

Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Mecánica

Valparaíso- Chile



ADECUACIÓN DE MOTOR MONOCILÍNDRICO ENCENDIDO POR COMPRESIÓN PARA OPERAR EN MODO DUAL CON HIDRÓGENO

David Matías Correa Durán

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO INDUSTRIAL

Profesor Guía: Dr. Germán Amador Díaz

Profesor Correferente: Dr. Roberto Leiva Illanes

Octubre, 2023

Agradecimientos

“Deseo expresar mi agradecimiento a todas las personas que quisieron estar en el proceso, no solo con mi memoria de título, si no con la etapa universitaria y en otras previas. A cada uno de los que creyeron en mi capacidad, sobre todo en los momentos en que ni yo mismo pude. A cualquiera que quiso sinceramente ofrecer una ayuda en algún momento o simplemente brindar una palabra de aliento, de todo corazón, muchas gracias.

Quiero agradecer a mi familia, por el apoyo y la paciencia todos estos años, no fue fácil, pero deseo destacar su compromiso por mi salud y educación, han sido un soporte fundamental toda mi vida y estaré eternamente agradecido. Dar gracias a mis amigos por todas las horas de camaradería y estudio. Y finalmente a mi pareja, por ser quien es y por querer compartirlo conmigo todo este tiempo.

Finalmente, me gustaría dar gracias a mí mismo. Por la perseverancia y el compromiso con el aprendizaje. Por el esfuerzo y dedicación. Por no tirar la toalla, muchas gracias.”

Resumen

En el presente documento se aborda la problemática actual del uso de combustibles fósiles y el daño que generan hacia el medio ambiente, con esto en consideración, se establece la base de trabajo con la cual se debe desarrollar la tecnología de la implementación de nuevos combustibles en los motores de combustión interna tradicionales, teniendo en cuenta como condición límite, los parámetros de funcionamiento térmico originales del fabricante.

Durante el proceso, se aborda la restauración, puesta en marcha y modificación para la inyección indirecta de hidrógeno gaseoso por el múltiple de admisión de un motor monocilíndrico diesel marca MWM, modelo KD12E, al cual, luego de realizarle un overhauling general, se le modifica el sistema de admisión para admitir el ingreso de combustible gaseoso y su sistema de escape para canalizar el flujo de salida de gases sin los problemas originales que presenta el equipo, los cuales serán detallados en los próximos capítulos de este documento. En adición a lo antes mencionado, se agregan sensores de temperatura, presión de vacío de admisión y velocidad de rotación, además de una transmisión de potencia desde el motor de combustión hacia un freno dinamométrico utilizado en el Laboratorio de Termofluidos de la Casa Central de la Universidad. Estas modificaciones permitieron agregar nuevas herramientas al motor y actualizar la instrumentación de este, con el fin de controlar los aspectos críticos de operación del equipo y tener la posibilidad de procesar los datos que la máquina brinda en los distintos modos de funcionamiento según corresponda, de esta manera, se aumenta la probabilidad de realizar una sustitución satisfactoria de combustible diesel en base a la temperaturas de salida de refrigerante del motor que se obtiene al operar el equipo en su régimen original de funcionamiento a [rpm] constantes.

Las reparaciones y modificaciones al motor monocilíndrico, el cual originalmente se utilizaba para medir el cetano de diferentes muestras de diesel, son diseñadas y manufacturadas con el fin de obtener una plataforma versátil de experimentación sobre la cual extraer datos fiables para los proyectos venideros con el equipo, como por ejemplo, la sustitución al 100% del combustible diesel por hidrógeno. Con esto en consideración, el diseño debe ser capaz de resistir los requerimientos técnicos a los cuales los componentes estarán sometidos en este proyecto y los futuros en términos de resistencia de materiales, teniendo en cuenta los diferentes esfuerzos y temperaturas a las que el equipo se ve expuesto en cada modo de operación.

Abstract

This document addresses the contemporary challenge posed by the utilization of fossil fuels and the resultant environmental degradation. In light of this concern, it establishes the foundational framework essential for the advancement of technology pertaining to the integration of novel fuels into conventional internal combustion engines. This framework is guided by the imperative to uphold the original thermal performance parameters as specified by the manufacturer.

The course of this study encompasses the restoration, initiation, and modification required for the indirect injection of gaseous hydrogen via the intake manifold of a diesel engine bearing the mark MWM, model KD12E. Following a comprehensive overhaul, adaptations to the intake system facilitate the introduction of gaseous fuel, while exhaust system enhancements are devised to effectively channel the gas flow, thereby mitigating the inherent challenges encountered by the equipment. A detailed exposition of these challenges is to follow in the ensuing chapters of this manuscript.

Supplementary to these modifications, the incorporation of temperature sensors, intake vacuum pressure gauges, and rotational speed sensors is undertaken. Moreover, a power transmission mechanism is integrated, facilitating the transfer of power from the combustion engine to a dynamometric brake within the Thermo-Fluid Laboratory at the University's Central Campus. These augmentations serve to equip the engine with new capabilities and modernized instrumentation, with the primary objective of exercising control over critical operational parameters. This comprehensive data can subsequently be processed across various operational modes, thereby significantly enhancing the prospect of effecting a successful substitution of diesel fuel. This substitution is predicated on the analysis of engine coolant outlet temperatures obtained during the operation of the equipment at a constant [rpm] in its original operational regime.

The reparations and modifications executed on the single-cylinder engine, originally designated for cetane level measurements of diverse diesel samples, are strategically engineered and executed to yield a versatile experimental platform. This platform is instrumental in acquiring dependable data, which will underpin forthcoming projects involving the equipment, including the ambitious endeavor of a complete transition from diesel to hydrogen fuel. In consequence, the design imperatives prioritize the endurance of materials under diverse mechanical stress and temperature scenarios. These considerations encompass the rigorous demands to which the components will be subjected throughout the lifecycle of this project and subsequent undertakings.

Índice General

Glosario	XII
1.- Introducción	1
1.1. Motivación y contexto	1
1.1.1 Participación y relevancia	2
1.2 Planteamiento de problemas.....	3
1.2.1 Enfoque global	3
1.2.2 Problemática Técnica	4
1.3 Objetivo principal.....	5
1.3.1 Objetivos específicos.....	5
1.4 Planificación	6
1.5 Antecedentes: motor monocilíndrico MWM KD12E	7
1.5.1 Restauraciones previas	7
1.5.2 Modificaciones anteriores a motores de combustión	8
1.5.3 Instrumentalización de equipos para control de parámetros	8
 2.-Marco teórico para la restauración, modificación de componentes e instrumentalización .	9
2.1 Aplicaciones del hidrógeno en la producción de potencia mecánica.....	9
2.2 Tipos de inyección de hidrógeno en MCI con pistones.....	10
2.3 Almacenaje de hidrógeno	14
2.3.1 Otras tecnologías de transporte y almacenaje	15
2.4 Overhauling	15
2.5 Modificaciones y consideraciones	17
2.5.1 Múltiple de admisión	17
2.5.2 Múltiple de escape	18
2.6 Instalación de instrumentos de medición.....	19
 3.- Metodología y ejecución	20
3.1 Restauración	20
3.1.1 Sistema de refrigeración	21

3.1.2	Sistema eléctrico	27
3.1.3	Sistema de inyección de combustible	29
3.1.4	Sistema de admisión de aire	35
3.1.5	Culata	36
3.1.6	Bloque motor	39
3.1.7	Línea de escape de gases	43
3.2	Puesta en marcha.....	44
3.3	Detalles del equipo	46
4.- Consideraciones, diseño, manufactura e instalación de componentes para la combustión dual con hidrógeno gaseoso		49
4.1	Introducción	49
4.2	Múltiple de admisión para inyección indirecta.....	50
4.3	Múltiple de escape	55
5.-Instalación de instrumentos de medición para parámetros de funcionamiento del motor		58
5.1	Acerca de la seguridad	58
5.2	Consideraciones y procedimiento de instalación	58
5.2.1	Temperaturas de operación (Aceite del cárter, entrada y salida de gases y refrigerante).....	59
5.2.2	Velocidad de rotación del equipo	62
5.2.3	Consumo de combustible.....	63
5.2.4	Torque al freno del motor	64
5.2.5	Presión de vacío de admisión.....	70
5.2.6	Caudal de aire de admisión	70
5.3	Validación.....	71
6.- Conclusiones y trabajos futuros en el equipo		75
6.1	Conclusiones	75
6.2	Trabajos futuros	77
Referencias.....		75
Anexos.....		78

Tabla de Contenidos: Figuras

Figura 1. Emisiones globales de CO ₂ desde combustibles fósiles desde 1850 hasta 2021. (Simon Evans, 2021)	2
Figura 2. Instalación estacionaria equipada con un motor MWM KD12E para medir la inflamabilidad de combustible Diesel. (Dansk Standard, 2017)	7
Figura 3. Admisión modificada para el ingreso de combustible gaseoso en el motor Perkins M80T.	8
Figura 4. Diagrama de funcionamiento de una pila de combustible. (NAFION, 2023).....	9
Figura 5. Diagrama de inyección indirecta de hidrógeno gaseoso en motor con ciclo Otto.	11
Figura 6. Diagrama de inyección indirecta de hidrógeno líquido en un MCI.....	11
Figura 7. Diagrama de inyección directa de hidrógeno gaseoso en un MCI.....	13
Figura 8. Diagrama de inyección dual para motor monocilíndrico MWM.....	18
Figura 9. Motor MWM KD12E utilizado como cetanómetro en la Universidad Técnica Federico Santa María Campus Casa Central, Valparaíso.	20
Figura 10. Sistema de refrigeración de motor MWM KD12E.....	21
Figura 11. Esquema de funcionamiento del sistema de refrigeración del equipo MWM KD12E.	22
Figura 12. Desarme de la parte inferior del sifón, se visualiza el deflector en la imagen izquierda y el interior del sifón a la derecha.....	23
Figura 13. Intercambiador de calor de la parte superior del sifón dañado por corrosión.	23
Figura 14. Retorno de la culata al sifón (izquierda) y cañería de entrada al bloque (derecha)...	24
Figura 15. Estanque y componentes inferiores del sifón restaurados.....	24
Figura 16. Intercambiador intervenido y en el centro la barra de acero SAE 4340.	25
Figura 17. Torneado (izquierda), fresado (centro) y soldadura (derecha) de cilindro para restauración del intercambiador de calor.....	25
Figura 18. Perforaciones de 18.5 [mm] para crear las roscas M20x1.5 de relleno.	26
Figura 19. Intercambiador de calor restaurado en su totalidad (izquierda) y sifón reensamblado (derecha).	26
Figura 20. Vista frontal (izquierda) y posterior (derecha) del conjunto eléctrico del cetanómetro antes de la restauración.....	27
Figura 21. Tablero de instrumentos, caja de conectores trifásicos y caja de convertidor restaurados.	28
Figura 22. Proceso de restauración de motor eléctrico Hansa.	29
Figura 23. Sensor de inicio de la elevación de combustible tipo platino de la bomba inyectora.	30
Figura 24. Regulador del inyector de combustible diesel.	30
Figura 25. Sensor de inyección de combustible en la parte superior del inyector.	31
Figura 26. Sensor de inicio de la combustión.	31

Figura 27. Cañería de retorno desgarrada en una de sus vías.....	32
Figura 28. Recipiente de retorno de combustible tratado con químicos y mecanizado (izquierda). En la imagen derecha se observa la copla para manguera con rosca M10x1 de bronce.	33
Figura 29. Bomba de combustible antes de la restauración.....	33
Figura 30. Vistas laterales de la bomba de inyección restaurada, en la imagen izquierda se puede apreciar el mecanismo de paso del combustible.....	34
Figura 31.Receptáculo para muestras de diesel antes y después de la restauración.	34
Figura 32. Proceso de restauración del múltiple de admisión del motor MWM.....	35
Figura 33. Vacuómetro del motor MWM utilizado para la medición de cetano. En la imagen a la derecha se puede apreciar la línea de vacío conectada a la parte posterior del instrumento. Unidades: mm.c.d.a.	36
Figura 34. Conjunto de válvulas del motor MWM KD12E.	36
Figura 35. Culata de motor MWM KD12E.....	37
Figura 36. Válvula de admisión (izquierda) y válvula de escape (derecha).	37
Figura 37. A la izquierda se aprecian las válvulas y los asientos rectificados con la culata cepillada. En la imagen derecha se encierra en un círculo rojo la erosión del asiento de escape.	38
Figura 38. Instalación de resortes de válvula (izquierda). Culata de motor MWM KD12E restaurada e instalada (Derecha).....	38
Figura 39. Conjunto tapa frontal del motor MWM KD12E en su proceso de restauración.....	39
Figura 40. Filtro de aceite incorporado al bloque del motor en su vista lateral y posterior respectivamente.	40
Figura 41. Tapas laterales del motor MWM KD12E. A la izquierda se observa la cubierta de distribución de la bomba de aceite y el damper para correa en V. Al centro se muestra la visión interna desde la cubierta trasera y, a la derecha, presenta la base de la bomba inyectora, la cual posee un rodamiento de polines y un sello en el eje de transmisión.	40
Figura 42. (Izquierda)Tapa soporte de la bomba de inyección restaurada con primer y con el correspondiente rodamiento de polines instalado. (Derecha) Tapa de distribución de la bomba de aceite instalada previo a la pintura final.....	41
Figura 43. Cubiertas laterales instaladas, a la izquierda la tapa soporte con la bomba de inyección y a la derecha la tapa de distribución de la bomba de aceite con su respectivo dámper.....	42
Figura 44. Vista superior de la camisa con el pistón en el PMI (Izquierda). (Derecha) En el círculo rojo se encierra el defecto encontrado en la cabeza del pistón.....	42
Figura 45.Múltiple de escape original del motor MWM KD12E antes y después de la restauración.	43
Figura 46. Línea de escape restaurada y las conexiones a sus extremos. En la imagen izquierda se observa la unión entre el codo de escape y la culata. A la derecha la unión entre la línea de escape y el colector de gases.	44
Figura 47. Motor MWM KD12E listo para operar después del overhauling.....	46
Figura 48. Diferencias entre la conexión con cañería con el suministro de combustible hacia la bomba de inyección.	47

Figura 49. Antes y después de la conexión a la línea de suministro del motor Perkins contiguo.	47
Figura 50. Múltiple de admisión original del motor MWM KD12E para medir cetano.	50
Figura 51. Diseño del múltiple de admisión con inyección indirecta para motor MWM KD12E.	51
Figura 52. Receptor de bronce de la válvula reguladora de aire de admisión. Se puede distinguir en el centro de la imagen, el cono desde el exterior hacia la entrada de aire del motor.	52
Figura 53. Vistas de frontal y lateral de los trabajos a la barra hexagonal.	52
Figura 54. Flange de conexión para el nuevo múltiple de admisión.	53
Figura 55. Tee M-H-H de para la conexión de combustibles gaseosos.	53
Figura 56. Codo y boquilla para inyección de combustible gaseoso.	54
Figura 57. Procedimiento de soldadura TIG para los componentes del nuevo múltiple de admisión del motor MWM KD12E.	54
Figura 58. Múltiple de admisión nuevo instalado en el regulador de aire del equipo.	55
Figura 59. Diseño del nuevo múltiple de escape del motor MWM KD12E.	55
Figura 60. Diseño del flexible para la línea de escape del motor MWM KD12E.	56
Figura 61. Múltiple de escape soldado y acoplado con el flexible de la línea de evacuación de gases de combustión.	57
Figura 62. Motor MWM KD12E con las modificaciones instaladas en la admisión y en el escape de gases.	57
Figura 63. Termocuplas tipo K con rosca 1/8" NPT, bulbo de 30 [mm] de largo y cable de malla de 10[m] de extensión.	59
Figura 64. En rojo se marca la posición de la termocupla del múltiple de admisión.	59
Figura 65. En rojo se encuentra la posición de la termocupla de salida de los gases de escape. La rosca a la derecha se utiliza para el condensador de la línea de evacuación de gases.	60
Figura 66. Tapón de refrigerante roscado para la instalación de la termocupla de entrada al bloque motor.	60
Figura 67. Salida de refrigerante desde la culata hacia el sifón. La distancia entre el codo y la copla a la entrada del sifón es de aproximadamente 40 [mm].	61
Figura 68. Solución para la instalación de la termocupla en la salida de agua de la culata del equipo.	61
Figura 69. Termocupla instalada en el cárter del motor MWM KD12E.	62
Figura 70. Soporte del sensor de rpm sujetado a la tapa posterior del motor de combustión (izquierda). Sensor de rpm fijado al soporte y orientado al dámper del motor de combustión (derecha).	63
Figura 71. Display digital que muestra las revoluciones del motor MWM.	63
Figura 72. A la izquierda, el método másico con balanza para calcular consumo de combustible de los equipos. Sensibilidad: 0.001 [kg]. Y a la derecha, el método volumétrico, con mediciones a 55 y 125 [ml].	64
Figura 73. Separación entre el eje del freno dinamométrico y el eje principal del motor MWM KD12E.	65
Figura 74. Distancias entre el eje del freno dinamométrico (1) y el eje del motor monocilíndrico (2) en [mm].	65

Figura 75. Dámper del freno dinamométrico en su posición original, orientado a la conexión con el motor Perkins. En la imagen derecha se puede apreciar el cono exterior del dámper en el sector sin pintura.	66
Figura 76. Fractura longitudinal a la sección cónica del dámper del freno dinamométrico.	67
Figura 77. A la izquierda, dámper del freno dinamométrico reparado y, a la derecha, dámper para correa en V original y nueva conexión manufacturada para el acople del cardán en el motor MWM.	67
Figura 78. Vista exterior e interior respectivamente de los acoples de la conexión motor-freno.	68
Figura 79. Chaveta original de la unión en el freno dámper -eje desgastada por el sobredimensionamiento de esta.	69
Figura 80. Unión cardánica entre el motor MWM KD12E y el freno dinamométrico.	69
Figura 81. Tablero con 2 columnas graduadas en [mm] para obtener presión en agua y mercurio según se requiera.	70
Figura 82. A la izquierda, en el círculo rojo se encuentra la entrada de la sonda del anemómetro (derecha).	70
Figura 83. Motor MWM KD12E adecuado para pruebas con inyección indirecta de hidrógeno.75	

Tabla de contenido: Tablas

Tabla 1. Características de combustibles comúnmente utilizados en motores de combustión interna.....	13
Tabla 2. Características de los diferentes tipos de cilindros para almacenar gas a alta presión.	14
Tabla 3. Parámetros de funcionamiento del motor MWM KD12E a diferentes RPM. A 1000 revoluciones la toma de datos se realiza mientras el motor eléctrico trifásico sigue encendido.	71

Tabla de contenido: Anexos

Anexo 1. Conexión antigua hacia el sifón desde el retorno de la culata.	78
Anexo 2. Intercambiador de calor post baño químico con ácido.	78
Anexo 3. Vista del eje del volante de inercia del equipo.	79
Anexo 4. Fabricación de empaquetadura de la tapa de distribución de la bomba de aceite.	79
Anexo 5. Chasis y bloque del motor MWM restaurados y pintados.	79
Anexo 6. Unión para cañería con conector para manguera de 3/8".	80
Anexo 7. Línea de suministro de combustible del motor marino Perkins.	80

Glosario

- MCI: Motor de combustión Interna.
- PMS: Punto muerto superior.
- PMI: Punto muerto inferior.
- Knock: Golpeteo que se produce cuando la combustión no se genera en el momento óptimo en un motor de 4 tiempos.
- ECU: Unidad de control del motor.
- SPI: Single point injection (Inyección monopunto).
- A/C: Relación aire-combustible.
- MPI: Multiple points injections.
- GDI: Gasoline direct injection (Inyección directa de gasolina).
- PCCI: Premixed Charge Compression Ignition (Encendido por compression de carga premezclada).
- HCCI: Homogenous Charge Compression Ignition (Encendido por compression de carga homogénea).

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y contexto

Tras la Revolución Industrial en Europa y América Anglosajona en el siglo XIX, ocurre un punto de inflexión en la historia, en donde el uso del petróleo como vector energético daba sus primeros pasos hacia lo que conocemos hoy en día como la gran industria petrolífera. El petróleo, si bien hay pruebas de que se empezó a utilizar hace más de 6000 años, desde 1859 cobró gran relevancia al poder extraer queroseno para el alumbrado de las calles (BBC, 2015) y también gracias a la invención del motor de combustión interna a gasolina en 1861 por Étienne Lenoir (Blázquez Morales Luis, 2023). El uso del petróleo y sus derivados se siguió desarrollando sin parar hasta alrededor de 1970, en donde comenzó la preocupación por las consecuencias ambientales que traía consigo la combustión de gasolina. Esta alerta consiguió que no se siguiera utilizando tetraetilo de plomo (TEL) y posteriormente se introdujo el combustible con menor contenido de azufre para los sistemas catalíticos modernos (Ingrid Lobet, 2021).

Con el paso del tiempo, se han introducido en los MCI (para ocuparse de la contaminación que generan) componentes tales como válvulas EGR (recirculación de gases de escape), inyección por conductor común (common rail), catalizadores, filtro de partículas, entre otros, los cuales si bien ayudan a disminuir los gases de escape no deseables (dióxido de carbono, hidrocarburos sin quemar, óxidos de azufre, partículas, etc.) no atacan el problema base de liberación de gases de combustión de hidrocarburos con efecto invernadero, los cuales son perjudiciales para la salud y el ecosistema en general, provocando el desarrollo de tecnologías en pos de reducir el daño ambiental que se ha generado masivamente desde principios del siglo XX.

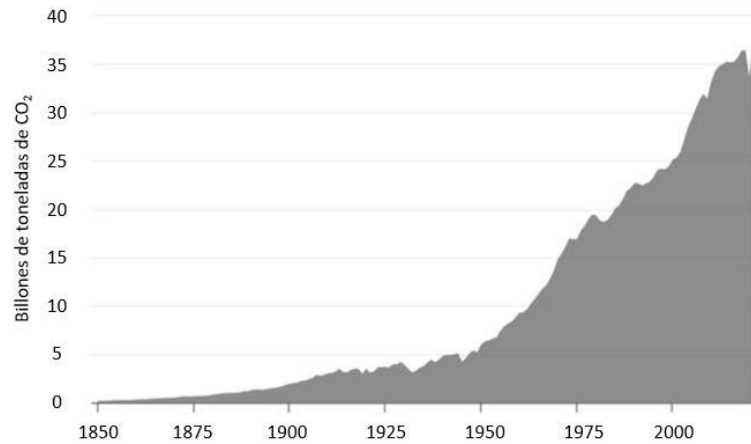


Figura 1. Emisiones globales de CO2 desde combustibles fósiles desde 1850 hasta 2021. (Simon Evans, 2021)

La cantidad de gases de efecto invernadero que se liberan a la atmósfera por la actividad humana sigue con una tendencia al aumento alarmante, por lo tanto, para abordar el cambio climático y sus impactos negativos, los líderes mundiales realizaron en 2015 el *Acuerdo de París* en el cual tratan temas como financiamiento para desarrollo de tecnologías que ayuden a mitigar el cambio climático (Naciones Unidas, 2015), formulación de estrategias en materia climática y, como punto destacable, medidas para reducir sus emisiones de gases con efecto invernadero. Con esto en mente, las industrias que dependen de la quema de hidrocarburos para obtener energía buscan alternativas para continuar con su funcionamiento, en donde una opción viable es la utilización de hidrógeno como combustible en los MCI.

Actualmente, Chile cuenta con una *Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde*, en donde establece las ambiciones del país para la creación de una nueva industria de exportación y aplicaciones derivadas, que permitan crear economías de escala para lograr ser competitivos a nivel mundial, cuyo éxito traerá beneficios tanto para el país, como para todo el planeta (Ministerio de Energía, 2021). Con esto en consideración, el estudio de la viabilidad de conversión de MCI existentes en el mercado actual para que operen con combustibles alternativos es fundamental para ser parte de la solución a este problema global.

1.1.1 Participación y relevancia

Para abordar la situación, se utiliza un motor monocilíndrico diesel que se encuentra en el Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM, el cual ha estado en desuso por más de 35 años. El equipo se utilizaba originalmente para medir el índice de cetano del petróleo, pero en la actualidad no existen funcionarios en la Universidad que tengan conocimiento acerca de su funcionamiento previo a este documento. Debido al evidente deterioro del equipo con el paso de los años, se realiza una restauración total detallada, con el fin de conocer el estado de los componentes, realizar mantenciones y reparar lo necesario para que pueda volver a operar como

en su estado original. Posteriormente, se modifica el motor para que pueda admitir hidrógeno gaseoso como inyección indirecta de combustible por el múltiple de admisión. Para poder obtener parámetros de funcionamiento, interpretar resultados, y tener bases de comparación, se instalan termocuplas en puntos estratégicos del equipo, con tal de poder monitorear en tiempo real el comportamiento de la evacuación térmica de la máquina al sustituir diferentes porcentajes de petróleo por hidrógeno. Finalmente, la instalación se conecta a un freno dinamométrico mediante un cardán, con el objetivo de controlar el torque que genera cada modo de operación.

La ejecución del proyecto aporta información útil en el desarrollo de los futuros MCI que funcionen con combustibles alternativos, como también en la utilización de nuevos vectores energéticos en la industria de la conversión de motores convencionales ya existentes. Además, todo el conocimiento generado podrá ser útil en proyectos de conversión de equipos con combustión interna, lo cual será de gran ayuda para la Universidad en términos de desarrollo de nuevas tecnologías para la industria y el país.

1.2 Planteamiento de problemas

1.2.1 Enfoque global

El petróleo tiene sus días contados como combustible. Si bien en la actualidad todavía se siguen desarrollando tecnologías con nuevos vectores energéticos y otras formas de movilidad o creación de energía, a corto y mediano plazo, los motores de combustión interna no podrán desaparecer hasta que la ciencia de la electromovilidad se encuentre más avanzada. Problemas tales como la autonomía para la maquinaria pesada, tiempos de carga elevados para baterías de alto voltaje, degradación de los depósitos de energía y escasez de electrolineras públicas desarrolladas, son algunas desventajas que se deben seguir trabajando para que sea una tecnología cada vez más viable en diversos sectores de la industria.

La utilización del hidrógeno como combustible soluciona una situación no menor: ¿Qué hacer con todos los MCI que están operando en la actualidad? ¿Su destino no será otro que ir a parar a los acopios de reciclaje? Si se utiliza como estrategia base el *Fit for 55* acordado por la UE (Consejo de la Unión Europea, 2005) la cual tiene como objetivo principal el cese de ventas de motores de combustión interna para el año 2035 para reducir las emisiones en al menos un 55% al 2030, la medida podría ser implementada en gran parte de los países desarrollados del mundo, en donde su población no tendrá mayor dificultad en migrar a nuevas tecnologías. Sin embargo, la mayoría de las personas que residen en naciones sub-desarrolladas, no son ni serán capaces a corto o mediano plazo de hacer una transición rápida a la electromovilidad en el sector

automotriz (dejando afuera otras importantes industrias generadoras de gases de efecto invernadero, como por ejemplo, la producción de energía eléctrica).

Esta medida tomada por la UE, con respecto al plan legislativo, es esencial para efectuar una transición y dar a conocer al mundo acciones que se están tomando y que deberán de tomarse en gran parte del globo por el bien común pero, hasta garantizar esta transición, deben existir soluciones que puedan aportar a disminuir el efecto negativo que genera la combustión en los equipos que se requieren en distintos sectores en la actualidad, por lo tanto, el uso de hidrógeno como combustible, resuelve en parte esta problemática, logrando al combustionar, potencia mecánica sin liberación de carbono a la atmósfera.

Con el objetivo de avanzar en el desarrollo de una solución al problema planteado anteriormente, se debe analizar el funcionamiento de los equipos utilizados en la actualidad con el fin de evaluar la viabilidad de una modificación que brinde las características necesarias para adecuarse paulatinamente a los desafíos que plantea la UE.

1.2.2 Problemática Técnica

En un MCI encendido con gasolina, la combustión es fácilmente controlada por la chispa de la bujía, en cambio, el equipo que funcione con diesel no posee un detonador controlado, esto se debe a que el calor de la compresión y la inyección de combustible en determinados ángulos del cigüeñal son suficientes para iniciar el proceso de combustión. Al ingresar hidrógeno en vez de diesel por el inyector, sin otra modificación en el equipo, existe un gran riesgo de operar de manera inestable.

Una de las maneras para ingresar hidrógeno en el sistema y que este funcione sin producir complicaciones al operar es modificando el tipo de suministro de combustible, de manera que el equipo opere en modalidad dual fuel. Para hacer funcionar el equipo con ambos elementos, se le debe implementar al motor una nueva inyección de combustible de hidrógeno, la cual debe ser diseñada en base a los requerimientos térmicos a los que estará sometida la máquina.

El motor que se utiliza en este proyecto data de principio de los años cincuenta, cuenta con un pistón y culatín independiente. El intercambiador de calor del mismo funciona por el método de la convección, en donde el agua fría, al tener mayor densidad que el agua caliente, baja y entra por la parte inferior del block, sube por el culatín y llega al intercambiador de calor, lugar donde existe un serpentín que actúa como sumidero de temperatura. Por lo tanto, al llegar el refrigerante, este se enfría al entregar energía calórica al sumidero y sigue su circulación hacia abajo. Este sistema no cuenta con bomba de agua, radiador o electroventilador, por lo que la evacuación térmica del equipo es decisiva para la viabilidad de la adición de hidrógeno para su funcionamiento. Los únicos instrumentos que el equipo brinda son el medidor de presión de

aceite del motor y la presión de vacío que genera el múltiple de admisión. Estos elementos son insuficientes para hacer pruebas con hidrógeno en el equipo, por lo tanto, la adición de termocuplas, medidor de revoluciones y un acople al freno dinamométrico son clave para llevar a cabo la conversión.

Antes de realizar todas las modificaciones, es de suma importancia una restauración completa del equipo, debido a que en esta tarea se observaron varios componentes defectuosos y deteriorados, tanto con el uso en décadas atrás, como por el abandono total del motor hasta el año 2022. Las piezas de la máquina no son comerciales y cada reparación debe ser realizada con suma precaución, tomando en cuenta que cada elemento es único. Cabe señalar que los manuales originales del equipo se perdieron, por lo tanto, si bien existen un par de documentos que mencionan motores similares de los cuales se puede sacar un poco de información, la ingeniería inversa en el proyecto es fundamental para entender como restaurar, mantener y operar un equipo de la época.

Considerando todo lo anterior es posible concluir que, el parámetro a controlar más importante es la temperatura de funcionamiento del equipo, en donde el valor máximo a la salida del refrigerante es el límite de operación con las condiciones de evacuación térmica actuales. La adición de hidrógeno depende directamente del parámetro antes mencionado, siendo una de las limitantes más importantes en la sustitución de combustible diesel, debido a que, si en algún porcentaje de sustitución el valor de la temperatura de refrigerante excediera el máximo, implica que desde ese punto en adelante no es posible un mayor reemplazo de diesel por hidrógeno sin cambiar o modificar el intercambiador de calor original del equipo.

1.3 Objetivo general

Adecuar un motor monocilíndrico encendido por compresión marca MWM modelo KD12E para operar en modo dual con hidrógeno.

1.3.1 Objetivos específicos

- Restaurar mecánicamente el motor monocilíndrico marca MWM KD12E encendido por compresión para operar en modo dual con hidrógeno.
- Diseñar, fabricar e implementar línea de inyección hidrógeno-diesel y sistema de evacuación de gases de escape.
- Instalar instrumentación para monitorear la temperatura del refrigerante, gases de escape, aire de admisión, aceite lubricante, presión de aire de admisión, velocidad y torque del motor.

1.4 Planificación

La modalidad de trabajo se obtiene a partir del análisis de los objetivos del proyecto, lo cual se traduce en las necesidades a las que el motor se verá sometido. Dos destacan por sobre las demás en una etapa inicial; confiabilidad y regularidad en la toma de muestras. Para llevar a cabo ambos puntos y teniendo en cuenta que es un equipo en desuso, además de que los funcionarios del laboratorio no tenían registro de la última mantención hecha, realizar un *overhauling* total es la primera decisión importante y la que requiere más tiempo de ejecución, pero es fundamental para conocer el funcionamiento de todos sus componentes y asegurar el buen estado de estos.

En los antecedentes, se abordan los antecedentes que se manejan sobre la restauración de equipos, modificaciones e instrumentalizaciones en la Universidad. Por otro lado, en el marco teórico se detallan las directrices a considerar tanto en la restauración como en la modificación del equipo. La evaluación de la viabilidad de la sustitución se aborda en la conclusión de este documento, en base a los parámetros que el mismo motor indica al operar con combustible diesel.

La restauración comienza a ejecutarse posterior al análisis de documentos de equipos que comparten similitudes en sus componentes y que son de utilidad al describir los fenómenos en los que se basan ciertos sistemas del motor MWM. En esta fase se describen todas las etapas de la restauración, el análisis de cada sistema y sus partes, los procesos por los que pasa cada pieza para llegar al más cercano grado de originalidad en términos físicos y operacionales, el cambio de elementos de desgaste, reparación de elementos dañados y reensamblado. Para finalizar con la etapa inicial, se detalla la puesta en marcha, apagado del equipo y la eliminación de detalles que surgieron tras el encendido.

La etapa central consta de evaluar las condiciones necesarias para que el motor admita combustible gaseoso por admisión y plantear una serie de mejoras para llevar a cabo el objetivo. En esta fase se diseña, adquiere y manufactura todos los elementos necesarios para la conversión.

Luego, con la finalidad de poder obtener y registrar los parámetros de funcionamiento, además de tener monitoreado las variables críticas de operación, se instalan instrumentos de medición en el equipo, logrando controlar temperatura, presión, velocidad y torque.

Al término de este documento se hace énfasis en las propuestas para modificaciones futuras del equipo, en línea con el avance de la investigación y desarrollo de la implementación de combustibles alternativos en MCI en modalidad dual-fuel y 100% hidrógeno.

1.5 Antecedentes: motor monocilíndrico MWM KD12E

En 1922, el Departamento de Construcción de Motores estacionarios de Benz & Cie. fue subcontratado y posteriormente vendido. El 22 de abril de 1922, la empresa fue renombrada como “Motoren-Werke Mannheim” y al año siguiente, el 22 de enero de 1923, solicitaron el registro de la marca en la oficina de patentes del Reich (Alemania), la primera marca oficial de MWM (MWM, 2023). Más de 100.000 motores modelo KD (Klein-diesel) de la marca MWM, fueron construidos desde 1946 y suministrados a fabricantes de tractores y maquinarias de construcción, entre los cuales se encuentra el modelo KD12E. Este equipo de 4 tiempos de aspiración natural cuenta con sólo un pistón refrigerado por agua con una cilindrada de 850 [cc], logrando una potencia de 12 [CV] a 2000 [rpm]. Se compone de un cárter estándar, un sistema de combustible con bomba BOSCH PHV 12/12 con doble depósito de combustible con una válvula selectora y un conjunto culata con precámara de combustión. La refrigeración del equipo es efectuada por un sistema de sifón térmico de recirculación de agua destilada (CEN, 2023). En base al test CEC L-12-A-76, la temperatura de salida del refrigerante para este motor es de 110 [°C] (Booser Richard, 1997)



Figura 2. Instalación estacionaria equipada con un motor MWM KD12E para medir la inflamabilidad de combustible Diesel. (Dansk Standard, 2017)

1.5.1 Restauraciones previas

En los últimos años, en la Universidad Técnica Federico Santa María no se presentan trabajos de restauración de motores a excepción de un trabajo de tesis para el título de técnico en mecánica automotriz en la sede de Viña del Mar, en donde se restaura un motor y el circuito eléctrico de un vehículo marca Chevrolet Chevette de 1980 (Alex Maldonado, 2020). Por otro lado, por medio de la web no fue posible encontrar la restauración de un medidor de cetano de características similares. Con estos antecedentes se deduce que el presente documento expone un trabajo único y con gran potencial investigativo para el desarrollo de nuevos combustibles para los existentes propulsores diesel.

1.5.2 Modificaciones anteriores a motores de combustión

En el Laboratorio de Termofluidos de la Casa Central de la Universidad Técnica Federico Santa María, hace aproximadamente cinco años, ya se había utilizado la modificación de componentes para permitir que un MCI pudiera combustionar otros carburantes a modo de sustitución de diesel, tales como: gas natural, hidrógeno, entre otros.

El ingeniero mecánico y apoyo académico Daniel Galleguillos, en el año 2018, fue el encargado de instalar modificaciones en el motor Perkins M80T que se encuentra en la misma cabina que el monocilíndrico MWM. La manera elegida para ingresar el nuevo combustible fue la inyección indirecta, instalando un múltiple de admisión de PVC en el cual esta inserto una cañería de cobre que dirige el caudal de gas en la dirección del aire de admisión (Figura 3). La línea acero inoxidable que canaliza el hidrógeno en la actualidad está en desuso, esto se debe a que se cambiaron las normas de seguridad en el uso de los cilindros de gas y la Universidad no ha podido solventar las nuevas exigencias.



Figura 3. Admisión modificada para el ingreso de combustible gaseoso en el motor Perkins M80T.

1.5.3 Instrumentalización de equipos para control de parámetros

La instalación de sensores para el control de los parámetros de operación de diferentes máquinas es una práctica común en un laboratorio con fines académicos. Una gran variedad de detectores de temperatura, presión, vibración, velocidad y emisiones de escape se han colocado en equipos del Laboratorio de Termofluidos, tales como el motor Mercedes Benz modelo OM 366LA y el antes mencionado Perkins M80T. En algunos casos es necesario realizar modificaciones o crear componentes en los equipos para admitir estos instrumentos, como por ejemplo los acoples para la conexión de los motores a los frenos dinamométricos, aunque por otro lado, siempre se intenta utilizar en primera instancia las perforaciones, roscas o lugares originales de la máquina, según corresponda, con el fin de intervenir mínimamente el motor a menos que sea completamente necesario.

Capítulo 2

Marco teórico

2.1 Aplicaciones del hidrógeno en la producción de potencia mecánica

En la actualidad se utilizan principalmente dos tecnologías para obtener potencia mecánica a partir del hidrógeno: La pila de combustible y el motor de combustión interna. La utilización de este vector energético se remonta a Étienne Lenoir en 1860 (Blázquez Morales Luis, 2023), aunque los primeros proyectos relevantes en la industria de la movilidad que utilizan hidrógeno surgen a fines de los años 90, con marcas que invierten en el desarrollo de celdas de combustible como Toyota (*Historia Del Uso Del Hidrógeno*, 2022) y Honda (*El Hidrógeno, Un Vector Energético Que Gana Protagonismo En Honda – HondaDreams*, 2023) o con la inyección de combustible en un MCI como Mazda (*Mazda RX-9 Hydrogen: Los Inicios Sostenibles de La Firma*, 2020) y BMW (BMW Group, 2006) a mediados de la primera década del siglo XXI.

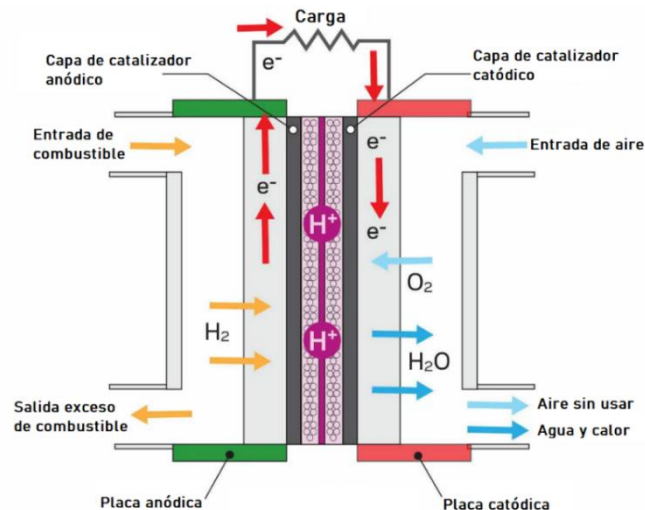


Figura 4. Diagrama de funcionamiento de una pila de combustible. (NAFION, 2023).

El desarrollo de motores de combustión de hidrógeno se extendió con el paso de los años en donde otras empresas como Porsche (Richard Backhaus, 2022) y JCB (*El Nuevo Motor de JCB*, 2023) han invertido en fabricar propulsores que disminuyan emisiones de óxidos nitrosos y, en

el caso de MAN, desarrollar inyección dual de combustible para embarcaciones (*MAN Engines: The First Dual Fuel Hydrogen Engines in Use on a Work Boat*, 2022).

2.2 Tipos de inyección de hidrógeno en MCI con pistones

Existen distintas maneras de ingresar combustible en la cámara de combustión de un motor, éstas se diferencian por cantidad de inyectores y por la ubicación del sistema de inyección en el equipo. Con respecto a la cantidad de inyectores se encuentra el sistema monopunto y el multipunto. Antiguamente, la inyección se realizaba por medio de un carburador, el cual se encarga de preparar la mezcla de aire-combustible en los MCI a gasolina. Este elemento cuenta con una entrada de aire en la parte superior y en el medio un pequeño contenedor de gasolina, el cual funciona como flotador para que, a cierto nivel mínimo de gasolina, una válvula deje entrar más combustible para mantener el nivel. El receptáculo vierte el combustible en la parte central del carburador, en donde es recibido por una estructura Venturi, modificando la presión del aire, de manera que sea succionado hacia la cámara de combustión. Este componente, debido a su baja eficiencia en comparación con los sistemas de suministro de combustible actuales, ha sido reemplazado por el sistema monopunto de inyección de combustible, el cual fue creado para aprovechar el diseño mecánico de los motores carburados previamente fabricados.

La inyección monopunto o SPI (Single Point Injection) en MCI lleva el combustible a la cámara de combustión realizando la mezcla aire-combustible antes de llegar a los cilindros al igual que el carburador, en donde la diferencia se encuentra en que la ECU es la que determina la relación a/c que se inyecta antes de la mariposa de gases. Por otro lado, la inyección multipunto o MPI (Multi Point Injection) emplea un inyector por cada cilindro del motor, pulverizando el combustible de manera independiente.

En motores de encendido por chispa, la combustión se controla fácilmente con la bujía como elemento activador en la cámara, por lo tanto, la inyección de hidrógeno por el colector de admisión no supone un desafío para la estabilidad de la operación, ausentándose el *knock* en el equipo.

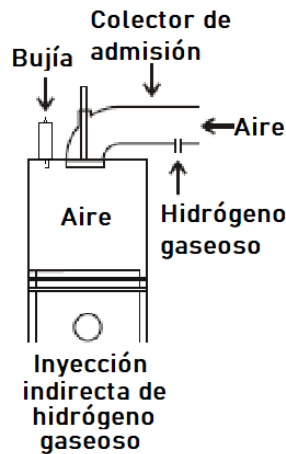


Figura 5. Diagrama de inyección indirecta de hidrógeno gaseoso en motor con ciclo Otto.

Otra manera de ingresar hidrógeno a la cámara de combustión de manera indirecta (mediante el múltiple de admisión) es inyectando el elemento en estado líquido criogenizado. Al inyectar el combustible a una temperatura extremadamente baja en la cámara de combustión y mezclarse con el aire aspirado, la mezcla se puede enfriar y, por lo tanto, aumenta el contenido energético dentro de la cámara de combustión, incrementando la potencia y rendimiento del motor.

Al ingresar el hidrógeno criogenizado por el múltiple, con respecto al elemento en estado gaseoso, la relación volumétrica del aire-combustible se maximiza de tal manera que es comparable con los parámetros rendimiento de una cámara de combustión más grande a temperatura ambiente (Figura 6).

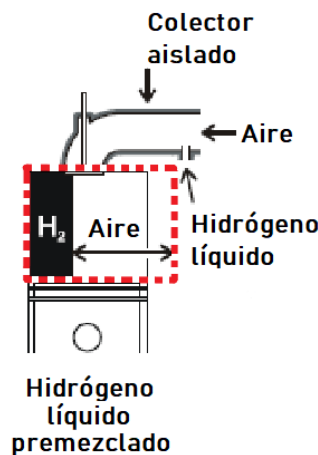


Figura 6. Diagrama de inyección indirecta de hidrógeno líquido en un MCI.

Los sistemas de inyección de combustible también se diferencian por la ubicación de estos en el equipo. Si está implementado en el múltiple de admisión, el combustible ingresa y genera una mezcla aire-combustible que entra al cilindro, el sistema de inyección se denomina

indirecto. Al contrario, si el ingreso de combustible se realiza adentro de la cámara de combustión, el método se denomina de inyección directa.

La inyección indirecta de combustible es más económica de construir que la inyección directa y permite una mayor limpieza del inyector al estar alejado de la cámara de combustión. Esto se debe a que la acumulación de carbono reduce el flujo de aire desde y hacia los cilindros, reduciendo el torque y la eficiencia del equipo con respecto a un consumo de combustible normal de operación.

En el método de inyección directa, la combustión es más eficiente, esto es debido al preciso control de la cantidad, sincronización y patrón de combustible inyectado en cada cilindro, lo cual aumenta la potencia, permite un mejor arranque en frío, una mayor estabilidad del ralenti y disminuye el tamaño de los equipos (*Diferencias Entre La Inyección Directa e Indirecta | Auto Bild España*, 2020). Este tipo de inyección mejora la calidad de la combustión reduciendo el consumo de combustible, minimiza la emisión de gases contaminantes y reduce la temperatura de los cilindros. Una menor temperatura favorece la relación de compresión, generando mayor potencia y economía con la misma cantidad de combustible. Por otra parte, los pistones en los sistemas de inyección directa están sometidos a una gran presión por parte del inyector, en donde este método puede trabajar con presiones de 2000 [psi] en comparación con los aproximadamente 60 [psi] del sistema de inyección indirecta. Por lo cual, las propiedades mecánicas de estos elementos (pistones y anillos) que transmiten potencia son superiores para los equipos con inyección directa. Estos motores son más caros de fabricar por su mayor complejidad y sus nocivas emisiones son mayores, por lo tanto, requiere de la instalación de mecanismos anticontaminantes complejos.

En la Figura 5 y Figura 6 se puede apreciar la utilización de la inyección indirecta de combustible para combustionar hidrógeno. Para el motor con ciclo Otto, el ingreso de hidrógeno se puede llevar a cabo tanto por el método indirecto de la figura como con el directo, esto es posible debido a que, al encender la chispa la bujía, el hidrógeno combustionará de manera controlada

En motores diesel no existe una bujía para controlar el encendido, la combustión se genera al ingresar el combustible por un inyector directamente en la cámara, por lo tanto, para ciertas condiciones de presión y temperatura, el combustible se enciende. El ingreso de hidrógeno en estos equipos plantea el desafío de generar la autoignición en el momento preciso sin un agente desencadenante, tomando en consideración la diferencia entre temperaturas de autoignición entre el diesel y el hidrógeno (Tabla 1).

Tabla 1. Características de combustibles comúnmente utilizados en motores de combustión interna.

Combustible	PCI [MJ/kg]	PCS [MJ/kg]	Relación estequiométrica Aire/Combustible [kg]	Temperatura de flama [°C]	Energía mínima de ignición [MJ]	Temperatura de autoignición [°C]
Hidrógeno	119,9	141,6	34,3	2320	0,017	535-585
Metano	50	55,5	17,2	1957	0,3	540-630
Propano	46,3	50,3	15,6	1980	0,3	450
Metanol	18	22,7	6,5	1870	0,14	460
Gasolina	44,5	47,3	14,6	2138	0,29	260-460
Diesel	42,5	44,8	14,5	2327		180-320

La inyección directa de hidrógeno gaseoso en la cámara de combustión es una práctica ya dominada por los constructores de equipos con ciclo Otto en términos de combustión, pero para el ciclo diesel, la ausencia de una fuente de ignición externa obliga a los fabricantes a buscar otra manera de brindar la energía inicial para que el hidrógeno combustione, por lo tanto, una opción tomada por muchos es la combustión dual de hidrógeno y diesel. De este modo, la detonación del diesel da pie a la combustión del hidrógeno.

Como se menciona en las aplicaciones del hidrógeno, la empresa MAN, en 2022 colocó en operación un motor dual de hidrógeno-diesel de 1019 [hp], el cual utiliza alrededor de un 5% de diesel para funcionar, reduciendo las emisiones de CO₂ en un promedio aproximado de un 50% con un máximo de 80%. Este sistema se denomina *“Diesel-pilot ignited hydrogen combustion”*, en donde la cantidad de hidrógeno varía entre un 65% y 95% de la energía. Por motivos económicos, algunos documentos plantean la inyección de un pequeño porcentaje de hidrógeno (alrededor de un 15% de la energía total del combustible principal) y usar el diesel como carburante principal (*Inyección de Hidrógeno Como Potencial Mejora de Los Motores Actuales*, 2011).

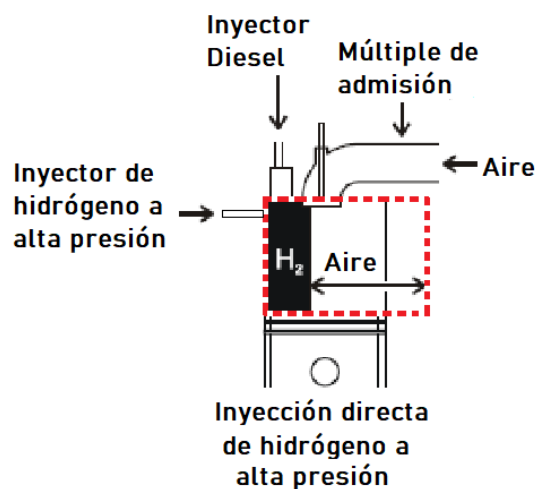


Figura 7. Diagrama de inyección directa de hidrógeno gaseoso en un MCI.

2.3 Almacenaje de hidrógeno

Debido a la baja densidad del hidrógeno, para un volumen dado, el hidrógeno contiene menos energía que otros combustibles para el mismo recipiente. El hidrógeno es un carburante con una gran densidad energética, en donde 1 [kg] del elemento puede entregar la misma energía que 2.8 [kg] de gasolina, pero al tener tan baja densidad, el almacenamiento se convierte en el gran cuello de botella para esta tecnología. La mayoría de los sistemas de almacenaje de hidrógeno son voluptuosos y/o más pesados que los usados para almacenar gasolina o Diesel.

Las maneras más comunes de almacenar hidrógeno son como gas a alta presión o almacenamiento en estado líquido a temperaturas criogénicas. Otras alternativas en desarrollo serán descritas más adelante, tales como las nanoestructuras de carbono o los hidruros metálicos, etc.

- **Gas a alta presión (CGH2)**

Es el sistema más común de almacenamiento y el más desarrollado. Se utilizan diferentes tipos de depósitos de hidrógeno, tales como: depósitos de superficies móviles, estacionarios y cavernas subterráneas. El transporte y suministro convencional de hidrógeno se efectúa en botellas metálicas con paredes gruesas y con materiales de alta resistencia. Con el fin de reducir peso, hace unos años, los fabricantes ensayan con materiales tipo *composite* poliméricos en sustitución del acero, los cuales poseen los mismos niveles de seguridad (*Almacenamiento de Hidrógeno* - ARIEMA, 2023). Si se asume un comportamiento de gas ideal, las densidades energéticas son mayores mientras a más presión se almacene el elemento. Es la manera más sencilla de almacenar hidrógeno, ocupando presiones de trabajo de 200 [bar] a 700 [bar] en equipos avanzados. A 200 [bar] se consume el 10% de la energía almacenada, mientras que a 700 [bar] un 15% de esta. (*Estudio Comparativo Del Uso de Hidrógeno Frente A Combustibles Fósiles En Motores de Combustion Interna En Buques*, 2023).

Los estanques o cilindros utilizados para el almacenaje de hidrógeno se pueden dividir en los tipos: I, II, III, IV y V, los cuales se diferencian en base a sus características de fabricación (*Types of Hydrogen Tanks: Technological Differences and Advantages Explained*, 2022):

Tabla 2. Características de los diferentes tipos de cilindros para almacenar gas a alta presión.

Tipo de cilindro	Composición estructural	Rango de presión [bar]	Densidad de almacenamiento [gr/L]
I	Acero o aluminio	300 (acero) - 175 (aluminio)	15
II	Aluminio con refuerzo de fibra de vidrio o carbono	100 - 1000	20
III	Recubierta de fibra de carbono, vidrio o Kevlar	~750	25
IV	Igual a tipo III pero con una capa plástica en el interior para hermeticidad	~875	40
V	Con envoltura compuesta con carbono, aramida y vidrio para reducir peso	~310	20

- **Hidrógeno líquido (LH2)**

El hidrógeno no se puede almacenar en estado líquido indefinidamente. Al no tener un recipiente con aislación perfecta, parte del calor ambiente se transfiere al interior del estanque, lo que ocasiona que el hidrógeno en el interior se evapore y aumente la presión. Para reducir la evaporación el recipiente consta de varias capas metálicas separadas por un material altamente aislante, el cual por lo general involucra presiones bajas similares al vacío, de aproximadamente 0.01 [Pa] y una conductividad térmica resultante de 0.05 [W K⁻¹] (Sørensen & Spazzafumo, 2018).

2.3.1 Otras tecnologías de transporte y almacenaje

En la actualidad se están desarrollando numerosas técnicas para poder almacenar y transportar hidrógeno, aunque cabe señalar que algunas de estas posibilidades son poco viables hoy en día en términos económicos, sin embargo, varias poseen un gran potencial para lograr los objetivos mencionados y pueden estar presente en los mercados futuros. Entre las más destacadas (*Elegir El Mejor Método de Almacenamiento de Hidrógeno | CIC EnergiGUNE, 2023*) es posible encontrar los hidruros metálicos para almacenaje de hidrógeno a baja presión, la adsorción del hidrógeno en carbón, la utilización de compuestos químicos con hidrógeno (amoníaco y tolueno) y el uso de microesferas de cristal a alta presión (“Hydrogen Permeation Through Glass,” 2020).

2.4 Overhauling

Para traer al servicio un equipo que ha estado en desuso mucho tiempo existen dos enfoques que son utilizados según las necesidades del usuario; el enfoque “*poco a poco*” o una reconstrucción completa. La única motivación para tomar la primera opción es el factor económico, reemplazando solo aquellas piezas que permiten que el motor se mantenga en funcionamiento. Para este tipo de proyectos y en particular con el equipo monocilíndrico, este enfoque es ineficiente, debido a que no se tiene información previa sobre la última mantención al equipo y no se sabe cuántas horas de trabajo tuvo desde su última revisión. Si se aborda la restauración “*poco a poco*”, la probabilidad de que alguno de los componentes falle mientras se está experimentado es muy alta, por lo tanto, para evitar paradas no programadas y perder tiempo valioso destinado a pruebas, la restauración completa del equipo es la opción más sensata a ejecutar, ofreciendo mejores resultados y más confiables.

Cuando un motor ha acumulado muchas horas de uso, las partes internas pueden estar desgastadas o dañadas y deben ser reemplazadas. Las piezas que se reemplacen cuando se reconstruya el equipo dependerán de su condición. Dentro del bloque del motor, los elementos típicos de desgaste incluyen: pistón, pasador de pistón, bujes de pasador, anillos, cojinetes de biela y cojinetes de apoyo principales. El cigüeñal se mecaniza de ser necesario y la, o las bielas

si corresponde, se pueden reutilizar o reemplazar. Las empaquetaduras se deben reemplazar para garantizar el sello en la junta de los elementos tales como: culata, tapa de válvulas, cárter de aceite, bomba de aceite, bomba de combustible y tapa de sincronización. Si se restaura la culata existente se necesitan; nuevas válvulas de admisión y escape, varillas de empuje, balancines, resortes y guías si corresponde. En algunos equipos se incluye la mantención de conjunto de cuerpo de aceleración, encendido y el sistema de refrigeración. A continuación, se muestra una guía resumida de cómo realizar un overhauling completo a un MCI de características comunes (*How To Rebuild An Engine: Everything You Need To Know*, 2021):

- Con el equipo desenergizado, desconectar los componentes externos del motor (cerrar paso de combustible y enchufes según corresponda) y drenar el refrigerante.
- Retirar el intercambiador de calor y las mangueras del sistema de refrigeración.
- Soltar el alternador y quitar las correas (si el equipo cuenta con estos elementos).
- Desconectar el suministro de aire de admisión y drenar el combustible del equipo.
- Retirar las conexiones eléctricas al motor, desconectar el colector de escape y luego la transmisión.
- Inspeccionar el motor, verificando si hay signos de sobrecalentamiento, grietas y quemaduras en el bloque. Comprobar si hay líquido saliendo de los sellos o de las juntas entre componentes y revisar que no quede exceso de sellante en las juntas debido al mantenimiento anterior.
- Si los pernos o espárragos del múltiple de escape están corroídos, usar lubricantes o calor para poder retirarlos.
- Desmontar la tapa de válvulas y aflojar la culata. Proteger las varillas de los elevadores cuando se levante la culata.
- Si el o los cilindros están demasiado desgastados, es posible que la restauración no sea del todo exitosa. Medir con un micrómetro para determinar el diámetro interior y obtener una idea del desgaste de las paredes observando la cresta del cilindro, esta cresta no se desgasta, debido a que los anillos no llegan tan arriba.
- Retirar el conjunto pistón-biela.
- Retirar e inspeccionar el cigüeñal. Buscar desgaste en los cojinetes y exceso de suciedad. Retirar el árbol de levas, comprobar si existen grietas o señales de sobrecalentamiento.
- Retirar los sellos, soportes, pasadores de guía y todo lo que esté unido al exterior del bloque motor.
- Comprimir los resortes de las válvulas, retirando los seguros y abriendo lentamente.
- Retirar las válvulas sin forzar para evitar daño en las guías.
- Verificar planitud de válvulas, desgaste excesivo en guías y asientos de válvulas.
- Reemplazar válvulas con bordes muy delgados y reemplazar resortes que estén desgastados.
- Reacondicionar las guías de válvulas desgastadas, asientos y rectificar las válvulas que no serán reemplazadas.
- Limpiar a fondo todas las piezas que se reutilizarán. De ser necesario, utilizar desoxidantes o desincrustantes según el estado de cada componente.

- Inspeccionar cada componente que será utilizado en busca de signos de daño.
- Reparar y/o reacondicionar los elementos que presenten problemas.
- Engrasar los cojinetes e instalar el cigüeñal y el árbol de levas según su posición original.
- Instalar el sistema de distribución según las marcas de sincronización cigüeñal-pistón y la secuencia de las válvulas para la carrera de admisión, compresión, combustión y escape del motor.
- Instalar según sea necesario nuevos pistones, anillos, juntas y sellos, verificando las holguras de los anillos para que no queden holguras excesivas en los extremos o que queden muy apretados.
- Instalar las válvulas lubricando siempre las piezas con aceite de motor y ajustar en base a las medidas originales del equipo.
- Conectar el sistema de refrigeración y el sistema eléctrico del equipo en el orden inverso a como se quitó. Rellenar el aceite del motor y el anticongelante.
- Realizar una comprobación final para asegurar que todos los componentes se encuentran dónde estaban originalmente y arrancar el motor para ajustes en la operación si el equipo lo requiere.

2.5 Modificaciones y consideraciones

La base tomada para la modificación del sistema de admisión que se plantea a continuación proviene de la conexión de hidrógeno que actualmente posee el motor Perkins según se detalla en la sección 1.5.2.

2.5.1 Múltiple de admisión

Para admitir hidrógeno como combustible, se diseña y fabrica un múltiple de admisión, en donde el gas es inyectado a través del sistema de admisión de aire del equipo. Con esto en consideración es posible concluir que el motor posee inyección dual de combustible de tipo directo para diesel e indirecto para el hidrógeno.

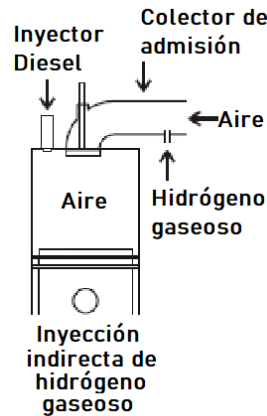


Figura 8. Diagrama de inyección dual para motor monocilíndrico MWM.

Para crear el componente, se toma en cuenta los cambios de temperatura que sufrirá el equipo en el futuro en las pruebas para su funcionamiento con 100% hidrógeno, por lo tanto, el material de construcción debe cumplir con una resistencia mínima a temperaturas cercanas a los 500 [°C]. El múltiple requiere ser compatible con las dos modalidades de funcionamiento actuales (diesel puro y dual fuel) además de tener en cuenta el futuro modo de operación sólo con hidrógeno, debido a esto, debe contar con conexiones rápidas para cambiar de un modo a otro sin mayor complicación.

Para lograr el propósito de utilizar hidrógeno como combustible de manera indirecta, el colector de admisión debe tener un inyector en su interior, de manera que el hidrógeno pueda ingresar a la cámara de combustión cuando el pistón esté en la carrera de bajada desde el PMS. El gas contenido será una mezcla de aire-combustible que hará combustión en el momento en que el diesel detone, en donde éste último actúa como fuente de ignición. El hidrógeno se mantiene saliendo a presión constante mientras se opera de manera dual, la cual se controla mediante una válvula afuera de la cabina del equipo. La línea de hidrógeno nace de cilindros tipo I en las afueras del laboratorio y termina con el arresta llamas justo antes de la entrada de combustible al múltiple.

2.5.2 Múltiple de escape

El canalizador de los gases de escape es otro componente que sufre modificaciones con respecto al original, en donde, gracias a la gran condensación que generan estos equipos en su línea de evacuación de gases, se debe agregar una válvula de purga en adición a la termocupla que se utiliza para obtener la temperatura de los gases de la combustión. El material de fabricación también es un gran factor a considerar, tomando en cuenta que la línea de evacuación de gases original está hecha en su mayoría con acero al carbono sometido a alta temperatura y humedad, lo que en consecuencia trae consigo abundante corrosión al interior de ésta.

2.6 Instalación de instrumentos de medición

Con el fin de reunir la mayor cantidad de datos posibles en el estudio de los modos de operación del equipo y tener controladas las temperaturas de operación del mismo, se resuelve instalar un sensor de revoluciones por minuto y termocuplas en puntos estratégicos críticos, tales como: múltiple de admisión, múltiple de escape, aceite del cárter y tanto la entrada como salida de refrigerante del equipo. Para cumplir con este objetivo, es necesaria la modificación de componentes para poder anclar cada termocupla en el lugar preciso.

El múltiple de admisión en particular se crea con la intención de cubrir varias necesidades además de inyectar de manera indirecta hidrógeno gaseoso al equipo, en donde es posible observar una perforación para poder utilizar el anemómetro del laboratorio que se utiliza medir la velocidad del flujo de aire entrante y una conexión para un filtro de aire cónico de malla.

Por otro lado, se conecta el equipo al freno dinamométrico que se encuentra a aproximadamente un metro de distancia. Este freno estuvo conectado por muchos años al motor Perkins (equipo que se encuentra en la misma cabina), por lo tanto, es necesario desconectar ambas máquinas y diseñar los acoples para unir el equipo MWM con el freno mediante un cardán. Esta modificación permite obtener de manera análoga el torque del motor, lo cual, gracias a un regulador de carga incluido en el freno, agrega una herramienta de control a la entrega de par en adición a los reguladores de caudal de aire y combustible respectivamente.

Capítulo 3

Metodología y ejecución

3.1 Restauración

El equipo MWM ha permanecido en desuso hace más de tres décadas. El último operario de la Universidad Técnica Federico Santa María que lo vio funcionar jubiló el presente año 2023 y sólo lo había visto funcionar gracias a algunas pruebas esporádicas que hizo su profesor a mediados de los años 80, por lo tanto, hasta este documento, no existía una guía de puesta en marcha del equipo y no se tenía información acerca de las mantenciones ejecutadas y las que se debían hacer en el futuro.

El motor se utilizó como cetanómetro en una instalación estacionaria en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad, pero debido a que el índice de cetano en la actualidad no posee potencial investigativo, el equipo no tuvo propósito. Por esta razón, sin la intervención del profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UTFSM, Dr. German Amador Díaz, el cual vio en el equipo una gran herramienta de investigación para el futuro, el motor hubiese sido desechado por el establecimiento.



Figura 9. Motor MWM KD12E utilizado como cetanómetro en la Universidad Técnica Federico Santa María Campus Casa Central, Valparaíso.

Gracias a una inspección visual del equipo, se distinguen ciertos elementos con problemas a simple vista:

- La instalación no enciende al conectar el motor eléctrico a la corriente trifásica.
- El sistema de combustible posee pérdidas desde los depósitos hacia la bomba.
- El depósito del retorno de combustible se encuentra interrumpido.
- El circuito de refrigerante se encuentra con pérdidas leves y el equipo posee mangueras agrietadas.
- Sellos del bloque motor se encuentran con pérdidas de aceite.

Dados los antecedentes visuales y debido a que el equipo no enciende al conectarlo a la línea eléctrica, se procede al desarme del motor de manera sectorizada. Este método de restauración responde al espacio disponible para trabajar, el cual es bastante acotado, por lo tanto, como el orden es primordial en un overhauling, se escoge un sistema a la vez para restaurar, de este modo el trabajo es menos abrumador en términos del gran número de piezas que manipular, pero ocupa un poco más de tiempo en términos generales.

Sin el manual de taller del equipo, el desarme se debe planear con detención. La instalación tiene un orden de armado, por lo tanto, mediante la inspección visual, se resuelve comenzar por el sistema de refrigeración, para luego seguir con el conjunto eléctrico, la línea de suministro de combustible, el conjunto de admisión de aire y por último el conjunto bloque-culata-escape del motor.

3.1.1 Sistema de refrigeración

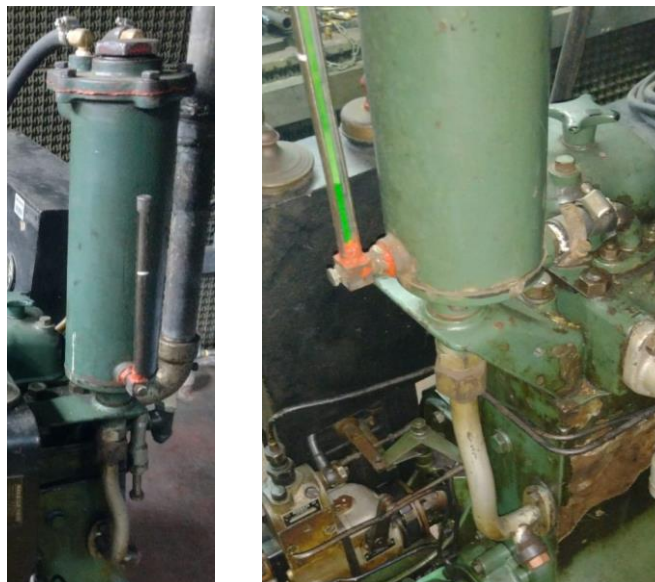


Figura 10. Sistema de refrigeración de motor MWM KD12E.

La refrigeración del motor se produce mediante un sistema de convección natural que es compuesto por un sifón térmico de recirculación, una columna de nivel de refrigerante, una cañería de entrada al bloque (que nace desde la parte inferior del termosifón) y una línea de retorno al sifón desde la parte superior de la culata.

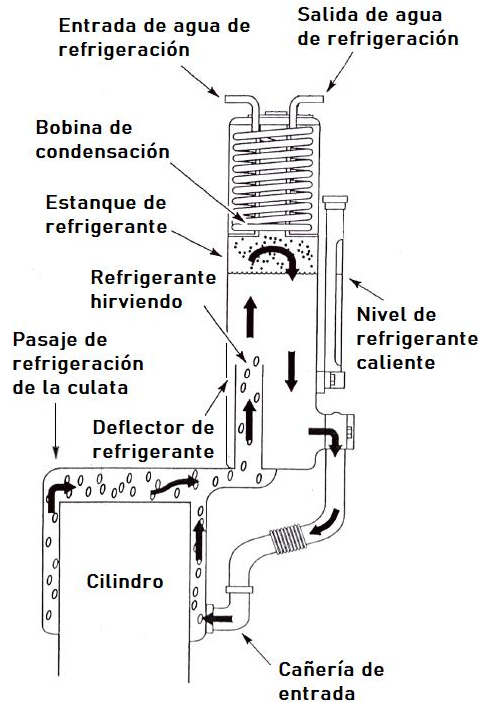


Figura 11. Esquema de funcionamiento del sistema de refrigeración del equipo MWM KD12E.

El sistema de refrigeración no posee bomba de agua para forzar la circulación, por lo tanto, la evacuación de energía calórica es efectuada por convección natural gracias a los cambios de densidad que se generan en la línea. Cuando el equipo se encuentra apagado, el sistema está en reposo, pero cuando se enciende, el calor que genera la combustión y el roce de los elementos adentro del motor es absorbido por el anticongelante y en parte por el aceite lubricante. El refrigerante, al recibir el calor, aumenta su volumen y, por lo tanto, disminuye su densidad, provocando una gradiente de presión en el sistema cerrado. El anticongelante a la salida de la culata tiende a subir hasta que, mediante un deflector al interior del sifón, llega a la parte superior del nivel del estanque, las partículas con más energía suben hacia la bobina, se condensan y caen con menor temperatura. El refrigerante de menor temperatura desciende por su mayor densidad y entra hacia el bloque motor por una cañería en la parte inferior del sifón, reiniciando el ciclo.

Al desarmar el sifón fue posible observar la magnitud del daño de los componentes internos, como por ejemplo, el deflector poseía varias incrustaciones en su estructura pero ninguna perforación o fisura, la parte interior del sifón presentaba una gran cantidad de corrosión pero las paredes internas se mantenían sin daños importantes (Figura 12) y, en la parte superior, se encontraba el componente más dañado del sistema; el intercambiador de calor entre la bobina

de condensación y el refrigerante mostraba perforaciones hechas por la presencia de óxido de hierro, comprometiendo la eficacia de la refrigeración al no enfriar correctamente el anticongelante caliente en el intercambiador y creando la posibilidad de que se desprendan partículas de material que puedan tapar el circuito (Figura 13).

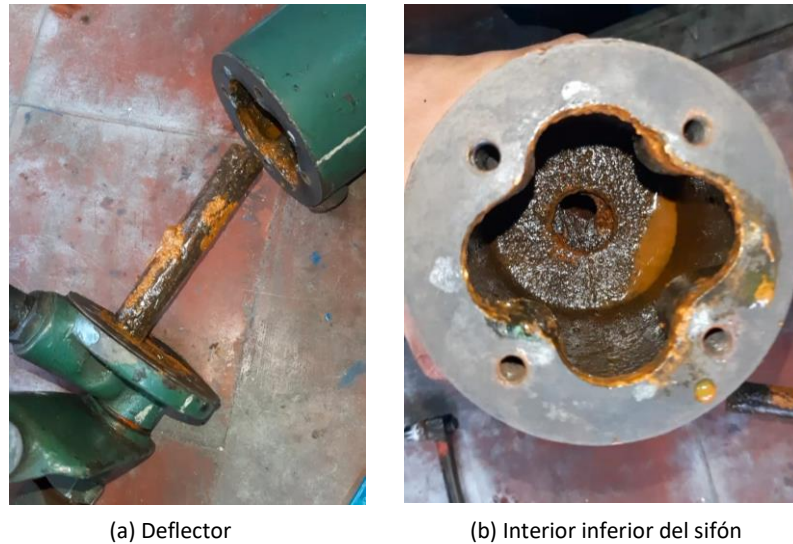


Figura 12. Desarme de la parte inferior del sifón, se visualiza el deflector en (a) y el interior del sifón en (b).



Figura 13. Intercambiador de calor de la parte superior del sifón dañado por corrosión.

Otros elementos menores del circuito de refrigeración como el codo de retorno desde la culata hacia el sifón y la cañería de entrada al bloque motor presentan desgaste menor y pueden ser reacondicionados rápidamente con herramientas rotativas eléctricas para suavizar superficies dañadas por óxido y eliminar partes corroídas sin posibilidad de reparación.



(a) Cañería de salida de refrigerante



(b) Cañería de entrada al bloque

Figura 14. Principales cañerías del sistema de refrigeración del motor.

La corrosión inicial de las piezas se eliminó con ácido fosfórico y ácido desincrustante. De manera posterior, se mecanizaron todas las superficies de los componentes del circuito con el fin de disminuir al mínimo la posibilidad de que pequeños elementos se desprendan y obstruyan la línea de anticongelante. La entrada desgastada (Anexo 1) hacia el sifón desde el retorno de la culata fue reemplazada por una nueva conexión de acero inoxidable para maximizar su vida útil (Figura 15). Finalmente, en este proceso se empleó anticorrosivo primer de alta temperatura para prevenir la corrosión en todos los elementos no inoxidable.



Figura 15. Estanque y componentes inferiores del sifón restaurados.

La parte superior del sifón, en donde entra y sale el agua de la bobina de condensación, se debe someter a un proceso de restauración más riguroso, en el cual se resolvió retirar la parte más dañada del componente y cambiarla por un elemento nuevo al notar, después del baño químico, el importante daño en el cuerpo del cilindro, en adición al extremo corroído (Anexo 2). Al ser un motor obsoleto, las piezas no pueden ser compradas en el comercio, por lo tanto, la obtención de elementos de repuesto solo es posible mediante la manufactura de los mismos

en talleres metalmecánicos. El extremo del intercambiador de calor se encontraba muy dañado y debido al adelgazamiento en su estructura se resolvió cortar el trozo en peor estado para soldar uno nuevo, reparación que, por temas económicos, se debe crear en el taller metalmecánico de la Universidad. El Laboratorio de Tecnología de Taller de la UTFSM, ofreció una barra cilíndrica de acero SAE 4340 para poder fabricar la punta del intercambiador en el Taller Metalmecánico (Figura 16), por lo tanto, las operaciones que se le deben hacer al material consisten en: torneado para obtener las mismas dimensiones generales del tubo, fresado para la realización de las perforaciones y finalmente soldadura TIG realizar la unión.



Figura 16. Intercambiador intervenido y en el centro la barra de acero SAE 4340.

El proceso de torneado se detalla como el refrentado, cilindrado y posterior vaciado a la barra de acero para poder llegar a las medidas del intercambiador de calor original. Al finalizar se realizan las perforaciones equidistantes a lo largo del perímetro del cilindro con el cabezal divisor de la fresadora vertical y posteriormente se solda el elemento mecanizado con tecnología TIG al intercambiador (Figura 17).



(a) Torneado



(b) Fresado



(c) Soldadura

Figura 17. Manufactura de cilindro para restauración del intercambiador de calor.

Con la estructura lista para el armado se avista un nuevo inconveniente que imposibilita el sellado del agua de la bobina condensadora hacia el sifón; las roscas de bronce que sujetan la bobina al intercambiador y permiten la entrada como salida del agua no aprietan debido a que las roscas hembra en la pieza de fundición están rodadas. Con esto en consideración se concluye que la mejor idea es realizar un encamisado para ambas roscas. El encamisado consta de perforar ambas roscas con una broca con un diámetro de 18.5 [mm] (Figura 18), para posteriormente introducir, mediante un macho de roscado, dos pernos M20X1.5. Estos pernos sirven de relleno para poder crear la rosca original M12x1.75 en material sano con mejores características mecánicas que el acero de fundición gris original y, de esta manera, poder fijar sin problema la bobina de condensación al intercambiador de calor sin fugas (Figura 19).



Figura 18. Perforaciones de 18.5 [mm] para crear las roscas M20x1.5 de relleno.

Para finalizar con el sistema de refrigeración del equipo, al armar el conjunto sifón, se le aplican capas de primer de alta temperatura para evitar corrosión y además es útil para que la pintura en el proceso final se adhiera a los materiales.



(a) Intercambiador de calor



(b) Sifón reensamblado

Figura 19. Intercambiador de calor (a) restaurado en su totalidad e instalado en el termosifón (b)

3.1.2 Sistema eléctrico

El sistema eléctrico de la instalación se utiliza única y exclusivamente para controlar el motor eléctrico trifásico que utiliza el MCI para la partida. Si bien el equipo posee sensores, estos responden a señales mecánicas que se interpretan en una luz, el receptor de estas señales es un tablero de luces que no existe a la hora de realizar la restauración y, debido a que no se requieren estos sensores para este proyecto, no se incluye la creación del tablero dentro del overhauling del equipo.

Los elementos que componen el sistema eléctrico son: motor eléctrico Hansa de 4 [KW], caja de contactores trifásico DSL FANAL, caja de convertidor de corriente WZ y conexiones para encendido y apagado del motor en el tablero de instrumentos.



(a) Vista frontal



(b) Vista posterior

Figura 20. Vista frontal (a) y posterior (b) del conjunto eléctrico del cetanómetro antes de la restauración.

La restauración de esta área del equipo se realiza con el objetivo de eliminar posibles fallas en la conexión debido al aislamiento de conectores por suciedad o corrosión, falsos contactos y fallas en el suministro de energía al motor eléctrico. Para comenzar, se marcan todos los cables con sus respectivos terminales, con el fin de armar todo tal y como estaba antes de la restauración, de esta manera, es posible confirmar la integridad de la instalación eléctrica antes de encender el equipo y, al momento de realizar la puesta en marcha, analizar si la mantención anterior al overhauling general se efectuó de manera eficaz. Posterior a las marcas se desarma completamente el conjunto eléctrico, comenzando con el tablero de instrumentos.

El tablero de instrumentos está conformado por dos soportes inferiores y la estructura superior hecha con acero laminar de 2 [mm]. El diseño del tablero cuenta con un compartimiento con tapa, a su derecha un lector de grados del motor (utilizado para las

pruebas de índice de cetano), en el panel frontal se encuentra la botonera de encendido y apagado, además del medidor de vacío de admisión y el reloj de presión de aceite. En el lado posterior, se encuentra la conexión de la botonera, un fusible cerámico, las conexiones de los instrumentos de medición, una salida de corriente en el costado del tablero y un condensador BOSCH. Cada conector del conjunto es desarmado, lavado químicamente con limpiacontactos y pulido con lijas para metal de grano fino o con herramientas de pulido para herramienta multiuso tipo Dremel. Por motivos estéticos se cepillan y suavizan las estructuras metálicas para finalmente aplicar pintura nueva y luego reensamblar.



Figura 21. Tablero de instrumentos, caja de conectores trifásicos y caja de convertidor restaurados.

El motor eléctrico del equipo posee una caja lateral de conexiones eléctricas, las cuales son tratadas de la misma manera que el conjunto eléctrico anteriormente descrito. Por otra parte, debido a no que no existe la información de las mantenciones anteriores, es esencial cambiar los dos rodamientos principales del equipo eléctrico, de este modo se asegura la confiabilidad del grupo eléctrico, se disminuye al mínimo la posibilidad de una parada no programada por una falla debido a un rodamiento atascado por falta de mantención y se reduce la carga por roce generada por la acción de giro de los rodamientos al estar bien lubricados. Los rodamientos originales del equipo no poseían sello, por lo tanto, era necesario limpiar y lubricar cada uno cada cierto tiempo. Al realizar el cambio, se instalaron rodamientos con sello de goma SKF; si bien la idea principal de los rodamientos sellados es que no se tenga acceso al interior de estos, el sello de goma, con mucha precaución, es posible de retirar sin destruirlo, por lo tanto, cuando sea necesario realizar una nueva mantención al grupo eléctrico existirá la posibilidad de reacondicionar los rodamientos existentes.

Al finalizar con el mantenimiento, se limpia y aplica tela abrasiva, eliminando la pintura antigua y corrosión en el exterior para posteriormente cubrir con pintura para alta temperatura.



(a) Previo a la restauración

(b) Mantenimiento

(c) Restaurado

Figura 22. Proceso de restauración de motor eléctrico Hansa.

3.1.3 Sistema de inyección de combustible

El equipo originalmente cuenta con dos estanques de combustible dispuestos en la parte frontal del equipo, con el fin de poder escoger mediante una válvula selectora manual el estanque con la muestra de combustible a estudiar. En términos de estudio del número de cetano, se utilizaba una muestra patrón en uno de los estanques en donde, mediante sensores de pulsos, se podía obtener el punto exacto en el cual la bomba de inyección elevaba el combustible, el punto de la inyección del combustible en la precámara y el punto de combustión de la mezcla. El funcionamiento de los sensores radica en la obtención de pulsos, que son interpretados por luces led, mediante el contacto de 2 placas metálicas al ocurrir una acción.

En el caso de la bomba inyectora, uno de los extremos del árbol de levas llega directamente a un acople elástico, se conecta al eje de la bomba y esta distribuye el combustible según la sincronización previa de las válvulas y el pistón. El extremo opuesto del eje de la bomba, con respecto al acople elástico, posee una leva que acciona una especie de platino, el cual marca el inicio de la elevación de combustible en cada ciclo.



Figura 23. Sensor de inicio de la elevación de combustible tipo platino de la bomba inyectora.

El inyector de combustible posee una válvula en su interior que se abre al ingresar combustible y se cierra al terminar. Esta válvula cuenta con regulación mediante un sistema de contratuerca en la parte superior del inyector, la cual sirve para controlar la cantidad de combustible máximo que llega a la precámara de combustión. Mientras más adentro la rosca apretada por la contratuerca, menos recorrido tiene el vástago y más cerrado estará el paso de combustible, generando una mezcla más pobre. El extremo superior de la válvula del inyector sobresale de éste, por lo tanto, cuando el equipo está funcionando, es posible observar como la válvula del inyector sube y baja según cada inyección de combustible en el cilindro.



Figura 24. Regulador del inyector de combustible diesel.

El movimiento rectilíneo que efectúa el elemento es aprovechado por un sensor que, al subir la válvula, permite que dos placas hagan contacto y se envíe una señal en forma de pulso (debido a que inmediatamente el vástago baja al terminar la inyección y finaliza el contacto).



Figura 25. Sensor de inyección de combustible en la parte superior del inyector.

El sensor que se ubica más abajo que el inyector en la precámara de la culata es utilizado para marcar el inicio de la combustión del equipo. En su interior posee un resorte dentro de un conjunto de rosca macho-hembra, por lo tanto, es posible regular a qué intensidad de combustión se desea que el sensor envíe el pulso. Mientras más apretada la rosca, más carga genera el resorte contra sus extremos y, debido a esto, el motor necesita aumentar la presión que se genera en la cámara para lograr que dos placas en el extremo exterior del sensor hagan contacto, logrando mandar un pulso; y viceversa.

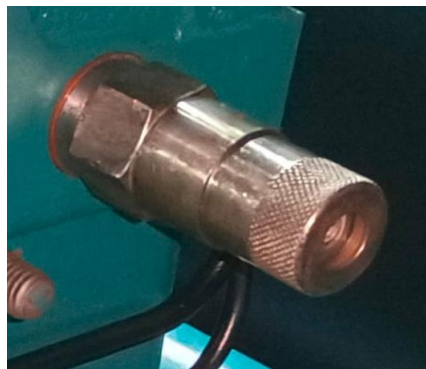


Figura 26. Sensor de inicio de la combustión.

Para efectos prácticos en este proyecto, los sensores antes mencionados resultan útiles para obtener el índice de cetano del diesel, pero no son importantes para la puesta en marcha en manera dual con hidrógeno, por lo tanto, cada sensor se restaura, pero no se conectan a un panel indicador con luces. Si en algún momento en el futuro se llegara a necesitar saber con certeza cualquiera de los puntos antes mencionados se recomienda la compra e implementación de sensores digitales que interpreten resultados en un computador o la adquisición de una interfaz que interprete los pulsos en función del ángulo del cigüeñal del

motor. De esta manera la adquisición y posterior manipulación de datos recibidos por los sensores es más sencilla y precisa.

Otros componentes del sistema de combustible son las cañerías de alimentación y el recipiente de retorno de combustible. Ambos elementos nombrados presentaban daños y significaban un posible problema de ausencia de vacío en la línea de combustible. A una de las cañerías principales, de las tres que se utilizan en el equipo, se le eliminó la vía de retorno de combustible, dejando expuesto uno de los extremos (Figura 27). Observando el daño causado es posible concluir que desconectaron la cañería del recipiente de retorno y, mediante flexiones de un lado a otro, desgarraron la vía.

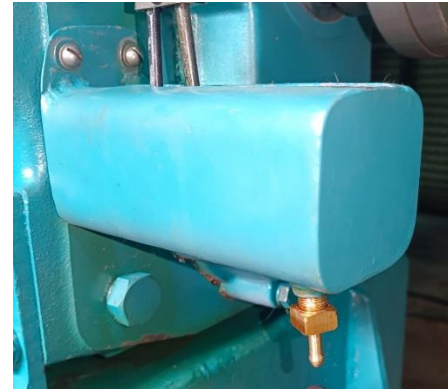


Figura 27. Cañería de retorno desgarrada en una de sus vías.

Por otra parte, el recipiente de retorno de combustible presentaba mucha suciedad y óxido en su superficie interior, además de no existir la rosca macho que conectaba la línea de retorno desgarrada al receptáculo desde la parte inferior de este. Para volver a colocar en operación ambos componentes, se limpió cada cañería tanto por interior como por el exterior y, a la vía intervenida, se reparó el extremo que quedó libre para colocar una manguera para combustible con abrazadera en ambas puntas, conectando así con el recipiente. Esta unión fue posible al fabricar una copla con una rosca macho M10x1 para fijar en el recipiente que, en su otro extremo, posee un terminal para manguera. El recipiente de retorno se limpia química y mecánicamente, aplicando en su exterior pintura primer anticorrosivo para evitar oxidación.



(a) Retorno previo a pintura



(b) Recipiente restaurado

Figura 28. Recipiente de retorno de combustible tratado con químicos y mecanizado (a). En (b) se observa la copla para manguera con rosca M10x1 de bronce.

La bomba de combustible del equipo corresponde a una bomba prototipo que se utiliza para investigación. Para obtener información acerca de ella, se decide llevar el artefacto a un centro especializado en diesel: *Eberlein*. Esta empresa se dedica a inyección diesel y son especialistas en BOSCH y, con esto en mente, surge la necesidad de calibrar la bomba para obtener la máxima confiabilidad posible en el componente, disminuyendo la posibilidad de fallas en la operación del equipo por problemas en la inyección de combustible.

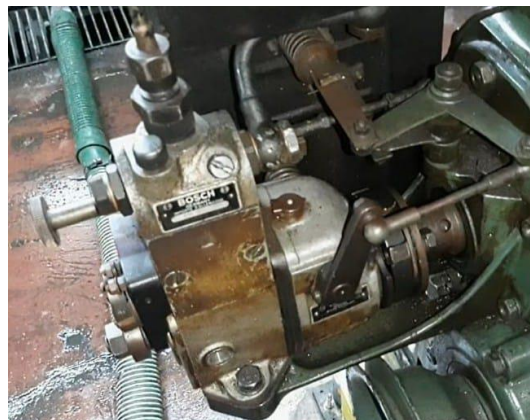


Figura 29. Bomba de combustible antes de la restauración.

Antes de llevar la bomba de combustible al establecimiento, se procede a restaurar la mayor cantidad de elementos en esta, con el fin de evitar posibles problemas sólo por la suciedad acumulada durante los años en desuso como los anteriores trabajando. La bomba no se puede desarmar por completo debido a unos pernos con cabeza especial que se requieren quitar para poder tener acceso al interior, por lo tanto, se restaura el exterior, los elementos removibles y se cambia la empaquetadura de la tapa lateral. En *Eberlein*, el gerente de servicio diesel, Don Mauricio Becerra E., al buscar información técnica de la misma, en sus servidores no hay más datos que el modelo: PHV 12/1Z. Al tratar de averiguar más sobre la bomba, se obtiene que es

una bomba prototipo, por lo tanto, de haber algún tipo de información, BOSCH Brasil y/o BOSCH Alemania deberían de brindarla. Mauricio, al notar esto, envía una solicitud a las divisiones antes mencionadas de BOSCH en busca de información y explica que tomará contacto en cuanto la obtenga. De todas maneras, el gerente comenta que la posibilidad de que una bomba de esas características falle es muy remota, por lo tanto, recomienda instalarla sin calibrar debido a la falta de información. A día de hoy todavía no se han recibido datos desde BOSCH acerca de la bomba en cuestión.

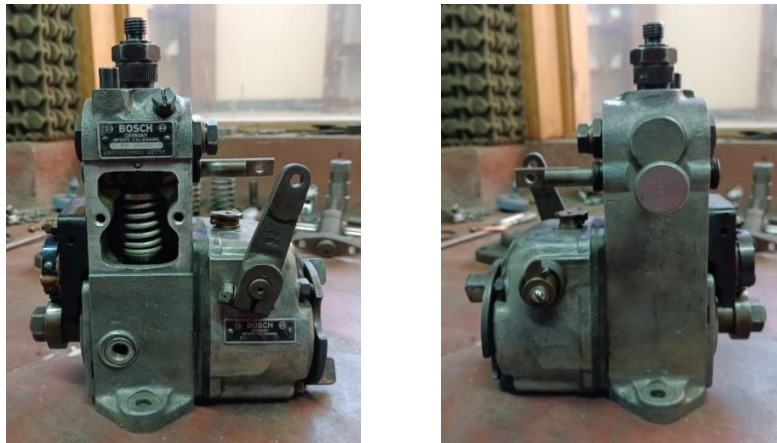


Figura 30. Vistas laterales de la bomba de inyección restaurada, en la imagen izquierda se puede apreciar el mecanismo de paso del combustible.

El último conjunto del sistema de combustible a tratar es el receptáculo con los dos estanques para pruebas y la válvula selectora. El conjunto está conectado por una cañería directa hacia la parte frontal de la bomba de inyección con sellos de pernos tipo cañería con arandelas de cobre.

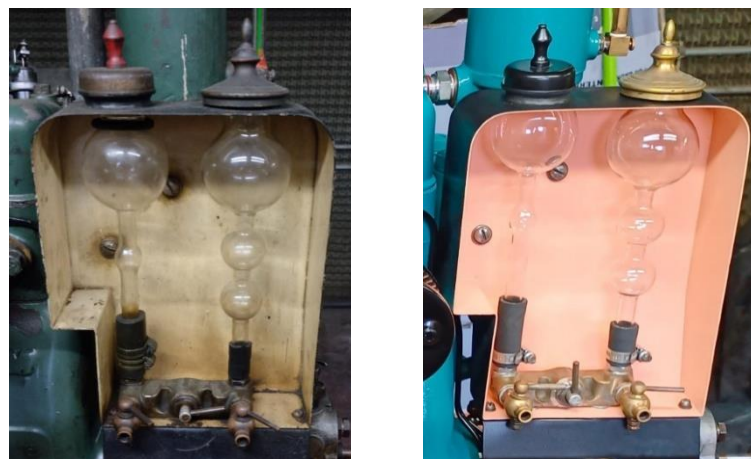


Figura 31. Receptáculo para muestras de diesel antes y después de la restauración.

Como a todos los componentes de este equipo, los conjuntos del sistema de combustible han sido limpiados química y mecánicamente con herramientas manuales y eléctricas, con el fin de que no existan interferencias en el paso de fluidos hacia las distintas áreas del motor. Partículas de suciedad dentro del inyector de combustible pueden obstaculizar el paso de diesel en la boquilla, causando inestabilidad por combustión deficiente. Al receptáculo de muestras diesel adicionalmente se le coloca pintura para lograr una fina terminación, acorde al equipo con el que se trabaja.

3.1.4 Sistema de admisión de aire



(a) Previo a la restauración



(b) Preparado para pintura



(c) Restaurado e instalado

Figura 32. Proceso de restauración del múltiple de admisión del motor MWM.

La entrada de aire del motor monocilíndrico es efectuada mediante un múltiple de admisión, el cual cuenta con filtro de aire de malla, una conexión hacia un vacuómetro análogo y un regulador manual de paso de aire hacia la culata. La principal tarea a este conjunto fue cambiar las mangueras antiguas hacia el vacuómetro, limpiar el conjunto múltiple de admisión, lubricar el regulador de aire y pintar.

El reloj para medir el vacío que genera la admisión del equipo se encuentra en el tablero de instrumentos de la instalación, junto al medidor de presión del aceite. Este instrumento recibe una mantención normal, en donde se limpia por completo y se revisa su línea de vacío.



(a) Vacuómetro análogo



(b) Conexión a la línea de admisión

Figura 33. Vacuómetro (a) del motor MWM utilizado para la medición de cetano. En (b) se puede apreciar la línea de vacío conectada a la parte posterior del instrumento. Unidades: mm.c.d.a.

3.1.5 Culata

El motor MWM KD12E cuenta con culatín independiente con precámara de combustión, lugar donde va instalado el inyector de combustible y en algunas aplicaciones, la bujía de encendido. En este equipo medidor de cetano en particular, la bujía de incandescencia es reemplazada por el sensor de combustión análogo antes descrito en el apartado de la inyección de combustible. En la parte superior de la culata se encuentra la tapa de válvulas y, al retirarla, se tiene acceso al conjunto de las válvulas, en donde es posible observar la válvula de admisión y la de escape, sus respectivos balancines, resortes y guías, además de las varillas empujadoras con sus taqués.



Figura 34. Conjunto de válvulas del motor MWM KD12E.

Al inspeccionar la culata desmontada fue posible notar algunos problemas que requieren de atención para garantizar la confiabilidad del equipo a largo plazo. El principal escenario de cuestionamiento es el desgaste en las guías de válvulas y, el otro problema es el adelgazamiento en los bordes de cada una de las válvulas. Éste último caso puede ocasionar

que las válvulas se quemen y, por lo tanto, puedan presentarse deformaciones o picaduras en los bordes, lo que resultaría en una pérdida del sello que generan al cerrarse.



Figura 35. Culata de motor MWM KD12E.

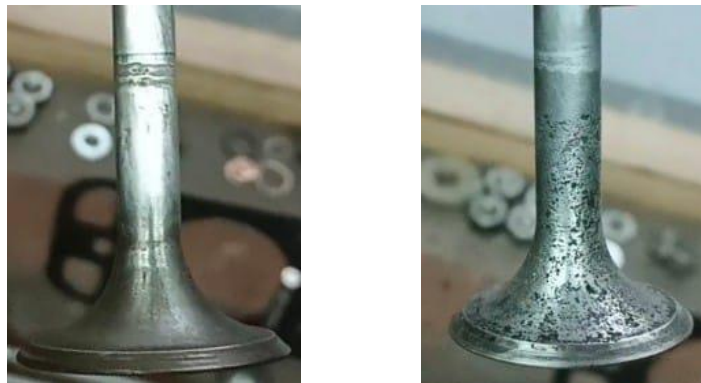


Figura 36. Válvula de admisión y válvula de escape respectivamente.

Para verificar planitud de la culata y viabilidad de sus componentes, se envía la misma a *Motores Piddo* en la comuna de Valparaíso, lugar donde realizan distintos servicios para equipos de fuerza: overhauling, rectificación, pruebas hidráulicas, entre otros. Al finalizar el diagnóstico de la culata el equipo, se emite un informe en donde se explican los siguientes puntos que se deben ejecutar para garantizar el óptimo funcionamiento de esta:

- Cepillado de culata.
- Cambio de guías de válvulas.
- Rectificación de asientos y válvulas.

Las guías se encontraban dañadas y era necesario reemplazarlas. Al no encontrar los repuestos originales, tomaron la decisión de utilizar un par provenientes de un motor *Pegaso* que eran de la misma medida. Al rectificar las válvulas y los asientos, desde *Piddo* hacen la observación que el asiento de la válvula de escape tiene una erosión, logrando asentar en una superficie aproximada al 20% de la original (Figura 37). Si bien es posible que no existan

problemas al hermetizar, si existe menor disipación de calor, provocando un sobrecalentamiento en parte de la válvula, aumentando la probabilidad de quemar la misma. Para tener el ancho correcto de asentamiento es necesario insertar un asiento en la culata, pero como los asientos son parte íntegra del elemento, se debe encasquillar, colocando un asiento postizo en la válvula de escape.

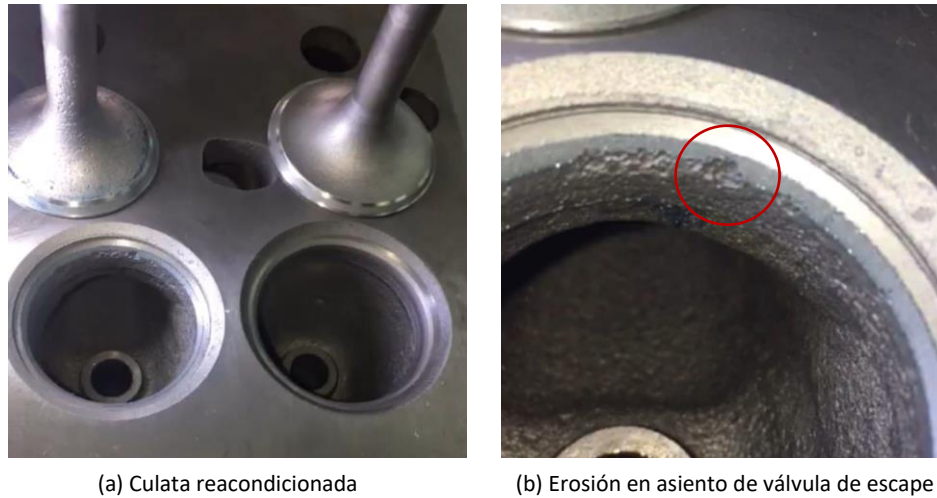


Figura 37. En (a) se aprecian las válvulas y los asientos rectificadas con la culata cepillada. En la imagen derecha se encierra en un círculo rojo la erosión del asiento de escape.

Cuando terminan los trabajos en la culata, se comprueba su hermeticidad y se inicia el proceso de armado en el bloque del motor. Se instalan los resortes de válvulas, seguros, balancines y varillas del conjunto. Finalmente se agrega la precarga recomendada por los documentos de motores monocilíndricos entregados al inicio del proyecto, en los cuales se menciona 130 [lb·ft] de torque para los pernos de culata.

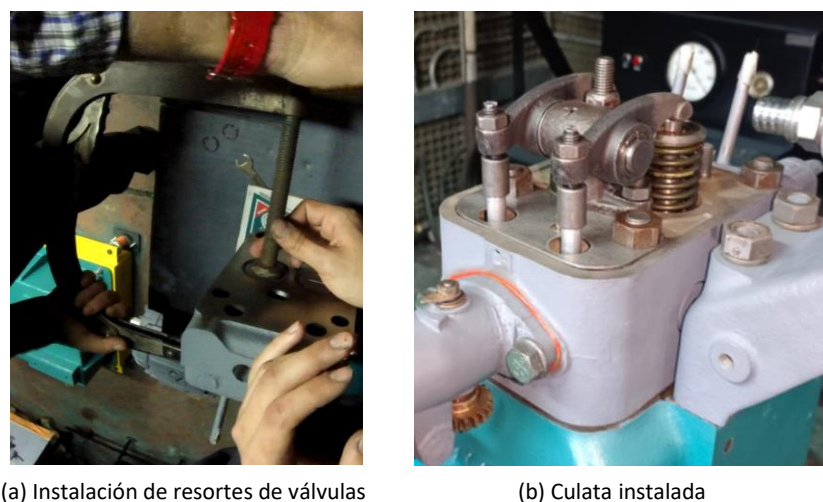


Figura 38. Instalación de culata restaurada.

3.1.6 Bloque motor

El bloque del motor MWM KD12E, además de contener las relaciones de transmisión que nacen en el cigüeñal y rigen el movimiento de las válvulas; bomba de aceite, inyección de combustible y el conjunto pistón-biela, cuenta con una serie de accesos a su interior, entre los cuales es posible señalar; la tapa frontal al sistema de engranes, la cubierta trasera para inspección del cigüeñal y la biela, la cubierta con sello para la salida del eje de la bomba de inyección al exterior, la tapa de unión en el lado del volante de inercia (Anexo 3) y la cubierta para la distribución de la bomba de aceite integrada al bloque.

Las relaciones de transmisión del equipo son inspeccionadas visualmente para verificar su integridad estructural. Se revisa el desgaste de los dientes y el de los cojinetes de cada eje, en búsqueda de algún daño o movimiento anormal en algún componente.

La tapa frontal (Figura 39) del bloque posee un tapón plástico (al centro y a la derecha en amarillo), lugar por donde se introduce el aceite al realizar mantenimiento. La cubierta también cuenta con una perforación para introducir la varilla del nivel de aceite (parte inferior derecha en amarillo, abajo del tapón plástico), una rosca para el regulador de presión de aceite (al centro inferior en color rojo) y un espacio en el centro inferior para el filtro de lanas integrado en la estructura (bajo el elemento rojo).



Figura 39. Conjunto tapa frontal del motor MWM KD12E en su proceso de restauración.

La restauración del conjunto frontal del bloque motor no escapa a los procedimientos ejecutados para los demás sistemas; se quita la pintura antigua, se aplica antioxidante a los elementos que presentan corrosión y, al enjuagar, se pasa cada elemento por un baño de diluyente para eliminar las grasas y aceites restantes antes de pintar, se fabrican las juntas para cada unión y posteriormente se lubrican las partes móviles para la instalación. El componente con más suciedad de este conjunto es el filtro de aceite, este elemento cuenta con un tapón

para retirar la suciedad recolectada al girar la llave crique del filtro. Al rotar el elemento interior hecho con muchas pletinas una al lado de otra, el aceite por acción centrífuga, sale hacia el exterior, dejando la suciedad atrapada en las lanas que, al decantar, se acumulan en el tapón inferior del filtro.



Figura 40. Filtro de aceite incorporado al bloque del motor en su vista lateral y posterior respectivamente.

El chasis completo del motor (Anexo 4) y las otras tapas del bloque, trasera de observación y laterales para las bombas de inyección y aceite, son tratadas con el mismo procedimiento de restauración anterior. Limpieza, verificación de integridad y funcionamiento, creación de empaquetaduras (Anexo 5), pintado y armado.



(a) Tapa de polea principal



(b) Tapa trasera inferior del bloque motor



(c) Soporte de la bomba inyectora

Figura 41. Tapas laterales del motor MWM KD12E. En (a) se observa la cubierta de distribución de la bomba de aceite y el damper para correa en V. En (b) se muestra la visión interna desde la cubierta trasera y, en (c), presenta la base de la bomba inyectora, la cual posee un rodamiento de polines y un sello en el eje de transmisión.

En adición a los procedimientos típicos antes descritos para la restauración, la eliminación de posibles fugas de fluidos en los sellos es vital para elevar la confiabilidad del equipo. Si la máquina se reensambla y tiene pérdidas en los sellos con el bloque motor, retirar el equipamiento y arreglar la fuga significa una gran inversión de tiempo, el cual es vital para poder realizar pruebas para este y otros proyectos del Departamento de Ingeniería Mecánica. En este caso, la tapa que actúa como soporte de la bomba de inyección tiene en su interior un sello y un rodamiento, los cuales fueron reemplazados por elementos nuevos de la misma medida marca SKF.



(a) Tapa de bomba inyectora restaurada



(b) Tapa de polea principal

Figura 42. En (a) se presenta la tapa soporte de la bomba de inyección restaurada con primer y con el correspondiente rodamiento de polines instalado. En (b), la tapa de distribución de la bomba de aceite instalada previo a la pintura final.

Por otra parte, los engranes de la distribución para el funcionamiento de la bomba de aceite y el eje del volante de inercia, poseen rodamientos que también fueron cambiados por precaución como mantenimiento preventivo.



Figura 43. Cubiertas laterales instaladas, a la izquierda la tapa soporte con la bomba de inyección y a la derecha la tapa de distribución de la bomba de aceite con su respectivo dámper.

Al retirar la culata del motor, el conjunto pistón-biela-camisa queda a la vista, por lo tanto, es posible verificar si el grupo de componentes presenta daños o desgaste. La primera observación revela una pequeña anomalía en la cabeza del pistón (Figura 44), en donde se puede ver a simple vista una pequeña “abolladura” en el borde de la superficie superior del mismo.



(a) Vista del cilindro y el pistón en el bloque motor



(b) Defecto de la camisa y el pistón

Figura 44. Vista superior de la camisa con el pistón en el PMI (a). En el círculo rojo se encierra el defecto encontrado en la cabeza del pistón (b).

Al notar la situación, se conforma un grupo de ingenieros entre docentes y estudiantes, entre los que se encuentra el apoyo académico del Laboratorio de Termodinámica Ing. Daniel Galleguillos, el ex apoyo académico Ing. José Duque y el profesor Dr. German Amador. El objetivo es discutir el estado actual del conjunto pistón-biela-camisa y resolver qué mantención

se debería ejecutar según los antecedentes. Debido a la dificultad de transportar el bloque motor, la única alternativa para rectificar la camisa del pistón es con una máquina rectificadora móvil, de las cuales no existen disponibles en Valparaíso, por lo tanto, si bien se realizan mantenciones preventivas al equipo, el gasto económico y de tiempo que requiere el desarme y tratamiento del conjunto no responde al daño presentado por el mismo. Por otro lado, los anillos y elementos del conjunto no son comerciales en la actualidad, dificultando la búsqueda y elevando el precio de estos al importar desde el extranjero. La camisa del pistón posee una pequeña superficie en la parte superior la cual el émbolo no alcanza en el PMS, por lo tanto, es un buen lugar para verificar el desgaste producido por los ciclos de trabajo. En la verificación hecha se confirma que la diferencia en el diámetro entre la superficie que mantiene contacto con los anillos del pistón y la que no los toca mantiene una variación imperceptible, debido a esto, si bien un overhauling completo de un equipo incluye siempre la sustitución de componentes que presenten algún tipo de daño, fue posible concluir que el costo beneficio de cambiar los componentes del conjunto pistón-biela-camisa no se corresponden con las necesidades del proyecto actual.

3.1.7 Línea de escape de gases



Figura 45. Múltiple de escape original del motor MWM KD12E antes y después de la restauración.

La salida de gases de escape del motor es conformada por el múltiple de escape y la línea de 2" hacia el colector de gases de la Universidad. Para desmontar estos componentes del motor se necesita previamente soltar la culata o sacar todos los pernos de la conexión desde la línea hacia el colector, en este último caso se necesita de al menos dos personas para concretar el proceso, una sujetando la vía y a la vez empujando la misma hacia la dirección contraria al apriete de los espárragos del múltiple y, la segunda persona, debe desenroscar las tuercas que unen el codo con la culata. El procedimiento descrito responde a un error en el diseño del múltiple de escape, al intentar retirar la tuerca inferior que está frente al condensador, estos dos elementos se interfieren y no permite que la tuerca gire libremente,

además de que la línea es fija y no admite grados de libertad, volviendo el proceso más complejo al momento de intervenir la vía de escape de los gases de combustión del equipo.

Para restaurar este conjunto al desmontar todos los componentes se agrega una mezcla de soda caustica con agua en su interior para soltar el carboncillo de los elementos expuestos a los gases de escape y en el exterior se utiliza tela abrasiva para eliminar óxido, agregando posteriormente antióxido primer de alta temperatura. Para las juntas en los extremos se utiliza una empaquetadura grafitada con malla metálica en su interior que soporta altas temperaturas en reemplazo de los sellos originales de asbesto.

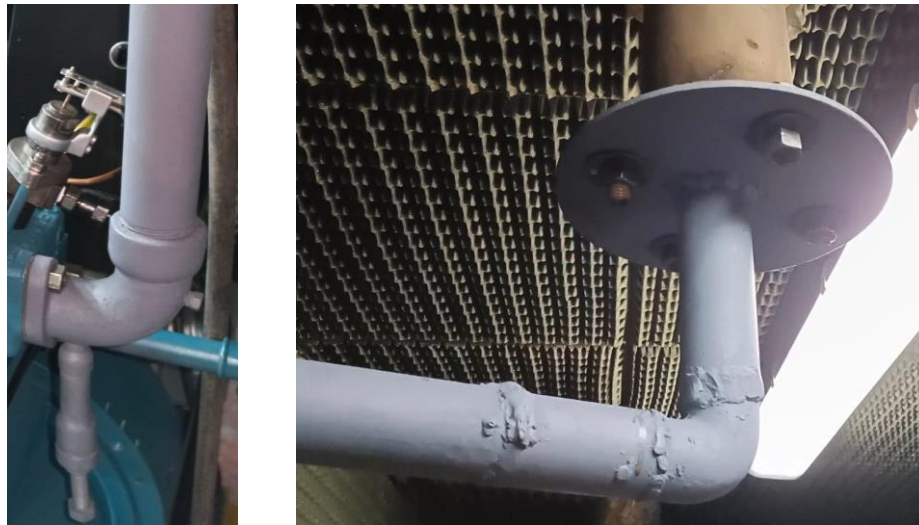


Figura 46. Línea de escape restaurada y las conexiones a sus extremos. En la imagen izquierda se observa la unión entre el codo de escape y la culata. A la derecha la unión entre la línea de escape y el colector de gases.

3.2 Puesta en marcha

Al finalizar con la restauración de cada uno de los componentes del equipo, el siguiente paso es comprobar que el motor de combustión se encuentre listo para entrar en operación, por lo tanto, el sistema de refrigeración se llena con aproximadamente 3 [L] de anticongelante con 50% de glicol marca ABRO y el sistema de lubricación con 3,2[L] de aceite SAE 30 LIQUIMOLY CLASSIC MOTORENÖL.

Todos los sistemas han sido revisados y ensamblados de la misma manera en que se encontraron originalmente, debido a esto, la mecánica del equipo no debiese mostrar un problema al operar, sin embargo, el sistema eléctrico, si bien también pasó por una exhaustiva revisión, el dominio básico de la electricidad no permite garantizar al 100% su viabilidad y, por lo tanto, la seguridad al operar. Con esto en consideración, para revisar el sistema eléctrico justo antes de la partida se requiere de un profesional capacitado para asegurar que todos los elementos del sistema eléctrico están bien conectados y en buen estado. Para este procedimiento, se consulta a Msc.

Felipe Riveros con especialidad en electricidad, para prestar servicio en las verificaciones del equipo, en donde, en primera instancia no se encuentra ningún detalle que pueda ocasionar un problema, por lo tanto, se conecta la instalación a la red trifásica de la Universidad y se procede con el encendido del motor eléctrico mediante la botonera en el tablero de instrumentos. Se activa el agua de circulación del serpentín de condensación del sistema de refrigeración y se lleva el volante de inercia al punto justo al comienzo de la carrera de expansión, se da partida con la botonera y el motor eléctrico no ejecuta movimiento alguno ni se escucha algún sonido desde la instalación. Al notar esto, se comienza a buscar el problema con un multi-tester con el fin de encontrar el punto en el que la corriente no llegaba al motor eléctrico.

Finalizando las comprobaciones se pudo detectar el mal funcionamiento del fusible del tablero de instrumentos, por lo tanto, se adquirió un automático de 6 [A] marca Schneider y se instaló en lugar del fusible. Con el problema solucionado, se vuelve a dar arranque al equipo, encendiendo inmediatamente y estabilizándose a rpm constantes. Con el primer arranque y posterior apagado, se logra comprobar que el sistema eléctrico está en buen estado y que el mecanismo del motor de combustión interna no presenta problemas para girar impulsado por corriente trifásica. En este primer ensayo de operación no se observan detalles en el funcionamiento de la máquina.

Con la comprobación del sistema eléctrico se debe realizar la verificación de la operación del MCI monocilíndrico, el cual no enciende a la par con el motor eléctrico. Cuando la instalación arranca y se alimenta con diesel, el calor que irradia la línea de escape no muestra signos de combustión, solo el calor correspondiente al roce entre los elementos internos. Al mantener el equipo encendido por aproximadamente 13 minutos y abrir el paso máximo de combustible al interior del motor, el sonido cambia y se escucha un golpeteo seco cíclico, en este estado, si se retira el tapón de condensación del escape se puede observar humo gris saliendo según los ciclos de golpeteo del equipo. Continuando con la operación con el paso de combustible normal desde a lo menos 16 minutos desde el encendido, el equipo comienza a dar golpeteos inestables que sacuden la instalación y, abriendo al máximo el paso de combustible, los golpes presentan una frecuencia mayor. Si se deja al MCI con su paso normal de combustible en este estado, la frecuencia de golpeteo comenzará a igualarse con las rpm del motor, hasta que el sonido seco se alinee completamente y, en ese preciso instante, el motor de combustión interna se encuentra encendido.

3.3 Detalles del equipo



Figura 47. Motor MWM KD12E listo para operar después del overhauling.

Al dejar el motor de combustión interna encendido es posible apreciar la cantidad de energía que se libera en la cámara, pudiendo apreciar inmediatamente en la salida de escape el calor que irradian sus componentes. Cerca de su temperatura estable de operación, es posible observar la presión a la que los componentes conectados a la cámara o la precámara de combustión se ven sometidos. En primer lugar, se detecta tempranamente una fuga de gases de escape en la unión del inyector con la culata y otras en ambos extremos de la línea de evacuación de gases de combustión; en la unión con el colector de gases y en el tubo de 2" con el codo de escape.

Por otro lado, al permitir que el equipo quede con diesel en los estanques de prueba toda la noche, al otro día se visualiza petróleo en el piso, evidenciando una fuga de combustible en el MCI. Las uniones entre cañerías y los otros componentes como la bomba, inyector o válvulas, se realizan por pernos-cañería con sellos de golillas de cobre, por lo tanto, con el objetivo de eliminar fugas, se retiran las golillas y, con la ayuda de un soplete, se calientan hasta volverlas más blandas, de esta manera el sello será más efectivo. Al reensamblar y volver a dejar con diesel en la noche, la pérdida persiste, debido a esto, se evalúan todos los elementos que tienen paso de combustible hasta que se encuentra la falla en la válvula selectora de combustible en el habitáculo de los estanques de prueba. Aunque se reemplace la empaquetadura que realiza el sello en la válvula selectora, no para de salir petróleo por la rosca de esta, por lo tanto, no se puede utilizar.

Para solucionar estos detalles se requiere de reparaciones y/o modificaciones que permitan el correcto funcionamiento de la instalación tanto en el sistema de gases de escape como con el de combustible, por lo tanto, para el primer punto, se deben reparar las uniones para eliminar las fugas y se debe apretar el porta inyector para asentar más en la arandela de cobre contra la culata. Al terminar el ajuste del porta inyector, se concluye que las fugas de gases de escape seguirán ocurriendo mientras la línea de evacuación de gases sea rígida. El motor al ser monocilíndrico, cuando se enciende, no contrarresta la inercia de un pistón con otro homólogo en el ciclo alterno,

por lo tanto, realiza movimientos oscilantes que dañan y desajustan las uniones de la vía de escape con el paso de los ciclos y la vibración que se genera. Con esto en consideración se decide no intervenir las uniones del escape hasta que se instale un flexible que absorba las fuerzas que genera el equipo.

Con respecto al sistema de combustible y, con el fin de seguir haciendo pruebas de encendido y estabilidad operacional, se decide eliminar la válvula selectora de combustible con sus estanques de prueba para añadir la alimentación de combustible a la línea de suministro del motor Perkins contiguo en la cabina mediante un conector para cañería con toma para manguera de 3/8" (Anexo 6), una Tee de 3/8" y manguera para combustible (Figura 49). Esta línea está pensada para poder medir la masa de combustible que se consume en cierto intervalo de tiempo, por lo tanto, es una variable más que se puede controlar al operar en el futuro en modalidad dual fuel. La válvula selectora original y su habitáculo no se retiran del equipo para conservar la originalidad, pero existen solo con un objetivo estético.

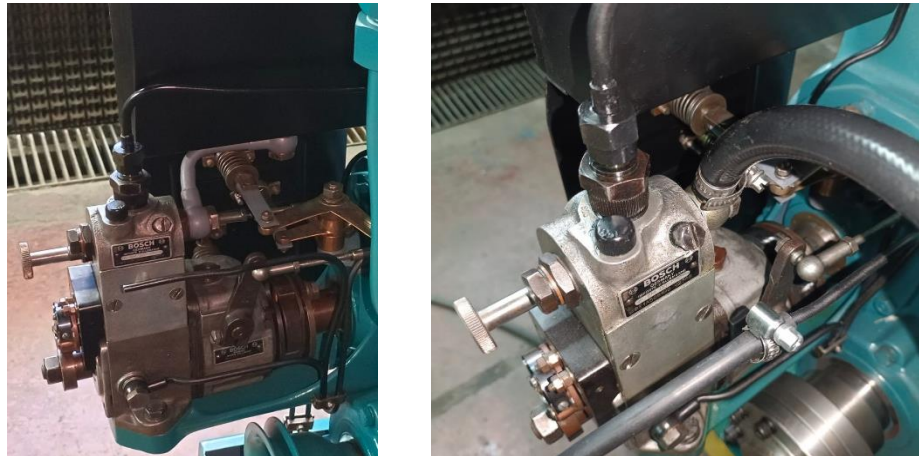


Figura 48. Diferencias entre la conexión con cañería con el suministro de combustible hacia la bomba de inyección.

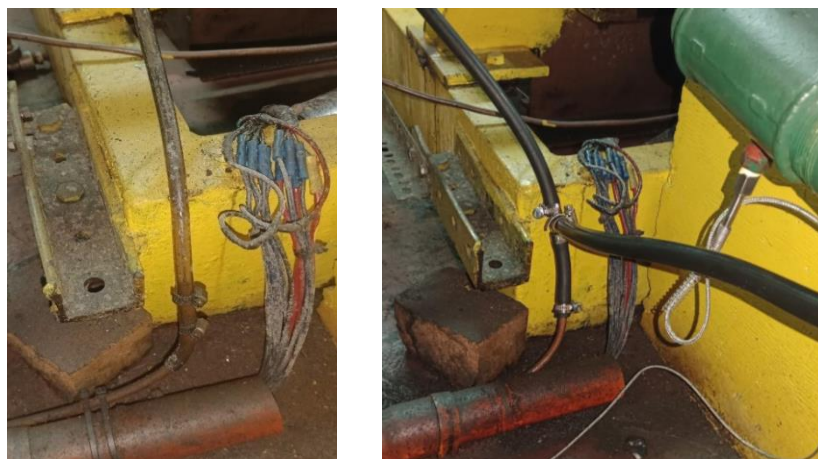


Figura 49. Antes y después de la conexión a la línea de suministro del motor Perkins contiguo.

Cabe señalar que para añadir el suministro de petróleo del motor MWM a la línea del motor Perkins se debió reemplazar la manguera de combustible de este último, debido a que se encontraba estrangulada en algunos puntos y muy rígida con los años de exposición al calor del equipo, por lo tanto, manipularla para colocar la Tee resultaba inviable y una pérdida de tiempo (Anexo 7).

En este punto, el equipo se encuentra restaurado, sin fugas y operativo para combustionar con petróleo. Para dar arranque al motor de combustión, se da partida al motor eléctrico y entre aproximadamente 15 a 20 [min] el equipo monocilíndrico entra en combustión. En ese instante, el motor de arranque pasa a ser una carga para el motor de combustión, permitiendo que la instalación gire a rpm constantes. Al presionar apagado en la botonera del tablero de instrumentos mientras el MCI está encendido, la energía que mantiene al motor eléctrico girando a revoluciones constantes se interrumpe, dejando libre al motor de combustión interna, que automáticamente comienza a subir la velocidad de operación. Se pueden regular las rpm del equipo con el regulador de paso de combustible bajo el habitáculo de los estanques de prueba y con la válvula de paso de aire en el múltiple de admisión.

Capítulo 4

Consideraciones, diseño, manufactura e instalación de componentes para la combustión dual con hidrógeno gaseoso

4.1 Introducción

El próximo paso en el proyecto es la modificación de la instalación actual para poder admitir la inyección indirecta de hidrógeno para ser combustionado en sustitución del petróleo. Para llevar este objetivo a cabo se deben identificar todas las variables que deben controlarse para tener una instalación de investigación capaz de mostrar información útil y sin contratiempos, por lo tanto, la instalación de sensores de temperatura en puntos estratégicos del equipo permite controlar las temperaturas de operación del equipo y, por lo tanto, salvaguardar la integridad del motor al no exceder sus rangos originales de operación. Los lugares clave para la colocación de las termocupas son los siguientes:

- Temperatura de aceite del cárter
- Temperatura de entrada y salida de refrigerante al bloque motor
- Temperatura de aire de admisión
- Temperatura de gases de escape

En el apartado de instrumentalización se explicará a mayor detalle la ubicación de las termocupas de aceite y refrigerante, debido a que, las modificaciones que se deben ejecutar en el equipo para admitir estos sensores no requieren de una gran intervención en el mismo, a diferencia de la medición de las temperaturas de aire de admisión y gases de combustión. Para el primer apartado, no existe lugar físico en la admisión de aire para colocar una termocupa, con esto en consideración y en adición a los requerimientos que desean los docentes para realizar diferentes análisis en el equipo, tales como: registro de caudal de aire entrante, presión de vacío y una estructura que resista temperaturas de aproximadamente 500 [°C] sin problema para futuros proyectos; se resuelve crear un múltiple de admisión, el cual cuente con filtro de aire, conexión rápida para un calentador de aire, espacio para utilizar un anemómetro, termocupa y un inyector de combustible. Por otro lado, la adquisición de la temperatura de escape podría haberse ejecutado con la línea original del equipo, pero gracias a que ciertas uniones presentaban fugas (gracias a la

rigidez del conjunto), en adición al problema de diseño del codo de escape del motor, se concluye que la mejor alternativa es la creación de un flexible de acero inoxidable con un nuevo múltiple de escape, con el fin de eliminar las fuerzas residuales de la operación del equipo en la línea de evacuación de gases e implementar un diseño más funcional y práctico en el múltiple. A continuación, se explicará el diseño, manufactura e instalación de ambas modificaciones:

4.2 Múltiple de admisión para inyección indirecta

Como se explica en el capítulo 2, la inyección de hidrógeno debe estar gobernada por un inyector en el múltiple de admisión, controlando y canalizando la cantidad de combustible que se ingresa a la cámara de combustión. Además, debe contar con receptores para los sensores de velocidad del aire y temperatura, en un conjunto conectado con un acople rápido a un filtro de aire.

Este nuevo múltiple de admisión debe ir acoplado a la válvula de paso de aire de admisión del motor que, previo a la modificación, actuaba como múltiple de admisión, conteniendo la copla para manguera para obtener la presión de vacío en el tablero de instrumentos y el filtro de aire de malla.

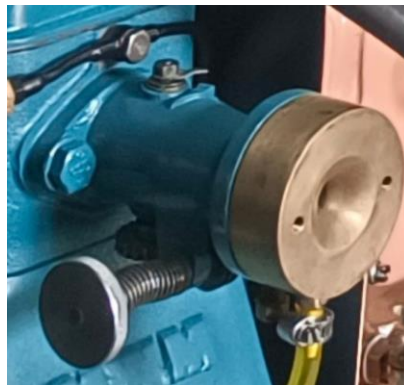


Figura 50. Múltiple de admisión original del motor MWM KD12E para medir cetano.

El nuevo conjunto debe ir sujeto en el elemento de bronce del múltiple en donde previamente estaba situado el filtro de aire, por lo tanto, se diseña el conjunto en base a esa pieza en particular. El material a utilizar para fabricar el múltiple es acero inoxidable, el cual no sufre de corrosión con la humedad ambiental, además de poseer la resistencia requerida a la alta temperatura y las presiones de trabajo de un motor atmosférico.

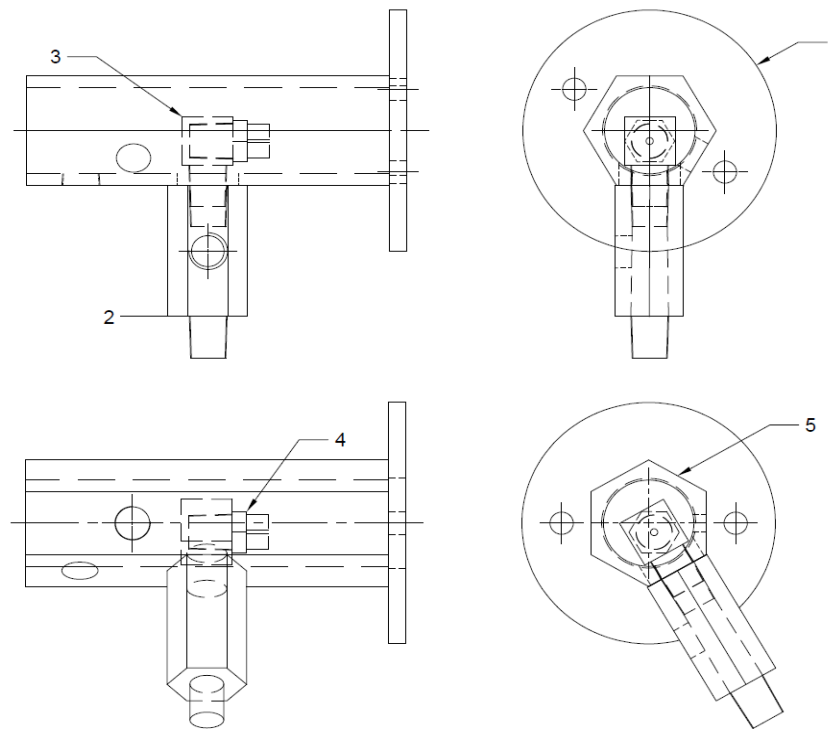


Figura 51. Diseño del múltiple de admisión con inyección indirecta para motor MWM KD12E.
1.- Flange de 5 [mm]. 2.- Tee de 1/8" NPT. 3.- Codo macho-hembra 1/8" NPT. 4.- Inyector 1/8" NPT. 5.- Barra Hexagonal 1 1/4".

La estructura principal del múltiple nace completamente de los requerimientos a los que se ve sometido el proyecto y la oferta del mercado para satisfacer las mismas. Se desea un elemento que pueda recibir distintas conexiones en su integridad como roscas para colocar sensores y que sirva como canalizador del flujo de aire y combustible gaseoso hacia la cámara. Bajo este principio, se toma de referencia el diámetro mayor del cono en la superficie del receptor de bronce (Figura 52) para fabricar una vía cilíndrica que a lo menos tuviera ese diámetro interior. Era posible fabricar un múltiple de admisión con su estructura lisa, pero por temas de asentamiento de las roscas al apretar los sensores, además de la diferencia de costo de las barras, se decide optar por la barra hexagonal de 1 1/4" de acero inoxidable AISI 316.



Figura 52. Receptor de bronce de la válvula reguladora de aire de admisión. Se puede distinguir en el centro de la imagen, el cono desde el exterior hacia la entrada de aire del motor.

Una serie de trabajos se le deben realizar a la barra de 100 [mm] de acero inoxidable para poder ser útil como múltiple en el equipo: vaciado de 25 [mm], rosca 7/16" 14h, rosca 1/8" NPT y una perforación de 17 [mm] para colocar el inyector.

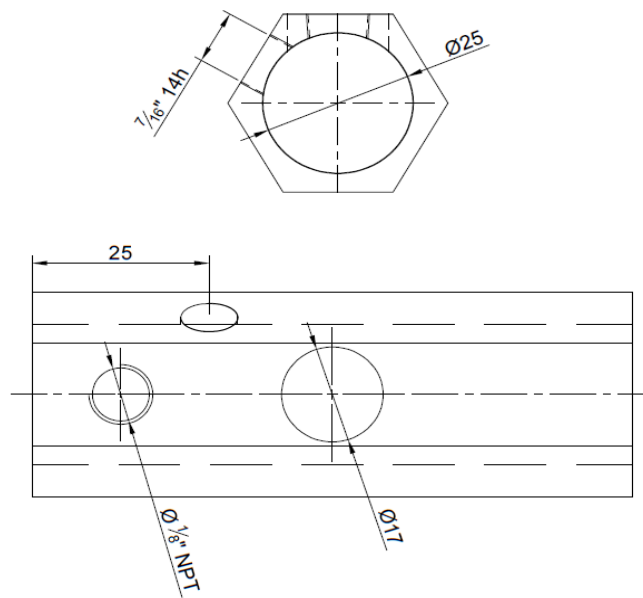


Figura 53. Vistas de frontal y lateral de los trabajos a la barra hexagonal.

La perforación interior de la barra fue determinada por el diámetro máximo del cono en el receptor de bronce, medida que es práctica para los receptores de cada sensor y el espacio para el inyector. Las roscas son hechas en el contorno de la barra para albergar los sensores, en donde la de 7/16" 14h es para el anemómetro y la de 1/8" NPT para la termocupla. La perforación de 17 [mm] está pensada para recibir a la Tee en su extremo hembra con el codo ya instalado y posteriormente soldar ambas piezas. El largo de la barra solo responde a una cuestión de comodidad para la instalación, en términos de una distancia tal entre elementos que permite la manipulación de estos de manera individual sin interferir con los otros, además de brindar espacio a futuras modificaciones, en el espacio derecho de la imagen inferior de la Figura 53.

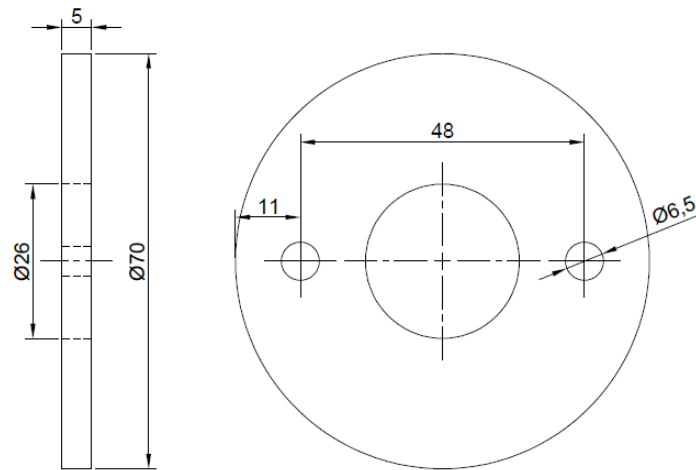


Figura 54. Flange de conexión para el nuevo múltiple de admisión.

El flange para la conexión con el soporte de bronce está fabricado en acero inoxidable AISI 304 y cortado con tecnología láser (Figura 54). Por otro lado, la Tee M-H-H está pensada para poder tener más de una línea de gas conectada a la vez, para pruebas con hasta 3 combustibles en simultaneo (uno de ellos, petróleo).

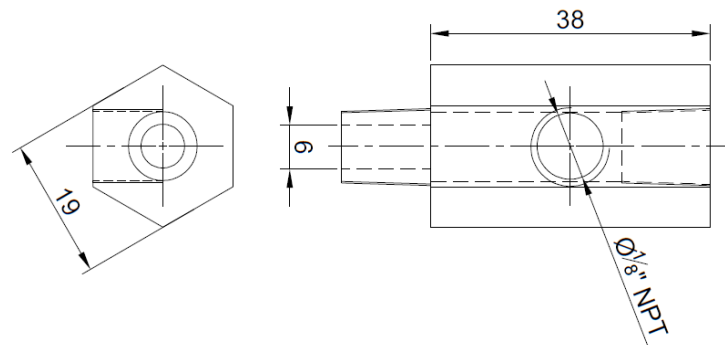


Figura 55. Tee M-H-H de para la conexión de combustibles gaseosos.

Finalmente, en el extremo longitudinal hembra de la Tee, se rosca un codo de bronce de 1/8" NPT, el cual es utilizado para colocar la boquilla, con la misma rosca, que sea requerida. Para la modificación actual, se tiene implementada una boquilla de acero inoxidable con 3 [mm] de apertura (Figura 56).

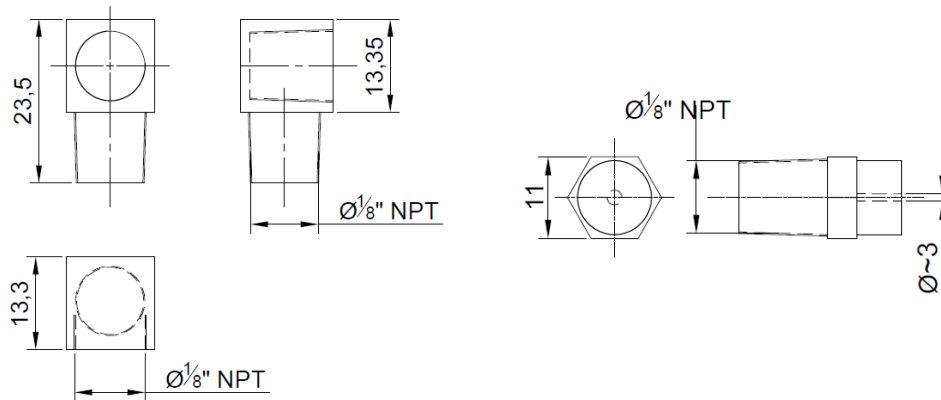


Figura 56. Codo y boquilla para inyección de combustible gaseoso.

El extremo de la barra que no lleva el flange debe contar con un acople rápido para cambiar de modo de operación fácilmente si se desea, por lo tanto, se adquieren reducciones para adaptar V-band clamp de 2" para cada conexión. Esta medida en particular de V-band fue regida por la disponibilidad de estos componentes, en donde los V-band de 1,5" que originalmente estaban pensados, no estaban disponibles en la parte central del territorio nacional. Al reunir todos los componentes, solo hacía falta soldar los elementos de acero inoxidable (Figura 57), para su posterior instalación en el soporte de bronce.

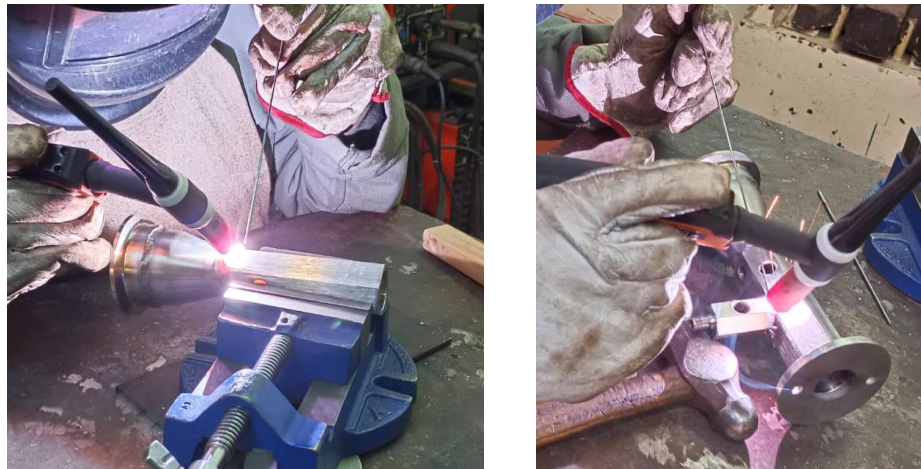


Figura 57. Procedimiento de soldadura TIG para los componentes del nuevo múltiple de admisión del motor MWM KD12E.

Como último apartado del múltiple de admisión, en el otro extremo de la copla para el V-band clamp se instala una reducción de 3" a 2", con el fin de utilizar un filtro de aire cónico. La reducción que va hacia el extremo del motor que une el múltiple con la copla es de 2" a 1 1/4". Actualmente la empaquetadura que une el nuevo múltiple de admisión con el soporte de bronce es de *Flexoid*, por otro lado, si se cambiara su modo de operación y admite aire caliente por admisión, la empaquetadura debe ser reemplazada por otra de grafito con malla metálica en su interior.



Figura 58. Múltiple de admisión nuevo instalado en el regulador de aire del equipo.

4.3 Múltiple de escape

En el extremo posterior de la culata del motor se encuentra la línea de escape, el segundo sector que sufrirá modificaciones con el objetivo eliminar las fallas en el diseño del múltiple y la rigidez del conjunto de escape, temas explicados anteriormente en el apartado 3.3 de la restauración.

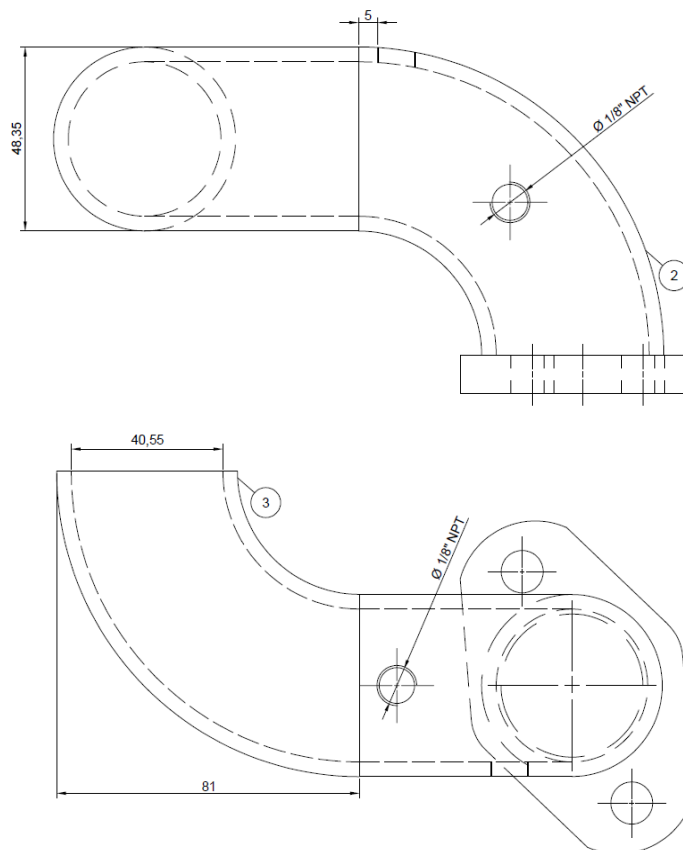


Figura 59. Diseño del nuevo múltiple de escape del motor MWM KD12E.

El nuevo múltiple de escape está compuesto por un flange idéntico a la conexión que tiene el codo original que cumplía la función de múltiple. Tanto los codos como el flange son de acero AISI 316, el cual corresponde a un acero inoxidable aleado con molibdeno, incrementando sus propiedades anticorrosivas hasta 400 [°C] y mostrando una gran resistencia a la oxidación en condiciones intermitentes de temperatura no superior a 870 [°C]. La temperatura de los gases de escape del motor monocilíndrico no deberían alcanzar esas temperaturas a menos que aumente la cantidad de calor evacuado desde la culata por medio de un nuevo intercambiador de calor, de esta manera podría aumentar el rango de operación del equipo, tomando siempre en cuenta la temperatura de operación máxima regida por la salida de agua desde culatín.

El codo de la izquierda en la Figura 59, solo cumple la función de conectar la línea vertical de escape con la salida del motor que, en este múltiple, está en horizontal, esto es así debido a la interferencia que genera la tuerca del flange con el decantador justo en el final del codo cuando este último está vertical. Por lo tanto, al tener el codo en horizontal, las tuercas no interfieren con el decantador que está colocado en el centro, como se ve en la imagen inferior de la Figura 59. Por último, la rosca que se encuentra a 5 [mm] del borde en el codo conectado con el flange es utilizada para conectar el sensor de temperatura para los gases de combustión. La conexión del múltiple con el resto de la línea de escape está a cargo de conexiones V-band clamp de 2", las cuales no necesitan de empaquetaduras para poder sellar.

La rigidez de la línea de escape de la instalación no permitía el sello de las conexiones de la vía hacia el colector de gases y a la culata, por lo tanto, se resuelve la creación de un flexible de acero inoxidable de 1.5" que se conecte al múltiple de escape y a la línea misma, dejando un tramo de aproximadamente 600 [mm] que absorbe las vibraciones y movimientos que genera el equipo, sobre todo en el encendido del motor eléctrico y posteriormente en el MCI.

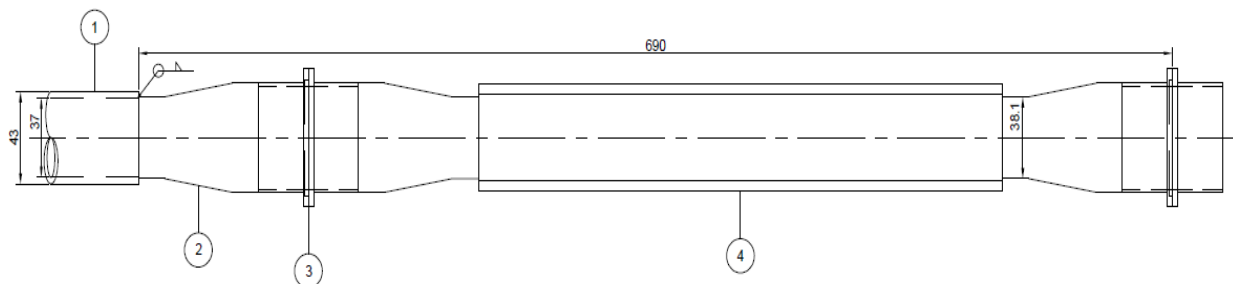


Figura 60. Diseño del flexible para la línea de escape del motor MWM KD12E.

Cada extremo del flexible está unido a un clamp V-band de 2", pero como la línea de escape del motor en casi toda su extensión es de 1.5", se deben incluir reducciones en cada conexión al concretar el acople. Al tener todos los componentes de la vía, se procede a unir cada uno con soldadura tipo TIG para acero inoxidable con la ayuda del profesor de soldadura del Taller Metalmecánico, Iván Aravena.



Figura 61. Múltiple de escape soldado y acoplado con el flexible de la línea de evacuación de gases de combustión.

Al instalar ambas modificaciones, el equipo queda listo para operar de manera dual con combustible gaseoso, pero todavía hacen falta la implementación de herramientas que ayuden a controlar los parámetros de funcionamiento del motor para poder obtener información sobre el proyecto que se desee estudiar.

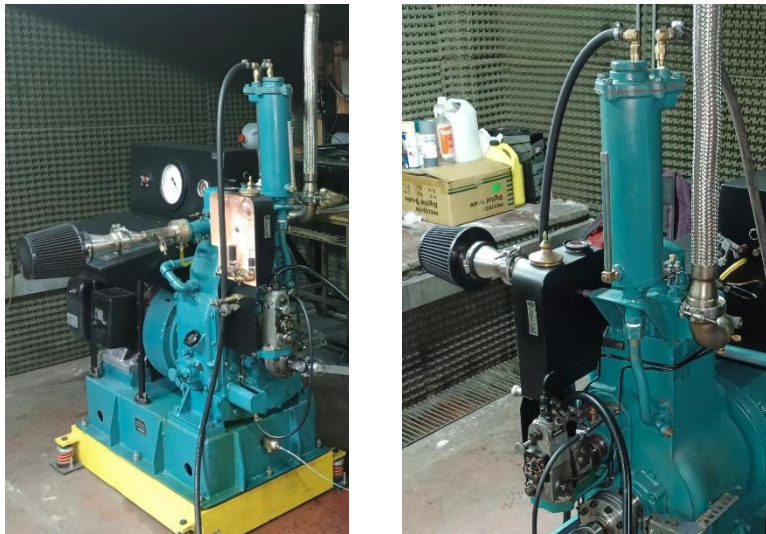


Figura 62. Motor MWM KD12E con las modificaciones instaladas en la admisión y en el escape de gases.

Capítulo 5

Instalación de instrumentos de medición para parámetros de funcionamiento del motor

5.1 Acerca de la seguridad

Para operar de manera segura una máquina rotativa de gran envergadura es necesario conocer los parámetros normales de funcionamiento del equipo, con el fin de que, en el momento en que el motor encendido sufra algún desperfecto, el operador pueda reconocer el área que está sufriendo el fallo no solo gracias a la audición o la visualización de un problema externo, si no que también gracias a la información de cada temperatura de interés, presión de aceite o la velocidad del equipo, pudiendo dilucidar rápidamente que hacer ante cualquier eventualidad. Al tener más claro el posible origen del problema, es sencillo visualizar las consecuencias de este y los peligros que pueden surgir según determinada situación.

Resguardar la seguridad de todos al operar equipos de combustión interna es primordial y es preocupación tanto del profesor como de los estudiantes seguir las normas de seguridad establecidas para resguardar la integridad de los involucrados.

5.2 Consideraciones y procedimiento de instalación

La información que brinda cada instrumento de medición del motor es vital para la generación de conocimiento en tecnologías de la combustión. El análisis es cada vez más completo si se tienen más variables bajo control, por lo tanto, el objetivo es dotar de herramientas al equipo para entregar la mayor cantidad de datos relevantes en cualquier modo de operación. Mediante conversaciones con los docentes acerca de las necesidades del alumnado y los equipos de investigación, se decide instalar los siguientes artefactos de medición:

5.2.1 Temperaturas de operación (Aceite del cárter, entrada y salida de gases y refrigerante).



Figura 63. Termocuplas tipo K con rosca 1/8" NPT, bulbo de 30 [mm] de largo y cable de malla de 10[m] de extensión.

Los receptores para los sensores de temperatura se encuentran instalados tanto en el múltiple de admisión, para captar la temperatura del aire que va entrando a la cámara de combustión, como en el de escape, brindando la temperatura de los gases de combustión al salir de la culata. Las termocuplas poseen rosca móvil, por lo tanto, se pueden ajustar a las necesidades del usuario, dando un rango de entre 3 a 20 [mm] de largo para el bulbo receptor de temperatura que sobresale de la rosca de 1/8" NPT.

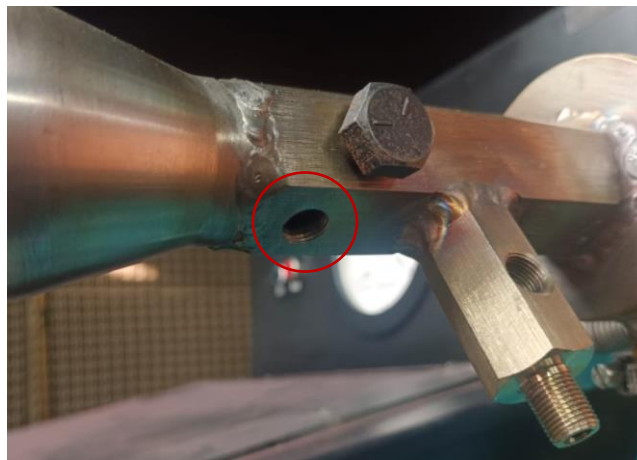


Figura 64. En rojo se marca la posición de la termocupla del múltiple de admisión.



Figura 65. En rojo se encuentra la posición de la termocupla de salida de los gases de escape. La rosca a la derecha se utiliza para el condensador de la línea de evacuación de gases.

Otras dos termocuplas se instalan en el circuito de refrigerante del equipo, justo en la entrada al bloque motor y a la salida de la culata. En el análisis de lugar físico en donde colocar los sensores, se llega al consenso de instalar la de entrada al bloque motor justo en el tapón que se utiliza para retirar el refrigerante del equipo, por lo tanto, la manufactura del elemento soporte, se limita a un vaciado interior de 5 [mm] y una rosca 1/8" NPT justo en la cabeza del tapón, tal y como se puede observar en la Figura 66.



Figura 66. Tapón de refrigerante roscado para la instalación de la termocupla de entrada al bloque motor.

El procedimiento para la instalación de la termocupla de salida de refrigerante es más complejo que el anterior, debido a que, el espacio disponible para poder colocar una rosca de 1/8" NPT es muy reducido (Figura 67), además de que el espesor del codo de salida del anticongelante desde la culata posee un espesor muy delgado, debido a la acción de la corrosión por el previo uso de agua destilada en el equipo.

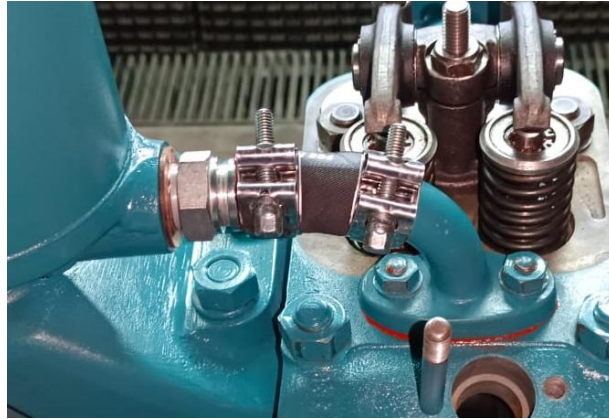


Figura 67. Salida de refrigerante desde la culata hacia el sifón. La distancia entre el codo y la copla a la entrada del sifón es de aproximadamente 40 [mm].

Para acordar la ubicación del sensor se plantean varios lugares en los cuales se puede realizar un roscado hembra para colocar la termocupla, entre los cuales se destaca el canal de entrada del anticongelante al deflector del sifón, realizar la rosca en la copla que lleva el agua de salida hacia el deflector o en el codo de salida de refrigerante desde la culata. La última opción se desecha por el delgado espesor del codo, lo cual puede causar que cuando el motor llegue a su temperatura máxima de operación, el sello se pierda en la rosca y el equipo comience a perder liquido anticongelante. Efectuar la rosca en la copla del sifón no permite colocar la termocupla en la orientación deseada, debido a que la copla es una rosca y debe quedar apretada en el sifón; si se realiza una rosca en cualquier parte de su estructura, cabe la posibilidad de que la termocupla no se puede instalar al quedar, por ejemplo, la rosca orientada hacia abajo. Por otro lado, realizar la rosca en la estructura del sifón o el deflector es relativamente fácil, pero al no estar lo más cerca posible de la salida de agua, existe la posibilidad de que los datos captados por la termocupla sean erróneos al ser tomados cuando el agua recorrió un trayecto de aproximadamente 15 [cm] desde la culata al sensor, lo anterior puede causar que, por radiación, el calor sea liberado y se adquiera una temperatura menor a la real.



Figura 68. Solución para la instalación de la termocupla en la salida de agua de la culata del equipo.

La solución más acertada para la instalación del sensor es alargar la salida del codo soldando una extensión en el extremo de la cañería, de esta manera, se puede realizar un roscado hembra 1/8" NPT para el sensor en la posición que se requiera. Al colocar la termocupla en esta orientación es posible adquirir la temperatura máxima de operación real del equipo, debido a que, como el sistema de refrigeración no posee bomba de agua, el líquido más caliente sube y, por lo tanto, justo donde se encuentra el tapón de bronce en la Figura 68, es el lugar donde la temperatura del agua de refrigeración alcanza su punto más elevado. Con esta solución se entorpece lo mínimo posible el circuito de refrigeración, lo cual es de suma importancia al tratarse de un equipo que induce el movimiento del refrigerante solo por convección.

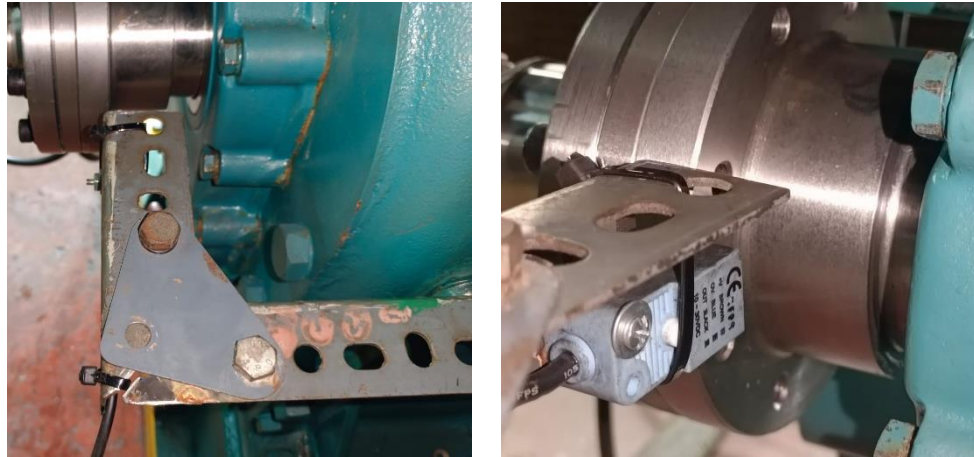
Por último, para la instalación del sensor de temperatura del aceite del cárter, se retira la válvula de paso para drenar el aceite del equipo y se instala una Tee M-H-H de 1/2" NPT, en la entrada inferior hembra se coloca un tapón y en el otro terminal hembra coaxial a la salida del motor, se instala un tapón con una rosca de 1/8" NPT para admitir la única termocupla fija del conjunto, la cual no permite la modificación del largo del bulbo.



Figura 69. Termocupla instalada en el cárter del motor MWM KD12E.

5.2.2 Velocidad de rotación del equipo

La velocidad de giro del motor de combustión está regulada por la carga que genera el motor eléctrico, la cual se mantiene constante en todo momento hasta que se corta el suministro de energía eléctrica. Cuando esto ocurre, el motor comienza a elevar sus rpm de manera indefinida hasta que se restringe el paso de aire de admisión o combustible a la cámara. Si bien las revoluciones del equipo están controladas por la acción del motor eléctrico, cuando se deseen hacer pruebas con distintos modos de operación, la velocidad de giro del motor probablemente varíe, por lo tanto, al no contar con la carga del motor eléctrico, es de suma importancia saber la rapidez instantánea del equipo, registrando de esta manera las condiciones de funcionamiento a [rpm] conocidas para cada modo de operación.



(a) Soporte del sensor de velocidad de rotación

(b) Sensor de revoluciones por minuto

Figura 70. Soporte del sensor de rpm sujetado a la tapa posterior del motor de combustión (a). Sensor de rpm fijado al soporte y orientado al dämpfer del motor de combustión (b).



Figura 71. Display digital que muestra las revoluciones del motor MWM.

5.2.3 Consumo de combustible

El consumo de combustible del equipo originalmente era calculado con la variación del volumen de diesel en los estanques de prueba del equipo con respecto a un intervalo temporal definido. Al eliminar el sistema de combustible original del equipo, debido a la pérdida irreparable de la válvula selectora en el receptáculo de los estanques de prueba del motor, el suministro de petróleo se añade a la línea del motor contiguo al equipo MWM. El motor Perkins, que se encuentra en la misma cabina que el monocilíndrico, registra su consumo de combustible en el exterior del habitáculo, en donde existe una manguera que se introduce en un estanque de combustible que se encuentra arriba de una balanza digital, por lo tanto, se puede calcular el consumo de petróleo solo con registrar el peso del estanque en un instante dado, para luego registrarlo al término de cierto periodo de tiempo, con esta información es posible calcular cuanta masa de combustible se consume en un determinado periodo temporal. Este método para obtener el consumo de combustible es heredado al motor MWM al unir

ambas líneas de suministro, al igual que la visualización en el cambio de volumen en la línea de suministro diesel como se observa en I, aunque cabe destacar que el método con la balanza es mucho más preciso.



(a) Consumo por método másico



(b) Consumo por método volumétrico

Figura 72. En (a), el método másico con balanza para calcular consumo de combustible de los equipos. Sensibilidad: 0.001 [kg]. Y en (b), el método volumétrico, con mediciones a 55 y 125 [ml].

5.2.4 Torque al freno del motor

Uno de los parámetros más importantes que se deben conocer de una máquina de potencia mecánica es la eficiencia de la conversión del combustible suministrado con respecto a la potencia útil que brinda el motor. Esta variable no era de interés originalmente para el equipo medidor de cetano, por lo tanto, el dâmpfer principal para correa en V del equipo no se encontraba conectado a ningún accesorio. En otras aplicaciones del motor MWM KD12E es posible encontrar una bomba de agua conectada con una correa en V al dâmpfer del equipo, en donde su función es hacer circular el agua venciendo las pérdidas de carga del circuito. Este equipo, al no tener bomba de circulación, deja libre su dâmpfer principal, dando la oportunidad de conectar otro artefacto de utilidad.

En este caso, para medir la potencia generada por el MCI, se plantea la instalación de un banco de resistencias, en donde se instala una serie de ampolletas de distintos ohmios. Este método requiere de un alternador conectado al dâmpfer mediante una correa en V, el cual genera corriente eléctrica a través de inducción electromagnética. La corriente eléctrica llega al panel resistor con ampolletas y enciende todas las que su potencia mecánica puede entregar mediante la conversión en el alternador. La resistencia total del panel se puede traducir en los Watts que genera el equipo para cierto modo de operación. La implementación del panel con el alternador es tomada como una opción hasta que el docente Dr. German Amador menciona que está más interesado en medir directamente el torque del equipo en el freno

dinamométrico que utiliza el motor Perkins para cada prueba. Debido a que en la actualidad el freno no se está utilizando en el equipo contiguo producto de una falla catastrófica en el cardán que unía ambos, el freno dinamométrico puede invertirse para dejar su dâmpner de conexión en su otro extremo, justo frente a la salida del motor MWM (Figura 73), de esta manera, mediante un cardán es posible conectar ambas máquinas y obtener directamente el torque que genera el motor en cada modo de operación.



Figura 73. Separación entre el eje del freno dinamométrico y el eje principal del motor MWM KD12E.

Si bien ambos ejes no se encuentran a mucha distancia entre sí, tienen diferencias de centrado en todos los ejes, por lo tanto, para poder utilizar un cardán entre los dos ejes no coaxiales se tienen que implementar crucetas en ambos extremos.

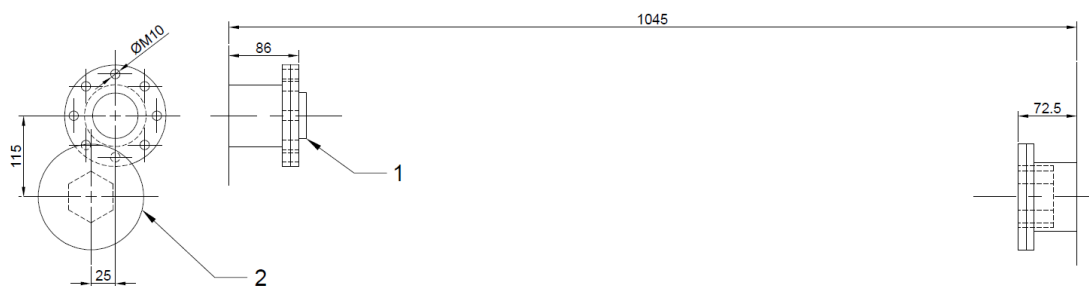


Figura 74. Distancias entre el eje del freno dinamométrico (1) y el eje del motor monocilindrico (2) en [mm].

Para efectivamente poder conocer el torque generado por el MCI, comienza la cotización de cardanes que cumplan con los requerimientos de un equipo con 12 [CV] a 2000 [rpm]. En la región de Valparaíso no fue posible encontrar un distribuidor de uniones cardánicas, por lo tanto, la búsqueda tuvo éxito en Santiago en la empresa *Luxor S.A.*, líderes en componentes de cardán para vehículos y maquinaria. Con los antecedentes entregados al personal, se concluye

que los elementos más adecuados a utilizar son uniones de 7/8". Con esto en consideración se adquieren cuatro yokes de cardán cuadrado de 7/8", dos crucetas, una barra cuadrada de 1 [m] y tres tornillos seguro de 3/8" para yoke.

El paso siguiente después de obtener los elementos de la unión cardánica es cambiar de posición el dámpfer que une el freno al motor Perkins contiguo al equipo MWM (Figura 73). La falla catastrófica entre ambos equipos antes mencionada, según lo que relata el Ing. Daniel Galleguillos, es la falla de varios pernos en la sujeción de la unión cardánica entre el motor Perkins y el freno debido a la continua vibración que producía la conexión. En la actualidad el equipo de potencia marino Perkins no se encuentra en uso debido a su desconexión del freno, y al no haber una urgencia en el uso del equipo, no se investigó más a fondo las causas principales del accidente.



Figura 75. Dámper del freno dinamométrico en su posición original, orientado a la conexión con el motor Perkins. En la imagen derecha se puede apreciar el cono exterior del dámpfer en el sector sin pintura.

Al retirar el dámpfer del freno dinamométrico, otra consecuencia de la falla catastrófica sale a la luz, en donde es posible ver una fisura en la sección cónica del acople justo en el canal del chavetero (Figura 75). El componente en ese estado no está apto para soportar torque, por lo tanto, se decide reparar la pieza para tener una conexión confiable, de lo contrario, la probabilidad de falla mientras el equipo está en operación es muy alta, lo que puede provocar consecuencias graves al mobiliario o al personal del Laboratorio de Termofluidos si se desprenden trozos del componente mientras gira.



Figura 76. Fractura longitudinal a la sección cónica del dämper del freno dinamométrico.

Para restaurar el dämper dañado del freno, se corta la sección agrietada y se suelda una nueva, torneando la nueva sección según las dimensiones tanto del cono exterior como del interior del componente originales. Además de esta tarea de reparación, se debe crear un acople que sirva para conectar la unión cardánica al motor, por lo tanto, en base a la polea para correa en V del equipo, se solicita a la tornería *Tornemec* la creación de un nuevo dämper para el motor MWM que tenga el mismo tipo de flange de conexión que el acople del freno.



(a) Dämper reparado



(b) Acople nuevo en base a la polea en V

Figura 77. En (a), se presenta el dämper del freno dinamométrico reparado y, en (b), los dämper para correa en V original y la nueva conexión manufacturada para el acople del cardán en el motor MWM.

Con cada dämper instalado en su respectivo equipo, comienza la fabricación de las conexiones que acoplen en los machones fabricados, los cuales fijan los yokes en cada extremo de la unión cardánica mediante un tornillo seguro de 3/8". Cada unión se fabrica con un vaciado en su interior, con el fin de que la tuerca de sujeción de cada dumper no interfiera con la conexión (Figura 78). De todos modos, para facilitar la instalación de las conexiones se ordena fabricar un separador de 10 [mm] para los acoples, con el fin de eliminar por completo la

posibilidad de obstrucción en el aprete debido al largo de las tuercas principales de cada equipo.

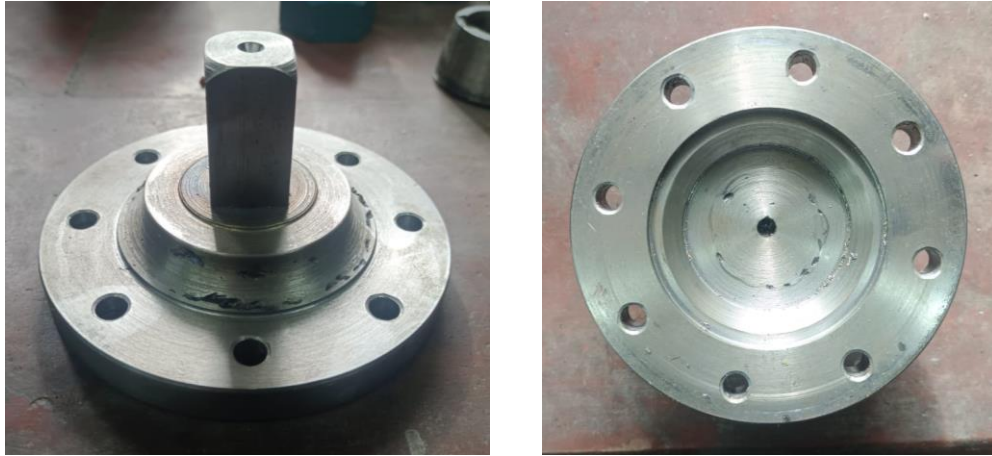


Figura 78. Vista exterior e interior respectivamente de los acoples de la conexión motor-freno.

Gracias a que ambos damper se crean con el mismo diseño de acople para pernos M10 según el machón original del freno, las uniones del cardán en cada extremo no difieren en lo más mínimo, por lo tanto, el cardán no posee una posición única de instalación. Al colocar el sistema de transmisión de torque en posición entre el motor monocilíndrico y el freno dinamométrico, al dar arranque al equipo es posible notar que el machón conectado al freno vibra considerablemente. Al notar esto, se desarma el conjunto de transmisión para inspeccionar el problema y tratar solventarlo. En la revisión se distingue que, el dâmpner conectado al freno y apretado con la tuerca principal varía su posición de manera perpendicular al eje de transmisión. Al ser un asentamiento cónico no hace sentido que el componente tenga este movimiento, por lo tanto, la única respuesta a la anomalía es un mal diseño de la chaveta entre el dâmpner y el eje cónico. La chaveta originalmente contaba con una altura de 9,7 [mm], la cual fue fabricada por el Ing. Daniel Galleguillos en una mantención al motor Perkins. Al retirar el dâmpner que presentaba una falla longitudinal, la chaveta del conjunto presentaba claros signos de desgaste en las aristas en contacto con el canal del chavetero en el interior del machón en cuestión (Figura 79).



Figura 79. Chaveta original de la unión en el freno dampér -eje desgastada por el sobredimensionamiento de esta.

Dado los antecedentes, se resuelve que la altura de la chaveta no es la adecuada, no permitiendo que el dampér asiente en el eje cónico del freno completamente, de esta manera, el machón se aprieta antes y, al ser cónico, el asiento del componente deja de ser coaxial, causando la desviación perpendicular al eje que desgastó la chaveta y, en varios ciclos de operación, cortó los pernos del cardán acoplado al motor Perkins gracias a la gran vibración que se percibía en la unión, generando la falla catastrófica en el conjunto. La altura final de la chaveta para que el dampér asentara mejor en el eje cónico fue de 8,1 [mm], dejando al conjunto machón-eje del freno con una desviación de 0,5 [mm], lo cual fue considerado satisfactorio con respecto a la gran vibración que generaba el conjunto antes del análisis.



Figura 80. Unión cardánica entre el motor MWM KD12E y el freno dinamométrico.

5.2.5 Presión de vacío de admisión

El vacío que genera el pistón en la carrera de bajada hacia el PMI es mostrado por el vacuómetro principal que se encuentra en el tablero de instrumentos, pero con el fin de llevar paulatinamente la información fuera de la cabina de motores, se instala un medidor de presión de columna de agua en el mismo mesón donde se encuentra el computador con la lectura de las termocuplas y las revoluciones por minuto. (Figura 81)



Figura 81. Tablero con 2 columnas graduadas en [mm] para obtener presión en agua y mercurio según se requiera.

5.2.6 Caudal de aire de admisión

Para obtener el caudal de aire de entrada al motor desde el múltiple de admisión, se conecta la toma del anemómetro a su respectiva perforación en la cara lateral (Figura 82) y se mide la velocidad del aire al ingresar en [m/s], al multiplicar este valor por la sección transversal en la cual fue tomada la medición (Figura 53) se obtiene el caudal requerido.

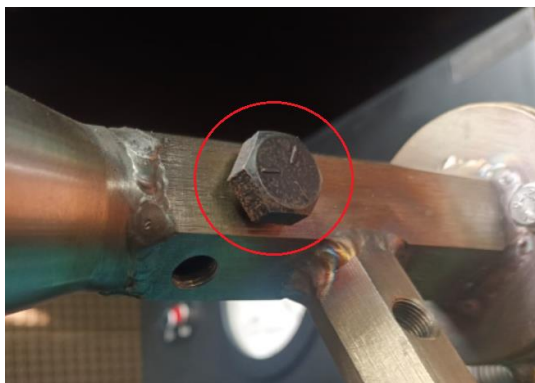


Figura 82. A la izquierda, en el círculo rojo se encuentra la entrada de la sonda del anemómetro (derecha).

5.3 Validación

Para la validación se expondrán tres modos de operación y todos los parámetros obtenidos gracias a los sensores instalados.

Tabla 3. Parámetros de funcionamiento del motor MWM KD12E a diferentes RPM. A 1000 revoluciones la toma de datos se realiza mientras el motor eléctrico trifásico sigue encendido.

Velocidad de rotación [RPM]	1510	1380	1000
Velocidad del aire de entrada [m/s]	8,3	5,8	5,2
Caudal de aire [m ³ /s]	0,2075	0,145	0,13
Presión de admisión [mmH2O]	410	280	250
Presión de aceite [kg/cm ²]	1,9	1,9	1,9
Consumo de combustible [ml/s]	0,72	0,66	0,51
Temperatura Salida Refr. [°C]	96,7	97	97,2
Temperatura Entrada Refr. [°C]	74,1	73,1	80,9
Temperatura gases de escape [°C]	350,2	349,3	431,3
Temperatura Aire de Admisión [°C]	19,2	19,1	20,1
Temperatura aceite [°C]	19,7	20,1	18,9
Torque [kgf]	-	2,5	-

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros en el equipo

6.1 Conclusiones



Figura 83. Motor MWM KD12E adecuado para pruebas con inyección indirecta de hidrógeno.

Si el motor no hubiese sido restaurado como se plantea en el primer objetivo de este documento, al momento de realizar la puesta en marcha, un mayor número de problemas en los distintos sistemas del equipo hubiesen salido a la luz, en comparación con la sección 3.3. En el sistema de refrigeración del equipo se hubiesen observado fugas en el circuito cerrado de anticongelante por parte del serpentín de condensación, deficiencia en la disminución de la temperatura del refrigerante en el sifón y restos de metal corroído en el circuito de refrigeración que podrían obstruir el libre paso de líquido, disminuyendo la tasa de energía evacuada por el intercambiador de calor. El conjunto eléctrico probablemente no hubiese generado mayor inconveniente que cambiar el fusible quemado por otra alternativa, pero por otro lado, el sistema de combustible podría haber visto afectado su inyector o la bomba de inyección por la suciedad en el interior de las líneas que transportan petróleo, el cual no fue drenado antes de dejar de utilizar la instalación. La culata en los primeros ciclos de operación desde su puesta en marcha no debiese haber dado problemas, pero mientras más horas acumule el equipo es probable que el roce entre las válvulas y las guías hubiese sido elevado, perdiendo rendimiento del equipo. Por otro lado, sin

el encasquillado y posterior asentamiento de las válvulas cabe la gran posibilidad de que el equipo hubiese perdido el sello de la cámara de combustión al quemar el borde de la válvula de escape, descomprimiendo el motor. Con respecto al bloque motor, el escenario más complejo que se podría evidenciar sin la restauración es la pérdida de aceite lubricante por los sellos en mal estado y una baja eficiencia de conversión de combustible en potencia mecánica al disipar energía en forma de roce con los rodamientos antiguos instalados.

Lás pérdidas de combustible y de gases de escape (sección 3.3) en la línea de evacuación son escenarios que, sin importar la existencia de una restauración previa, se deben subsanar antes de operar el equipo, por el peligro que representa tener petróleo derramado en el piso y gases de combustión adentro de la cabina donde es probable que exista personal del Laboratorio trabajando. Con todos los antecedentes mencionados, se concluye que efectivamente un overhauling total al equipo es la manera más adecuada de obtener una máquina fiable, evitando paradas no programadas por fallas en cualquiera de los sistemas antes nombrados.

Las modificaciones en el equipo permitieron que el motor evacuara sus gases de combustión de manera eficaz sin pérdidas y que el MCI tuviera nuevas maneras de ingresar combustible a la cámara. La creación del múltiple de escape permitió que el equipo pudiera contar con un circuito hermético de evacuación de gases hacia el colector al eliminar las fuerzas que recibía la rígida línea de escape original y que generaba la pérdida de sello cuando el motor se movía al encender o al comenzar la combustión de diesel. Por otro lado, la creación del nuevo múltiple de admisión del motor genera un gran número de posibles desarrollos tecnológicos al poder incluir hasta 3 combustibles en pruebas de operación con el equipo, lo cual convierte a la instalación en un equipo versátil con una gran variedad de modos de operación al poder variar la cantidad de cada combustible utilizado, la cantidad de aire de admisión, el momento de la inyección de combustible según el ángulo de cigüeñal o la cantidad de combustible máxima que puede ingresar a la precámara.

Finalmente, con el fin de visualizar los cambios que se generan en el equipo con respecto a la gran variedad de nuevos modos de operación que se pueden implementar en la actualidad gracias a las modificaciones hechas, se instalan herramientas de medición que permiten controlar los parámetros de funcionamiento que son de interés para el personal, tales como temperatura críticas de trabajo, velocidad de rotación, caudal de aire, consumo de combustible y, una herramienta vital para analizar cada modo de trabajo, el torque al freno del equipo. Con estos adquisidores de datos, el análisis de nuevos lubricantes, combustibles o aditivos se vuelve más sencillo y de fácil interpretación, debido a que, como se trata de un motor monocilíndrico, no existe un error asociado al asumir uniformidad de los resultados para equipos con más de un cilindro.

6.2 Trabajos futuros

Este trabajo y, posterior documento, sirve como base para nuevos desarrollos tecnológicos en el sector de la generación de potencia, área que en la actualidad enfrenta un gran desafío debido a las nuevas regulaciones ambientales. Como herramienta de investigación, el motor MWM KD12E, para seguir siendo un equipo con gran potencial en el futuro, requiere de una futura nueva actualización de instrumentos de medición, en donde la digitalización de señales mediante una interfaz computacional en todos los parámetros del motor es el paso lógico para lograr una mayor eficiencia al procesar todos los datos brindados.

Como observación al proyecto actual y con miras hacia el futuro, ciertos procedimientos necesarios quedan pendientes por ejecutar para obtener una máquina capaz de entregar la mayor variedad de datos de manera confiable y segura, entre los que se destaca:

- Creación de tapa protectora para el cardán entre el equipo monocilíndrico y el freno dinamométrico, con el fin de evitar el violento salto de componentes si por alguna razón el eje cardán falla.
- Implementación de controles del equipo fuera de la cabina de motores.
- Instalación de sensor de presión en cámara.
- Instalación de flujómetro en la línea de escape para análisis de emisiones.
- Instalación de bomba elevadora de combustible para eliminar el aire en la línea de suministro.
- Cambio de intercambiador de calor por un radiador con electroventilador con circuito acelerado mediante bomba de agua controlada por un bulbo de temperatura y termostato.
- Ejecutar mantención al freno dinamométrico para disminuir al mínimo el roce, para posibilitar la partida en frío del motor conectado al freno.

Cabe mencionar que, en las futuras pruebas del motor, se debe tomar la temperatura máxima de salida de refrigerante como valor máximo de operación del equipo (≤ 110 [°C]). Si por alguna razón, la inyección de gases combustibles, lubricantes o aditivos eleva la temperatura de operación con respecto a la máxima registrada, se debe apagar el equipo y no operar nuevamente hasta que se solucione la deficiente evacuación de energía calórica del motor de combustión, de lo contrario, la probabilidad de que el motor se funda se eleva potencialmente.

Este proyecto es la primera fase de un plan de modificaciones para el equipo, el cual tiene como objetivo final convertir al motor encendido por compresión MWM para operar con 100% de hidrógeno gaseoso. Este plan a mediano-largo plazo requiere de la instalación de un inyector de alta presión en la precámara de combustión el cual inyecte el combustible directamente de la misma manera que efectúa con el petróleo, con el fin de crear un motor que opere en modalidad HCCI o PCCI. Los estudios futuros revelarán la manera más eficiente y viable de convertir este equipo monocilíndrico en una máquina que pueda operar en su totalidad con combustibles alternativos.

Referencias

- Alex Maldonado. (2020). *Proceso de restauración de motor y circuito de luces de Chevrolet Chevette*.
<https://repositorio.usm.cl/discover?scope=%2F&query=restauraci%C3%B3n+de+motor&submit=>
- Almacenamiento de Hidrógeno - ARIEMA. (2023). <https://www.ariema.com/almacenamiento-de-h2>
- BBC. (2015, April 4). *¿Cómo llegó el petróleo a dominar el mundo?*
https://www.bbc.com/mundo/noticias/2015/04/150331_iwonder_historia_petroleo_finde_dv
- Blázquez Morales Luis. (2023). *Grandes Inventores - Museo Virtual - Oficina Española de Patentes y Marcas*.
http://historico.oepm.es/museovirtual/galerias_tematicas.php?tipo=INVENTOR&xml=Lenoir,%20Jean-Joseph%20Etienne.xml
- BMW Group. (2006). *La nueva era de la movilidad*.
<https://www.press.bmwgroup.com/austria/article/detail/T0026585DE/eine-neue-aera-der-mobilitaet-beginnt-der-bmw-hydrogen-7?language=de>
- Booser Richard. (1997). *Tribology Data Handbook: An Excellent Friction, Lubrication, and Wear Resource - E. Richard Booser - Google Libros*.
https://books.google.cl/books?id=VRmLriy00pQC&pg=PA271&lpg=PA271&dq=MWM+KD12E&source=bl&ots=8EU3lcDCmK&sig=ACfU3U2JNFaMEM_FXS3NjOakEfzrvYWYZQ&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjN1rGOt57_AhWrp5UCHcXQBpA4PBDoAXoECAYQAw#v=onepage&q=MWM%20KD12E&f=false
- CEN. (2023, January 18). *FprEN 16906 - Liquid petroleum products - Determination of the ignition quality of diesel fuels* -. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/a1cec580-2d29-4883-8ee9-df18c75ddeb6/pren-16906>
- Consejo de la Unión Europea. (2005). *Objetivo 55 - El plan de la UE para la transición ecológica - Consilium*. <https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>
- Dansk Standard. (2017). *Productos petrolíferos líquidos: Determinación de la inflamabilidad del gasóleo*.

- Diferencias entre la inyección directa e indirecta | Auto Bild España.* (2020, August 6). <https://www.autobild.es/practicos/aprende-autobild-diferencias-inyeccion-directa-indirecta-691929>
- El hidrógeno, un vector energético que gana protagonismo en Honda – HondaDreams.* (2023, February 21). <https://www.honda.es/hondadreams/2023/02/21/el-hidrogeno-un-vector-energetico-que-gana-protagonismo-en-honda/>
- El nuevo motor de JCB.* (2023). https://www.hibridosyelectricos.com/coches/motor-hidrogeno-promete-misma-potencia-par-gasolina-cero-emisiones_68821_102.html
- Elegir el mejor método de almacenamiento de hidrógeno | CIC energigUNE.* (2023). <https://cicenergigune.com/es/blog/metodos-almacenamiento-hidrogeno-cicenergigune>
- Estudio Comparativo Del Uso de Hidrógeno Frente A Combustibles Fósiles en Motores de Combustion Interna en Buques.* (2023). <https://es.scribd.com/document/303729821/Estudio-Comparativo-Del-Uso-de-Hidrogeno-Frente-a-Combustibles-Fosiles-en-Motores-de-Combustion-Interna-en-Buques>
- Historia del uso del hidrógeno.* (2022). <https://www.motorpasion.com/espaciotoyota/curiosa-historia-hidrogeno-como-combustible-automocion-relato-que-se-empezo-a-escribir-1806>
- How To Rebuild An Engine: Everything You Need To Know.* (2021). <https://carfromjapan.com/article/car-maintenance/how-to-rebuild-an-engine/>
- Hydrogen Permeation Through Glass.* (2020). *Frontiers in Materials*, 6. <https://doi.org/10.3389/FMATS.2019.00342>
- Ingrid Lobet.* (2021). *El final de la gasolina con plomo tardó pero llegó | National Geographic.* <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2021/09/el-final-de-la-gasolina-con-plomo-tardo-pero-llego>
- Inyección de hidrógeno como potencial mejora de los motores actuales.* (2011). <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/13713>
- MAN Engines: The first dual fuel hydrogen engines in use on a work boat.* (2022, June 1). <https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-engines-the-first-dual-fuel-hydrogen-engines-in-use-on-a-work-boat/>
- Mazda RX-9 Hydrogen: los inicios sostenibles de la firma.* (2020). <https://www.muyinteresante.es/actualidad/8698.html>
- Ministerio de Energía.* (2021). *H2 | Ministerio de Energía.* <https://energia.gob.cl/h2>
- MWM.* (2023). *MWM Geschichte - MWM.* <https://www.mwm.net/mwm-geschichte/>
- Naciones Unidas.* (2015). *El Acuerdo de París | Naciones Unidas.* <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- NAFION.* (2023). *Celdas de combustible.* <https://www.nafion.com/es/support/white-papers/membranes-for-fuel-cells-white-paper>

- Richard Backhaus. (2022). *Mastering the Nordschleife with hydrogen - Porsche Newsroom*.
<https://newsroom.porsche.com/en/2022/innovation/porsche-engineering-simulation-hydrogen-combustion-engines-nuerburgring-nordschleife-29401.html>
- Simon Evans. (2021, October 5). *Analysis: Which countries are historically responsible for climate change? - Carbon Brief*. <https://www.carbonbrief.org/analysis-which-countries-are-historically-responsible-for-climate-change/>
- Sørensen, B., & Spazzafumo, G. (2018). Hydrogen. *Hydrogen and Fuel Cells*, 5–105.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100708-2.00002-3>
- Types of Hydrogen Tanks: Technological Differences and Advantages Explained*. (2022).
<https://www.addcomposites.com/post/types-of-hydrogen-tanks-technological-differences-and-advantages-explained>

Anexos



Anexo 1. Conexión antigua hacia el sifón desde el retorno de la culata.



Anexo 2. Intercambiador de calor post baño químico con ácido.



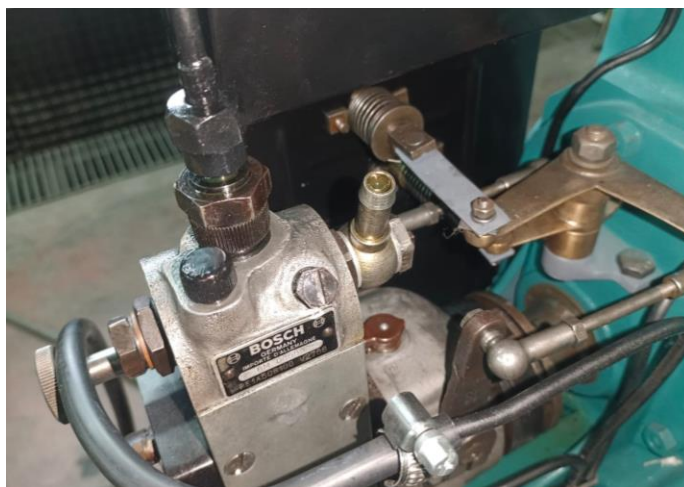
Anexo 3. Vista del eje del volante de inercia del equipo.



Anexo 4. Fabricación de la empaquetadura de la tapa de distribución de la bomba de aceite.



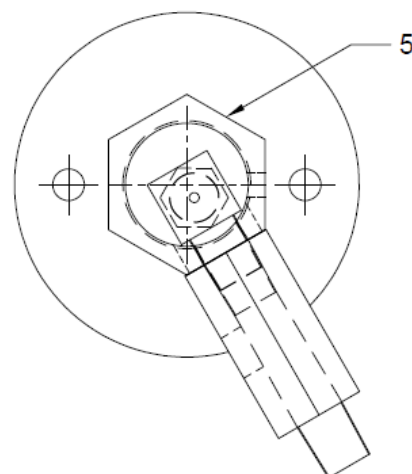
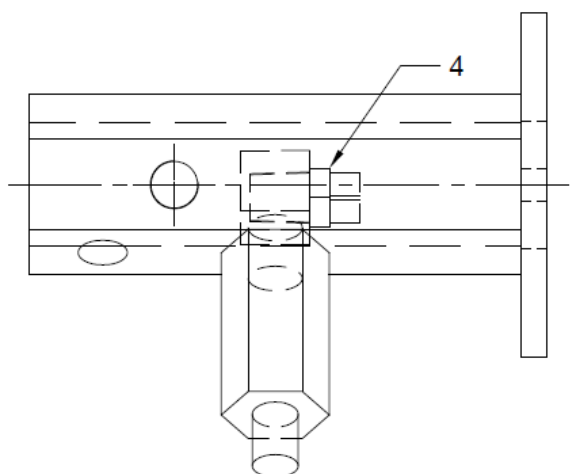
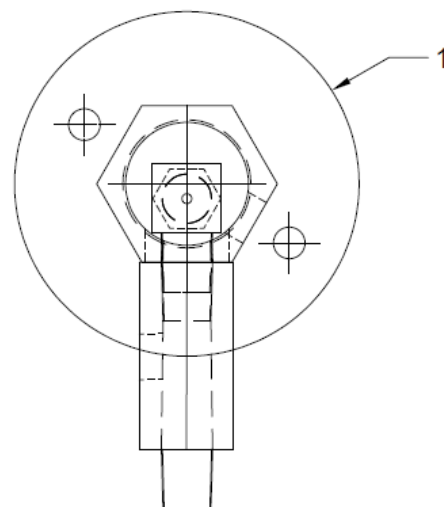
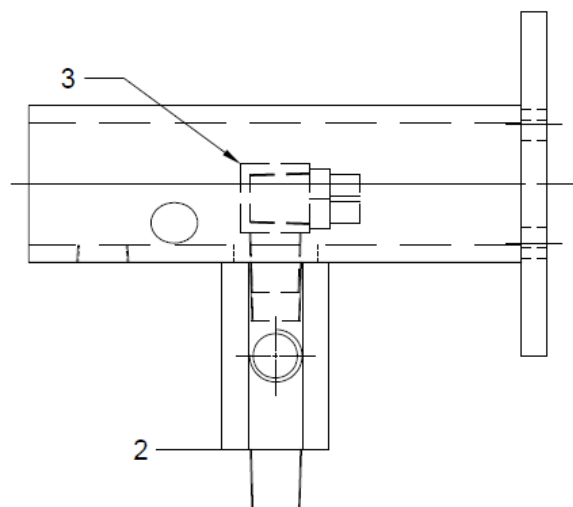
Anexo 5. Chasis y bloque del motor MWM restaurados y pintados.



Anexo 6. Unión para cañería con conector para manguera de 3/8".



Anexo 7. Línea de suministro de combustible del motor marino Perkins.

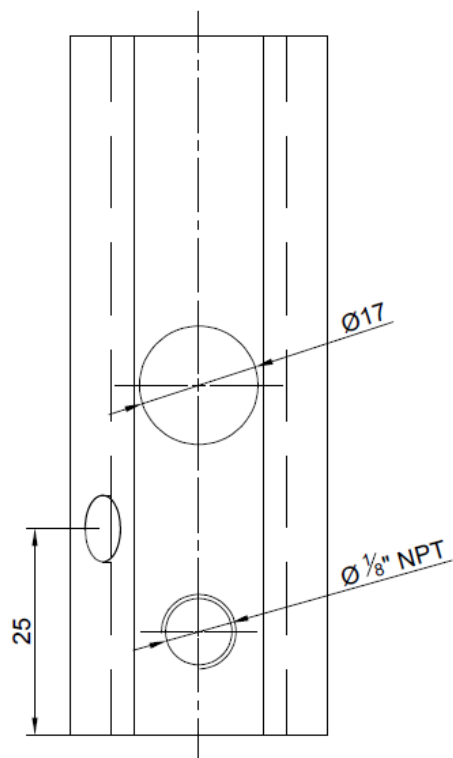
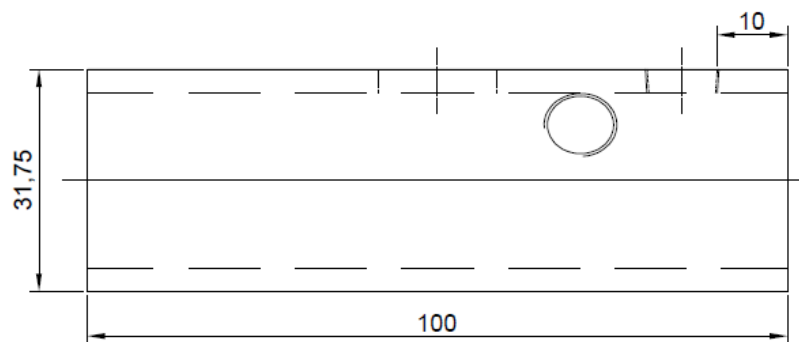
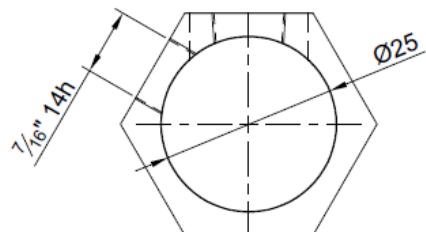


1	Barra hexagonal 1 1/4"	5	Inox. 316
1	Boquilla alta presión	4	Inox. 1/8" NPT
1	Codo H-M 1/8" NPT	3	
1	Adaptador Tee 1/8" NPT	2	Inox. 303
1	Flange	1	Inox. 304

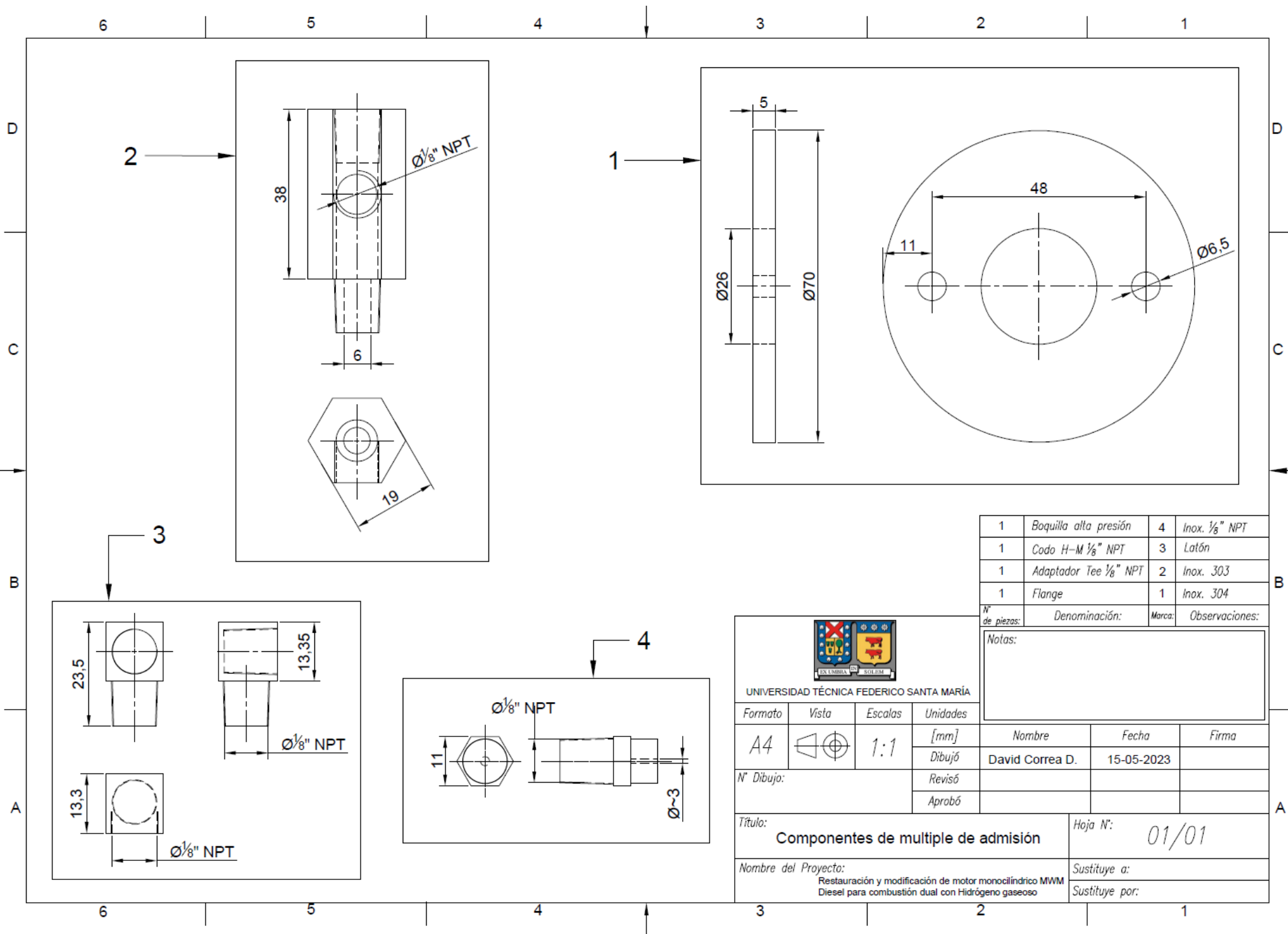
N° de piezas: Denominación: Marca: Observaciones:

Notas:

 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA						
Formato	Vista	Escalas	Unidades	Nombre	Fecha	Firma
A3		1:1	[mm]	David Correa D.	15-05-2023	
N° Dibuja:				Revisó		
				Aprobó		
Título:					Hoja N°:	
Componentes de multiple de admisión					01/01	
Nombre del Proyecto:					Sustituye a:	
Restauración y modificación de motor monodilindro MVM Diesel para combustión dual con Hidrogeno gaseoso					Sustituye por:	



 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA				N° de piezas:		Denominación:		Marca:		Observaciones:	
				Notas: Acero inoxidable AISI 316							
Formato	Vista	Escalas	Unidades	Nombre		Fecha		Firma			
A4		1:1	[mm]	David Correa D.		15-05-2023					
N° Dibujo:				Revisó							
				Aprobó							
Título: Barra hexagonal de admisión								Hoja N°: 01/01			
Nombre del Proyecto: Restauración y modificación de motor monocilíndrico MWM Diesel para combustión dual con Hidrógeno gaseoso								Sustituye a:			
								Sustituye por:			



1	Boquilla alta presión	4	Inox. 1/8" NPT
1	Codo H-M 1/8" NPT	3	Latón
1	Adaptador Tee 1/8" NPT	2	Inox. 303
1	Flange	1	Inox. 304
N° de piezas:		Denominación:	Marca:
		Observaciones:	

Notas:

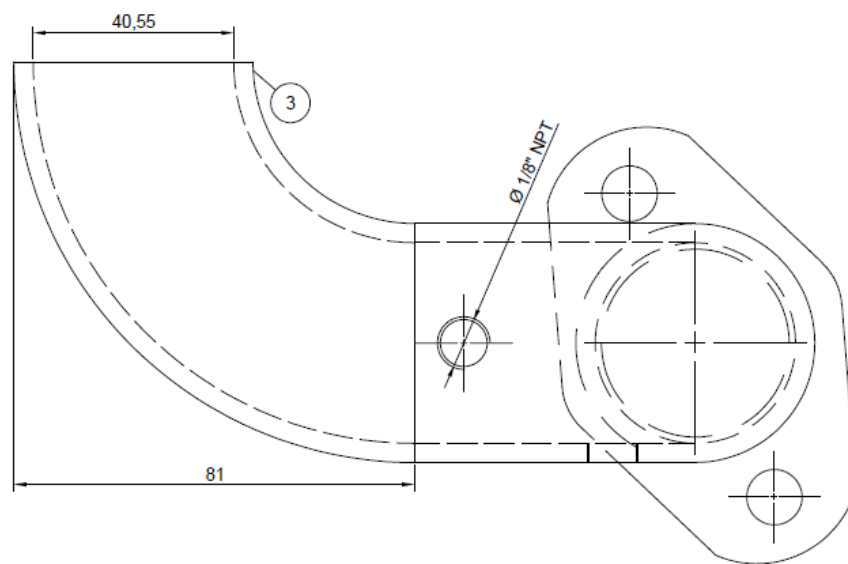
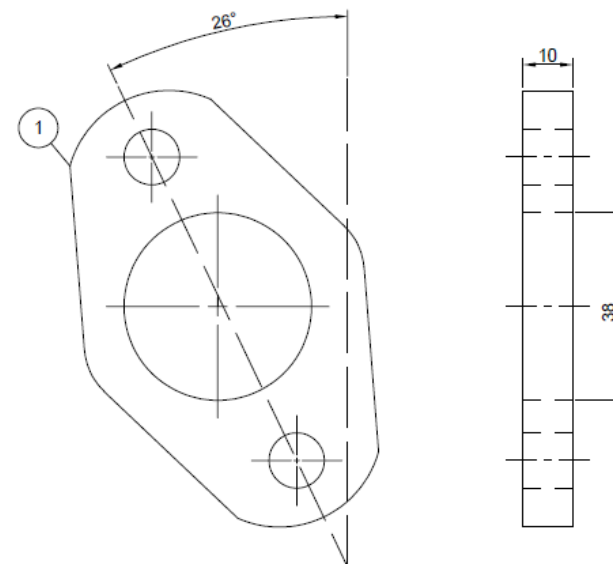
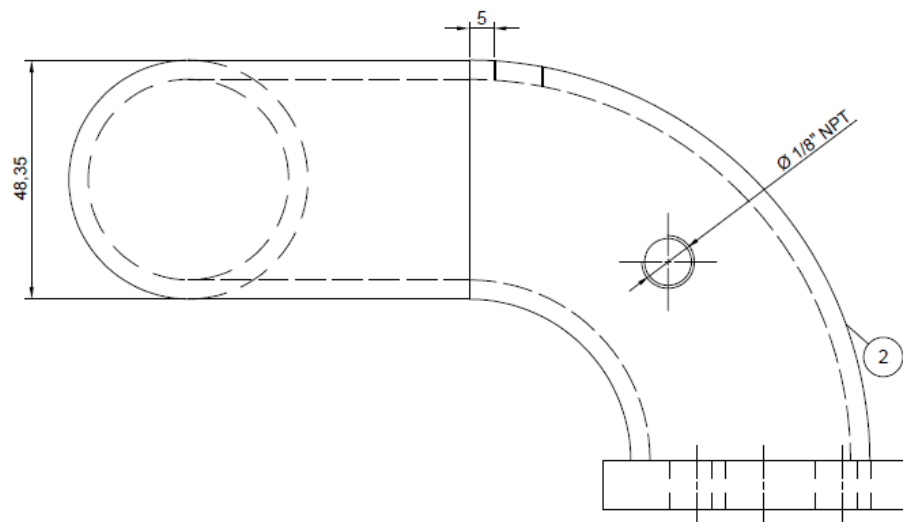


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Formato	Vista	Escalas	Unidades
A4		1:1	[mm]
N° Dibujo:			
Revisó			
Aprobó			

Nombre	Fecha	Firma
David Correa D.	15-05-2023	
Título:		
Componentes de múltiple de admisión		
Nombre del Proyecto:		
Restauración y modificación de motor monocilíndrico MWM Diesel para combustión dual con Hidrógeno gaseoso		
Sustituye a:		
Sustituye por:		

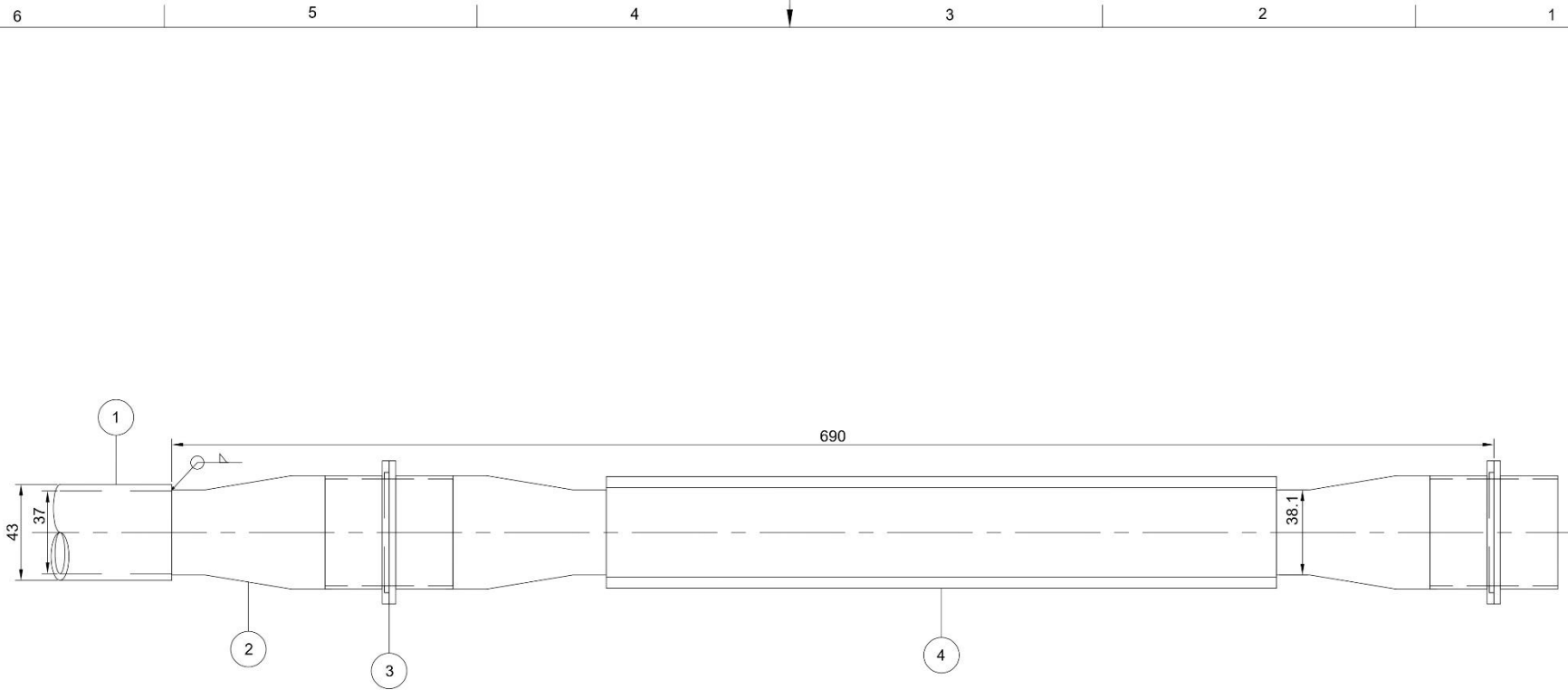
Hoja N°: 01/01



1	Codo 1 1/2"	3	Acero Inox.
1	Codo 1 1/2" roscado	2	Acero Inox.
1	Flange	1	Acero Inox.
N° de piezas:	Denominación:	Marca:	Observaciones:

Notas:		

 UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA			
Formato	Vista	Escala	Unidades
A3		1:1	[mm]
N° Dibuja:		Unidades	
		Nombre	Fecha
		David Correa D.	19-04-2023
		Revisó	
		Aprobó	
Título:			Hoja N°:
Codos de escape con flange			01/01
Nombre del Proyecto:			Sustituye a:
Restauración y modificación de motor monocilindrico MWM Diesel para combustión dual con Hidrogeno gaseoso			Sustituye por:



1	Flexible de 1.5"	4	Elemento de acero inoxidable
2	V-Band Clamp de 2"	3	Elemento de acero inoxidable
3	Reducción de 2" a 1.5"	2	Elemento de acero inoxidable
1	Tubo de escape de 1.5"	1	Tubo de acero de 3 [mm] de espesor

N° de piezas:		Denominación:		Marca:		Observaciones:			
Fecha		Firma				Escalas		Formato	
19-04-2023						1:2		A3	
				Unidades					
				{mm}		N° Dibujo:			
cape con flexible de acero inoxidable									
						Hoja N°: 01/01			
auración y modificación de motor monocilíndrico M Diesel para combustión dual con Hidrógeno oso						Sustituye a:			
						Sustituye por:			

Notas:



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA