexión de la probeta de medición al sistema de combustible del motor Rotax 912US.	88
Figura 48. Distribuidor de combustible en el motor Rotax 912US.	88
Figura 49. Panel de instrumentación para el banco de pruebas.	89
Figura 50. Panel de control e interfaz para el usuario.	90
Figura 51. Interfaz del software en detalle.	91
Figura 52. Laboratorio de motores.	92
Figura 53. Distribución de la habitación inicial.	92

Figura 54. Distribución de la habitación con el banco de pruebas para MCIA no mayor a 120hp.	93
Figura 55. Configuración del suelo a modificar.....	94
Figura 56. Dimensiones y ubicación para el freno dinamométrico.	95
Figura 57. Agujero para ventilación en la pared del laboratorio de pruebas.	96
Figura 58. Adecuación del sistema de extracción de aire en el laboratorio.	96
Figura 59. Campana extractora de aire recomendada.	97
Figura 60. Agujero para interconexión de manguera de combustible.	98
Figura 61. Agujero para interconexión de sensores hacia el motor.	98
Figura 62. Banco de pruebas en vista frontal en el laboratorio correspondiente.	99
Figura 63. Banco de pruebas y extractor de gases en el laboratorio.	99
Figura 64. Elemento Shock mount set para absorción de vibraciones entre el motor y el banco.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de medición e instrumentos de medición para un banco de pruebas.	19
Tabla 2. Comparación de rendimiento para los motores LSA	23
Tabla 3. Técnicas de generación de conceptos.....	31
Tabla 4. Conceptos para la función “medir parámetros del motor”	32
Tabla 5. Conceptos para la función “modificar velocidad angular”.	33
Tabla 6. Conceptos para la función “soportar cargas”.	33
Tabla 7. Conceptos para la función “asegurar integridad operativo”	34
Tabla 8. Conceptos para la función “expulsar gases de escape”	34
Tabla 9. Conceptos descartados en primer proceso de filtrado	36
Tabla 10. Conceptos resultantes del primer proceso de filtrado.	37
Tabla 11. Combinaciones posibles luego del proceso de filtrado de la matriz pasa o no pasa.	40
Tabla 12. Proceso de filtro basado en estudio de factibilidad	41
Tabla 13. Conceptos globales obtenidos del estudio de factibilidad.....	42
Tabla 14. Ejemplo esquemático sobre el método Pugh.....	44
Tabla 15. Evaluación de los conceptos globales basado en el método Pugh.	45
Tabla 16. Conceptos globales resultantes del análisis Pugh.	46
Tabla 17. Comparación entre los momentos del banco y los soportados por Bosch	60
Tabla 18. Comparación entre los momentos ejercidos sobre los elementos de unión.	61

Tabla 19. Característica de los perfiles Bosch escogidos.....62

Tabla 20. Flexión de los perfiles de aluminio según su longitud62

Tabla 21. Frenos dinamométricos.66

Tabla 22. Caudalímetro para medición de aire.....71

Tabla 23. Sistemas de adquisición de datos.73

Tabla 24. Accesorios para sistema de adquisición de datos.....74

Tabla 25. Dimensiones y coordenadas para el motor Rotax 912US.....77

Tabla 26. Coordenadas para conexión de sensor de rpm.78

Tabla 27. Coordenadas de ubicación para la culata del motor.....80

Tabla 28. Coordenadas de ubicación de la bomba de aceite.80

Tabla 29. Soportes para maquinas industriales101

Tabla 30. Costo de perfiles Bosch para banco motor.....103

Tabla 31. Costos de accesorios y sistemas requeridos para el banco de pruebas.....104

TABLA DE SÍMBOLOS

■	Perfil cuadrado
γ	Angulo del banco
v	Angulo en V del motor
L_n	Lado izquierdo del motor
R_n	Lado derecho del motor
m_B	Masa del cilindro del motor
r	Radio de la manivela
ω	Velocidad angular
l	Longitud de la biela
g	Gravedad
I	Inercia del perfil
F	Peso del perfil
W_n	Peso
E	Módulo de elasticidad
L	Longitud del perfil
P	Presión
ϕ	Diámetro
M_{SL}	Momento de sacudimiento del lado izquierdo del motor
M_{SR}	Momento de sacudimiento del lado derecho del motor
M_{Sx}	Momento de sacudimiento en la componente vectorial x
M_{Sy}	Momento de sacudimiento en la componente vectorial y
▲	Relación pobre
⊙	Relación fuerte
○	Relación moderada

INTRODUCCIÓN

El presente documento tiene como propósito dar a conocer el proceso de diseño de un banco de pruebas para motores de combustión interna con una potencia no mayor a 120hp, utilizados en aeronaves LSA (Light Sport Aircraft), con la finalidad de afianzar los conocimientos en las áreas de termodinámica, química y motores. En la actualidad, la Universidad San Buenaventura (USB) no cuenta con un banco de pruebas que permita la caracterización de diferentes parámetros de un motor de combustión interna alternativo (MCIA) que puedan ser contrastados con la teoría. Por lo anterior, resulta de gran interés llevar a cabo la concepción de un banco de pruebas de motores en beneficio de los estudiantes de Ingeniería Aeronáutica.

En el capítulo 1 del documento, se encontrará información acerca del planteamiento del problema cuya finalidad es manifestar de forma clara el propósito del proyecto. Adicionalmente, en este capítulo se mencionan los objetivos a llevar a cabo, la justificación del porque se desarrolla este proyecto y los alcances y limitaciones que expresan hasta donde se pretende llegar con el desarrollo del proyecto de grado.

En el capítulo 2, el lector podrá apreciar la metodología y las actividades que se llevarán a cabo durante el desarrollo del trabajo de grado. El lector puede apreciar en las secciones de este capítulo, información relacionada a los antecedentes sobre los diferentes bancos de pruebas existentes actualmente.

En el capítulo 3, se encuentra el marco teórico el cual contiene información acerca de los motores y aviones de categoría LSA con el fin de que el lector se familiarice con el tema del documento de grado.

Posteriormente, en el capítulo 4 se da a conocer el desarrollo de ingeniería llevado a cabo para la concepción del banco de pruebas. Dentro de este desarrollo de ingeniería, se empieza por

el diseño conceptual del banco, el cual tiene como finalidad explicar de forma metodológica la selección de cada uno de los elementos que componen el banco para cumplir con todos los requerimientos solicitados. Una vez se ha realizado el diseño conceptual, en las demás secciones se encuentran los cálculos de vibraciones y estructurales para el banco motor, y la correspondiente selección componentes necesarios para el funcionamiento del banco de pruebas a desarrollar. Adicionalmente, se encuentra el diseño del sistema de adquisición de datos y la correspondiente propuesta de adecuación y disposición del habitación necesaria para el funcionamiento del banco de pruebas.

En el capítulo 5, se puede encontrar la información correspondiente al costo total del banco de pruebas, el cual resume el precio por separado de cada elemento necesario para la futura construcción del banco correspondiente. Se puede apreciar que los precios están en dólares debido a que es la moneda internacional más usada en el mundo.

En el capítulo 6 se da a conocer las principales conclusiones obtenidas durante el desarrollo de esta tesis y algunas recomendaciones futuras para su construcción por parte de quien desee dar continuidad a este trabajo de grado.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El planteamiento del problema de acuerdo con (Barbosa, Paba, & Rodríguez, 2011) es el conjunto de información que manifiesta de manera breve la finalidad del proyecto de grado basado en los elementos relacionados al problema de investigación.

Para llevar a cabo un buen planteamiento del problema relacionado con el diseño con un banco de pruebas para motores, en las siguientes secciones se describen los antecedentes, la descripción y formulación del problema, la justificación, los objetivos y los alcances y limitaciones del proyecto.

1.1. Antecedentes

Un banco de prueba para MCIA se utiliza para caracterizar parámetros de operación del motor; así lo expresa (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007). Cada banco de prueba para MCIA debe llevar acoplado un freno en el eje de salida del motor (cigüeñal), el cual ofrece resistencia a la rotación del motor. Adicionalmente, el motor contiene los elementos y sistemas necesarios para que pueda trabajar continuamente durante los períodos experimentales, todo dependiendo de las prestaciones del mismo.

En esta sección, el lector podrá encontrar información de los diferentes bancos de prueba desarrollados por los estudiantes de la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, así como también, aquellos bancos de prueba existentes en el mercado.

En la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá, existen dos proyectos de grado relacionados con bancos de pruebas. El primero, propuesto por (García E. , 2010), se trata de un banco de pruebas para MCIA de 4 tiempos, el cual consiste en determinar la forma de sujeción y el tipo de bancada para un motor AMC. Este trabajo dio a conocer la selección del sistema de adquisición de datos experimentales, con el fin de compararlos posteriormente con los cálculos termo-gasodinámicos del motor.

El segundo banco de pruebas es el desarrollado por (Ferreira, Jurado, & Ayala, 2008), el cual está enfocado en la caracterización de motores a reacción (MR) como el PT6T-3¹. Sin embargo, este tipo de bancos de pruebas tienen un enfoque diferente debido al tipo de motor a trabajar.

En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de bancos de pruebas para MCIA que dependen de la potencia del motor y el tipo de estante. Los bancos de pruebas como el CT110, CT159, CT300 de la empresa GUNT (G.U.N.T, 2005), el TBMC3 de la empresa EDIBON (EDIBON, 1978), y el TD 800 construido por la empresa EDLAPQUIP (EDLAPQUIP, 2008), se caracterizan por funcionar para motores de un solo cilindro sin superar los 11kW (15hp). En la Figura 1 se observa un ejemplo para este tipo de bancos de prueba.



Figura 1. Banco de prueba CT110.

Fuente: (G.U.N.T, 2005)

¹ PT6T-3: Motor a reacción para helicópteros diseñado por el fabricante Pratt and Whitney.

El mercado también ofrece bancos de pruebas para motores de alta potencia y de múltiples cilindros, tal como es el caso del banco de prueba P8600 y P8650 elaborado por la empresa CUSSONS (CUSSONS, 2007), el banco CT400 de la empresa GUNT (G.U.N.T, 2005), y los bancos de prueba HT3, DS2, DR3 construido y distribuido por la empresa SAENZ (Saenz, 2001). Estos bancos se caracterizan por dos aspectos importantes, el primero es operar motores (dependiendo de la referencia del banco) con potencia de hasta 1000 hp, y el segundo es por la ergonomía en la interface del sistema de adquisición de datos.

En la Figura 2 y Figura 3, se muestra el banco de pruebas DS2 de la empresa SAENZ y el banco CT400 de la empresa G.U.N.T, respectivamente.



Figura 2. Banco de pruebas DS2 para motores de 800hp marca SAENZ

Fuente: (Saenz, 2001)



Figura 3. Banco de pruebas CT400 para motores de 100hp marca G.U.N.T.

Fuente: (G.U.N.T, 2005)

Hasta este punto, se han podido apreciar algunos de los bancos de prueba para MCIA que existen en el mercado con respecto al tipo de motor y los regímenes de potencia del mismo. Sin embargo, el mercado actual también ofrece otros tipos de bancos de prueba para MCIA que se caracterizan por tener una estructura modular universal, lo que significa que es posible adecuar diferentes tipos de motores a la estructura del banco, atrayendo la atención de quienes desean caracterizar motores de diferentes prestaciones en un mismo banco. Tal es el caso del banco de pruebas 66 series construido por la empresa Easy Run, el cual se caracteriza por su versátil sistema para el montante del motor tal como se muestra en la Figura 4. Además de este banco, la empresa PRW ofrece el banco 1300111, diseñado para adecuarlo a cualquier tipo de motor, y con una estructura modular de fácil desplazamiento tal como se puede apreciar en la Figura 5.



Figura 4. Banco de prueba 66 Series de la empresa Easy Run
Fuente: (Run, 2006)



Figura 5. Banco de pruebas 1300111 de la empresa PRW
Fuente: (PRW, 2004)

En el ámbito académico y ajeno a la Universidad San Buenaventura sede Bogotá, se han llevado a cabo algunos bancos de prueba para MCIA, como el desarrollado por (Casanova & Aguirre, 2005), el cual permite medir la fricción en los cilindros de los pistones por medio de algunas modificaciones del motor. Este banco cuenta con la instrumentación necesaria para la

medición y control del motor desde el panel principal. En la Figura 6, se muestra el banco con el freno acoplado al motor a gasolina y su sencilla estructura.

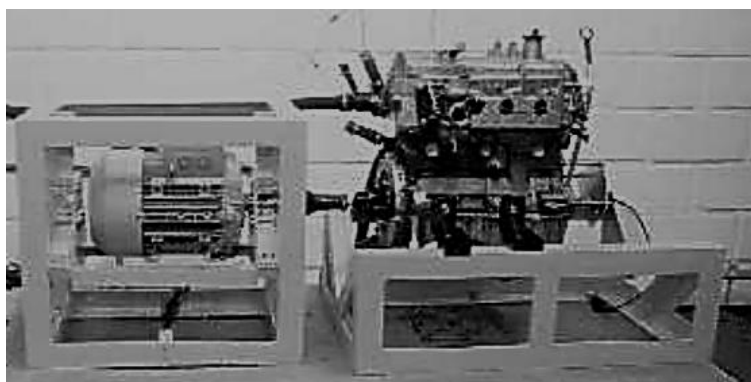


Figura 6. Banco de Pruebas para Medir Fricción Motor

Fuente: (Casanova & Aguirre, 2005)

Asimismo, (Hernandez & Portillo, 2011) han trabajado en el diseño y construcción de un banco de prueba para motores de un solo cilindro tipo diésel con potencia de 10hp, el cual recomienda que para la medición de combustible, es mejor utilizar un caudalímetro, en lugar del método gravimétrico, debido a cuestiones de precisión. En la Figura 7, se muestra el banco de pruebas construido en su totalidad.

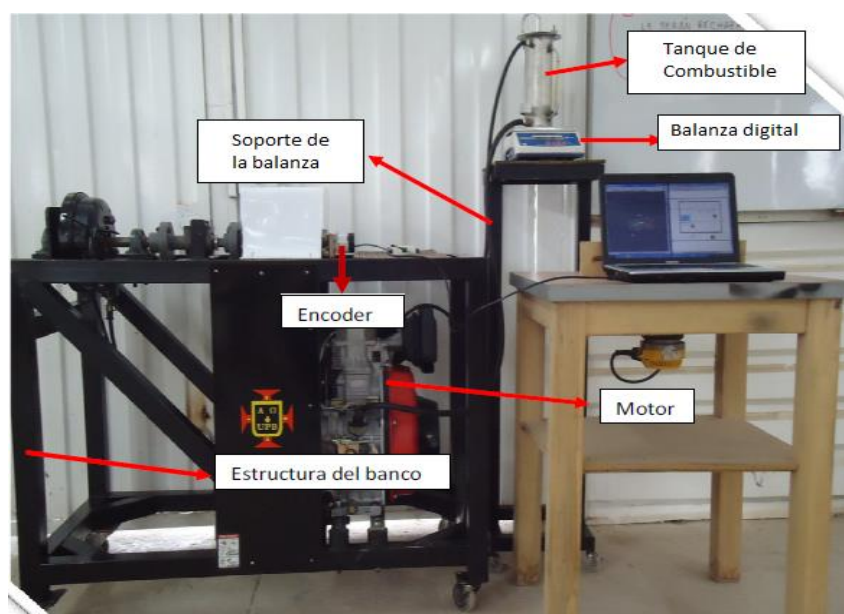


Figura 7. Banco de pruebas para motores de un solo cilindro y potencia de 10hp.

Fuente: (Hernandez & Portillo, 2011)

1.2. Descripción y formulación del problema

Debido a la ausencia de un banco de pruebas para MCIA en la Universidad de San Buenaventura, sede Bogotá, no se llevan a cabo pruebas experimentales para caracterizar motores recíprocos y así complementar el proceso de aprendizaje en el área de propulsión. Por lo tanto, el problema de ingeniería consiste en diseñar un banco de pruebas para MCIA siguiendo una estricta metodología de diseño que permita tomar en cuenta requerimientos esenciales como por ejemplo que sea didáctico para la utilización por parte de los estudiantes y que su construcción a futuro represente un menor costo con respecto a los que se encuentran en el mercado.

A partir de esta necesidad se formula la siguiente pregunta, para darle solución a lo largo del documento.

¿Cuáles son las características estructurales, componentes, sensores, accesorios, dimensiones, ensamblabilidad y ubicación espacial requeridos para que los datos obtenidos del banco permitan la caracterización de motores hasta 120 hp y así conocer su desempeño a diferentes condiciones de operación?

1.3. Justificación

Este proyecto se realiza con el fin de suplir la carencia de herramientas experimentales que permitan estudiar a fondo el principio de operación de un MCIA y comparar estos resultados con la teoría, logrando aplicar diferentes áreas afines como termodinámica, química y motores.

Tomando como referencia un motor existente en el mercado que no exceda los 120 hp y teniendo en cuenta las necesidades y requerimientos de la Universidad San Buenaventura, se diseñará un banco de pruebas con la combinación adecuada de dispositivos tanto de hardware y software, con el fin de implementar una metodología que involucre las áreas relacionadas a la adquisición, recopilación y análisis de datos.

1.4. Objetivos de la Investigación.

A continuación, se muestran los correspondientes objetivos (general y específicos) del proyecto.

1.4.1. Objetivo General.

Diseñar un banco de pruebas para un motor de combustión interna de hasta 120 hp.

1.4.2. Objetivos Específicos.

- Diseñar la estructura del banco de prueba.
- Diseñar el sistema de adquisición de datos.
- Proponer la adecuación del laboratorio de motores existente en la Universidad de San Buenaventura para la incorporación del banco de prueba.

1.5. Alcances y Limitaciones del Proyecto.

A continuación se describen los alcances del proyecto:

- El diseño del banco y selección del freno se realizará teniendo en cuenta una potencia máxima de 120 hp provenientes del motor.
- Los parámetros a medir en el banco de prueba son:
 - Flujo másico de aire a condiciones de operación.
 - Consumo de combustible a diferentes condiciones de operación.
 - Par del motor a diferentes condiciones de operación.
 - Temperaturas requeridas para el cálculo del flujo másico de aire y combustible
 - Medir rpm del motor.
- Se seleccionarán los elementos más aptos para absorber las vibraciones entre la estructura del banco y el motor.
- Mediante un estudio de los métodos de fijación y de unión, se seleccionará el más adecuado.

- Se calcularán las cargas que debe soportar el suelo sobre el cual se instalará el banco de prueba.
- Se realizarán los planos de ingeniería donde se contemplen planos de despieces, secciones, tipos de unión y ensamble entre componentes.
- El diseño del sistema de adquisición de datos se enfocará en la disposición espacial y la conexión de cada uno de los elementos en el motor.

Durante el desarrollo del banco de prueba, no se desarrollarán los siguientes aspectos:

- Un análisis de vibraciones detallado.
- La construcción del banco de prueba.
- Análisis de ruido.
- Parámetros que no se encuentran especificados en la sección de alcances.

2. METODOLOGÍA

La metodología correspondiente al desarrollo de este proyecto está basada en la recopilación y apropiación de la información obtenida a través de las diversas fuentes disponibles (internet, reseñas, libros) acerca de los diferentes bancos de pruebas existentes en el mercado. Adicionalmente, la metodología para llevar a cabo este proyecto también incluye una fase ingenieril, la cual consta de observar y escoger las diferentes alternativas y posibilidades por medio del diseño conceptual y luego realizar el estudio del comportamiento de los diferentes fenómenos que interfieren en el funcionamiento del banco de pruebas como las cargas estáticas incluyendo las vibraciones, además de la interconexión de elementos y su ubicación espacial en el recinto correspondiente.

En la Figura 8 se muestra un diagrama de flujo con la metodología a seguir para el diseño del banco de pruebas.

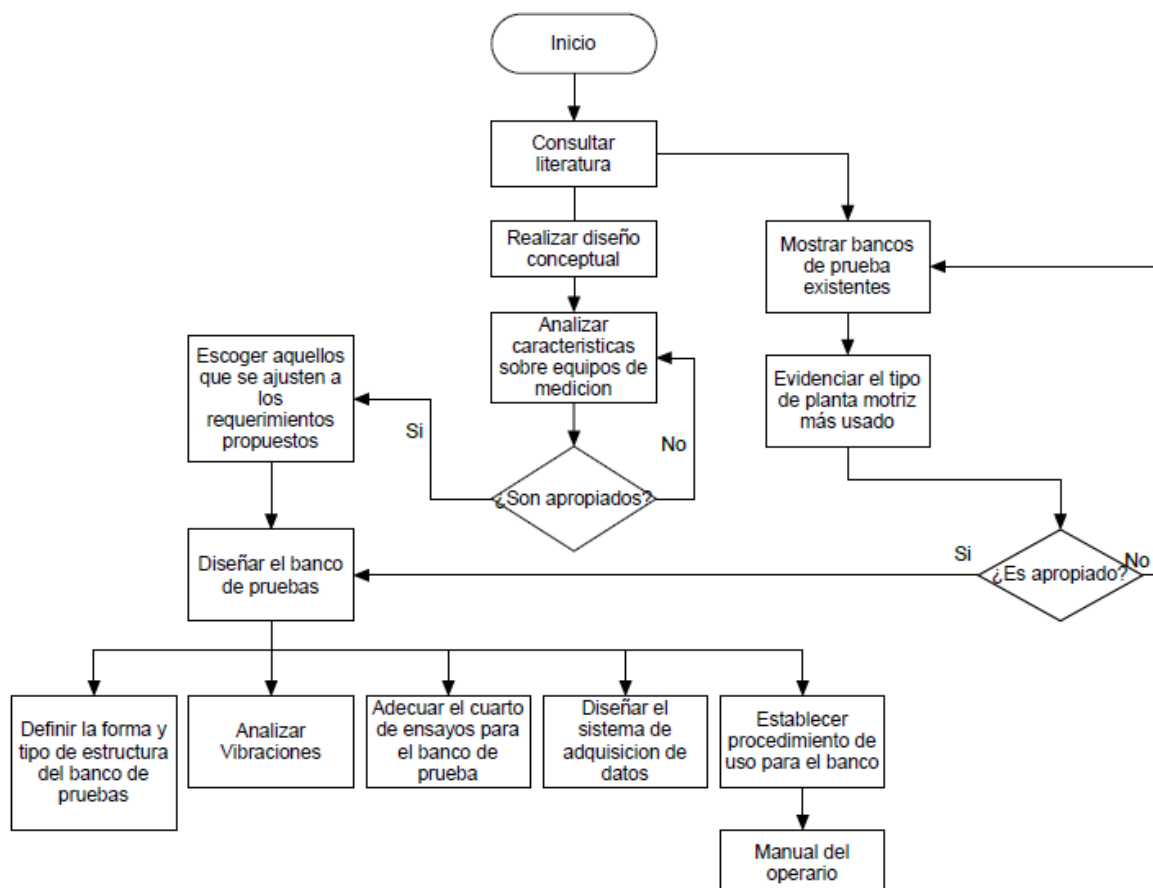


Figura 8. Metodología a seguir para el diseño del banco de pruebas.

2.1. Actividades a desarrollar.

En este apartado se mencionan las actividades a desarrollar durante el desarrollo de este proyecto el cual inicia con el diseño conceptual que permite recopilar, clasificar y seleccionar las alternativas más viables para llevar a cabo un banco de pruebas como los sensores de medición, freno dinamométrico, el material estructural y geometría, métodos de fijación al suelo y soportes antivibratorios. En este orden de ideas, se evidencia que el diseño conceptual es una parte fundamental del proyecto con respecto a la selección de los componentes de medición de parámetros como rpm, consumo de combustible, par del motor, entre otros.

Luego del diseño conceptual, se realiza un estudio ingenieril el cual contiene un conjunto de cálculos estructurales con la finalidad de mostrar la influencia de la vibración y el peso del motor sobre el tipo de estructura propuesta en el diseño conceptual. Posteriormente, se realizará el diseño en CAD de la bancada o estructura acompañado de los planos correspondientes.

Una vez culminado el estudio ingenieril, se realiza el diseño del sistema de adquisición de datos, el cual comprende de la disposición espacial y la interconexión de elementos al motor mediante los sensores escogidos y adicionalmente al panel de control e interfaz que se propone para el banco de pruebas. Este diseño está acompañado también con la propuesta para la ubicación del banco de pruebas y adecuación del recinto.

Finalmente, el documento culmina con el desarrollo de un manual de operario o guía rápida para el uso del banco de pruebas, teniendo en cuenta procedimientos que brinden seguridad y comodidad a quien utilice el banco con fines académicos.

3. MARCO TEÓRICO - CONCEPTUAL

En el presente capítulo, se definen aquellos conceptos que se deben tener en cuenta durante el desarrollo del proyecto, permitiendo así contextualizar y dejar en claro a que se refiere cada concepto cuando son mencionados en los capítulos siguientes.

3.1. Motor de combustión interna alternativo (MCIA)

El banco de pruebas a diseñar es para un motor de combustión interna alternativo (MCIA) con una potencia máxima no mayor a 120 hp. Por este motivo, es necesario tener en cuenta la definición de (Cengel & Boles, 2008) con respecto al funcionamiento termodinámico del motor, ya que este utiliza como principio de operación el ciclo Otto, el cual comprende la admisión, compresión, expansión y escape de los gases.

De acuerdo con (Cengel & Boles, 2008), los ciclos de operación para un MCIA pueden ser realizados en dos tiempos o en cuatro tiempos dependiendo del tipo motor. De manera representativa, (Gómez, 2013) muestra gráficamente de que se trata el ciclo de combustión Otto de 4T correspondiente a un MCIA (Véase Figura 9).

Durante la etapa de **admisión**, el pistón desciende desde el punto muerto superior (PMS) hasta el punto muerto inferior (PMI) y la mezcla de aire (proveniente del exterior) y el combustible ingresan al cilindro. A lo largo de la etapa de **compresión**, la mezcla de aire y combustible se comprime hasta alcanzar el punto muerto superior (PMS), y posteriormente ser encendido por la bujía e iniciar la combustión de dicha mezcla. Posteriormente, en la etapa de **expansión**, la energía química de la mezcla es transformada en energía mecánica que permite mover el cigüeñal. Finalmente, los gases producidos durante la combustión salen del interior del cilindro a través de la válvula de escape. (Moran & Shapiro, 2008).

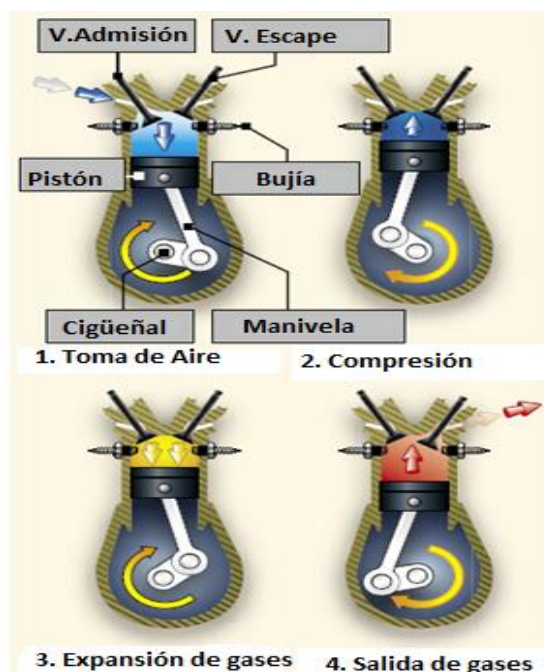


Figura 9. Etapas de combustión para el ciclo Otto.
Fuente: (Gómez, 2013)

3.2. Banco de pruebas de MCIA.

De acuerdo con (Martyr, 2007), un banco de pruebas es un conjunto de maquinaria, e instrumentación el cual está ubicado en un edificio adecuado. Los desarrolladores de vehículos hoy en día utilizan este tipo de bancos de prueba para medir el rendimiento del motor y frecuentemente requieren sistemas sofisticados para llevar a cabo esta labor.

Los bancos de pruebas según (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007) tienen determinada instrumentación dependiendo de los parámetros a medir. En la Tabla 1 se resumen los parámetros más comunes medidos en un banco de pruebas.

Tabla 1. Parámetros de medición e instrumentos de medición para un banco de pruebas.

Parámetros a medir	Instrumento de medición
Par efectivo (M_e)	Frenos dinamométricos. Balanzas o células de carga.
Régimen de giro (n)	Tacómetros ópticos, magnéticos o mecánicos.
Gasto de Combustible ($\dot{m}_f$)	Flujómetros o probeta de medición.
Gasto de aire ($\dot{m}_A$)	Caudalímetros y flujómetros para aire
Temperatura del motor (T)	Termopares o termo resistencias.
Contaminantes (CO, CO_2)	Quimioluminiscencia, infrarrojos o ionización de la llama.

Es importante destacar que los elementos mínimos que todo banco de pruebas debe tener son: el **freno**, cuya finalidad es regular las rpm, los **termopares** para conocer la temperatura de operación, **flujómetros** para la medición exacta de combustible y en algunas ocasiones dependiendo de la aplicación para el banco de pruebas, se utilizan los **infrarrojos** para medir el nivel de contaminantes en el motor (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007).

3.2.1. Freno para banco motor.

Un freno para banco motor o comúnmente denominado *freno dinamométrico* es un dispositivo que somete al motor a un par resistente previamente establecido, el cual puede modificarse dependiendo de los requerimientos y capacidad del freno (Hernanz, 2010).

Los tipos de frenos más utilizados en bancos de prueba para MCIA son los frenos hidráulicos y eléctricos.

Frenos hidráulicos

El freno hidráulico es un dispositivo compuesto por un rotor que gira accionado por el eje del motor, un estator o carcasa fija unido al sistema de medida de fuerza. En este caso, el agua es el agente frenante, el cual ingresa al freno y es sometida a continuas aceleraciones y

desaceleraciones producto de la interacción de los álabes de los rotores y estatores. Esta interacción provoca turbulencia el cual se traduce en la carga aplicada al motor impulsor. La energía mecánica disipada dentro del freno se convierte en calor, lo cual se ve reflejado en el cambio térmico del agua a su salida del freno como se observa en la Figura 10 (Saenz, 2001).

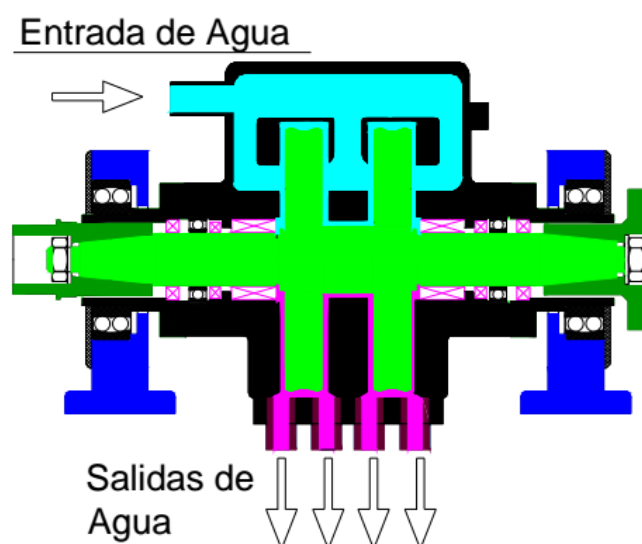


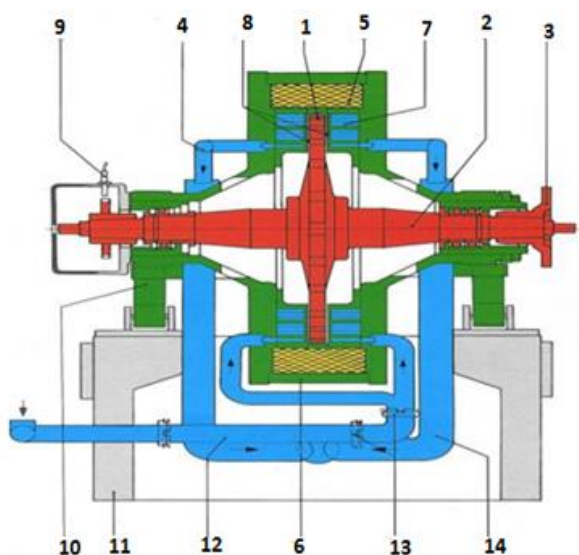
Figura 10. Funcionamiento del Freno Hidráulico
Fuente: (Saenz, 2001)

De acuerdo con (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007), el funcionamiento de este freno se puede llevar a cabo en dos maneras: variar el nivel del agua en el interior del freno y así controlar el par transmitido al motor o mantener constante el nivel de agua en el interior del freno con el fin de modificar la interacción entre el rotor y el estator mediante el empleo de compuertas deslizantes.

Frenos Eléctricos

Los frenos eléctricos constan de un rotor construido con un material de elevada conductividad, y un estator que contiene una o varias bobinas de campo que son excitadas mediante una pequeña corriente continua. La aplicación de dicha corriente produce un campo magnético paralelo al eje del rotor, cuyo giro produce cambios de flujo del campo magnético en

las paredes de la cámara de agua de refrigeración del estator, dando lugar así a la circulación de electrones conocida como corrientes de Foucault sobre la periferia interna del estator y a la disipación de energía en forma de calor al agua de refrigeración del estator. El par resistente inducido al motor es controlado por medio de la intensidad de corriente suministrada a las bobinas del estator (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007). En la Figura 11, se muestra el esquema del freno eléctrico.



1. Rotor. 2. Eje. 3. Brida. 4. Salida de agua. 5. Embobinado. 6. Carcasa. 7. Cámara de agua. 8. Entrehierro. 9. Codificador angular. 10. Soporte. 11. Bancada. 12. Entrada de agua. 13. Unión. 14. Colector de agua.

Figura 11. Esquema del freno eléctrico

Fuente: (Ruiz, López, & Bermúdez, 2007)

3.3. Aeronaves LSA

Una aeronave Light Sport Aircraft (LSA), es una aeronave que según la definición de (UAEAC, Colombia, 2010) debe cumplir los siguientes requisitos:

- Aeronaves de ala fija o rotativa con cualquier tipo de estructura.
- Peso máximo de despegue no superior a 750 kg, con capacidad máxima de 2 sillas incluyendo la del piloto.

- Cabina no presurizada y certificación únicamente para vuelo visual diurno (VFR).
- Planta Motriz y hélice certificada.

Una aeronave LSA se caracteriza por ser pequeña y simple de ensamblar, ya que provienen de un sistema de producción “listos para volar” y por lo tanto, es económico en comparación con otras aeronaves utilizadas en la aviación deportiva. (Lawrence, 2011). En la Figura 12 se muestra un ejemplo de una aeronave LSA.



Figura 12. Aeronave de categoría LSA.

Fuente: (Rojas, 2009)

3.3.1. Planta motriz para aeronaves LSA.

Las aeronaves LSA utilizan actualmente plantas motrices con una potencia máxima de 120hp. Las empresas que trabajan este tipo de plantas motrices son: Lycoming con el motor 233, Continental con su serie O-200D y Bombardier Recreational Products (BRP) con la planta motriz Rotax 912ULS.

En la Tabla 2, se muestran las características de algunos motores usados en ultralivianos y se puede observar que el motor Rotax 912 ULS es un motor que se caracteriza por alcanzar

elevadas rpm y potencia para un desplazamiento volumétrico inferior, en comparación con los motores Lycoming 233 y Continental 0200-D.

Tabla 2. Comparación de rendimiento para los motores LSA

Características\Motor	LYCOMING 233	ROTAX 912 ULS	CONTINENTAL 0200-D
Velocidad Rotación [<i>rpm</i>]	2800	5500	2750
Volumen cilindro [<i>in</i>³]	233	82.6	201
Potencia [<i>hp</i>]	116	120	100
Peso [<i>lb</i>]	213	140	215

De acuerdo con BRP (BRP, 2014), las prestaciones en rendimiento del motor Rotax 912US hacen de este, el más apetecido por los fabricantes de aeronaves LSA. De esta manera, en este documento se tendrá en cuenta el motor Rotax 912ULS (ver Figura 13) para el proceso de diseño del banco de pruebas.



Figura 13. Motor Rotax 912 ULS

Fuente: (BRP, 2014)

En la Figura 14 se puede evidenciar el motor Rotax 912US instalado sobre un ultraliviano MSP-STOL 740, el cual permite evidenciar la versatilidad del motor en la aviación deportiva. En Colombia existen empresas que utilizan este tipo de aeronaves con fines académicos en el ámbito de la instrucción de vuelo como en el caso de la escuela de aviación Adevia S.A.



Figura 14. Motor Rotax 912US en un ultraliviano MSP-STOL 740.

4. DESARROLLO DE INGENIERÍA

Para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto se ha establecido una metodología de un diseño conceptual, el cual presenta la ventaja de recolectar y reconocer las diferentes alternativas de desarrollo para un banco de pruebas. Uno de los pasos más importantes para comenzar con el diseño conceptual es establecer en primera instancia los requerimientos del cliente para aclarar y enfocar de manera satisfactoria el proceso de diseño y responder a la pregunta ¿hacia dónde se dirige este proyecto?

Después de elaborar el diseño conceptual, el desarrollo de ingeniería se orienta a la creación del banco donde se utilizan los recursos teóricos que permiten estudiar los fenómenos más importantes e influyentes en la estructura del banco y así empezar a dar forma a lo que se ha planteado como primer objetivo. Luego de ello, se encuentra el diseño de los sistemas de adquisición de datos y la propuesta de adecuación del lugar para el banco de pruebas, con el propósito de colocar en marcha el banco de pruebas en un futuro.

4.1. Requerimientos del cliente.

En este apartado se encuentran establecidos los requerimientos del cliente que en este caso hace referencia a la Universidad San Buenaventura sede Bogotá (USB). Estos requerimientos serán tenidos en cuenta a lo largo del desarrollo del diseño conceptual e involucran aspectos económicos, académicos y operativos para el banco de prueba y son presentados a continuación:

- Que sea económico en su operación.
- Que sea de mantenimiento fácil y económico.
- Que sea didáctico como herramienta académica.
- Que sea desplazable fácilmente.
- Que sea seguro operacionalmente.
- Que tenga un panel ergonómico.
- Que sea económico en su adquisición

- Que sea atractivo visualmente

Estos requerimientos permiten orientar el curso que se va a seguir durante el desarrollo de la metodología del diseño conceptual que se desarrollará más adelante.

4.2. Diseño Conceptual.

En la definición de (Ullman, 2008), se denomina diseño conceptual al proceso de diseño que permite identificar conceptos o principios de solución a un problema por medio de la evaluación de las restricciones (especificaciones o requerimientos del cliente) impuestas.

Un **concepto** se define como una idea que es suficientemente desarrollada para evaluar los principios físicos que gobiernan su comportamiento, es decir, brinda una solución para realizar una determinada función (Ullman, 2008).

En este orden de ideas, se define **concepto global** como el producto de la combinación de diferentes **conceptos** para formar un único elemento global dominante. Es importante tener en cuenta estas definiciones, ya que serán utilizadas a lo largo del diseño conceptual.

4.2.1. Marco Funcional.

En esta etapa de diseño, se debe plantear un diagrama de funciones de acuerdo a (Ullman, 2008), el cual está basado en utilizar los requerimientos para el banco de prueba (o también llamado en este apartado *concepto global*) y dar como respuesta a dos preguntas (¿Cómo? y ¿Para qué?), relacionadas con las funciones que debe cumplir el banco para lograr caracterizar un motor MCIA con una potencia no mayor a 120 hp.

En la Figura 15, se muestra la estructura de un diagrama funcional, ya que de acuerdo con la definición de (Karl & Eppinger, 2013), este diagrama consiste en descomponer las funciones del concepto global en subfunciones con el fin de obtener una descripción detallada y así tener un punto de partida claro a la hora del desarrollo del diseño.

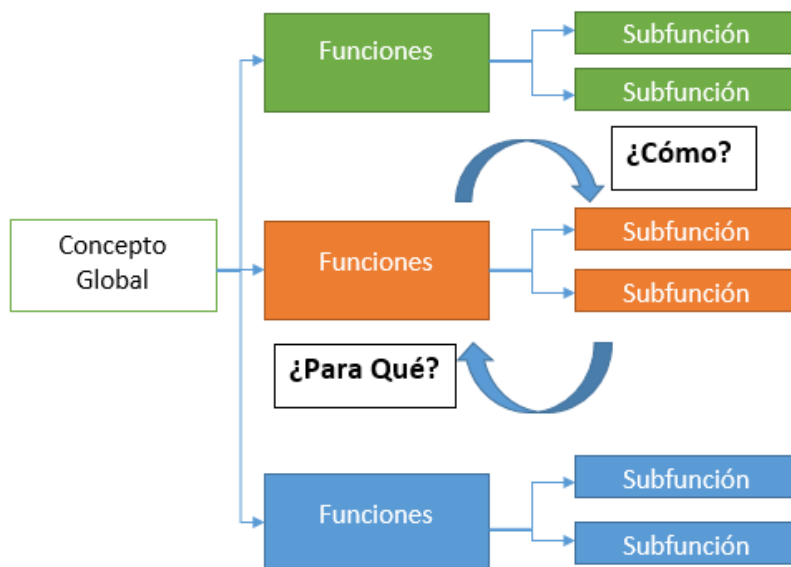


Figura 15. Estructura del diagrama funcional.

A modo de orientación, (Karl & Eppinger, 2013) proponen el siguiente ejemplo que ha sido adaptado por los autores de la siguiente manera:

Se tiene un concepto global denominado “*pistola de clavos manual*” donde uno de los requerimientos es la *energía*.

- La función *a* del diagrama funcional podría ser “*Almacenar o aceptar energía externa*”
- La subfunción *b* derivada de la primera función *a* es “*Convertir energía en energía traslacional*” ya que responde a la pregunta **¿Cómo?** de la siguiente manera:
¿Cómo se va a almacenar o aceptar la energía externa?
- La subfunción *c* derivada de la subfunción *b* puede ser “*Aplicar energía traslacional al clavo*”, ya que responde a la pregunta **¿Cómo?** de la siguiente manera:
¿Cómo se va a convertir la energía en energía traslacional?

Haciendo el proceso inverso, se tendría entonces:

- La subfunción *c* “Aplicar energía traslacional al clavo”, es el punto de partida para obtener la subfunción *b* por medio de la pregunta **¿Para qué?** de la siguiente manera: ¿Para qué se va a aplicar energía traslacional al clavo? En este caso la subfunción *b* respondería a esta pregunta de la siguiente manera: Para “convertir energía en energía traslacional”
- Si se pregunta ¿para que se requiere “convertir la energía en energía traslacional”? la respuesta es la subfunción *a*, y es: Para “almacenar o aceptar energía externa”.
- Si se pregunta nuevamente ¿Para qué almacenar o aceptar energía externa?, la respuesta sería nada menos que el concepto global o producto final: Para realizar una “pistola de clavos manual”.

En la Figura 16, se muestra el diagrama funcional para el ejemplo propuesto anteriormente y por lo tanto permite evidenciar que la subfunción *c* es el punto de partida para trabajar en lo que al final se convertirá en el concepto global “pistola de clavos manual”.

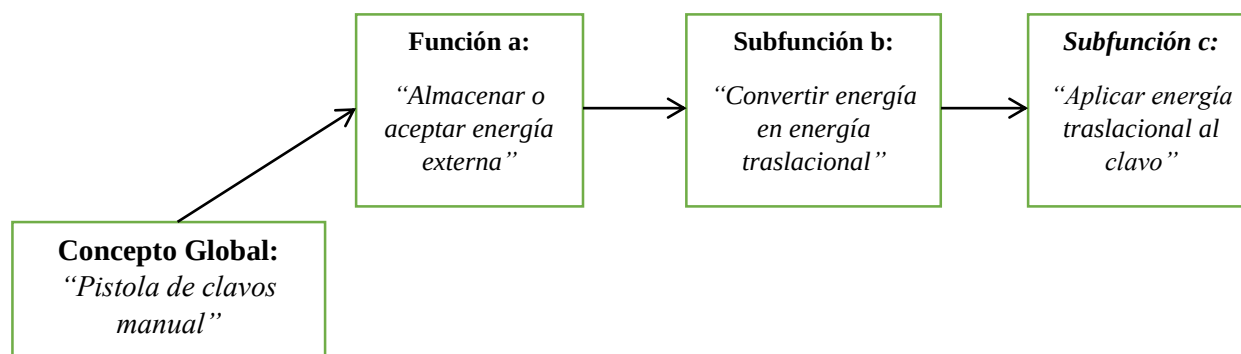


Figura 16. Diagrama funcional para el ejemplo descrito anteriormente.

De acuerdo al ejemplo y a la orientación del diagrama funcional explicado anteriormente, la Figura 17 contiene el respectivo diagrama funcional para el diseño del banco de pruebas. Este diagrama contiene 5 funciones principales a desarrollar por el banco de prueba y a su vez están divididas en subfunciones. Como se puede evidenciar, el punto de partida para trabajar en el diseño del banco debe responder a la pregunta *¿cómo?*, relacionada a:

- La medición de parámetros
- La sujeción del banco
- Seguridad de operación
- Expulsión de gases

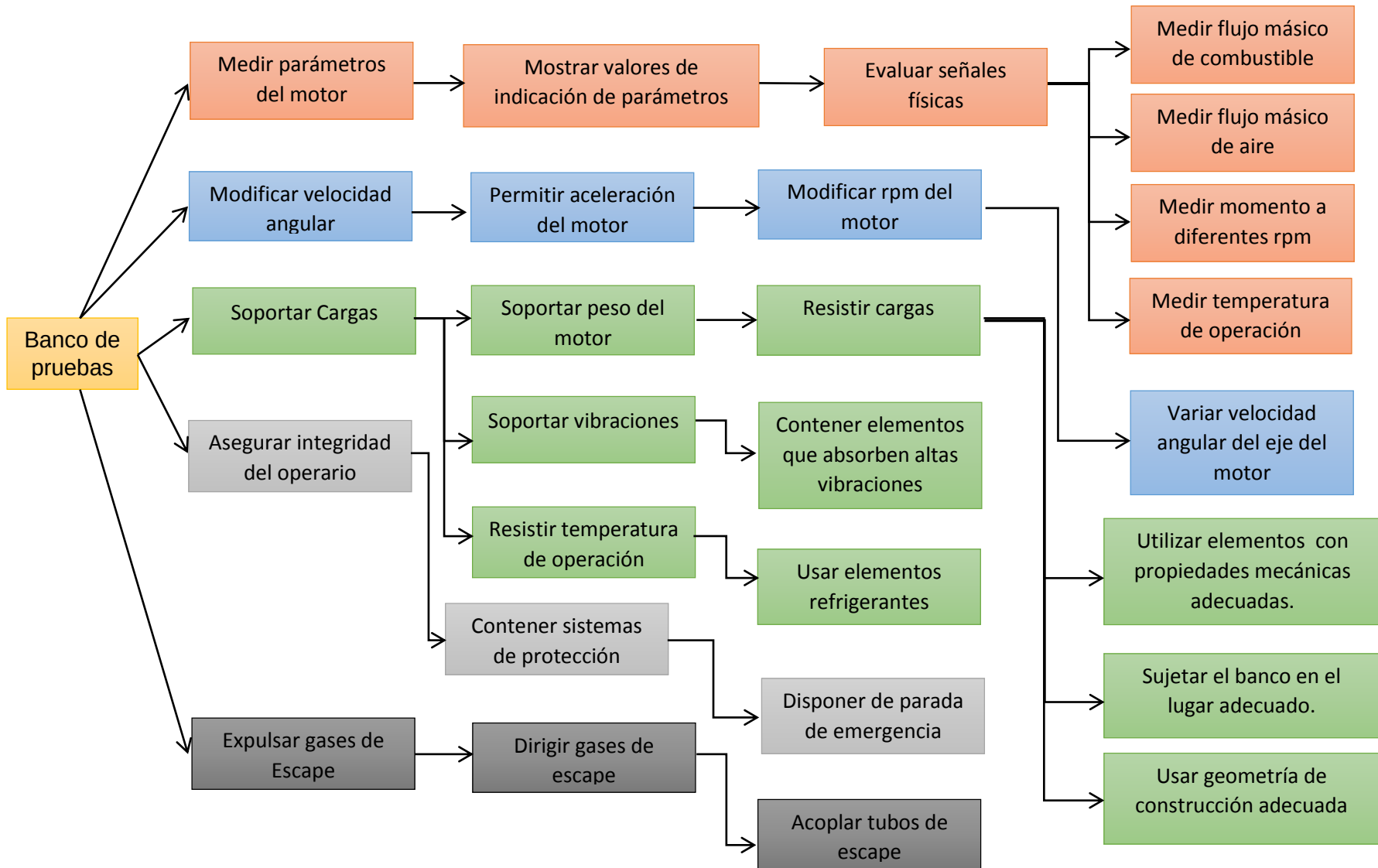


Figura 17. Diagrama funcional del banco de pruebas a diseñar

4.2.2. Conceptos por cada subfunción.

En la metodología del diseño conceptual y luego de obtener el diagrama de funciones para el banco de prueba, (Karl & Eppinger, 2013) define que el paso a seguir es construir por medio de las diferentes técnicas de creatividad, los conceptos relacionados a la última subfunción del diagrama funcional.

Existen técnicas relacionadas a la generación de conceptos como la lluvia de ideas, técnicas de los 6 sombreros, listas de atributos y analogías (Karl & Eppinger, 2013). En la Tabla 3 se resume algunas características importantes para cada una de estas técnicas de generación de conceptos.

Tabla 3. Técnicas de generación de conceptos.

Técnica de generación de conceptos	Características
Lluvia de ideas	Técnica que se caracteriza por suspender críticas y juicios frente a los posibles conceptos que cada uno de los miembros del equipo propone con respecto al producto final.
6 Sombreros del pensamiento	Es un método que se basa en 6 sombreros donde cada uno toma un determinado rol (basado en sentimientos de gusto o disgusto, en miradas objetivas, críticas, control de proceso de pensamiento) para la generación de conceptos.
Analogías	Es una técnica que se basa en simular una situación ficticia que implique cambiar o modificar un objeto.

En cuanto al uso de las técnicas de generación de conceptos para el diseño del banco de pruebas, la lluvia de ideas y la técnica de los 6 sombreros son las opciones de preferencia a utilizar, ya que permiten que se tenga en cuenta la creatividad de los autores con sus respectivos puntos de vista. En la Tabla 4, se describe para la función principal denominada “*medir*

parámetros del motor”, los conceptos generados mediante el uso de las técnicas mencionadas anteriormente.

Tabla 4. Conceptos para la función “*medir parámetros del motor*”

Medir parámetros del motor	
Subfunción	Concepto
Medir flujo másico de combustible	• Balanza gravimétrica • Caudalímetros • Método volumétrico • Probeta de medición • Medidor ultrasónico
Medir flujo másico de aire	• Tobera calibrada • Orificio calibrado • Caudalímetros • Anemómetro • Ventiladores • Medidor de rueda alada
Medir momento y rpm simultáneamente	• Torquímetro y Láser • Galga Extensiométrica e infrarrojo • Celda de carga y Tacómetro • Freno de Prony y Luz estroboscópica • Con la mirada
Medir temperatura de operación	• Termistores • Termopares • Con la mano • Termómetro

En la Tabla 5, se nombra cada uno de los conceptos que hace parte de la función “*modificar velocidad angular*”. Cada concepto está basado en los diferentes dispositivos que permiten variar la velocidad angular del motor.

Tabla 5. Conceptos para la función “*modificar velocidad angular*”.

Modificar velocidad angular	
Subfunción	Concepto
Variar velocidad angular del eje del motor	• Freno Hidráulico • Freno Eléctrico • Freno de Disco • Freno Abrazadera • Freno tambor • Freno electromagnético • Pedal de fricción

En la Tabla 6, los conceptos propuestos hacen referencia a la función “*soportar cargas*” y por lo tanto involucra materiales, geometrías y elementos que estén relacionados con la parte estructural del diseño del banco de pruebas.

Tabla 6. Conceptos para la función “*soportar cargas*”.

Soportar Cargas	
Subfunción	Concepto
Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	• Acero • Aluminio • Material Compuesto
Sujetar el banco en el lugar adecuado	• Pernos • Empotramiento • Cuerdas
Usar geometría de construcción adecuada	• Perfil en L • Perfil Cuadrado ■ • Perfil Redondo
Usar elementos refrigerantes	• Aire ambiente • Agua • Hidrogeno • Ventilador • Aire acondicionado • Nitrógeno liquido

La construcción del banco de pruebas también tiene en cuenta un factor importante como la seguridad y por lo tanto en la Tabla 7 se muestra los conceptos que se tienen en cuenta para “asegurar la integridad del operario”.

Tabla 7. Conceptos para la función “asegurar integridad operario”

Asegurar integridad operario	
Subfunción	Concepto
Disponer Parada De Emergencia	• Usar alarma industrial • Campana sonora • Switch de apagado

En la Tabla 8, se muestra los conceptos propuestos para la función relacionada a “expulsar gases de escape”, ya que el motor debido a su principio de funcionamiento genera gases que deben ser conducidos hacia el ambiente.

Tabla 8. Conceptos para la función “expulsar gases de escape”

Expulsar gases de escape	
Subfunción	Concepto
Acoplar tubos de escape	• Moffler • Manguera industrial • Canales metálicos • Extractores eléctricos • Tubo de PVC

En este punto, conviene aclarar que (Karl & Eppinger, 2013) dice que una vez propuestos los conceptos para cada subfunción, el siguiente paso en el diseño conceptual es el desarrollo de *combinación de conceptos* cuyo objetivo es evidenciar la cantidad de *conceptos globales* que se originan a partir de la combinación de conceptos mostrados en las tablas anteriores (Ver Tablas 4, 5, 6, 7, 8).

4.2.3. Proceso de filtrado

Se entiende como proceso de filtrado a un conjunto de métodos que se encargan de *descartar* aquellos conceptos globales que son imposibles de realizar o no satisfacen los requerimientos del cliente (Karl & Eppinger, 2013).

El primer proceso de filtrado se realiza basado en 3 factores:

- **Basado en la intuición:** Se descartan aquellos conceptos que por acción lógica no pueden hacer parte del diseño del banco de pruebas.
- **Basado en un listado de desventajas:** Se descartan aquellos conceptos que representan una desventaja para el banco de prueba en materia de operación.
- **Decisión externa:** Es el conjunto de conceptos que son excluidos debido a que representan altos costos o carecen de practicidad para los requerimientos del cliente.

Para aplicar el método de filtrado anterior, es necesario tener en cuenta que ingresan a este proceso de filtrado un total de 48 *conceptos individuales*, los cuales al combinarlos entre sí forman 6.804.000 opciones de *conceptos globales*. En la Tabla 9, se tienen en cuenta aquellos conceptos que han sido descartados aplicando las características del primer proceso de filtrado explicado anteriormente.

Tabla 9. Conceptos descartados en primer proceso de filtrado

	Basado en la intuición	Basado en un listado de desventajas de cada concepto	Decisión externa	Prototipo y prueba de las alternativas prometedoras (prueba – error – corrección)
Medir flujo másico de combustible	Método Volumétrico	Caudalímetro	Balanza Gravimétrica	N/A
Medir flujo másico de aire	- Ventilador - Tobera calibrada	Anemómetro	Orificio Calibrado	N/A
Medir momento y rpm simultáneamente	Con la Mirada	Freno de Prony y Luz estroboscópica	Galga Extensiométrica e infrarrojo	Torquímetro y Laser
Medir temperatura de operación	- Con la Mano - Termómetro	N/A	N/A	N/A
Variar velocidad angular del eje del motor.	- Freno Abrazadera - Pedal de fricción	- Freno de disco - Freno Tambor	Freno electromagnético	N/A
Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	N/A	N/A	Material Compuesto	N/A
Sujetar el banco en el lugar adecuado	Cuerda	N/A	Empotramiento	N/A
Usar geometría de construcción adecuada	N/A	N/A	N/A	Perfil Redondo
Usar elementos refrigerantes	- Ventilador - Aire Acondicionado	- Nitrógeno líquido - Hidrogeno	Agua	N/A
Disponer Parada De Emergencia	- Campana sonora - Alarma industrial	N/A	N/A	N/A
Acoplar tubos de escape	- Manguera industrial - Tubo de PVC.	N/A	- Moffler - Extractores eléctricos	N/A

En la Tabla 10, se muestran los conceptos que son obtenidos del proceso de filtrado anterior.

Tabla 10. Conceptos resultantes del primer proceso de filtrado.

Medir flujo másico de combustible	Probeta de medición Medidor ultrasónico
Medir flujo másico de aire	Caudalímetro Medidor de rueda alada
Medir momento y rpm simultáneamente	Celda de carga y Tacómetro
Medir temperatura de operación	Termistores Termopares
Variar velocidad angular del eje del motor.	Freno Hidráulico Freno Eléctrico
Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	Acero Aluminio
Sujetar el banco en el lugar adecuado	Pernos Cuerdas
Usar geometría de construcción adecuada	Perfil en L Perfil Cuadrado ■
Usar elementos refrigerantes	Aire Ambiente
Disponer Parada De Emergencia	Switch de apagado
Acoplar tubos de escape	Canales metálicos

4.2.4. Matriz pasa o no pasa.

En este punto es importante hacer énfasis en que los conceptos de la Tabla 10 se combinan de tal manera que se busca obtener una cantidad determinada de *conceptos globales*. En este caso se obtienen 64 combinaciones diferentes. Para cada uno de estos conceptos globales, se aplica el análisis de filtrado denominado matriz pasa o no pasa, el cual consiste en responder con un SI o NO y de manera objetiva las siguientes preguntas:

- ¿Es ligero y preciso?
- ¿Es Anticorrosivo?
- ¿Es Económico?
- ¿Es fácil de operar?
- ¿Se puede realizar un fácil mantenimiento?
- ¿Posee estructura modular?
- ¿Es seguro de operar?

Los conceptos globales que posean un NO como respuesta, son descartados y por lo tanto no se tienen en cuenta para los posteriores procesos de filtrado. En el Anexo 1, se muestra la matriz pasa o no pasa aplicada a los conceptos globales obtenidos.

Cada una de las respuestas negativas se debe a las siguientes consideraciones:

- Se descarta la combinación del freno eléctrico por su costo más elevado frente al hidráulico (Aproximadamente en un 50%).
- Se descarta la combinación de los termopares por ser menos preciso (en un 100%) que los termistores, ya que estos se caracterizan por ser sensibles en comparación con los termopares.
- Se descarta el medidor de rueda alada para la medición del caudal de aire por su poca precisión, dado que en la industria de construcción de bancos no es utilizado.

En la Tabla 11 se muestra diferentes conceptos que conforman 8 tipos de banco de prueba obtenidos luego de aplicar el método de filtrado denominado *matriz pasa o no pasa*.

Tabla 11. Combinaciones posibles luego del proceso de filtrado de la matriz pasa o no pasa.

C. Global	Medir Flujo másico de combustible	Medir flujo másico de aire	Medir Momento y rpm simultáneamente	Medir temperatura de operación	Variar velocidad angular del eje del motor	Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	Sujetar banco en el lugar adecuado	Usar geometría de construcción adecuada	Usar elementos refrigerantes	Disponer parada de emergencia	Acoplar tubos de escape
1	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil L	Aire	Swich Apag.	C. metálico
2	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil □	Aire	Swich Apag.	C. metálico
3	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil L	Aire	Swich Apag.	C. metálico
4	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil □	Aire	Swich Apag.	C. metálico
5	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil L	Aire	Swich Apag.	C. metálico
6	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil □	Aire	Swich Apag.	C. metálico
7	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil L	Aire	Swich Apag.	C. metálico
8	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil □	Aire	Swich Apag.	C. metálico

4.2.5. Estudio de factibilidad

El estudio de factibilidad es un proceso de aproximaciones sucesivas basado en supuestos, pronósticos, juicios y estimaciones con el fin de orientar el problema por resolver (Santos, 2008).

En el diseño del banco de pruebas, el estudio de factibilidad permite cuestionar por medio de un conjunto de preguntas, las características y condiciones sobre aquellos conceptos globales de la Tabla 10 y determinar si satisface o no los requerimientos del cliente.

El desarrollo del estudio de factibilidad comprende 3 preguntas subjetivas cuyas respuestas evaluadas con un SI o NO, representan un juicio para cada concepto global (enumerados de 1 a 8 tal como se muestran en la Tabla 11), y por lo tanto permite filtrar aquellos que no satisfacen los requerimientos del cliente (Ver Tabla 12).

Tabla 12. Proceso de filtro basado en estudio de factibilidad

	1	2	3	4	5	6	7	8
¿Funcionará el concepto de acuerdo a los requerimientos del cliente?	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
¿Es atractivo el concepto para el equipo de diseño? Idea original o invención.	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI
¿Es viable el concepto geométrico para el diseño del banco de prueba?	NO	SI	NO	SI	NO	SI	NO	SI

Como resultado del estudio de factibilidad, la depuración de conceptos globales recae en aquellos que contienen al perfil en L, ya que este diseño representa mayor complejidad en su ensamble, más costoso, y poco estético en comparación con el perfil cuadrado, ya que este es simétrico desde cualquier punto de vista. En la Tabla 13, se muestra los conceptos globales obtenidos del proceso de filtrado basado en los estudios de factibilidad.

Tabla 13. Conceptos globales obtenidos del estudio de factibilidad.

C. Global	Medir Flujo másico de combustible	Medir flujo másico de aire	Medir Momento y rpm simultáneamente	Medir temperatura de operación	Variar velocidad angular del eje del motor	Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	Sujetar banco en el lugar adecuado	Usar geometría de construcción adecuada	Usar elementos refrigerantes	Disponer parada de emergencia	Acoplar tubos de escape
1	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil ■	Aire	Swich Apag.	C. metálico
2	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil ■	Aire	Swich Apag.	C. metálico
3	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Acero	Pernos	Perfil ■	Aire	Swich Apag.	C. metálico
4	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil ■	Aire	Swich Apag.	C. metálico

4.2.6. Matriz de decisión Pugh

La matriz de decisión Pugh, es conocida como *total design*, el cual emplea de manera conjunta todos los posibles criterios de evaluación implicados en los que se asignan una importancia relativa y se compara con las alternativas en cada uno de estos criterios para así obtener una valoración ponderada de todos (García, Alejandro, & Maldonado, 2012).

El método de Pugh involucra algunos pasos como:

- Identificación de posibles alternativas
- Definición de criterios: este depende del objetivo que se pretende alcanzar y se usa para evaluar las alternativas propuestas.
- Definición de la importancia de cada criterio: la ponderación o importancia se evalúa de acuerdo a la escala de Likert de 1 a 10, donde el 1 representa una importancia nula del concepto y el diez indica una importancia esencial. Cada una de ellas son promediadas de acuerdo a la cantidad de + o – que existen para cada alternativa.
- Se selecciona la alternativa con el resultado más alto en este proceso de filtrado.

En la Tabla 14, se muestra a modo de ejemplo una vista esquemática de la evaluación por el método Pugh. En este caso, la alternativa 2 tiene un resultado de veinte (20), el cual es más alto que las alternativas 1 y 3. Esto quiere decir que la alternativa 2 es la que continua en los posteriores procesos de filtrado, mientras que las alternativas 1 y 3 son descartadas.

Tabla 14. Ejemplo esquemático sobre el método Pugh.

CRITERIO DE DISEÑO	PONDERACIÓN O IMPORTANCIA	ALTERNATIVA N° 1	ALTERNATIVA N°2	ALTERNATIVA N°3
Criterio 1	10	+	+	-
Criterio 2	9	-	+	-
Criterio 3	8	+	+	+
Criterio 4	7	-	-	-
Suma de Positivos +		2	3	1
Importancia de positivos +		18	27	8
Importancia de negativos -		16	7	26
Resultado alto, pasa.		2	20	-18

El proceso de filtrado utilizando el método Pugh, permite evidenciar que la selección del *concepto global* está basada en criterios cuantitativos y estrechamente relacionados a los requerimientos del cliente. En la Tabla 15 se muestra los criterios y la evaluación correspondiente para los cuatro (4) conceptos globales mostrados en la Tabla 13.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Tabla 15, es posible evidenciar que la evaluación arrojó que el concepto global 2 y 4 obtuvieron un resultado positivo y por lo tanto se tienen en cuenta para la selección por QFD (casa de la calidad del producto). Asimismo, en la Tabla 16 se encuentran los conceptos globales 2 y 4 que han quedado luego de aplicar el proceso de filtrado Pugh y de esta manera permite visualizar los elementos que componen estos conceptos globales.

Tabla 15. Evaluación de los conceptos globales basado en el método Pugh.

CRITERIO DE DISEÑO	PONDERACIÓN O IMPORTANCIA	Concepto Global 1	Concepto Global 2	Concepto Global 3	Concepto Global 4
Que sea económico en su operación	10	+	+	-	-
Que sea de fácil y de económico mantenimiento	8	-	-	+	+
Que sea didáctico como herramienta académica	10	-	-	+	+
Que sea desplazable fácilmente	7	-	+	-	+
Que sea seguro operacionalmente	9	+	+	-	-
Que posea un panel ergonómico	6	+	+	+	+
Que sea económico en su adquisición	8	-	-	+	+
Que sea atractivo visualmente	7	-	+	-	+
Suma de Positivos +		3	5	4	6
Suma de Positivos -		5	3	4	2
Importancia de positivos +		25	39	32	46
Importancia de negativos -		40	26	33	19
Resultado alto, pasa.		-1	13	-1	27

Tabla 16. Conceptos globales resultantes del análisis Pugh.

C. Global	Medir Flujo másico de combustible	Medir flujo másico de aire	Medir Momento y rpm simultáneamente	Medir temperatura de operación	Variar velocidad angular del eje del motor	Utilizar materiales con propiedades mecánicas adecuadas	Sujetar banco en el lugar adecuado	Usar geometría de construcción adecuada	Usar elementos refrigerantes	Disponer parada de emergencia	Acoplar tubos de escape
C. Global 2	Medidor ultrasónico	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil 	Aire	Swich Apag.	C. metálico
C. Global 4	Probeta de M.	Caudalímetro	Celda de carga y Tacómetro	Termistores	Freno Hidráulico	Aluminio	Pernos	Perfil 	Aire	Swich Apag.	C. metálico

4.2.7. Casa de la Calidad

La casa de la calidad (QFD) consiste en un proceso nacido en 1960 en Japón con el fin de introducir productos originales. En aquella época formó parte fundamental en las herramientas de gestión de calidad con el principal objetivo de creación de nuevas aplicaciones y productos (Yacuzzi & Fernando, 2003).

En la Figura 18, se muestra un ejemplo esquemático acerca de lo que consiste la casa de la calidad QFD.

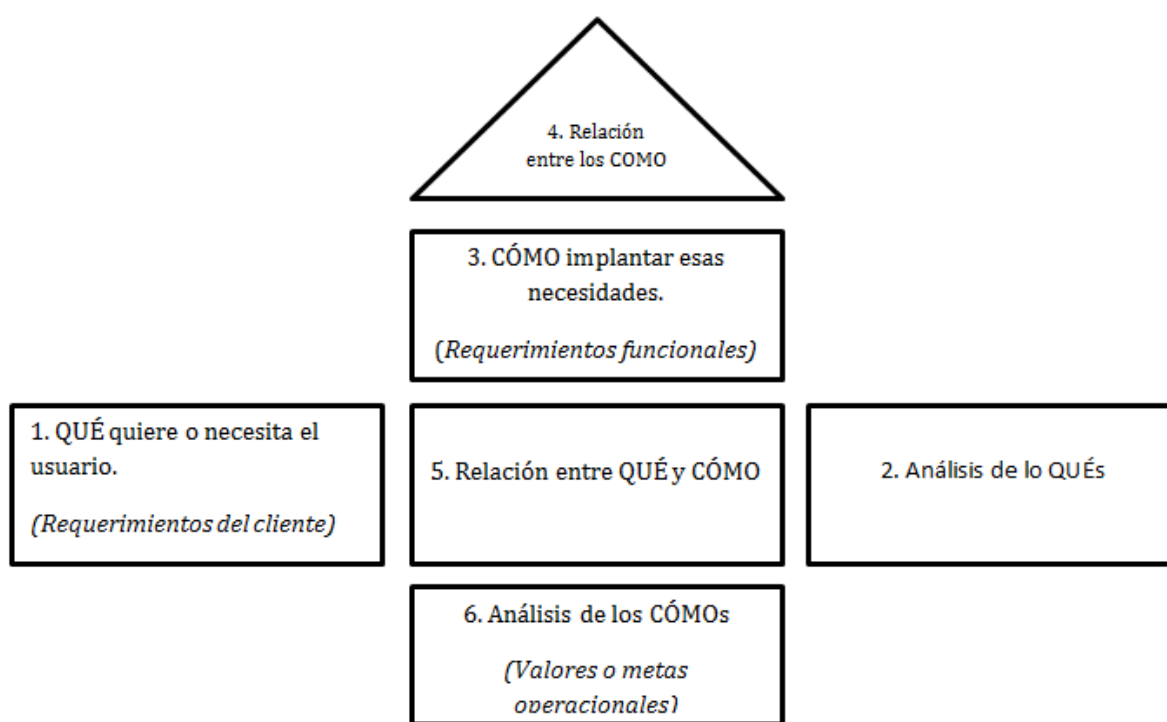


Figura 18. Relación casa de la calidad.

Fuente: Adaptado de (Jimeno, 2012)

Para aplicar el método QFD a la selección final de un diseño, se debe tener en cuenta un conjunto de condiciones basadas en responder a las preguntas ¿Qué? y ¿Cómo?, que permiten definir y satisfacer las necesidades de los clientes potenciales y los requerimientos determinados.

De acuerdo con (Ullman, 2008), la casa de la calidad QFD tiene en cuenta los siguientes aspectos:

- **Requerimientos del cliente**

Cada requerimiento del cliente (ver apartado 6.1) es evaluado por el cliente en una escala numérica cuya importancia se mide de 0 a 10 siendo el 0 el valor mínimo de importancia y 10 el valor máximo de importancia.

- **Orden de importancia**

Es una calificación numérica que determina cuál de los requerimientos del cliente tiene mayor relevancia y que resulta decisivo a la hora de escoger el producto final.

- **Requerimientos funcionales**

Los requerimientos funcionales son evaluados con el fin de determinar la relación que existe con los requerimientos del cliente. De esta manera, se evalúa así:

- 1 como relación pobre con los requerimientos del cliente. 
- 3 como relación moderada con los requerimientos del cliente. 
- 9 como relación fuerte con los requerimientos del cliente. 

- **Evaluación competitiva**

La evaluación competitiva es una comparación que por medio de una ponderación (entre 0 como peor y 5 como el mejor), evalúa los requerimientos del cliente entre los conceptos globales de la Tabla 15 y productos similares existentes en el mercado (Benchmarking).

- **Valores o metas operacionales**

El valor operacional consiste en evaluar de 0 a 10 la dificultad para lograr un objetivo representado en una medida cuantitativa para cada uno de los requerimientos funcionales.

A continuación, se van a comparar los últimos dos conceptos de la Tabla 16 utilizando la casa de la calidad, los cuales son dos bancos que cumplen con los requerimientos para motores de potencia de hasta 120 hp.

En la Figura 19, se muestra dónde se encuentran ubicados los requerimientos del cliente y su evaluación con respecto a la importancia de cada requerimiento en una escala de 1 a 10.

Row #	Max Relationship Value in Row	Relative Weight	Weight / Importance	Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")
1	9	15,4	10,0	Que sea económico en su operación
2	3	12,3	8,0	Que sea de fácil y de económico mantenimiento
3	3	15,4	10,0	Que sea didáctico como herramienta académica
4	3	10,8	7,0	Que sea desplazable fácilmente
5	9	13,8	9,0	Que sea seguro operacionalmente
6	9	9,2	6,0	Que posea un panel ergonómico
7	3	12,3	8,0	Que sea economico en su adquisición
8	3	10,8	7,0	Que sea atractivo visualmente

Figura 19. Requerimientos y evaluación de los requerimientos del cliente.

La evaluación para los requerimientos funcionales de los conceptos globales 2 y 4 son iguales a excepción de la ergonomía del sistema de control, la precisión en la medición de consumo de combustible y la calidad de los sensores y material de construcción, como se observa en la Figura 20 y Figura 21.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Tiempo de parada de motor	Peso	Ergonomía del sistema de control	Estética	Precisión en la medición consumo de combustible	Calidad de los sensores y material de construcción
Que sea económico en su operación					⊙	▲
Que sea de fácil y de económico mantenimiento						▲
Que sea didáctico como herramienta académica			○			
Que sea desplazable fácilmente		○				
Que sea seguro operacionalmente	⊙					
Que posea un panel ergonómico	▲		⊙			
Que sea económico en su adquisición					○	▲
Que sea atractivo visualmente				○		○

Figura 20. Requerimientos funcionales para el concepto global 2.

Quality Characteristics (a.k.a. "Functional Requirements" or "Hows") Demanded Quality (a.k.a. "Customer Requirements" or "Whats")	Tiempo de parada de motor	Peso	Ergonomía del sistema de control	Estética	Precisión en la medición consumo de combustible	Calidad de los sensores y material de construcción
Que sea económico en su operación					○	⊙
Que sea de fácil y de económico mantenimiento						○
Que sea didáctico como herramienta académica			○			
Que sea desplazable fácilmente		○				
Que sea seguro operacionalmente	⊙					
Que posea un panel ergonómico	▲		○			
Que sea económico en su adquisición					○	⊙
Que sea atractivo visualmente				○		○

Figura 21. Requerimientos funcionales para el concepto global 4

El valor o meta operacional permite visualizar cuantitativamente la diferencia entre los conceptos globales 2 y 4. En este caso, se puede evidenciar en la Figura 22 y Figura 23, que la fila de *dificultad (difficulty)* muestra que los únicos valores que cambian corresponden al precio y a la precisión en la medición de consumo de combustible. De esta manera, el precio del medidor ultrasónico es superior en el concepto global 2 con respecto al concepto global 4 y por lo tanto, utilizar este dispositivo resulta bastante costoso en comparación con una probeta. La ventaja de la probeta en este caso es su característica didáctica, ya que permite visualizar el consumo de una manera cualitativa dependiendo de las rpm del motor.

Target or Limit Value	>5 segundos	>=170 Libras	Porcentaje %	#FFE900 (Hexadecimal RGB)	1-5%	Máx US 20.000
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	5	7	5	0	5	9
Max Relationship Value in Column	9	3	9	3	9	3
Weight / Importance	133,8	32,3	129,2	32,3	175,4	72,3
Relative Weight	9,6	2,3	9,3	2,3	12,6	5,2

Figura 22. Valor o meta operacional para concepto global 2.

Target or Limit Value	>5 segundos	>=170 Libras	Porcentaje %	#FFE900 (Hexadecimal RGB)	1-5%	Máx US 20.000
Difficulty (0=Easy to Accomplish, 10=Extremely Difficult)	5	7	5	0	8	6
Max Relationship Value in Column	9	3	9	3	3	9
Weight / Importance	133,8	32,3	221,5	32,3	83,1	318,5
Relative Weight	8,1	2,0	13,5	2,0	5,1	19,4

Figura 23. Valor o meta operacional para concepto global 4.

Comparando la Figura 22 y Figura 23, el concepto global 4 presenta mayor ventaja frente al concepto global 2 en tres factores: la economía de adquirir una probeta para medición de combustible, el costo de mantenimiento de la misma y el factor didáctico.

Finalmente, la evaluación se determina calificando los requerimientos del cliente en cada concepto global con respecto a la competencia, que en este caso hace referencia a bancos de prueba ya existentes en el mercado. Este procedimiento se realiza evaluando de 1 a 5 cada uno de ellos teniendo en cuenta los requerimientos del cliente con respecto a las características del banco, tal como se muestra en la Figura 24.

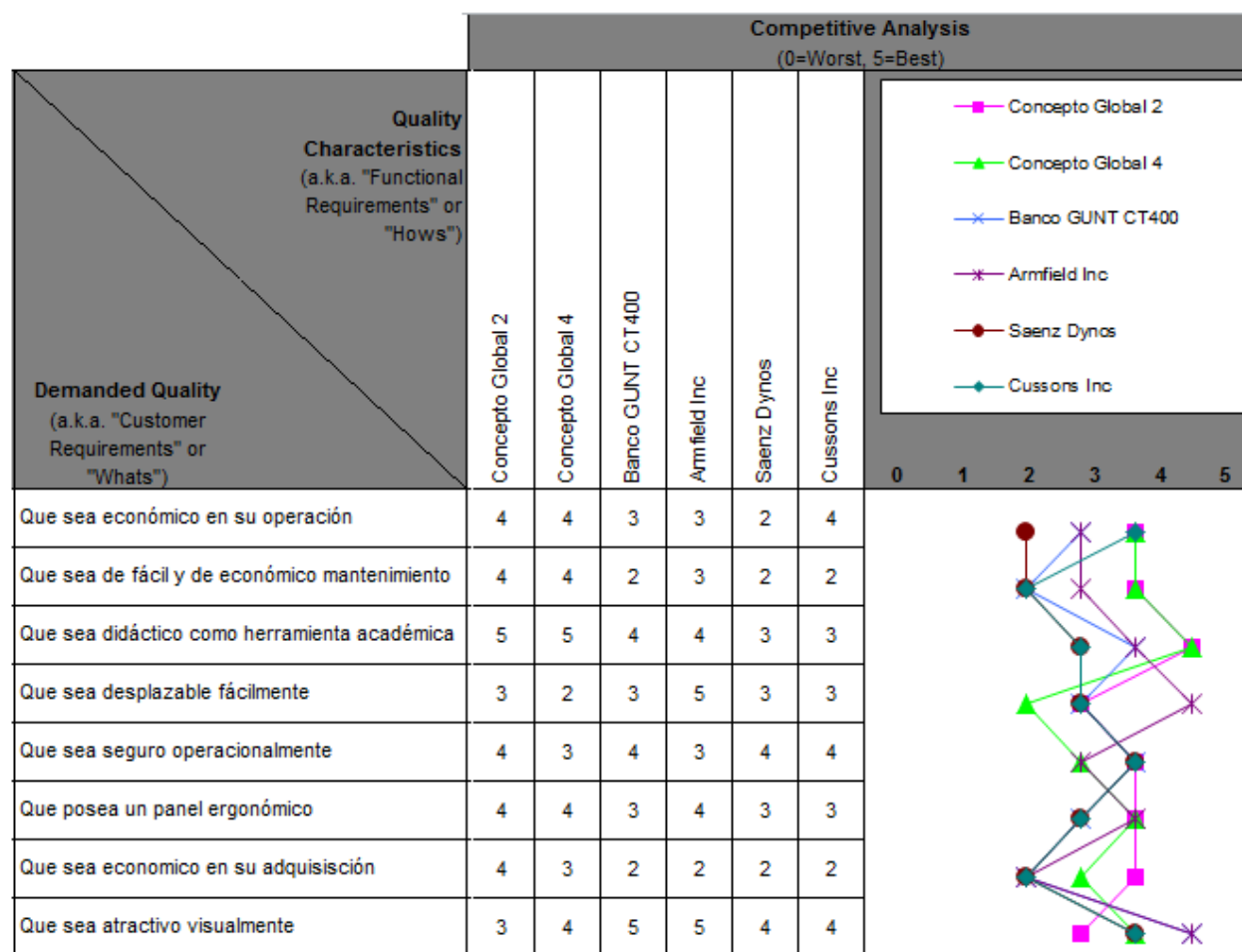


Figura 24. Evaluación comparativa entre la competencia y los conceptos globales.

Se concluye de acuerdo a las figuras anteriores (Figuras 22, 23 y 24), que la mejor opción para el diseño de banco de pruebas es el concepto global 4, ya que el costo de utilizar una probeta de medición es considerablemente más económico que un medidor ultrasónico. Así mismo, el mantenimiento y la operación es un factor determinante debido a los costos que ello implicaría. Por lo tanto, el concepto global 4 resulta ser la mejor opción a trabajar. En el anexo 2 se puede apreciar en su totalidad la casa de la calidad.

4.3. Cálculos estructurales.

Los cálculos estructurales consisten en determinar si el peso y las vibraciones del motor son soportados en una estructura elaborada con los perfiles cuadrados escogidos durante el diseño conceptual y que son elaborados por Bosch Rexroth (Bosch, 2013) en material de aluminio.

En este orden de ideas, el cálculo estructural se realizará en el siguiente orden:

- Cálculo de vibraciones del motor tomando como referencia el motor Rotax 912.
- Cálculos de estática y resistencia de materiales para la estructura de soporte del motor.

4.3.1. Cálculo de vibraciones.

Los motores de combustión interna están sometidos a cargas alternativas debido al movimiento del sistema biela-manivela. Estas cargas se generan en función de la velocidad de las masas en movimiento como por ejemplo, el pistón.

El estudio que se describe a continuación en este apartado, es un análisis básico de vibraciones que de acuerdo con (Fayette, 1985), debe involucrar el cálculo del momento o par de torsión de sacudimiento, ya que es la principal carga que genera vibraciones en el motor.

Momento o par de torsión de sacudimiento para un motor en V

De acuerdo con (Norton, 2009), los motores opuestos son los mismos motores en V, pero con el ángulo $\nu = 180^\circ$, que se muestra en la Figura 25. El análisis dinámico consiste en determinar el momento de sacudimiento del motor teniendo en cuenta el número de cilindros que lo componen.

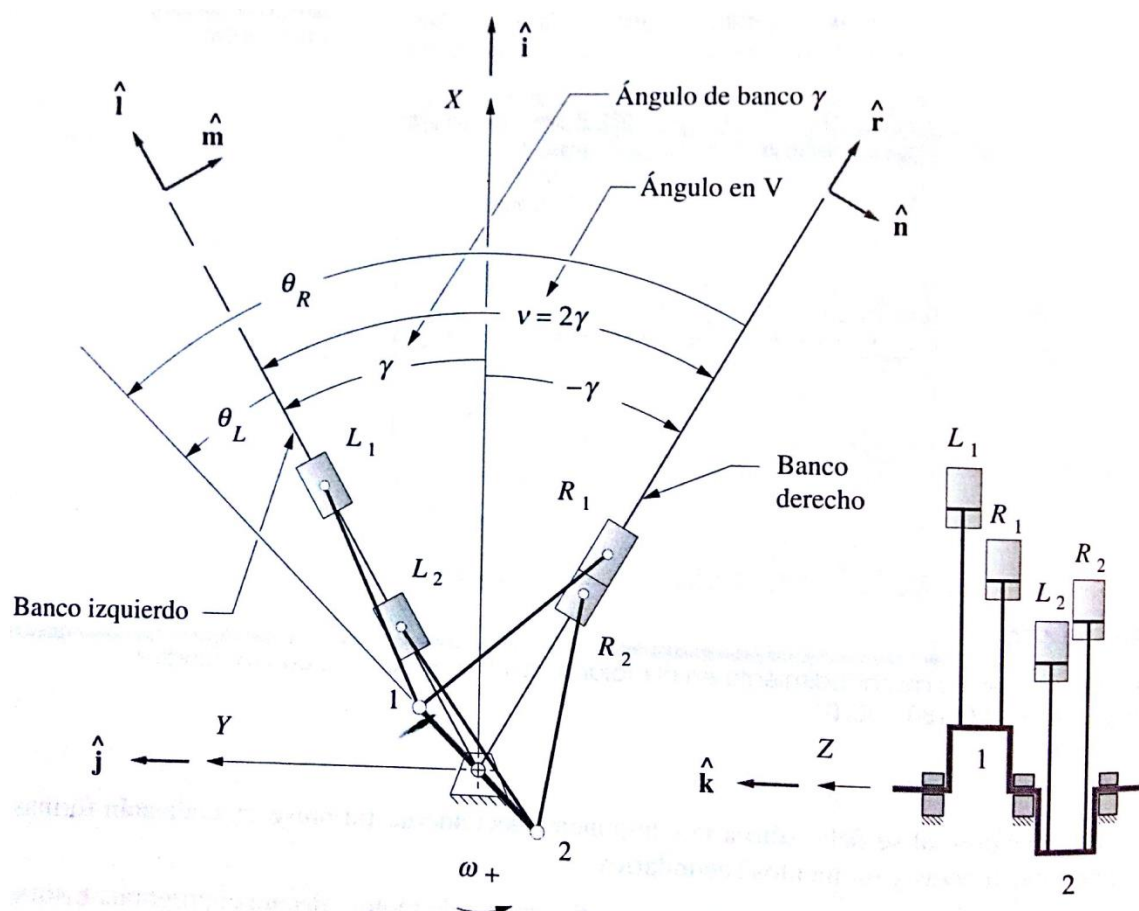


Figura 25. Diagrama para el motor en V.

Según (Norton, 2009), el momento o par de torsión es el producto entre la fuerza de sacudimiento y el brazo de momento desde un punto determinado. Sin embargo, cabe aclarar que para este estudio de vibraciones no se tienen en cuenta las fuerzas de sacudimiento ya que debido a que el motor cuenta con una configuración con los cilindros opuestos, las fuerzas de sacudimiento son cero para cada componente horizontal y vertical (Norton, 2009). Por lo tanto, solo se tiene en cuenta las ecuaciones del par o momento de sacudimiento para el lado izquierdo y derecho del motor deducidas por Norton (Norton, 2009) y que se puede apreciar en las ecuaciones (1) y (2).

$$\begin{aligned}
M_{sR} = m_B r \omega^2 & \left[(\cos \omega t \cos \gamma - \sin \omega t \sin \gamma) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \cos \phi_i \right. \\
& + (\cos \omega t \sin \gamma + \sin \omega t \cos \gamma) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \sin \phi_i \\
& + \frac{r}{l} (\cos 2\omega t \cos 2\gamma - \sin 2\omega t \sin 2\gamma) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \cos 2\phi_i \\
& \left. + \frac{r}{l} (\cos 2\omega t \sin 2\gamma + \sin 2\omega t \cos 2\gamma) \sum_{i=1}^{n/2} z_i \sin 2\phi_i \right] \hat{n}
\end{aligned} \tag{1}$$

$$\begin{aligned}
M_{sL} = m_B r \omega^2 & \left[(\cos \omega t \cos \gamma + \sin \omega t \sin \gamma) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \cos \phi_i \right. \\
& - (\cos \omega t \sin \gamma - \sin \omega t \cos \gamma) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \sin \phi_i \\
& + \frac{r}{l} (\cos 2\omega t \cos 2\gamma + \sin 2\omega t \sin 2\gamma) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \cos 2\phi_i \\
& \left. - \frac{r}{l} (\cos 2\omega t \sin 2\gamma - \sin 2\omega t \cos 2\gamma) \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n z_i \sin 2\phi_i \right] \hat{m}
\end{aligned} \tag{2}$$

La suma vectorial de las ecuaciones (1) y (2) representa el momento de sacudimiento total del motor y por lo tanto deben ser reescritas en el plano i y j así:

$$M_{sx} = (M_{sL} - M_{sR}) \sin \gamma \tag{3}$$

$$M_{sy} = (-M_{sL} - M_{sR}) \cos \gamma \tag{4}$$

De esta manera, se obtiene que la ecuación (5) representa el momento de sacudimiento en sus componentes vectoriales i y j :

$$\mathbf{M}_s = M_{sx} \mathbf{i} + M_{sy} \mathbf{j} \quad (5)$$

Valor numérico para el momento de sacudimiento

El valor del momento o par de torsión de sacudimiento a utilizar se obtiene de graficar la ecuación (5) teniendo en cuenta que las variables ω, r, l, γ dependen del motor (Ver Figura 25).

En este caso, se toma como referencia el motor Rotax 912US donde:

- Régimen de operación máx. 5500 rpm ($\omega = 366,52 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$)
- Radio o longitud de manivela ($r = 0,06 \text{ m}$).
- Longitud de Biela ($l = 0,17 \text{ m}$).
- Masa del pistón: ($m_B = 1,86 \text{ kg}$).
- Ángulo de banco ($\gamma = 90^\circ$).

En la Figura 26 , se muestra el modelo dinámico simplificado de masa concentrada, donde se puede apreciar que corresponde el radio (r) y longitud (l) y que en este caso, los valores numéricos corresponden al motor Rotax 912US.

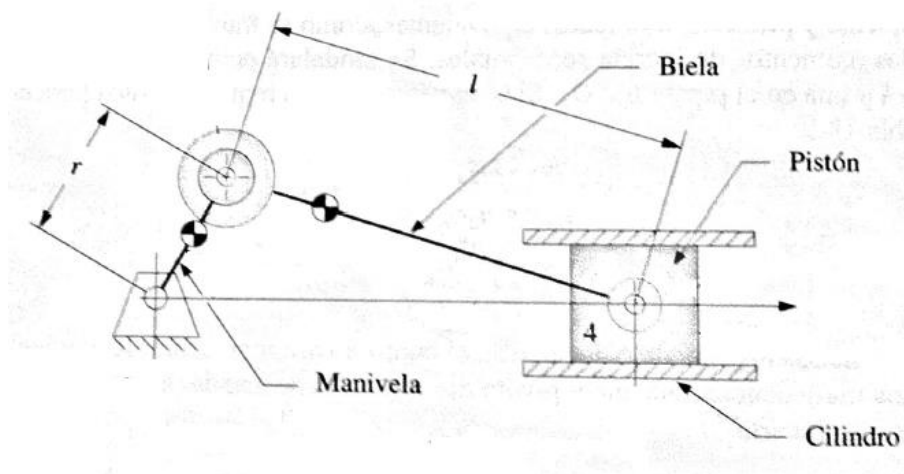


Figura 26. Modelo dinámico simplificado de masa concentrada.

Para un periodo de 30 segundos, el comportamiento del momento de sacudimiento se visualiza en la Figura 27. La amplitud máxima es el valor más crítico para el momento o par de torsión y corresponde a $M_s = 3873,22 \text{ [N.m]}$

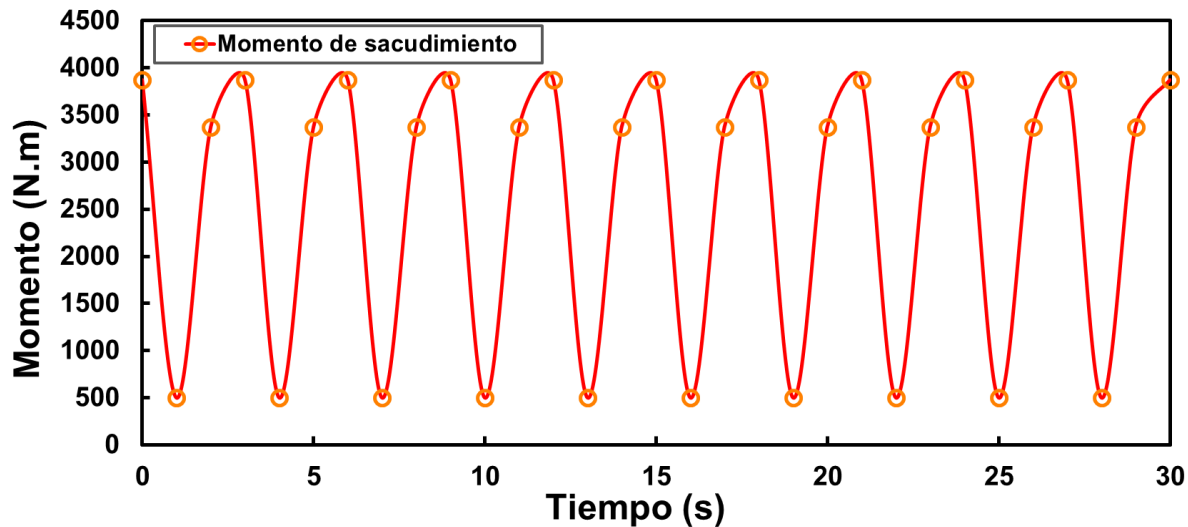


Figura 27. Comportamiento del momento en función del tiempo.

4.3.2. Cálculos Estructurales para estante del motor.

Para el desarrollo de los cálculos estructurales del banco de pruebas, se propone una estructura del estante y la posición del motor, el cual se muestra en el diagrama de cuerpo libre (DCL) de la Figura 28.

De esta manera, los cálculos estructurales están enfocados en:

- Hallar el momento que ejerce el peso del motor sobre el elemento de unión que se encuentra a un costado de la estructura vertical y compararla con los datos técnicos de los perfiles de aluminio Bosch (Bosch, 2013).
- Determinar la flexión de los perfiles de aluminio por medio de las ecuaciones propuestas por Bosch (Bosch, 2013).

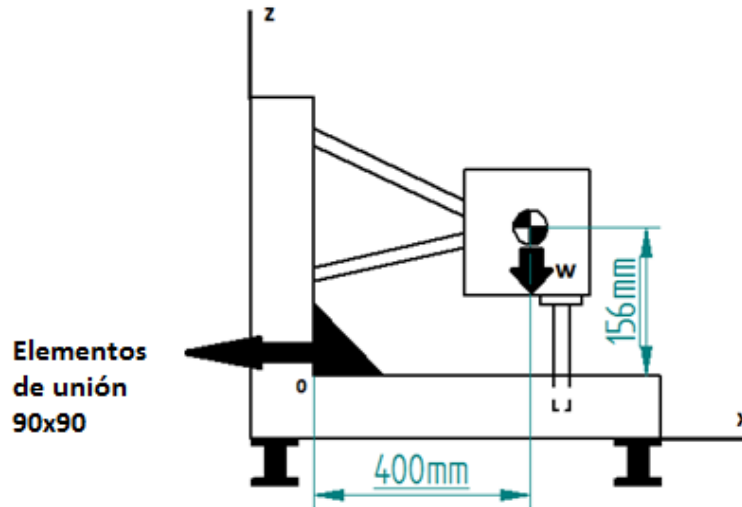


Figura 28. DCL Banco de prueba.

Cabe aclarar que las barras que sostienen el motor mostrado en la Figura 28, son despreciadas para el análisis estructural debido a que representan el sistema de suspensión acoplado al motor dado por el fabricante (BRP, 2014).

Según el diagrama de cuerpo libre DCL mostrado en la Figura 28, el elemento de unión está sometido a un momento con respecto a una línea M_0 producto de la fuerza W .

Si:

$$r = 0,400 \, i + 0j + 0,156k \, [m] \quad (6)$$

$$F = 0 \, i + 0j + 681,1 \, k \, [N] \quad (7)$$

Entonces, resolviendo el momento según el procedimiento descrito en (Bedford, 2010), se obtiene que el momento con respecto al punto 0 es:

$$+\circlearrowleft M_0 = \begin{bmatrix} i & j & k \\ 0,400 & 0 & 0,156 \\ 0 & 0 & 681,1 \end{bmatrix}$$

$$+\circlearrowleft \mathbf{M}_0 = 272,44 \, j \, [N \cdot m] \quad (8)$$

En la Tabla 17, se aprecia mediante un cuadro comparativo los momentos ejercidos por el motor sobre los elementos de unión 90 x 90 y el máximo soportado según Bosch (Bosch, 2013).

Tabla 17. Comparación entre los momentos del banco y los soportados por Bosch.

Tipo de unión	Momento obtenido teóricamente [N.m]	Momento Máx. según Bosch [N.m]
90 x 90	272	1600

Las vibraciones obtenidas en la sección 4.3.1 influyen en la estructura de tal manera que es necesario tener en cuenta el momento de sacudimiento ejercido por el motor sobre la estructura y compararlo con el máximo soportado por la misma, teniendo en cuenta los datos técnicos que el fabricante Bosch brinda con respecto a los perfiles de aluminio y sus correspondientes uniones.

En la Figura 29 se observa cómo influye el momento de sacudimiento del motor sobre la estructura mediante un DCL. Este valor del momento de sacudimiento es comparado con el máximo soportado por la estructura Bosch. Cabe aclarar que el fabricante Bosch brinda información sobre el momento de torsión para los perfiles, tornillos y uniones y por lo tanto, el valor máximo mostrado en la Tabla 18 corresponde al momento máximo soportado por la estructura de acuerdo a las características estructurales y datos técnicos que Bosch brinda en su catálogo correspondiente de los perfiles que componen la estructura.

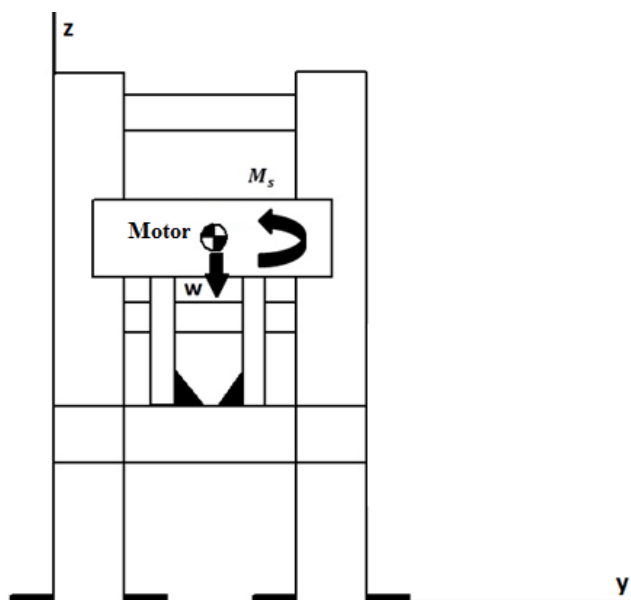
**Figura 29.** Diagrama de cuerpo libre para momento sobre la estructura.

Tabla 18. Comparación entre los momentos ejercidos sobre los elementos de unión.

Momento de sacudimiento [N.m]	Momento Máx. soportado por la estructura [N.m]
3873,22	14160

Según la Tabla 18, se puede evidenciar que la estructura es idónea para desarrollar pruebas a regímenes de operación altos, sin que por ello la vibración del motor suponga problema alguno sobre la estructura.

El análisis de flexión consta de determinar la flexión del perfil y el esfuerzo producido por la flexión de acuerdo a su longitud por medio de la ecuación (9) y (10) mostrada por (Bosch, 2013). Esto orienta el proceso de análisis y ayuda a determinar si la longitud escogida es la más apropiada para el banco motor.

$$f = \frac{5 * m * g * L^4}{384 * E * I} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{(F * L)}{4 * W * 10^3} \quad (10)$$

Dónde:

m =Masa del perfil

$g = 9,81m/s^2$ - Gravedad

L = Longitud del perfil

$E = 70.000N/mm^2$ - Módulo de elasticidad aluminio

I = Inercia del perfil

F = Peso del perfil

W = Momento de resistencia

En la siguiente Tabla 19, se muestra el tipo de perfil Bosch que compone la estructura del banco junto a su información estructural como la inercia, la masa del perfil, y el momento de resistencia:

Tabla 19. Característica de los perfiles Bosch escogidos.

TIPO DE PERFIL	MASA (kg/m)	INERCIA (cm^4)	W (cm^3)
90 x 90	10,5	302	67
45 x 45	2	14	6,1

Fuente: (Bosch, 2013)

Se puede apreciar en la Tabla 20, la flexión y el esfuerzo de cada perfil de aluminio según la longitud a utilizar. De esta manera, se puede evidenciar que la flexión y el esfuerzo de los perfiles son bajos en comparación con el máximo soportado para cada uno, el cual corresponde a $\sigma_{m\acute{a}x} = 200 \text{ N/mm}^2$ de acuerdo con el catalogo BOSCH (Bosch, 2013). Con lo anterior, no existe inconveniente en utilizar las dimensiones establecidas para cada perfil del banco. En el anexo 3, se encuentran los planos de ingeniería sobre el banco motor.

Tabla 20. Flexión de los perfiles de aluminio según su longitud

Perfil	Longitud (mm)	Flexión (m)	Esfuerzo (N/mm^2)
45 x 45	240	8,64E-08	0,192
45 x 45	156	1,54E-08	0,125
90 x 90	700	1,52E-06	0,269
90 x 90	420	1,98E-07	0,161
90 x 90	240	2,10E-08	0,100

Cargas que debe soportar el suelo con respecto al banco de pruebas.

Teniendo en cuenta los cálculos anteriores y la información de la Tabla 19, se puede determinar que la estructura del banco motor tiene un peso de $w_{estructura} = 157 \text{ N}$, el cual sumado con el peso del motor $W_{motor} = 682 \text{ N}$, da como resultado la fuerza total ejercida al suelo, el cual es $W_{total} = W_{motor} + W_{estructura} = 839 \text{ N}$.

La presión total ejercida por la estructura del banco motor está dada por el cociente entre el peso del motor y la suma de cada área correspondiente a la base de cada pata del banco motor. De esta manera, la presión ejercida por el banco motor es: $P = \frac{F}{A} = \frac{839}{0,1089} = 7.6 \text{ kPa}$. El suelo sobre el cual se debe ubicar el banco de prueba cuenta con materiales apropiados que brindan una resistencia máxima de ($P_{\text{máx}} = 27800 \text{ kPa}$) y por lo tanto, no representa inconveniente alguno durante el uso del banco (ver sección 4.8.1). Este valor se obtuvo a partir de los datos técnicos que brinda el fabricante Toxement en la guía correspondiente a la construcción de suelos en concreto y cerámica industrial. (Toxement, 2014)

4.3.3. Comportamiento según Ansys.

En esta sección, se puede apreciar una simulación estructural de la bancada teniendo en cuenta que la finalidad de este es identificar los puntos críticos durante la operación del mismo y permitir mejorar el diseño en posteriores estudios.

Aunque en los alcances del proyecto no se ha propuesto realizar ninguna simulación computacional, esta se realiza con la finalidad de visualizar el comportamiento que tiene la estructura del banco motor y por lo tanto, la parte numérica de la simulación no es tenida en cuenta, ya que se requiere de un estudio avanzado que no está contemplado en el desarrollo de este proyecto y sería objeto para una nueva tesis.

En la Figura 30, se muestra el comportamiento que presenta la estructura ante el peso del motor, el cual permite evidenciar que la deformación más crítica se encuentra en los dos perfiles verticales de 40X40, lo que conlleva a recomendar una inspección en esta zona durante el mantenimiento del banco motor.

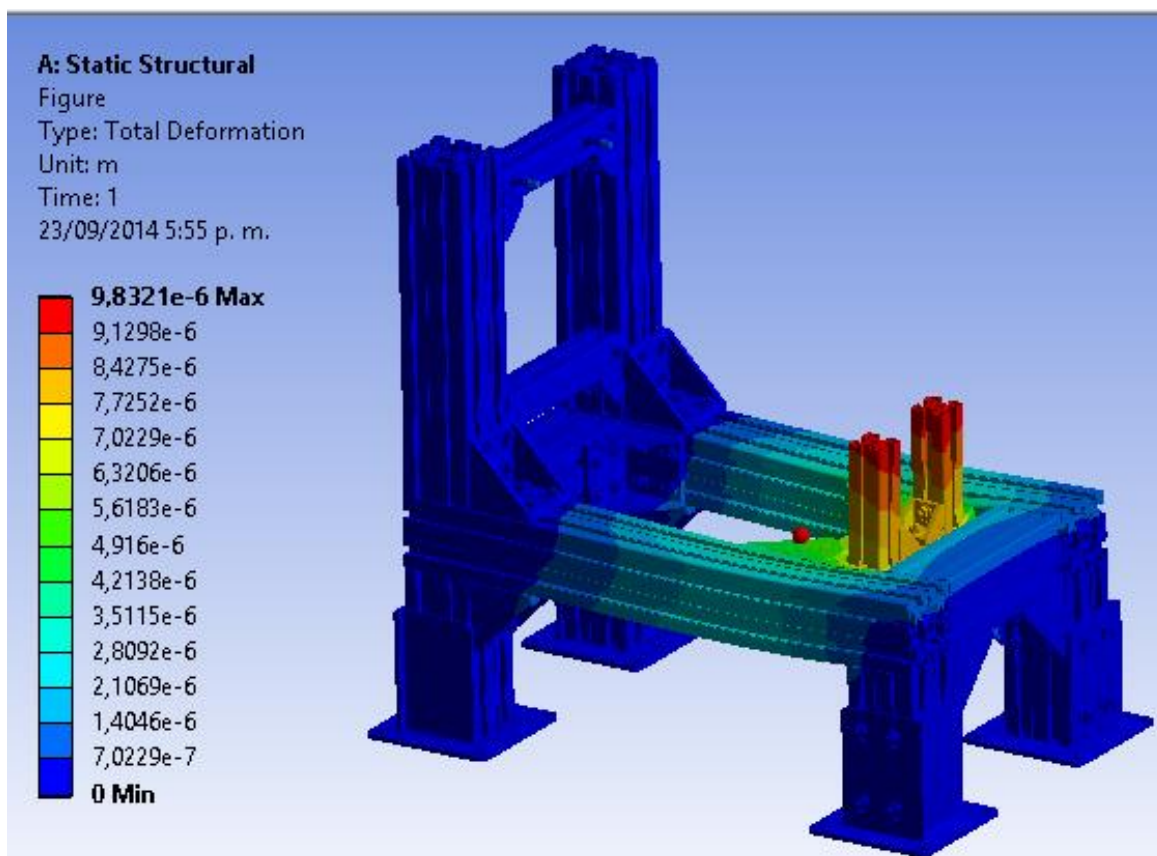


Figura 30. Deformación del banco ante el peso del motor.

En la Figura 31, se puede evidenciar que existe una concentración de esfuerzo en la estructura debida al peso del motor y por lo tanto, permite recomendar que dependiendo del uso del banco de pruebas, es necesario realizar una revisión en los sistemas de unión de los perfiles verticales, con el fin de evitar fallas estructurales en esta zona.

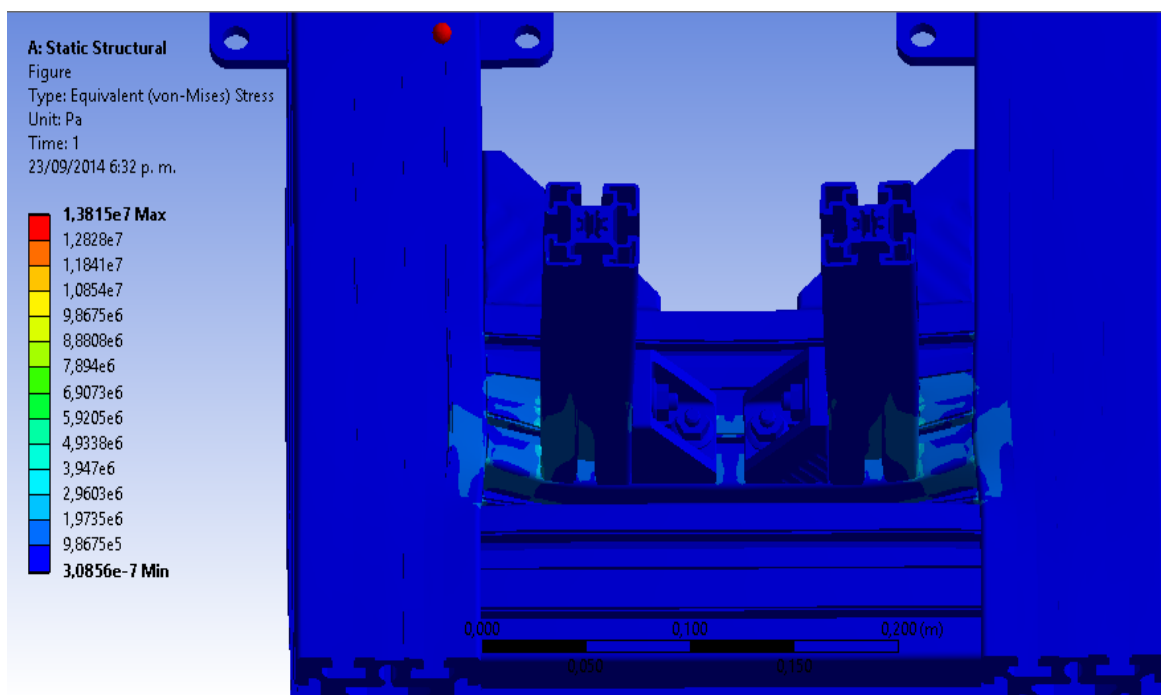


Figura 31. Concentración de esfuerzos sobre la estructura del motor.

4.4. Selección de componentes.

El diseño conceptual ha permitido orientar el proyecto con respecto a la selección de los diferentes tipos de sistemas y dispositivos adecuados que componen el banco de prueba gracias a que fueron descartados diferentes conceptos globales hasta llegar a un sólo concepto global dominante que involucra todos los elementos de medición y componentes adecuados que conforman el banco de pruebas. Esto ha representado una ventaja para este apartado de selección de componentes debido a que solamente se debe escoger el más óptimo dentro de un grupo de dispositivos que tienen características comunes en el mercado.

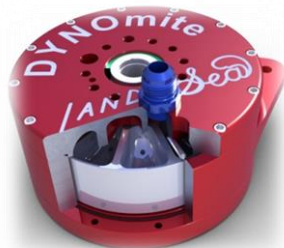
La selección de componentes está basada en comparar los sensores de medición a utilizar en el banco de pruebas. Esta comparación es realizada para los sensores que se requieren en el desarrollo de este proyecto con respecto a los más utilizados en los diferentes bancos de prueba existentes y de esta manera escoger el más adecuado. En cada subsección se argumenta de manera técnica cada elemento escogido.

4.4.1. Freno dinamométrico hidráulico.

En esta subsección, se encuentra la selección del freno dinamométrico hidráulico, el cual está basado en un conjunto de criterios que involucra datos técnicos y características de operación, con la finalidad de escoger el más idóneo para el diseño del banco de pruebas.

En la Tabla 21, se muestra algunos de los diferentes tipos de frenos dinamométricos hidráulicos existentes en el mercado que se ajustan a la potencia del motor a trabajar (120hp).

Tabla 21. Frenos dinamométricos.

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	VALOR	IMAGEN
Water-Brake Absorber DYNOmite.	• Excelente relación de tamaño y potencia. (250hp) • Requerimiento mínimo de agua (5gpm @ 30 psi)	8000 USD	
Stuska Water Brakes XS-19	• Tamaño favorable para la potencia y velocidad máxima soportada (200hp) @ 9000rpm. • Baja inercia debido a la aleación de aluminio del rotor. • Requerimiento mínimo de agua (8gpm @ 30psi)	9700 USD	
D-100 Small Engine Dynamometer	• Trabaja bajo condiciones continuas de máximo 14000 rpm. • Opera para máximo 100hp. • Funciona con caudal de agua mínimo de 10gpm @ 35psi.	7500 USD	

Freno dinamométrico Sáenz DR3	• Trabaja en rangos de alta capacidad (600hp @ 8000rpm). • Integra freno, arranque y sensor de medición de par. • Funciona con caudal de agua mínimo de 15lpm @ 40psi	9900 USD	
----------------------------------	---	----------	---

A partir de las características de los diferentes frenos de la Tabla 21, se recomienda utilizar el freno hidráulico DR3 de la empresa SÁENZ, debido a que la relación entre precio y prestaciones lo hace tener mayor ventaja frente a los otros frenos dinamométricos hidráulicos mostrados anteriormente, ya que puede funcionar con motores con potencia mayor a la requerida por el banco de prueba a diseñar (120hp). Cabe tener en cuenta, que este freno cuenta con su propio sistema de arranque eléctrico, además de contar con sensores de torque y su propio estante para montarlo, garantizando de esta manera el correcto funcionamiento del freno.

4.4.2. Conexión del motor al freno.

La conexión al motor se realiza por medio de un sistema de junta universal (eje cardánico) que en este caso corresponde al acople universal *1810 series* de la empresa SAENZ, el cual se caracteriza por trabajar en condiciones de alta potencia (1000hp). En la Figura 32, se aprecia el eje tipo cardánico:



Figura 32. Eje de tipo cardánico 1810 series.

En caso de utilizar el motor Rotax 912US para las prácticas en el banco de pruebas, se debe tener en cuenta que al ser un motor de aviación, éste requiere de un acople en lugar de la hélice, el cual puede ser fabricado teniendo en cuenta las siguientes dimensiones (Ver Figura 33):

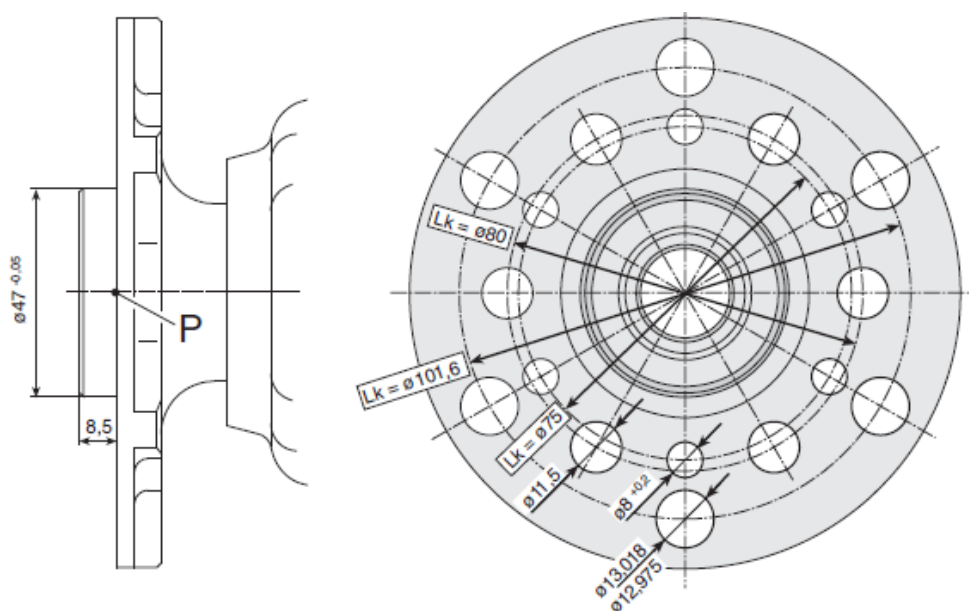


Figura 33. Dimensiones para acople del motor al eje.

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

4.5. Sistema de Sensores

En las siguientes subsecciones, se encuentra información acerca de los sensores escogidos para el banco de pruebas a diseñar. Cada sensor ofrecido en el mercado ha sido comparado entre sí con la finalidad de escoger el más adecuado, teniendo en cuenta el costo beneficio que ofrece cada uno.

4.5.1. Termistores.

Un termistor es un dispositivo semiconductor térmicamente sensible, el cual posee una resistencia que varía con la temperatura. Están fabricados de óxido de metal encapsulado en material epóxico. Existen dos tipos de termistores, los de coeficiente de temperatura negativos (NTC) que son utilizados en la medición de la temperatura del motor, y los de coeficiente de temperatura positivos (PTC), que se utilizan para la protección de circuitos en reemplazo a los fusibles (National Instruments, 2013).

Cuando se adquiere un MCIA, el fabricante se encarga de entregar los accesorios necesarios del mismo. En este caso, el fabricante del motor Rotax 912US entrega el termistor (NTC) correspondiente (conector 6.3x0.8 DIN46247) adecuado para el motor.

4.5.2. Probeta de medición para combustible

El sistema de medición de combustible para el banco de prueba está basado en una probeta de vidrio de doble entrada elaborada en aleación de boro - silicato, el cual brinda propiedades térmicas y dieléctricas más altas que en comparación con el vidrio común, evitando de esta manera que el combustible se encienda de manera inesperada (VIDRASA S.A., 2010).

Esta probeta de medición se caracteriza por ser una herramienta didáctica debido a que permite que el estudiante visualice la cantidad de combustible consumido bajo diferentes rangos de operación, es decir, ofrece una visión de lo que significa una cantidad volumétrica de combustible, característica que no ofrecen los medidores de alta tecnología. En la Figura 34, se observa la probeta de medición para el banco de pruebas el cual se recomienda enviar a fabricar (ver capítulo 5 para el correspondiente costo).

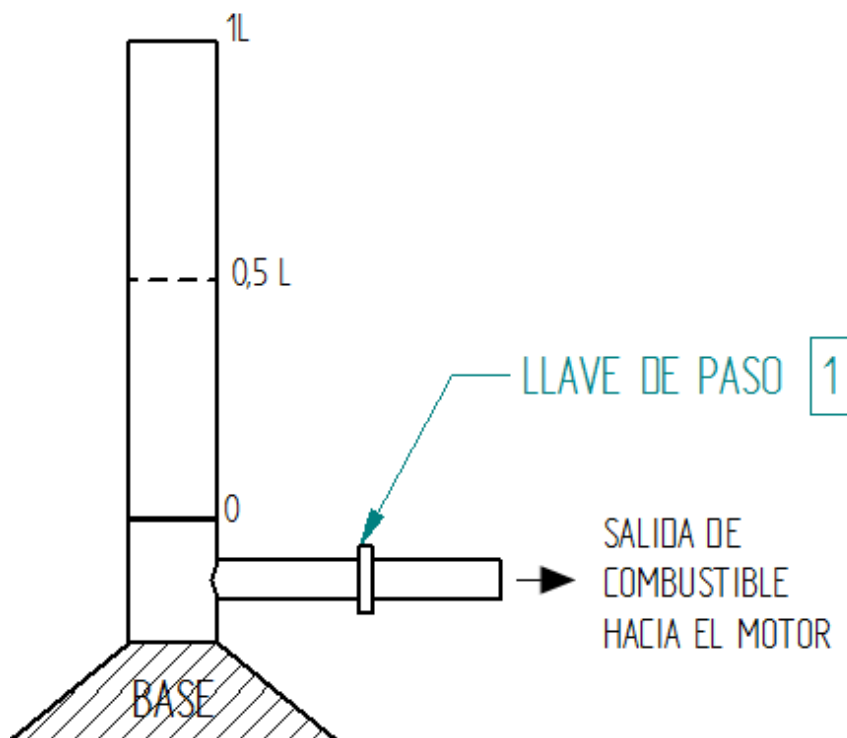


Figura 34. Probeta de medición.

4.5.3. Caudalímetro

Un caudalímetro, es un dispositivo que se utiliza para medir el caudal o la cantidad de un gas o líquido. Los caudalímetros se conocen por muchos nombres, como flujómetro, indicador de flujo, medidor de líquido, etc., según la industria. No obstante, la función de medición de caudal es siempre la misma, medir el volumen de un gas o líquido en un intervalo de tiempo (MAX MACHINERY, 2009). En la Tabla 22, se encuentra una comparación entre los diferentes tipos de caudalímetros utilizados en la medición de flujo de aire.

Tabla 22. Caudalímetro para medición de aire.

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	VALOR	IMAGEN
3" Flanged Digital Gas Flow (Turbine Qmin)	•Rango de temperatura soportado entre -1°C y 50°C •Tiene un rango de medición entre 30 y 300 m^3/h. •Precisión de $\pm 5\%$ en la medición de caudal	2000 USD	
OMEGA® FTB730 Series (Turbine Meters)	•Rango de temperatura soportado entre 0°C y 100°C •Tiene un rango de medición entre 3 y 400 m^3/h. •Precisión de ± 3 en la medición de caudal.	2470 USD	
Rn4/150 Turbine (Flowmeter)	•Alta precisión en las mediciones ($\pm 1\%$ en la medición de caudal) •Manufactura de alta calidad. •Tiene un rango de medición entre 27 y 540 m^3/h. •Capacidad de flujo bidireccional.	2050 USD	
Air Flow Meter Turbines (DYNOMite)	•Tiene un rango de medición entre 30 y 300 m^3/h. •Manufactura especializada para MCIA. •Precisión de ± 1 en la medición de caudal.	645 USD	

A partir de los caudalímetros existentes en el mercado y mostrados en la Tabla 22, se selecciona el flujómetro *Air Flow Meter Turbines* de la empresa DYNOMite, ya que sus características son ideales para el banco de pruebas por garantizar compatibilidad entre los diferentes sistemas de adquisición de datos, además de ofrecer alta precisión (de $\pm 1\%$) en comparación con los otros caudalímetros. Asimismo, el rango de medición se ajusta a los recomendados por el fabricante Rotax 912US, ya que este es de aproximadamente $220 \text{ m}^3/\text{h}$. Cabe aclarar que el precio también es algo que aporta una ventaja a este caudalímetro, ya que es considerablemente menor en comparación con los demás mostrados en la Tabla 22.

4.5.4. Sistemas de adquisición de datos.

El sistema de adquisición de datos es un conjunto de dispositivos que permiten por medio de una interfaz en el ordenador (PC) y un hardware especializado, mostrar al usuario los datos de medición captados por el sistema de sensores por medio de una señal eléctrica (KEITHLEY, 2001).

Para el diseño del banco de pruebas, se debe tener en cuenta que el uso de un adecuado sistema de adquisición de datos permite al operario tener un adecuado control del banco. Por esta razón, en la Tabla 23 se muestran diferentes tipos de sistemas de adquisición de datos en el mercado y de esta manera escoger el que mejor se caracterice por su ergonomía y compatibilidad entre los sensores a utilizar.

Tabla 23. Sistemas de adquisición de datos.

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	VALOR	IMAGEN
Data Acquisition y Control. (Stuska)	• Entradas de medición de torque, velocidad, 3 para flujo de combustible, 12 para salida de temperatura de gases de escape, 5 de temperatura para motor, 4 de presiones. • Comando de PC. • Control de carga. • Error de precisión de 2% para medir rpm y temperatura	5100.00USD	
GPS-6000 Data Acquisition y Control (Go Power System)	• 3 entradas para termistores, transductores de presión, control de potencia. • 2 Salidas digitales • 1 salidas Análogas. • Comando de PC. • Precisión del software del 98%	4855.00USD	
Data Acquisition y Control (DYNomite)	• Comando de PC. • Transductor de torque con características digitales y análogas. • Tacómetros para mediciones de rpm • Control de automático de carga y aceleración. • Entradas de temperatura flujo de aire, combustible • Rango de precisión del software del 98%.	4969.95USD	

A partir del estudio de mercado de los diferentes sistemas de adquisición de datos y control de sistemas, se selecciona el ofrecido por la empresa *DYNOMite*. Aunque la precisión de éste (98%) es igual a la ofrecida por el GPS 600, el DYNOMite ofrece un software intuitivo para la medición de rpm, además de que cuenta con un control automático de la aceleración cuando es ajustada la servo válvula para control de carga, característica que en los restantes sistemas de adquisición de datos mostrados en la Tabla 23 no es ofrecido y que es de vital importancia a la hora de realizar pruebas sobre el banco motor.

4.5.5. Accesorios para sistema de adquisición de datos.

Los elementos que se muestran en la Tabla 24, hacen referencia a los dispositivos necesarios que se utilizan para el sistema de adquisición de datos. Estos elementos son distribuidos por la empresa *DYNOMite* e incluyen cables de conexión y transmisión de datos, tarjeta lógica de procesamiento de datos junto a su interfaz de procesamiento en PC, y servomotores de control para el motor.

Tabla 24. Accesorios para sistema de adquisición de datos

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	VALOR	IMAGEN
Set de Tarjeta	• Permite incrementar el número de datos que puede usar el monitor de PC. • Facilidad a la hora de la actualización del sistema. • Compatibilidad con diferentes marcas.	1300 USD	

Cables de transmisión de Datos.	• Permite la recolección de datos entre el comando de computador y los diferentes sensores. • Compatibilidad con diferentes marcas.	445 USD	
Servo válvula para control de carga.	• Permite fácilmente la aceleración. • Utilidades de sostenimiento de rpm con facilidad, haciéndose cargo de la carga efectuada al motor. • Compatibilidad con diferentes marcas.	1095 USD	
Servo control para control de aceleración	• Permite control automático de aceleración. • Compatibilidad con diferentes marcas.	1300 USD	
Cable de extensión para servo control.	• Extiende los cables entre el mando de control y los sensores. • Compatibilidad con diferentes marcas.	89.95 USD	

Paquete de terminales para sensores.	• Permite una mayor facilidad en los sensores y el cableado del sistema. • Compatibilidad con diferentes marcas.	40 USD	
Cable para medición de rpm	• Permite la obtención de datos de rpm. • Compatibilidad con diferentes marcas.	115 USD	
Software para la adquisición de datos DYNO-MAX 2010 PRO	• Permite la recopilación de datos creando una interfaz para el usuario cómoda. • Genera graficas en tiempo real permitiendo al operario el análisis de datos. • Compatibilidad con diferentes marcas de sensores.	2000 USD	

4.6. Diseño del sistema de adquisición de datos.

Una vez seleccionados los elementos de la sección 4.6 que componen el sistema de adquisición de datos, es necesario establecer la disposición y ubicación espacial de dichos elementos, los cuales deben ser conectados al motor (Rotax 912US).

4.6.1. Coordenadas del motor Rotax 912US.

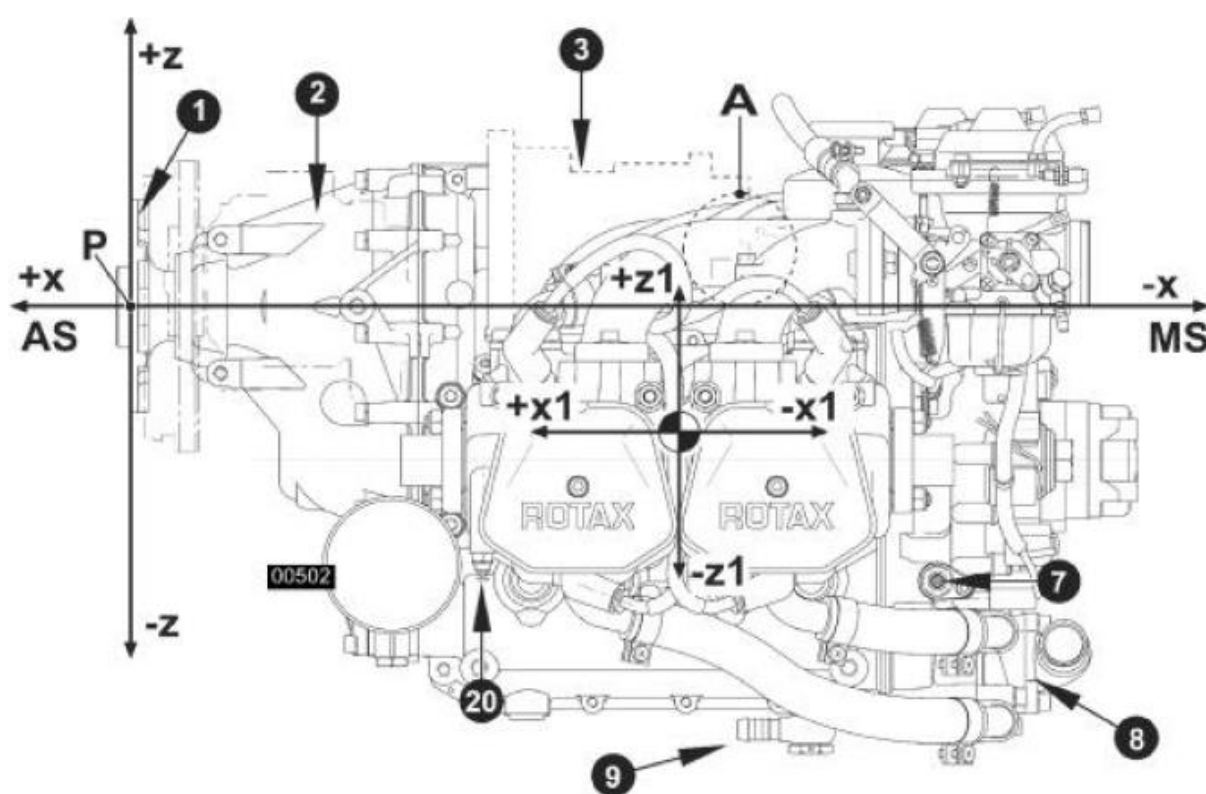
Para la instalación de los sensores en el motor, es necesario tener en cuenta un mapa del motor con la finalidad de conocer la ubicación espacial de cada uno de los componentes del motor que se requieren para realizar la correspondiente conexión de sensores. En la Tabla 25 se

muestra las dimensiones máximas para cada eje coordenado y en la Figura 35 la ubicación espacial de los elementos que componen el motor Rotax 912US en una vista lateral.

Tabla 25. Dimensiones y coordenadas para el motor Rotax 912US.

Dimensiones	Motor Versión Estándar		
	Pos. (+)	Neg. (-)	Total
Eje X	8,5	-581	589,5
Eje Y	288	-288	576
Eje Z	118	-276	394

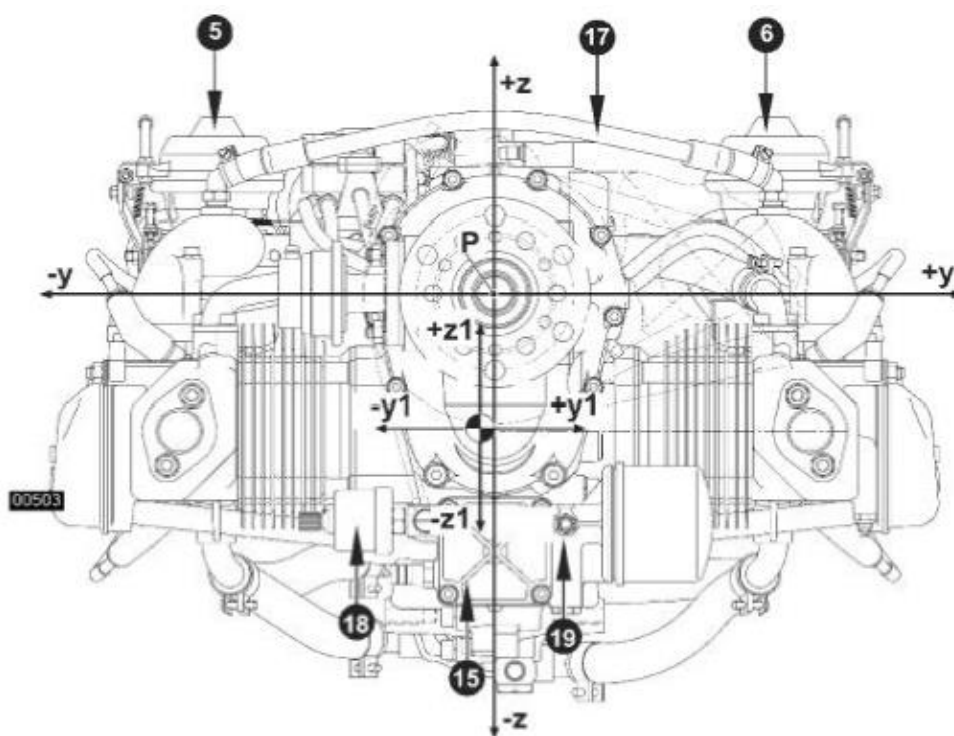
Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)



1. Plato de la hélice. 2. Reductora. 3. Bomba de vacío o governor para hélice de velocidad constante. 7. Conexión para el cuentarrevoluciones. 8. Bomba de agua. 9. Conexión para la línea de retorno de aceite. 20. Sensor de temperatura de culata.

Figura 35. Vista lateral para motor Rotax 912US.

En la Figura 36 se muestra la vista frontal del motor el cual permite evidenciar mejor la distribución espacial de los cilindros y las conexiones del motor.



5. Carburador de depresión constante para cilindros 1 y 3. 6. Carburador de depresión constante para cilindros 2 y 4. 15. Bomba de aceite. 17. Tuvo de compensación de presión. 18. Sensor de presión de aceite. 19. Sensor de temperatura de aceite.

Figura 36. Vista frontal 912US.

4.6.2. Medición de rpm en el motor.

La medición de rpm en el motor Rotax 912US se realiza conectando el cable correspondiente seleccionado en la subsección 4.5.5 al motor en las coordenadas de la Tabla 26.

Tabla 26. Coordenadas para conexión de sensor de rpm.

	Coordenadas [mm]		
	Eje x	Eje y	Eje z
Punto de Conexión P4	8,5	-581	589,5
	288	-288	576
	118	-276	394

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

En la Figura 37 se muestra el lugar donde se debe conectar el sensor de rpm correspondiente.

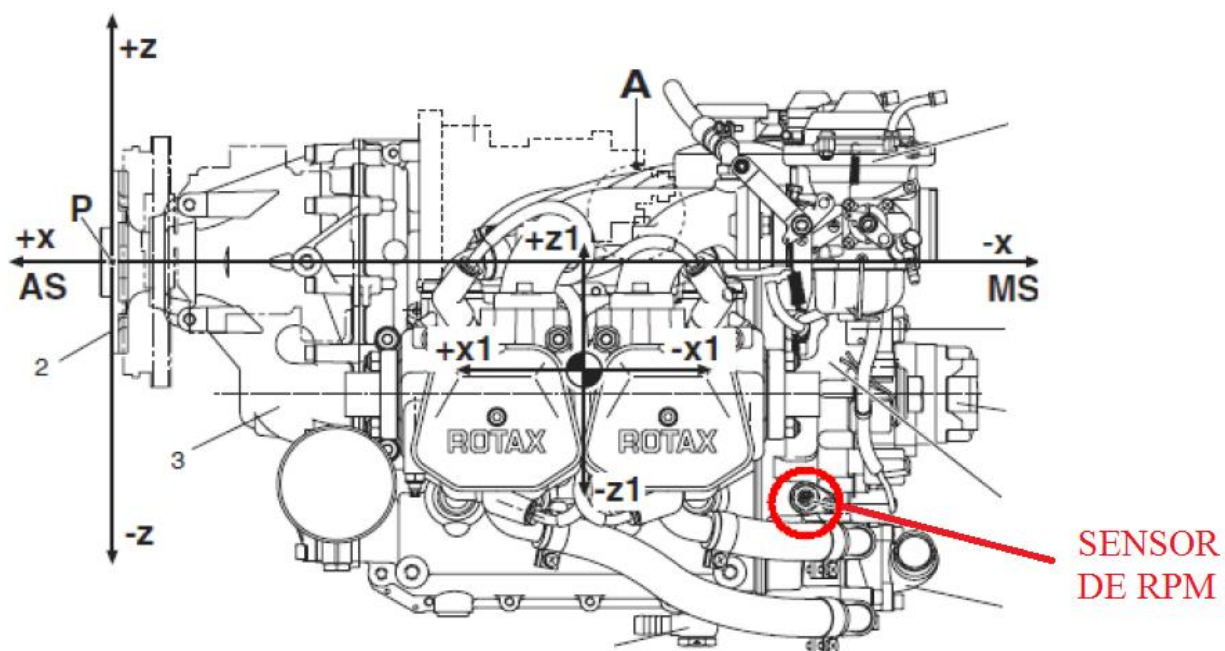


Figura 37. Conexión del sensor de rpm en el motor Rotax 912US

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

4.6.3. Medición de Temperatura.

La medición de temperatura puede realizarse en tres lugares del motor: la culata, aceite, cabeza de los cilindros, el cual permiten monitorear funcionamiento del motor, siendo en este caso temperaturas de control.

Para realizar la medición de temperatura de la culata del motor con el sensor correspondiente (ver subsección 4.5.1), se debe tener en cuenta las coordenadas de su ubicación en el motor el cual se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27. Coordenadas de ubicación para la culata del motor.

Culata	Coordenadas [mm]		
	Eje x	Eje y	Eje z
2	-200	241	-157
3	-387	-241	-157

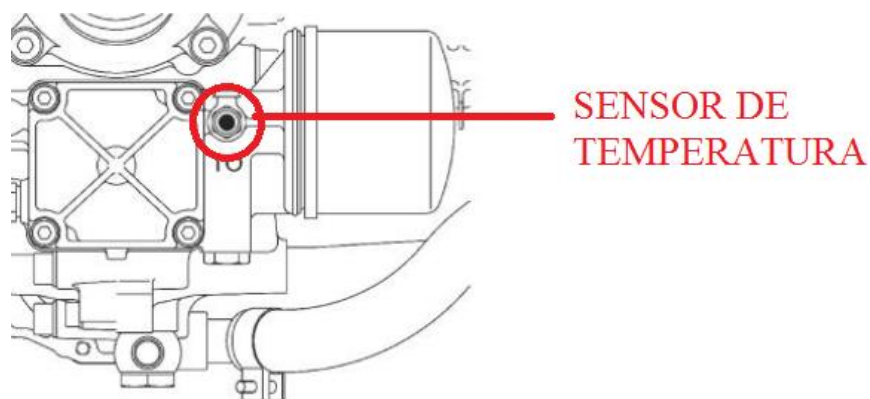
Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

La medición de la temperatura del aceite se puede realizar con el sensor mencionado en la subsección 4.5.1 el cual debe ser conectado en la bomba de aceite como se muestra en la Tabla 28. En la Figura 38, se puede evidenciar el lugar en el que se debe conectar el sensor correspondiente.

Tabla 28. Coordenadas de ubicación de la bomba de aceite.

Punto de Sujeción	Coordenadas [mm]		
	Eje x	Eje y	Eje z
	-115	6	-150

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

**Figura 38.** Ubicación para el sensor de temperatura en la bomba de aceite.

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

Para realizar la medición de temperatura en la cabeza de los cilindros se puede realizar mediante el sensor mencionado en la subsección 4.5.1. Este se debe conectar en la cabeza de los cilindros 1 y 2 tal como se evidencia en la Figura 39.

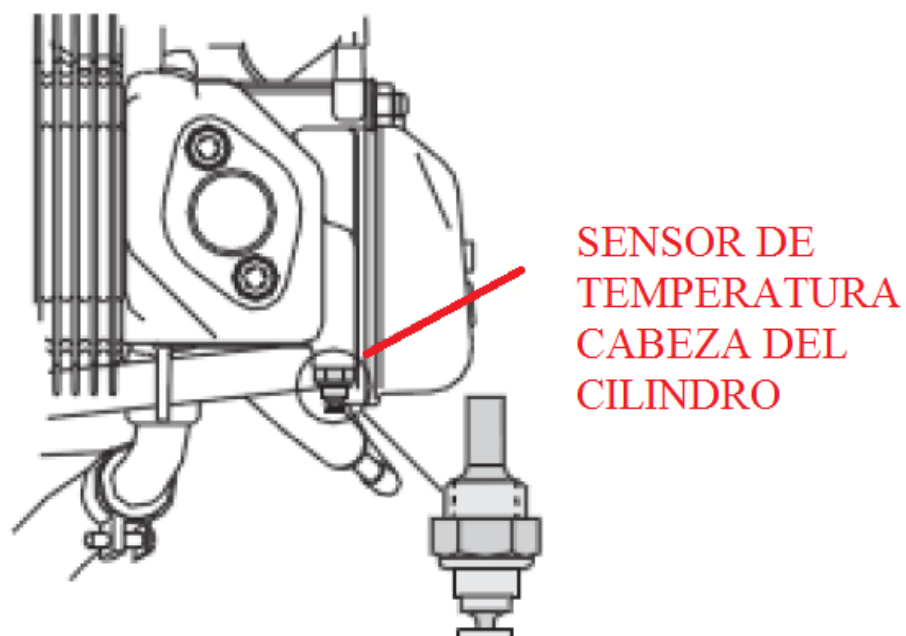


Figura 39. Ubicación del sensor de temperatura en la cabeza del cilindro.

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012)

Las temperaturas mencionadas anteriormente, no van a repercutir en la toma de datos que se llevarán a cabo en el banco de pruebas, ya que solamente son temperaturas de control. No obstante, la temperatura del aire en el colector de admisión, permite determinar la densidad real del aire que ingresa al motor y por lo tanto lograr extraer datos del comportamiento del motor durante su funcionamiento bajo cualquier régimen deseado.

Para realizar la medición de la temperatura en el colector de admisión, se debe colocar un sensor de temperatura como el mencionado en la subsección 4.5.1, en el lugar que se muestra en la Figura 40.

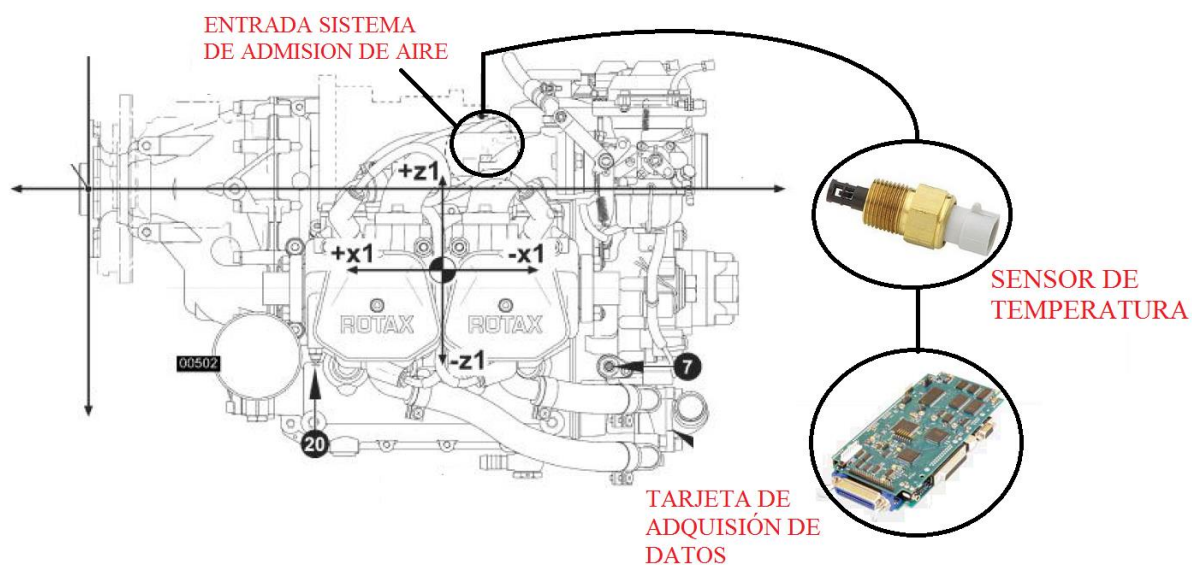


Figura 40. Sensor de temperatura en el colector de admisión de aire.

4.6.4. Conexión del sensor de temperatura y rpm al sistema de adquisición de datos.

La conexión de los sensores de temperatura y rpm al sistema de adquisición de datos debe ser realizada a la tarjeta de adquisición de datos al puerto de comunicaciones COM correspondiente para cada sensor, el cual se muestra en la Figura 41. Esto garantiza que se registren y se muestren los datos deseados en el software correspondiente.

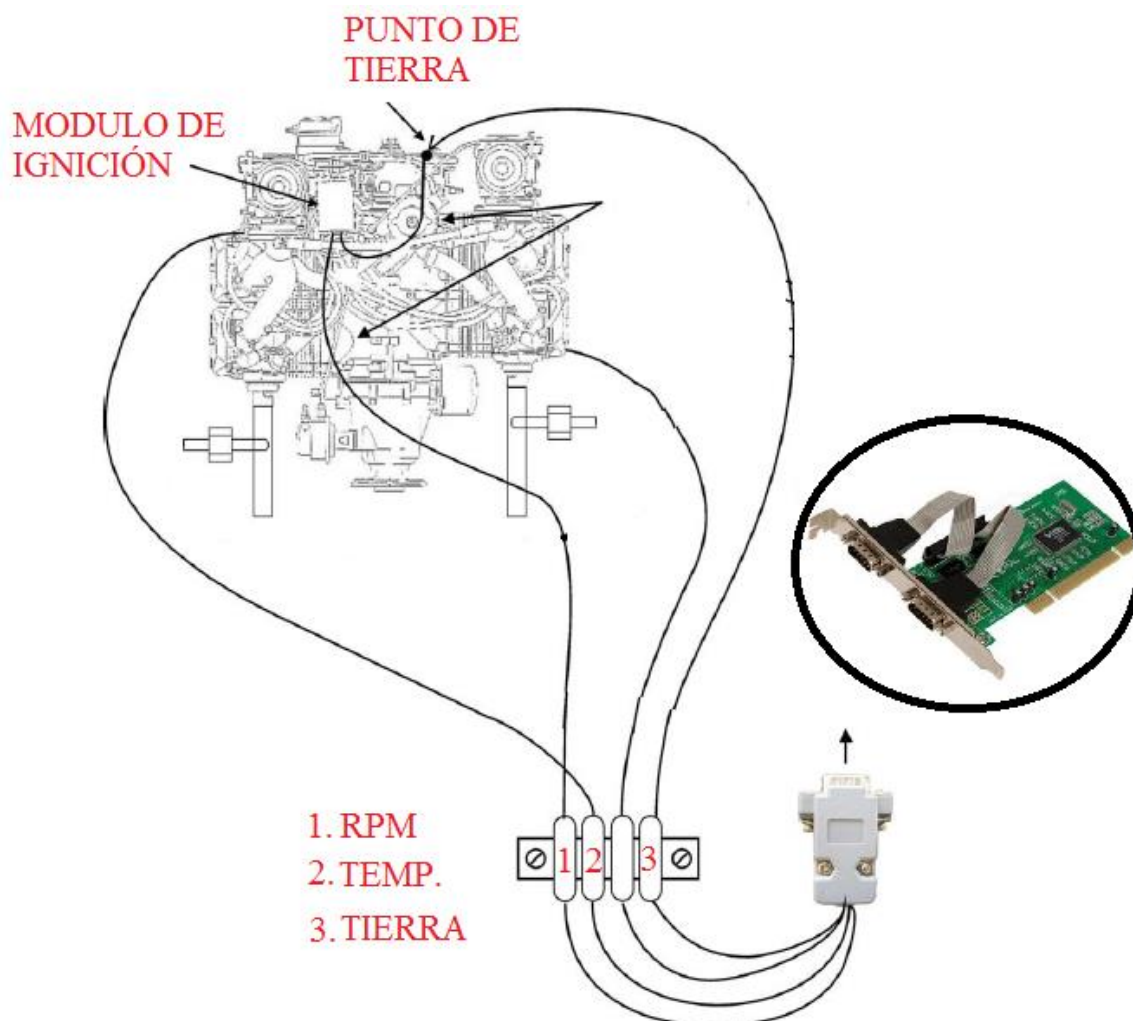


Figura 41. Conexión al sistema de adquisición de datos de los sensores de temperatura y rpm.

4.6.5. Medición de flujo de aire.

La medición del flujo de aire que se debe realizar con el flujómetro seleccionado debe ser conectada en el sistema de admisión de aire del motor como se muestra en la Figura 42. Esto permite registrar el flujo de aire que ingresa al motor durante su funcionamiento.

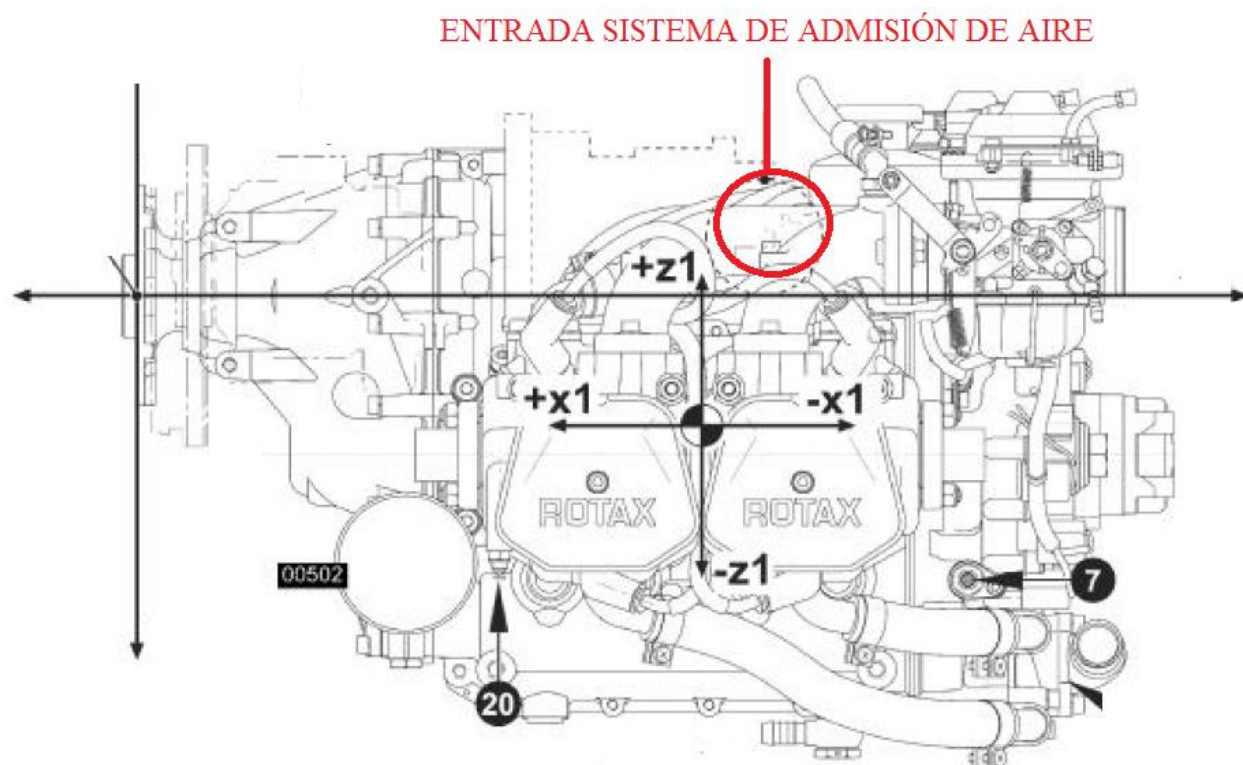


Figura 42. Entrada para sistema de admisión de aire en el motor Rotax 912US.

Fuente: (BRP-Powertrain, 2012).

La conexión del flujómetro al sistema de adquisición de datos se realiza por medio de la tarjeta de adquisición de datos del PC el cual se encarga de procesar dicha información y permitir su posterior monitoreo en el panel correspondiente. En la Figura 43 se muestra la conexión del flujómetro y la tarjeta de adquisición de datos del PC.

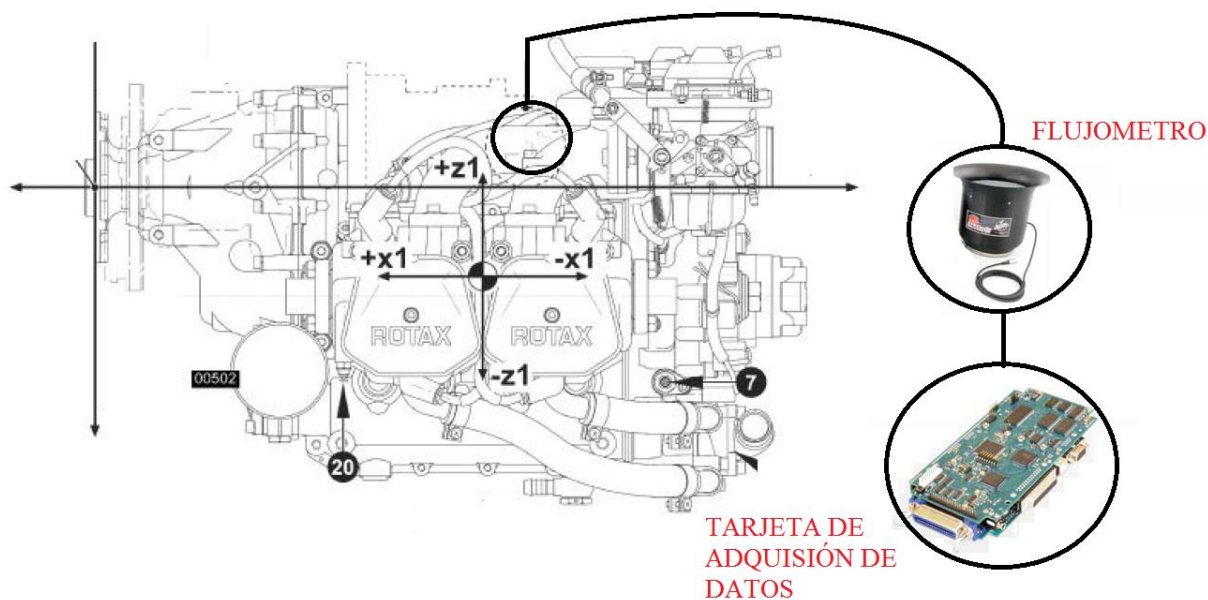


Figura 43. Conexión del flujómetro a la tarjeta de adquisición de datos.

4.6.6. Control de carga y sensor de par.

El control de carga permite modificar la cantidad de agua (ver subsección 4.7.3) que ingresa al freno, permitiendo así ajustar la cantidad de par que se impone al motor durante las pruebas realizadas en el banco de pruebas. En la Figura 44 se puede evidenciar el esquema de conexión de la manguera al freno y el sensor de par al panel.

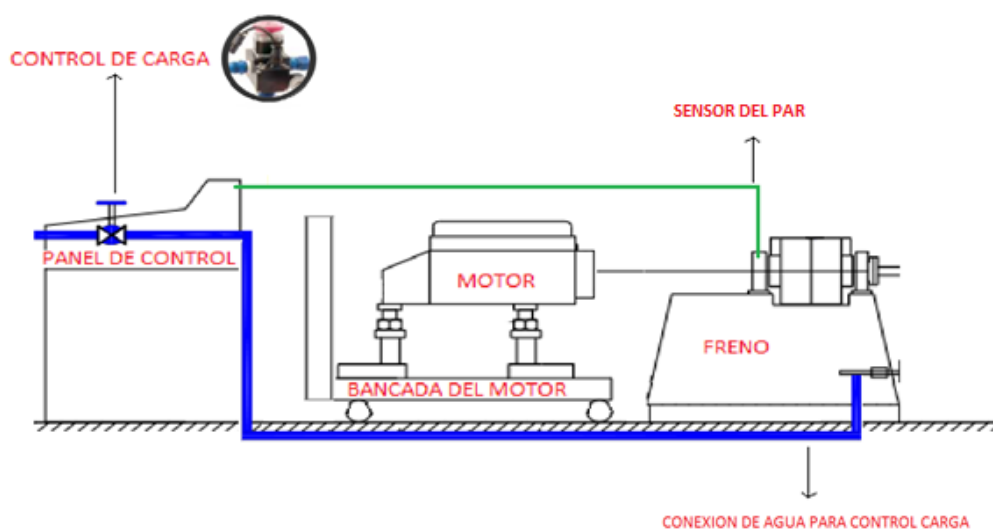


Figura 44. Conexión de la manguera de agua al freno y el sensor de medición de par al panel de control.

4.6.7. Conexión al carburador de la palanca de potencia.

Los carburadores del motor Rotax ya están instalados por medio de una brida flexible. Solamente se deben establecer las conexiones del cable para el acelerador del carburador, así como la conexión de la línea de combustible que a su vez está conectada a la probeta de medición de combustible.

En la Figura 45 se muestra el lugar donde debe ser conectada la palanca de aceleración al carburador del motor Rotax 912US.

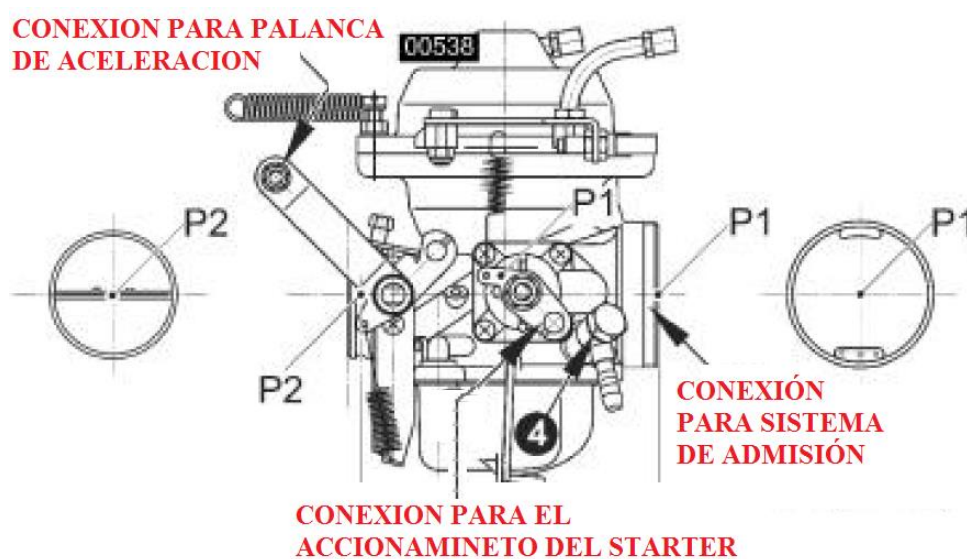


Figura 45. Carburador del motor Rotax 912US.

En la Figura 46 es posible evidenciar que la palanca de control de aceleración está conectada al sistema de adquisición de datos debido a que el software del sistema de adquisición de datos en algunos casos controla la aceleración del motor dependiendo del régimen de carga al cual esté trabajando el motor. (LAND AND SEA INC, 2014)

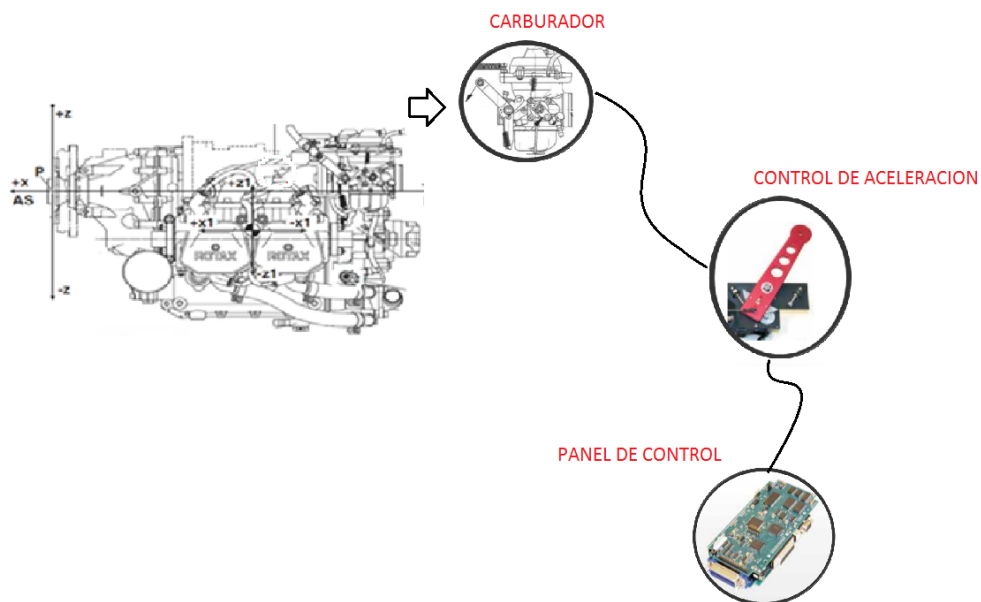


Figura 46. Conexión del carburador a la palanca de aceleración y a la tarjeta de adquisición de datos.

4.6.8. Conexión de la probeta de combustible al motor.

El sistema de combustible del motor Rotax 912US se encuentra alimentado por una probeta de medición como la mostrada en la sección 4.5.2. Se debe tener en consideración las características de funcionamiento del motor el cual consta de dos carburadores que ya están instalados junto a las tuberías de combustible conectadas al distribuidor de combustible. Así, la instalación del sistema desde la probeta de combustible hasta la entrada de la bomba de combustible activada por el motor debe ser establecida por el operario del banco.

La conexión de la probeta de medición al sistema de combustible del motor debe realizarse tal como se muestra en la Figura 47.

PANEL DE INSTRUMENTACIÓN

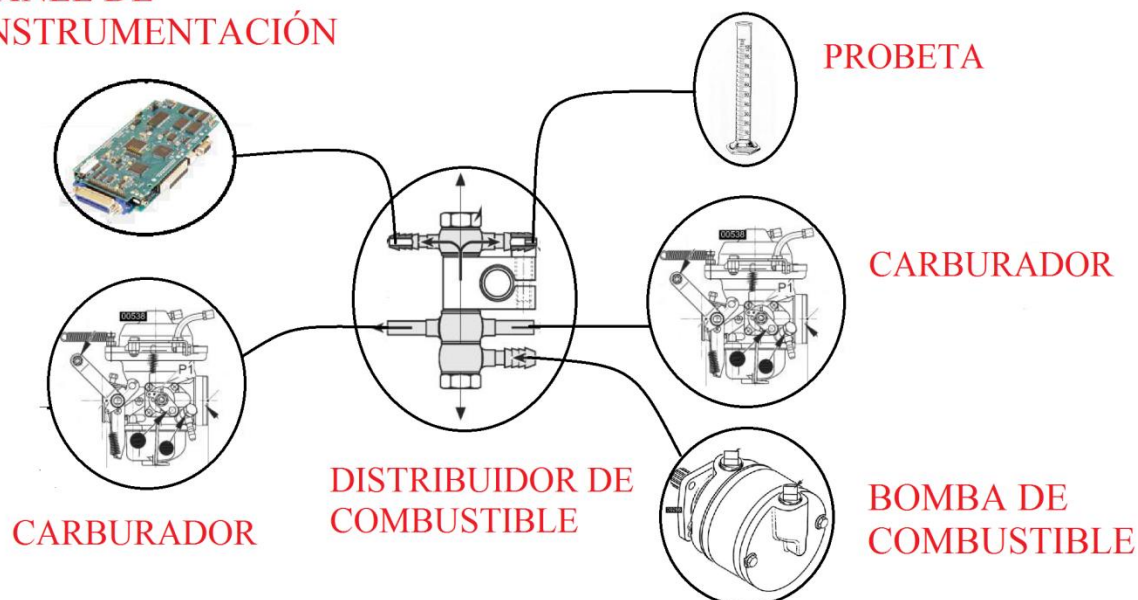


Figura 47. Conexión de la probeta de medición al sistema de combustible del motor Rotax 912US.

En la Figura 48, se muestra en detalle el distribuidor de combustible mostrado en la figura anterior, teniendo en cuenta que allí es donde se realiza la conexión de la manguera que proviene de la probeta de medición y alimenta de combustible al motor. Asimismo, también es posible evidenciar las conexiones que internamente debe contener el motor en este distribuidor de combustible.

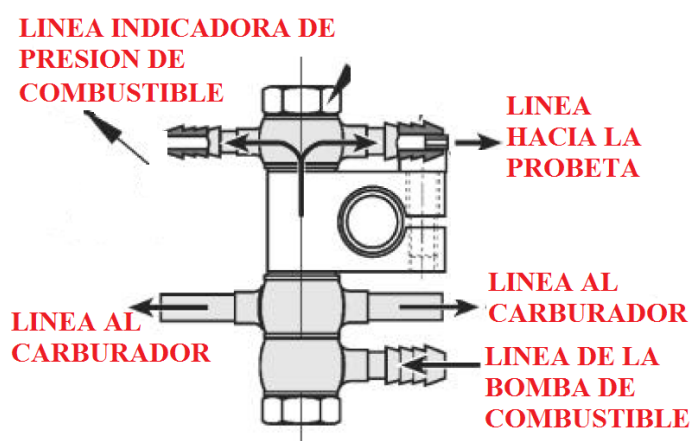


Figura 48. Distribuidor de combustible en el motor Rotax 912US.

4.6.9. Panel de instrumentación.

El panel de instrumentación tiene la finalidad de monitorear los parámetros de temperatura, rpm, flujo de aire y par generado por el motor. En el panel se encuentra el control de acelerador, el freno de emergencia, el botón de encendido, el control de carga, los indicadores de encendido / apagado y la pantalla, como se muestra en la Figura 49.

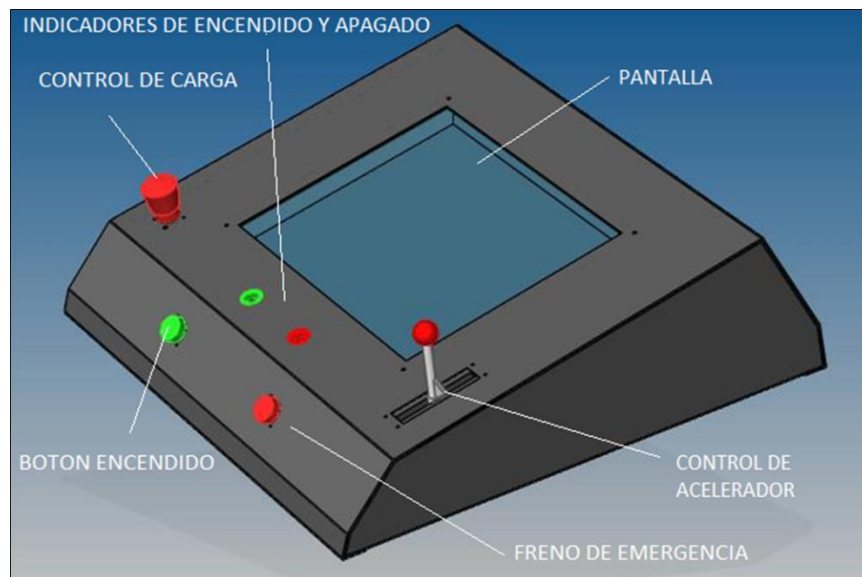


Figura 49. Panel de instrumentación para el banco de pruebas.

En la Figura 50 se encuentra la interfaz del software DYNOMAX 2000, el cual muestra la pantalla del panel de instrumentación, el cual se encarga de mostrar al usuario la información proveniente de los sensores conectados al motor. Los parámetros a visualizar son: el par proveniente del motor, las rpm, la temperatura, el indicador de consumo de aire además de un compendio de graficas que el software es capaz de mostrar gracias a sus sofisticadas librerías de programación.



Figura 50. Panel de control e interfaz para el usuario.

En la Figura 51 se puede evidenciar en detalle que la interfaz está compuesta por un registro grafico de lo que está sucediendo en el motor en tiempo real, un tacómetro para medir las rpm y una escala en forma de reloj para la medición del par del motor, temperatura y flujo de aire.

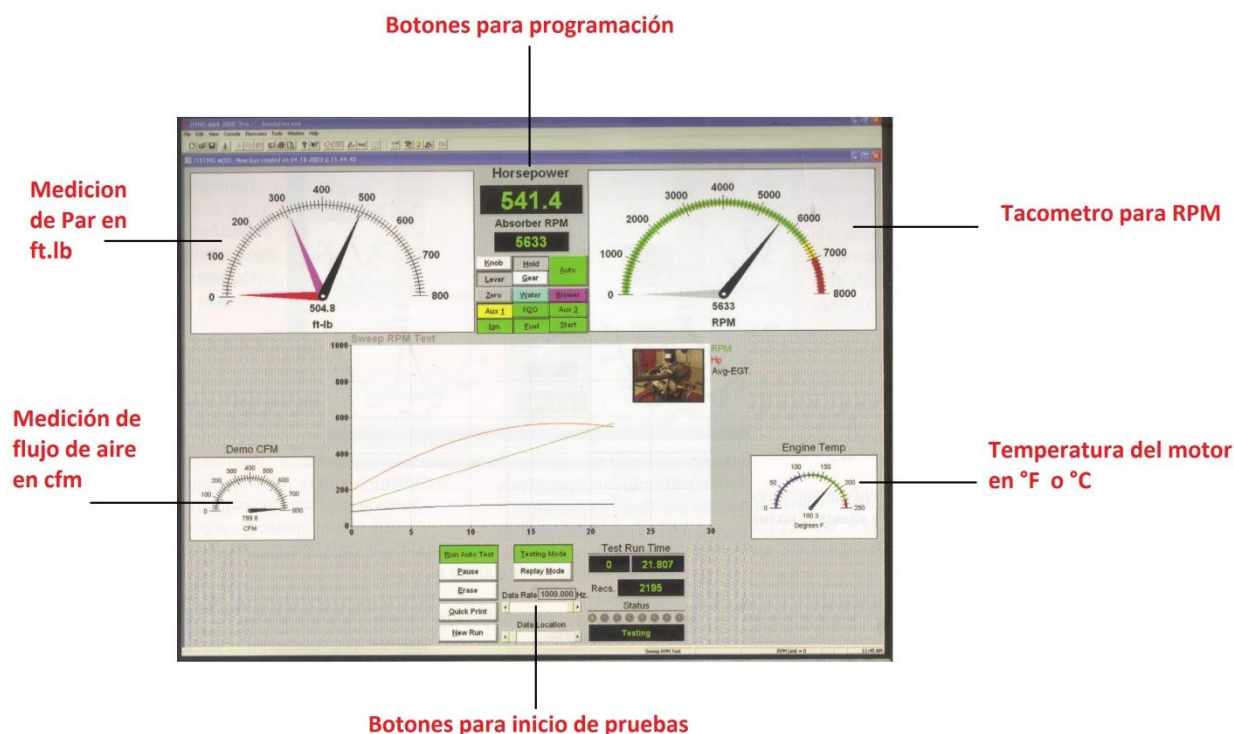


Figura 51. Interfaz del software en detalle.

4.7. Propuesta de adecuación de la habitación para el banco de pruebas.

En esta sección se encuentra la adecuación de la habitación que se recomienda realizar para el funcionamiento del banco de pruebas, el cual incluye una distribución espacial teniendo en cuenta los elementos existentes allí. Adicionalmente se encuentra la adecuación del suelo necesaria para el buen funcionamiento del banco de prueba, además de lo que se requiere para la extracción de gases.

4.7.1. Distribución de la habitación.

La habitación donde se propone el montaje del banco de pruebas, se encuentra en el laboratorio de motores ubicado en la Universidad de San Buenaventura, tal como se muestra en la Figura 52.



Figura 52. Laboratorio de motores.

La habitación mostrada en la Figura 52, cuenta con un área de ensayo de 18 m^2 ($193,8\text{ ft}^2$) que se encuentra distribuida actualmente de la siguiente manera y que es factible cambiar de distribución tal como se muestra en la Figura 53.

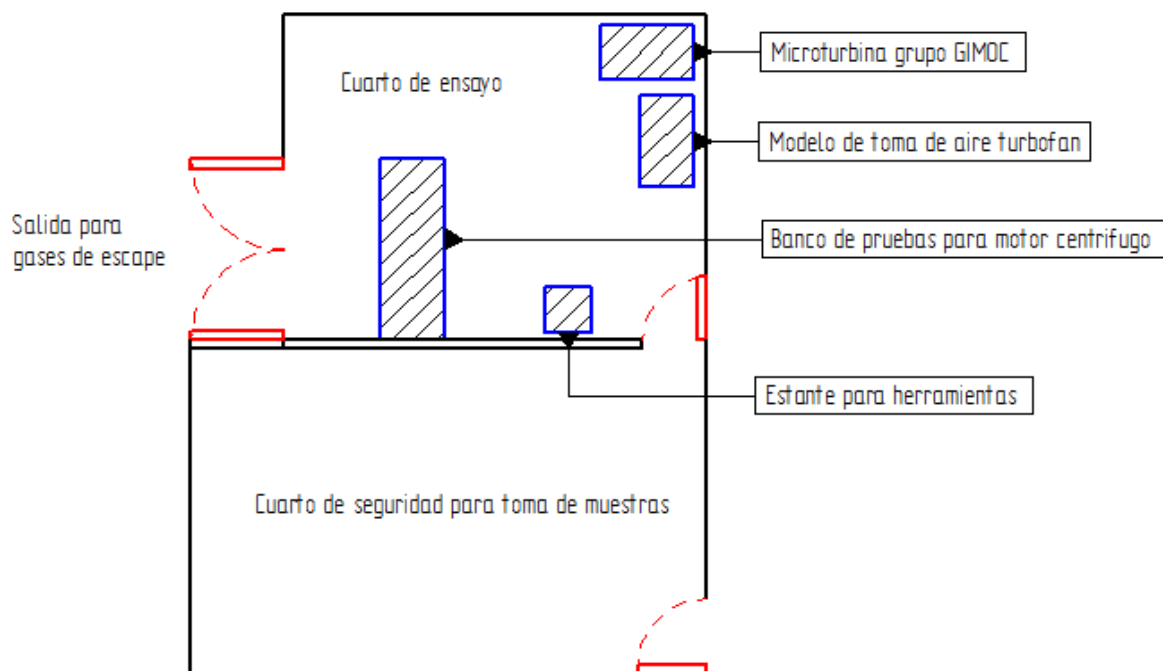


Figura 53. Distribución de la habitación inicial.

Debido a las dimensiones del banco de pruebas ($0,8 \times 1.825 \text{ m}$), y a la distribución actual de la habitación, se recomienda que la nueva distribución para la ubicación del banco de pruebas se realice como se muestra en la Figura 54, ya que de esta manera se garantiza que los gases de combustión sean liberados fácilmente a través del sistema de extracción propuesto en la sección 4.7.4. Cabe aclarar que dentro de los alcances del proyecto no se encuentra la realización del sistema de extracción de gases y por lo tanto es una propuesta de distribución que se puede llevar a cabo en caso de continuar con la construcción y ejecución de este proyecto.

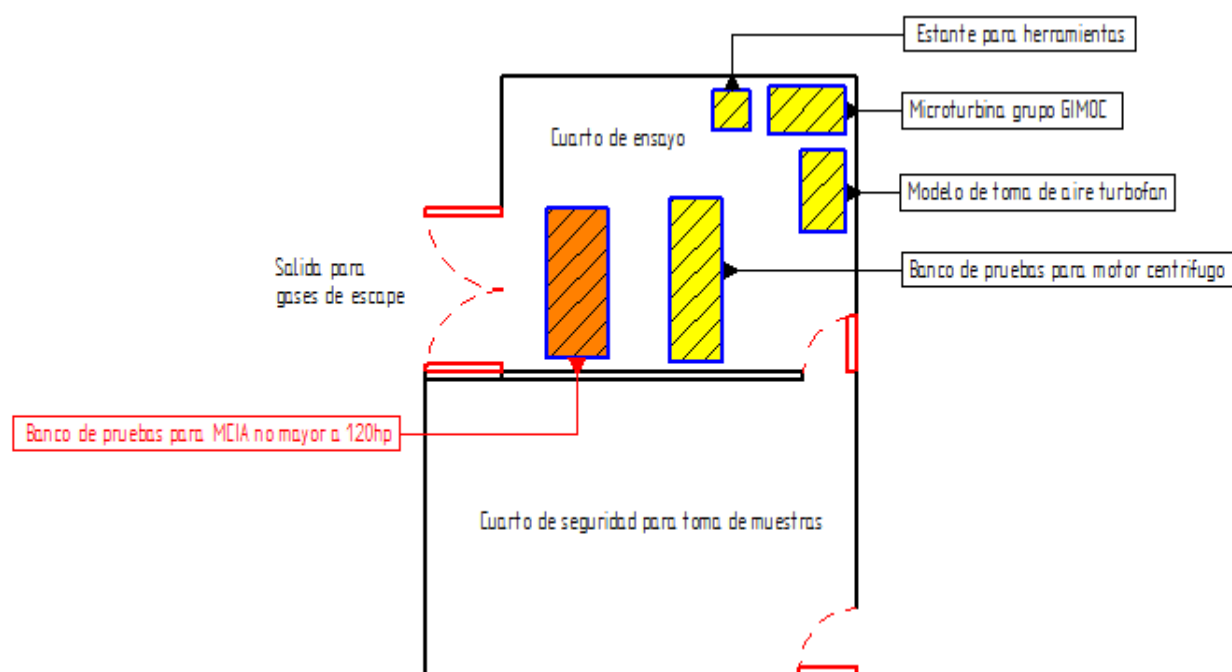


Figura 54. Distribución de la habitación con el banco de pruebas para MCIA no mayor a 120hp.

Para la instalación del freno dinamométrico, el fabricante recomienda fijar la base del freno sobre el piso existente con *pernos de fijación*, el cual están incluidas con la adquisición del freno dinamométrico y que se caracterizan por evitar el movimiento del freno durante su funcionamiento (Saenz, 2001).

4.7.2. Acondicionamiento del suelo.

Debido a las vibraciones y cargas producidas por el freno dinamométrico, es necesario efectuar un cambio en el suelo del lugar donde quedará instalado el banco de pruebas. En la subsección 4.7.1 se ha mencionado el uso de pernos de fijación para evitar el movimiento del freno dinamométrico. Sin embargo, el uso de este tipo de pernos de fijación requiere que el suelo sea modificado teniendo en cuenta que el área donde se ubique el freno dinamométrico este compuesta por con una capa de 5cm de arena, una rejilla de hierro y una fundición de concreto de 5cm de profundidad, el cual debe ser realizada por una persona calificada en construcción (obrero).

Luego de terminado el suelo correspondiente, se recomienda utilizar láminas de corcho de 5cm como recomienda el manual de instalación del freno dinamométrico (Saenz, 2001) con la finalidad de reducir las vibraciones producidas por este freno (Ver Figura 55).

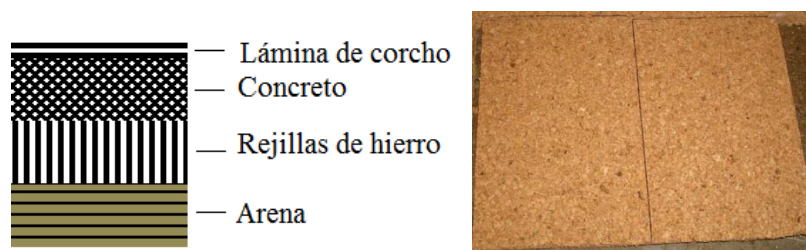


Figura 55. Configuración del suelo a modificar.

Finalmente, en la Figura 56 se muestra las dimensiones en el suelo que deben ser cambiadas en la habitación para el banco de pruebas.

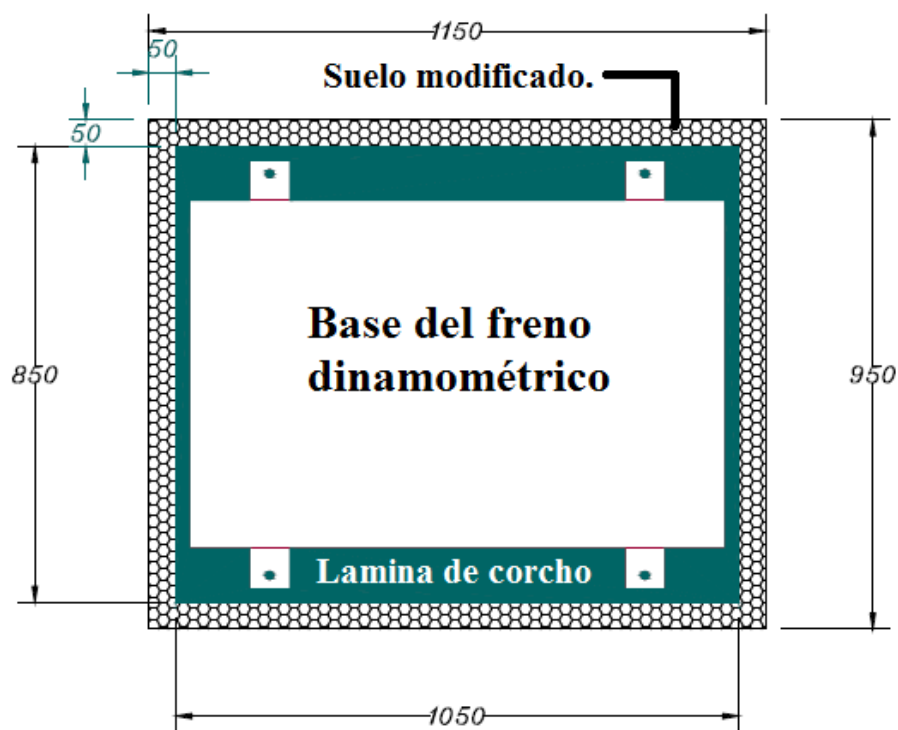


Figura 56. Dimensiones y ubicación para el freno dinamométrico.

4.7.3. Sistema de alimentación de agua.

Para la adecuación de la habitación para el banco de pruebas, se requiere que esta habitación cuente con una entrada de agua con capacidad de hasta 15 litros por minuto para el funcionamiento del freno. Cabe aclarar que la cantidad de agua varía dependiendo del rango de operación del freno dinamométrico. El lugar donde se pretende ubicar el banco de pruebas cuenta con una conexión de agua la cual brinda aproximadamente un caudal de 20 litros por minuto, permitiendo así el correcto funcionamiento del freno dinamométrico.

4.7.4. Extracción de gases.

Para el sistema de extracción de gases, se propone adecuar un agujero de ventilación para que en el futuro se realice la adecuación de un extractor en forma de campana, el cual permita dirigir y extraer los gases de escape producidos por el motor. Se debe tener en cuenta que para la instalación de este sistema se debe realizar un agujero en la pared de 50cm x 50cm como se

muestra en la Figura 57 con la finalidad de direccionar los gases al exterior. Para llevar a cabo esto, es necesario contratar los servicios de personal calificado.



Figura 57. Agujero para ventilación en la pared del laboratorio de pruebas.

Luego de realizar el agujero para ventilación, se sugiere adecuar la campana de extracción en el laboratorio para el banco de pruebas tal como se muestra en la Figura 58.

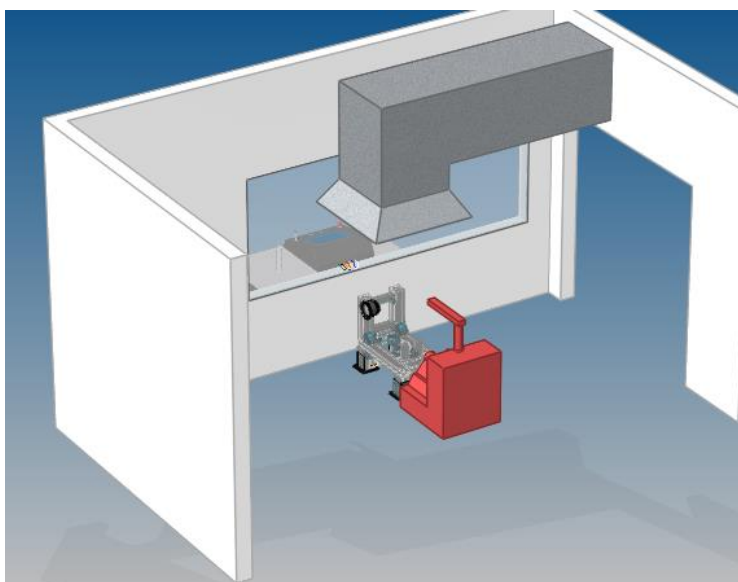


Figura 58. Adecuación del sistema de extracción de aire en el laboratorio.

De acuerdo a la norma (Ashrae, 2013), se establece los valores mínimos de ventilación en recintos cerrados. El valor mínimo de ventilación para un recinto o habitación, en este caso el laboratorio de motores de la USB, debe ser al menos de 1 cfm por cada 1 ft^2 de área que contenga la habitación. Tomando como referencia el área de la habitación a instalar el banco de pruebas (ver subsección 4.7.1), esta debe tener una tasa de extracción de aire mínima de 193.8 cfm .

La campana extractora Whirlpool WAI60ARTWW (Ver Figura 59) es una óptima opción que se recomienda adquirir para adecuar en la habitación para el banco de pruebas, ya que cuenta con una capacidad de extracción de hasta $294,3\text{ cfm}$, el cual es suficiente para mantener la habitación libre de gases durante la operación del motor.



Figura 59. Campana extractora de aire recomendada.

4.7.5. Cableado para conexión al motor.

Para llevar a cabo la conexión de elementos que se ha mostrado en la sección 4.5, se debe realizar dos agujeros de 20 cm de ancho y 10 cm de alto sobre la pared de seguridad en el laboratorio tal como se muestra en la Figura 60 y Figura 61. El motivo para realizar dos agujeros es con la intención de separar la manguera de combustible de las conexiones electrónicas con la finalidad de evitar algún incendio provocado por la corriente eléctrica.



Figura 60. Agujero para interconexión de manguera de combustible.



Figura 61. Agujero para interconexión de sensores hacia el motor.

4.7.6. Visualización final del banco de pruebas.

En esta sección se puede visualizar como quedaría a futuro el banco de pruebas y la habitación modificada, teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en las anteriores secciones. En la Figura 62 se puede visualizar que el panel de instrumentación y el banco de

prueba se encuentra dividido por un vidrio de seguridad ya instalado en la habitación. La probeta de medición se encuentra junto al panel de instrumentos debido a que permite al estudiante observar como es el consumo de combustible de un motor bajo un régimen de operación determinado teniendo en cuenta que esto hace más didáctico el banco de prueba.

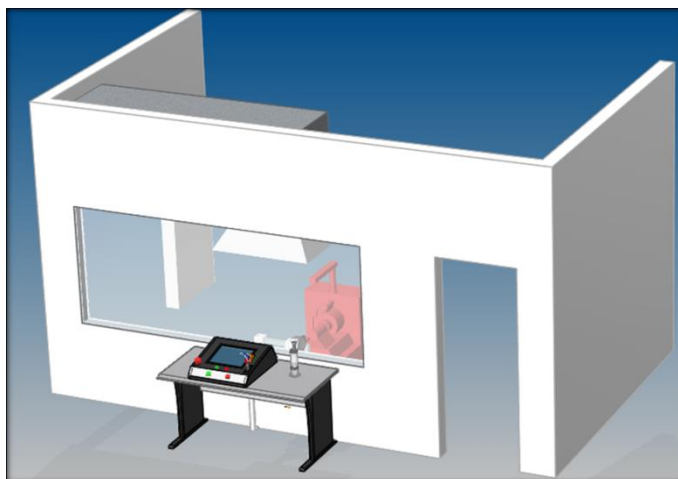


Figura 62. Banco de pruebas en vista frontal en el laboratorio correspondiente.

En la Figura 63 se visualiza el banco de pruebas y la modificación de la habitación con el sistema de extracción correspondiente, el cual se encargará de mantener limpio el aire de la habitación expulsando los gases producto de la combustión.

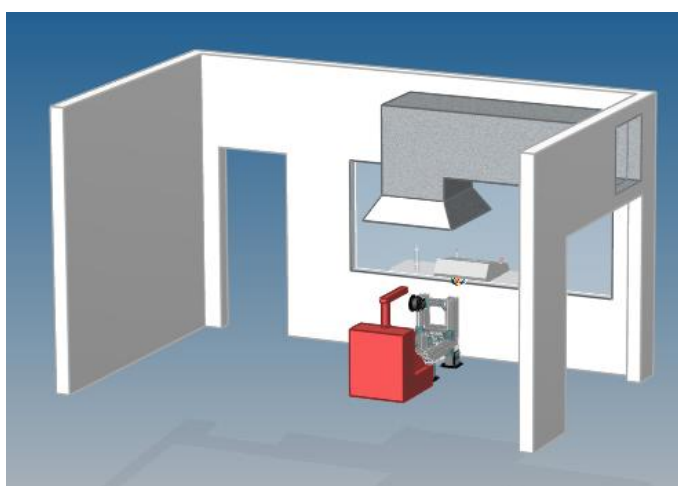


Figura 63. Banco de pruebas y extractor de gases en el laboratorio.

4.8. Absorción de Vibraciones.

De acuerdo con el fabricante Rotax, el motor 912US debe contener elementos de absorción de vibraciones, el cual son denominados como *Shock mount set*. Estos permiten absorber las vibraciones que ejerce el motor sobre la estructura que lo soporta. En este caso, para el montante del banco motor se recomienda utilizar el mostrado en la Figura 64, ya que es un accesorio que puede ser adquirido desde la empresa Rotax bajo el número 860690 y totalmente compatible con el motor mencionado anteriormente.

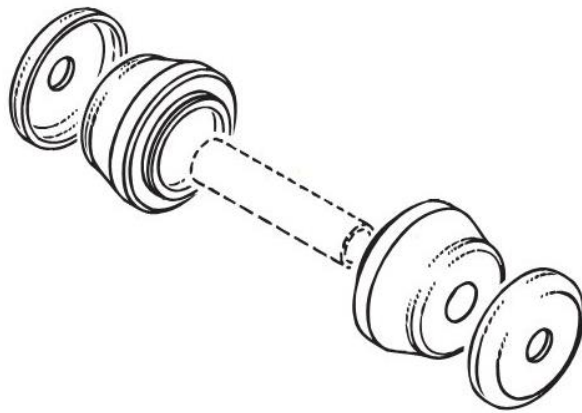


Figura 64. Elemento *Shock mount set* para absorción de vibraciones entre el motor y el banco.

El sistema de absorción de vibraciones entre el banco motor y el suelo está dado por diferentes tipos de elementos utilizados en máquinas industriales y que varían dependiendo de los requerimientos de uso. En la Tabla 29, se muestra los diferentes tipos de elementos para absorción de vibraciones utilizados en las maquinas industriales.

Tabla 29. Soportes para maquinas industriales

PRODUCTO	CARACTERÍSTICAS	PRECIO	IMAGEN
Soporte Antivibratorio <i>Novidra type Saw 15.</i>	•Dispositivo que permite una alta absorción en máquinas con baja altura de instalación. •Está construida en secciones de goma cilíndrica con placas de metal que garantizan fácil instalación. •Compatibilidad con diferentes marcas. •Soporta cargas de hasta 30000 kg por montante. •Soporta temperaturas de -150°C hasta 400°C. •Absorción de un amplio rango de frecuencias anti vibratorias 3 a 15 Hz.	211 USD	
Soporte Antivibratorio sin desplazamiento lateral.	•Extiende los cables entre el mando de control y los sensores. •Compatibilidad con diferentes marcas. •Absorción de un amplio rango de frecuencias anti vibratorias 3 a 15 Hz) •Soporta temperaturas de -150°C hasta 400°C.	315 USD	

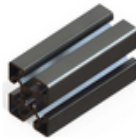
Soporte anti vibratorio de resorte V14Z73 series	• Soporte antivibración con base hecha en acero al carbono y núcleo de protección en polietileno. • Trabaja en rangos de temperatura entre -90°C y 200°C. • Absorción de un amplio rango de frecuencias anti vibratorias 3 a 15 Hz. • Permite trabar diferentes tipos de anclajes.	322 USD	
---	---	----------------	---

De acuerdo a los requerimientos del diseño del banco se seleccionó el montante anti vibratorio Saw 15, el cual cumple con las necesidades de diseño y operación que se requieren durante el funcionamiento del banco, ya que las vibraciones producidas por el banco alcanzan los 1Hz y el montante Saw 15 soporta frecuencias entre 1 y 15 Hz, razón por la cual es una opción óptima para adecuar al banco. El montante antivibratorio Saw 15 está construido en secciones de goma cilíndrica con placas de metal que garantizan fácil instalación, soporta cargas que varían entre 150 y 200 lb, siendo en este caso óptimo para el banco (estructura + motor), ya que soporta el peso total del banco, el cual es de 188 lb. El montante anti vibratorio también resiste temperaturas de -150°C hasta 400°C, el cual es necesario tener presente si se considera la generación de calor durante el uso del banco de pruebas.

5. COSTOS Y PRESUPUESTOS.

En este capítulo se encuentra la información relacionada a los costos monetarios que conlleva el desarrollo del banco de pruebas para MCIA no mayor a 120hp. En la Tabla 30 se muestra el costo en dólares de cada perfil Bosch, el cual conforma la estructura que sostiene el motor. (Para los detalles de ensamble, ver manual que se entrega adicional a este documento).

Tabla 30. Costo de perfiles Bosch para banco motor.

PIEZA	CANTIDAD	VALOR	IMAGEN
MGE 12 90x90 Perfil de aluminio	4100 [mm]	375 USD	
MGE 12 45x45 Perfil de aluminio	1000 [mm]	11.99 USD	
Unión 90x90	10 Unidades.	65.40 USD	
Unión 45x45	6 Unidades	11.80 USD	
Soporte MGE 12	4 Unidades	64.50 USD	
Conjunto Tornillo M8x25 & Tuerca SW13	108 Unidades.	398 USD	
TOTAL: 926.69 USD			

En la Tabla 31, se muestra el costo de cada uno de los accesorios necesarios para montar el banco de pruebas, tal como el freno dinamométrico, el caudalímetro, la probeta de medición, los sistemas de adquisición de datos. Adicionalmente, se contempla la mano de obra por la respectiva adecuación de la habitación y los elementos de papelería que puedan llegar a ser de utilidad durante la toma de datos en el funcionamiento del banco de pruebas.

Tabla 31. Costos de accesorios y sistemas requeridos para el banco de pruebas.

ÍTEM	CONCEPTO	TOTAL
FRENO	Freno dinamométrico Sáenz DR3	9900 USD
CAUDALÍMETRO	Flujómetro Air Flow Meter Turbines.	645 USD
SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	Set de Tarjeta. Cables de transmisión de datos. Servo válvula de control de carga. Servo válvula de aceleración. Cable de extensión para servo. Paquete de terminales para sensores. Cable para medición de rpm. Software de adquisición. Panel de control	4969.95 USD
SOPORTE ANTI VIBRATORIO	Novidra type Saw 15.	211 USD
PROBETA DE MEDICIÓN	Fabricado de acuerdo a las especificaciones mencionadas en la subsección 4.5.2.	145 USD
ELEMENTOS DE PAPELERÍA	Carpetas, Papel, sujetadores, impresiones.	115 USD
ADECUACIÓN DE LA HABITACIÓN	Maestro de obra, concreto, arena y sistema de extracción de gases.	223 USD
PERFILES BOSCH	Perfiles Bosch para la construcción del Banco de Prueba.	926.69 USD
EXTRACTOR DE AIRE	Campana de extracción de aire.	1500 USD
SUBTOTAL		18635,64 USD
IVA 16 %		2981,70 USD
TOTAL		21617,34 USD

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este capítulo se describen las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido a lo largo del desarrollo de este proyecto.

6.1. Conclusiones.

En cuanto al diseño conceptual, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Se logró diseñar un banco de pruebas para motores no mayores a 120 hp mediante la aplicación de la metodología de diseño conceptual, la cual se encargó de encaminar el proyecto hacia la adecuada justificación en la selección de los componentes que conformarían el banco de pruebas, por medio de las herramientas de filtrado y de depuración existentes en la teoría del diseño conceptual.

Se pudo evidenciar que la casa de la calidad fue un proceso que permitió definir y justificar la selección de un solo concepto global, debido a que se pudo comparar las ventajas y desventajas frente a los diferentes bancos existentes en el mercado, permitiendo de esta manera cumplir con el diseño del banco de pruebas para motores no mayores a 120hp.

Se obtuvo un concepto global definitivo para el banco de pruebas con la ayuda del diseño conceptual, el cual cumplió con los requerimientos de operación propuestos y de esta manera desarrollar el diseño de una estructura con perfiles Bosch.

Se concluye que el diseño conceptual es el método apropiado para comenzar con la elaboración de cualquier tipo de trabajo que involucre el diseño, construcción, investigación científica o la planeación de mejoras de producción, ya que permite organizar las diferentes ideas o posibilidades y de esta manera seleccionar las más idóneas, para así dar inicio al objetivo que se desea cumplir.

En cuanto a los cálculos estructurales, se pudo obtener como resultado la vibración máxima del motor mediante el uso de la teoría correspondiente a la dinámica de maquinaria, el cual permitió verificar que la estructura diseñada y acoplada con los perfiles Bosch es idónea para el uso en cualquier régimen del motor a utilizar, permitiendo de esta manera completar el diseño de la estructura del banco de pruebas.

Se logró evidenciar que la presión total ejercida por la estructura del banco sobre el suelo del laboratorio de trabajo no representa ningún inconveniente, ya que los valores de presión son demasiado bajos y por ende no es posible causar efectos negativos sobre el suelo del laboratorio de pruebas.

En cuanto a la selección de componentes, es posible extraer las siguientes conclusiones:

Se escogió un freno dinamométrico que permite trabajar bajo diferentes regímenes de operación y cuenta con un sistema de sensor de torque incorporado aportando precisión en la toma de datos para el sistema de adquisición de datos.

Se pudo seleccionar los sensores y accesorios más idóneos para el diseño del banco de pruebas teniendo en cuenta la precisión y la calidad de cada uno de los existentes en el mercado, garantizando así la obtención de datos confiables durante cualquier práctica que se quiera llevar a cabo en el banco de pruebas.

En cuanto al diseño del sistema de adquisición de datos, se extraen las siguientes conclusiones:

Se realizó el diseño de un sistema de adquisición de datos el cual consiste en la ubicación espacial, disposición e interconexión de los correspondientes elementos seleccionados.

Se logró desarrollar la interconexión de elementos entre el motor y el panel de control, basado en las recomendaciones de la empresa fabricante del motor, y de cada uno de los fabricantes de los sensores garantizando así la correcta funcionabilidad para el banco de pruebas.

En cuanto a la propuesta de adecuación de la habitación, es posible extraer las siguientes conclusiones:

Se propuso ubicar el banco de pruebas en el laboratorio de motores ubicado en el hangar de la Universidad de San Buenaventura, con la facilidad de adecuar un sistema de extracción de aire para asegurar una extracción adecuada de los gases de combustión.

Se logró realizar una propuesta de modificación del suelo del laboratorio de motores con la finalidad de absorber las vibraciones producidas por el motor y el freno dinamométrico.

6.2. Recomendaciones.

Se recomienda que para la construcción posterior del banco de pruebas para MCIA no mayor a 120hp, se tenga en cuenta la adquisición de un motor con características similares al motor Rotax 912US debido a que el banco de pruebas y los elementos seleccionados fueron diseñados teniendo en cuenta las prestaciones y características de este motor. Adicionalmente, el motor Rotax 912US es el más utilizado en el mercado para aeronaves de categoría LSA y por lo tanto, permite que la adquisición de repuestos sea más sencilla en comparación con otros motores de la misma potencia.

Se aconseja implementar guías didácticas de trabajo que permitan al estudiante complementar su proceso de formación en las distintas áreas dónde requiera del uso del banco de pruebas, obteniendo así un máximo provecho del mismo durante las diferentes prácticas en el laboratorio.

7. BIBLIOGRAFÍA.

- Barbosa, C., Paba, Z., & Rodríguez, U. (2011). *Guía Practica para la presentacion de informes de investigación y artículos científicos*. (Primera ed.). Santa Marta, Colombia: UniMagdalena.
- Bedford. (2010). *Mecánica para Ingeniería* (Quinta ed.). Houston: Pearson Prince Hall.
- Beer, F., & Russell, J. (2011). *Mecánica de Materiales* (Quinta ed.). Boston, United States: McGraw Hill.
- Bosch. (2013). Los elementos básicos de mecánica. *Perfiles Mecanizados Bosch*.
- BRP. (21 de Agosto de 2014). *Bombardier Recreational Products Inc (BRP)*. Obtenido de Sitio web de Rotax Aircraft Engines : <http://www.rotax-aircraft-engines.com/portaldata/5/data/ac%20brochure.pdf>
- BRP-Powertrain. (2012). *Installation Manual for Rotax Engine 912US* (First ed.).
- Casanova, J., & Aguirre, V. (2005). Banco de Pruebas para Medida de Fricción en Pistones. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, 9, 79-94.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2008). *Termodinámica* (Sexta ed.). Mexico: McGraw Hill.
- Chilena., D. G. (s.f.). *Normas para la Operación de Aeronaves Deportivas Livianas LSA*. Obtenido de <http://www.ultrasport.cl/pdf/reglamentacion/DAN150.pdf>
- CUSSONS. (2007). *P8150 Automotive Low Power Engine Test Bed*. Recuperado el 2014 de Agosto de 18 , de Education & Training: http://www.cussons.co.uk/education/products/automotive_technology/single_cylinder_engine_test_beds/p8150_automotive_low_power_engine_test_bed.asp
- EDIBON. (01 de Enero de 1978). *Equipamiento didáctico técnico*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2014, de Edibon Internacional: <http://www.edibon.com/products/catalogues/ru/units/thermodynamicsthermotechnics/enginestestbenches/TBMC3.pdf>
- EDLAPQUIP. (01 de Diciembre de 2008). *Education Laboratories Equipment*. Recuperado el 07 de Septiembre de 2014, de EdLabQuip: <http://www.edlabquip.com/catalogue/td-800-engine-test-bed-single-cylinder/>
- FAA, U. D. (2008). *Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge*. United States.
- Fayette, C. (1985). *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice* (Revised Edition ed., Vol. 2). USA: MIT Press.
- Ferreira, A., Jurado, R., & Ayala, J. (2008). *Diseño de un banco de pruebas para motores PTGT-3*. Tesis de Pregrado , Universidad de San Buenaventura , Facultad de Ingeniería , Bogotá.

- G.U.N.T. (2005). *G.U.N.T.* Obtenido de Equipos para la educación en Ingeniería: http://www.gunt.de/static/s3689_3.php
- G.U.N.T, G. G. (2005). *Gunt Hamburg Inc.* . Recuperado el 18 de Agosto de 2014, de Equipos para la educación en Ingeniería: http://www.gunt.de/static/s3689_3.php
- García, E. (2010). *Diseño de un banco de pruebas para el motor de pistón ciclo otto de cuatro tiempos amc 200*. Tesis de Pregrado, Universidad de San Buenaventura, Facultad de Ingeniería, Bogotá.
- García, J., Alejandro, A., & Maldonado, A. (2012). Selección de Proveedores. *Revista de contaduría y administración*.
- Gómez, L. (28 de Octubre de 2013). *Ciclo Otto*. Obtenido de <http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/otto.html>
- Hernandez, A., & Portillo, C. (2011). *Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas de un Motor Diesel*. Facultad de Ingenieria. Bucaramanga: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Hernanz, J. (01 de Octubre de 2010). *Departamento de Ingeniería Mecánica*. Recuperado el 01 de Septiembre de 2014, de <http://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/tema3/El%20par%20motor%202.htm>
- Jimeno, J. (18 de Octubre de 2012). *Despliegue de la función calidad (QFD)*. Recuperado el 2014 de Agosto de 30, de <http://www.pdcahome.com/1932/qfd-despliegue-calidad/>
- Karl, U., & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos* (Quinta ed.). México D.F.: McGraw Hill.
- KEITHLEY. (2001). *Data Acquisition and Control Handbook* (First ed.). Ohio: Keithley Instruments, Inc.
- LAND AND SEA INC. (05 de Junio de 2014). *DYNO-mite Dynamometer* . Recuperado el 10 de Octubre de 2014, de DYNO-mite Dynamometer : <http://www.land-and-sea.com/>
- Lawrence, J. (20 de Diciembre de 2011). *Plane & Pilot*. Recuperado el 21 de Agosto de 2014, de http://www.planeandpilotmag.com/aircraft/best-buys/top-20-lsa.html?start=2#.U_i6zvl5PVJ
- Martyr, A. (2007). *Engine Testing Theory and Practice* (Third ed.). United Kingdom : Elsevier.
- MAX MACHINERY. (30 de Enero de 2009). *¿Qué es un caudalímetro?* Recuperado el 16 de Septiembre de 2014, de Medidor de flujo de bajo caudal, alta precisión y alta resolución: <http://www.maxmachinery.mx/que-es-un-caudal%C3%ADmetro>
- Millan, J. (20 de Mayo de 2001). *Banco de ensayo de Motores*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2014, de Departamento de máquinas y motores térmicos: <http://www.sc.ehu.es/nmwmigaj/bancomot.htm>

- Moran, M., & Shapiro, H. (2008). *Engineering Thermodynamics* (Sixth ed.). New York , United States: TechBooks & Von Hoffman Corporation.
- National Instruments. (19 de Agosto de 2013). *Guía para Realizar Medidas de Temperatura con Termistores*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2014, de National Instruments: <http://www.ni.com/white-paper/7112/es/>
- Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria* (Cuarta ed.). Mexico D.F.: McGraw Hill.
- PRW. (01 de Julio de 2004). *Engine Test Stands*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2014, de <http://www.prw-usa.com/category/products/test-stands>
- Rojas, A. (01 de Julio de 2009). *Aviacion Ultraligera*. Recuperado el 2014 de Agosto de 30 , de Aviones Deportivos: <http://aviaciong.blogspot.com/2009/07/aviones-deportivos.html>
- Ruiz, S., López, J., & Bermúdez, V. (2007). *Prácticas de Motores de Combustión*. Valencia, España: Alfaomega .
- Run, E. (30 de Enero de 2006). *Easily adapts to American & Foreign Applications*. Recuperado el 17 de Agosto de 2014, de <http://www.easy-run.net/>
- Saenz. (30 de Enero de 2001). *Banco de pruebas de motores*. Recuperado el 06 de Septiembre de 2014, de Saenz Inc: <http://www.saenzdynos.com.ar/content/productos.php>
- Santos, T. (Noviembre de 2008). *Estudio de factibilidad de un proyecto de inversión*. Recuperado el 25 de Agosto de 2014, de Contribuciones a la economía: <http://www.eumed.net/ce/2008b/tss.htm>
- Thomson, W. (1981). *Theory of Vibration with Applications* (Second ed.). USA: Prentice Hall Inc.
- Toxement. (2014). *Guía de diseño para pisos en concreto*. Bogotá: Toxement INC.
- UAEAC, Colombia. (3 de Agosto de 2010). *Reglamento Aeronáutico Colombiano (RAC)*. (Aerocivil, Editor) Recuperado el 21 de Agosto de 2014, de [http://www.aerocivil.gov.co/ResPro/Documents/PROYECTO%20-%20AERONAVES%20CATEGORIA%20LIVIANA%20\(ALS\)-%20Nueva%20Parte%20%20Vig%C3%A9simo%20Sexta%20%20RAC.pdf](http://www.aerocivil.gov.co/ResPro/Documents/PROYECTO%20-%20AERONAVES%20CATEGORIA%20LIVIANA%20(ALS)-%20Nueva%20Parte%20%20Vig%C3%A9simo%20Sexta%20%20RAC.pdf)
- Ullman, D. (2008). *The Mechanical Design Process* (Fourth ed.). United States.
- VIDRASA S.A. (01 de Octubre de 2010). *Vidrio en tubo y varilla*. Recuperado el 26 de 11 de 2014, de Propiedades físicas y químicas del duran: http://www.vidrasa.com/esp/productos/duran/duran_pf.html
- Yacuzzi, E., & Fernando, M. (2003). Conceptos, Aplicaciones y Nuevos Desarrollos. *Serie Documentos de trabajo*.

8. ANEXOS.

Concepto	Ligero	Anticorrosivo	Económico	Fácil operar	Mantenimiento	Modular	Académico	Seguro	Preciso
19	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
20	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
21	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
22	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
23	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
24	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
25	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
26	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
27	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
28	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
29	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
30	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
31	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
32	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
33	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
34	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
35	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
36	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI
37	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Concepto	Ligero	Anticorrosivo	Económico	Fácil operar	Mantenimiento	Modular	Académico	Seguro	Preciso
38	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
39	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
40	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
41	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
42	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
43	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
44	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
45	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
46	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
47	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
48	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
49	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
50	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
51	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
52	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
53	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
54	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
55	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
56	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO

Concepto	<i>Ligero</i>	<i>Anticorrosivo</i>	<i>Económico</i>	<i>Fácil operar</i>	<i>Mantenimiento</i>	<i>Modular</i>	<i>Académico</i>	<i>Seguro</i>	<i>Preciso</i>
57	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
58	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
59	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
60	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO
61	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
62	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
63	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO
64	SI	SI	NO	SI	SI	SI	SI	SI	NO

Anexo 2. Casa de la calidad QFD para concepto global 2 y concepto global 4.

Anexo 3. Planos.

Anexo 4. Manual del operario.