



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



**Recuperación y puesta en marcha de motor Kubota
DG972 para operar con gas natural como
combustible**

DIEGO FÖRSTER MUÑOZ

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO
INDUSTRIAL**

PROFESOR GUÍA: Dr. German Amador

CORREFERENTE: Dr. Roberto Leiva-Illanes

Diciembre 2025



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE
MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Recuperación y puesta en marcha de motor Kubota D9972 para operar con gas natural como combustible.-

Nombre del candidato(a): Diego Benjamín Farfán Muñoz

Carrera / Grado: Ingeniería Mecánica Industrial / Licenciado

Campus: Casa Central Departamento: Ingeniería Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, German Amador Díaz, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO** contiene información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 26/02/2026

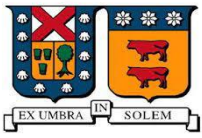
Firma: _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 26/02/2026

Firma: _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Agradecimientos

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, por su apoyo constante, por esforzarse y preocuparse siempre por mí, y por brindarme la confianza y el respaldo necesarios para alcanzar este objetivo académico. Su acompañamiento ha sido un pilar fundamental a lo largo de toda mi formación universitaria.

A mi profesor guía Germán Amador, por su orientación, dedicación y asesoramiento a lo largo de este proceso. Le agradezco especialmente por brindarme la oportunidad de desarrollar un tema relacionado con motores de combustión interna, área que me apasiona profundamente y que convirtió esta memoria en una experiencia académica sumamente enriquecedora.

A los ayudantes de laboratorio, por su colaboración y profesionalismo durante todas las etapas experimentales de este trabajo. En particular, agradezco a David y Daniel, cuya experiencia y disposición fueron esenciales para la correcta ejecución y desarrollo de los experimentos.

Finalmente, a mi pareja, por su constante apoyo, paciencia y motivación, que me acompañaron en cada etapa de este proceso y contribuyeron a mantenerme enfocado y perseverante hasta la culminación de este logro.

A todos ustedes, expreso mi más sincero reconocimiento y gratitud por haber sido parte indispensable de este proceso académico.

Resumen

El presente trabajo consiste en la recuperación y puesta en marcha del motor Kubota DG972 para su operación con gas natural, además del análisis preliminar de las modificaciones necesarias para permitir una futura conversión hacia el modo de combustión HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition). El objetivo principal fue restaurar el motor y dejarlo operativo, mientras que como objetivo complementario se evaluó la factibilidad de adaptación del sistema hacia combustión por autoignición homogénea.

La metodología incluyó el desmontaje, limpieza y evaluación dimensional de los componentes críticos del motor, el reemplazo de piezas con desgaste, y el armado siguiendo las especificaciones del fabricante. Se implementó un sistema de arranque seguro y se verificaron los parámetros mínimos requeridos para el funcionamiento, tales como compresión, chispa y suministro de gas natural. Posteriormente, se realizaron las pruebas de partida y operación, evaluando el comportamiento del motor en distintas condiciones de régimen.

También se plantearon las modificaciones y equipos requeridos para permitir que el motor pueda operar en modo HCCI, tomando como referencia estudios y experiencias previas en motores similares. Esto permitió definir la instrumentación básica y los sistemas de control necesarios para manejar las condiciones de combustión y garantizar un funcionamiento estable durante las futuras etapas experimentales.

Contenido

1.1	Motivación.....	4
1.2	Objetivos.....	4
1.3	Objetivo principal	4
1.4	Objetivos específicos	4
2	Estado del arte	5
2.1	Motores HCCI realizados en el mundo	5
3	Proceso de recuperación motor Kubota DG972	12
3.1	Reconocimiento y limpieza de componentes	12
3.1.1	Limpieza general	13
3.1.2	Reparación y recorrido de hilos.....	13
3.2	Mediciones y chequeo de componentes	14
3.2.1	medición de componentes críticos.....	14
3.3	Resultados e informe de la situación del motor.....	15
3.4	Armado motor y cambio de componentes	16
3.4.1	instalación de componentes y revisión de tolerancias	17
3.4.2	Elaboración de estructura para soporte de conjunto motor-generator	20
3.4.3	Fabricación de arnés eléctrico	21
4	Puesta en marcha	24
4.1	Revisión de estándares mínimo para su partida.....	24
4.2	Partida y verificación de un correcto funcionamiento.....	24
5	Proyectar las modificaciones necesarias para operar a futuro el motor en modo HCCI con mezclas de hidrogeno y gas natural.	26
5.1	Relación de compresión.....	26
5.2	Sensores e instrumentos de control	31
5.3	Transición a HCCI.....	32
5.4	Factibilidad técnica motor Kubota DG972.....	33
	Referencias	34

Capítulo 1

1.1 Motivación

En el marco del proyecto Fondecyt Regular N°1241883, se quiere lograr un motor HCCI, tomando como base un motor Kubota DG972, que utiliza gas natural como combustible. Dado que el motor es usado y se desconoce sus estado y posibles modificaciones que haya sufrido, es necesario examinarlo y corroborar que los componentes principales se encuentren dentro de las especificaciones que indica el fabricante. Posterior a esto, es necesario realizar una mantención y puesta en marcha.

1.2 Objetivos

1.3 Objetivo principal

Recuperar y poner en marcha el motor Kubota DG972 para operar con gas natural como combustible.

1.4 Objetivos específicos

- Realizar mantenimiento mecánico del motor Kubota DG972.
- Poner en marcha el motor Kubota DG972 operando con gas natural como combustible.
- Proyectar las modificaciones necesarias para operar a futuro el motor en modo HCCI con mezclas de hidrogeno y gas natural.

Capítulo 2

2 Estado del arte

A continuación, se presentan investigaciones realizadas en distintas partes del mundo sobre el desarrollo y funcionamiento de motores en modo HCCI. El propósito de esta revisión es reunir información técnica y experimental sobre el diseño, la instrumentación y las condiciones de operación de motores HCCI, con el fin de extraer conclusiones aplicables al diseño e implementación de un sistema HCCI en el motor Kubota DG972. Esta recopilación servirá como base para definir requisitos de modificación, estrategias de control y medidas de seguridad necesarias para lograr una operación estable y eficiente en modo HCCI.

2.1 Motores HCCI realizados en el mundo

Stenlaas (2004) inició sus investigaciones en el Lund Institute of Technology en Florida con el objetivo de evaluar en qué medida los motores HCCI podrían beneficiarse de los avances en reformadores, particularmente operando con gas reformado (RMG). Para ello, desarrolló una serie de experimentos utilizando RMG sintético y comparó el desempeño del HCCI alimentado con esta mezcla frente al funcionamiento en modo SI y al HCCI operando con hidrógeno puro. El motor utilizado es un motor Diesel con las características descritas en la Tabla 1.

Tabla 1: características motor Volvo TD100

Parámetro	Valor
Motor	Volvo TD100 6 Cilindros
Cilindrada	1600 [cm^3]
Carrera	- [mm]
Diámetro	-[mm]
Relación de compresión	17:1
Refrigeración	Por agua forzada
Temperatura de admisión	90°C a 115°C (H_2 como combustible)

La modificación principal fue la desactivación de todos los cilindros excepto uno, manteniendo los pistones de los cinco cilindros desactivados conectados al cigüeñal para generar fricción, mientras que la presión en esos cilindros era la misma que en el cárter. Reduciendo el volumen desplazado a 1.6 [L] ver Figura 5. Además, se agregaron bujías para operar en modo SI. La construcción del motor permite cambiar bielas, pistones y geometría de la cámara de combustión, ofreciendo gran flexibilidad en la relación de compresión y geometría de la cámara. En este estudio se enfocaron en cambiar la relación de compresión, manteniendo la parte superior del pistón plana para obtener una cámara aplanada. La relación

de compresión que permitió trabajar en HCCI con Hidrogeno y RMG fue de 17:1 a 1200 RPM.

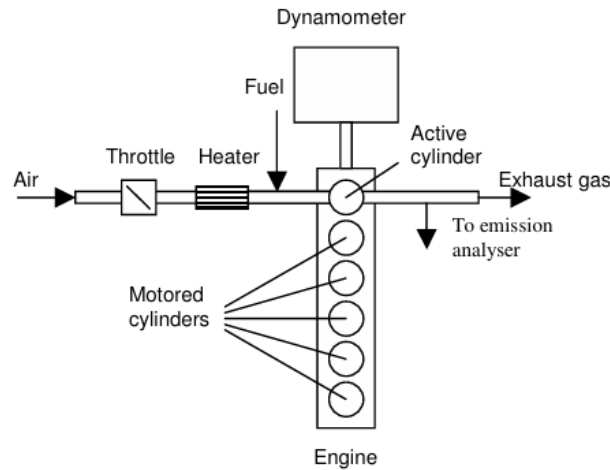


Figura 1: set up experimental con 1 cilindro en funcionamiento (O. Stenlås, 2004)

Posteriormente J.M. Gomes Antunes (2007), desarrolló una investigación en un motor de cuatro tiempos, de inyección directa y refrigerado por aire, cuyas características se presentan en la Tabla 2. Dicho motor fue adaptado con un sistema de inyección que permitía mezclar hidrógeno con el aire de admisión. El objetivo fue estudiar de manera más detallada los procesos de combustión con hidrógeno en un motor CI convencional, explorando cómo la mezcla, la proporción de hidrógeno y las condiciones de operación influían en la transición hacia comportamientos más cercanos al modo HCCI. El set up experimental, mostrado en la figura 2, incluía sensores y equipos similares a los empleados en estudios previos, permitiendo caracterizar el proceso de combustión y las emisiones de forma precisa.

Tabla 2: características motor Deutz F1L511

Parámetro	Valor
Motor	Deutz F1L511
Cilindrada	825 [cm^3]
Carrera	105 [mm]
Diámetro	100 [mm]
Relación de compresión	17:1
Refrigeración	Aire
T° de admisión	85°[C]

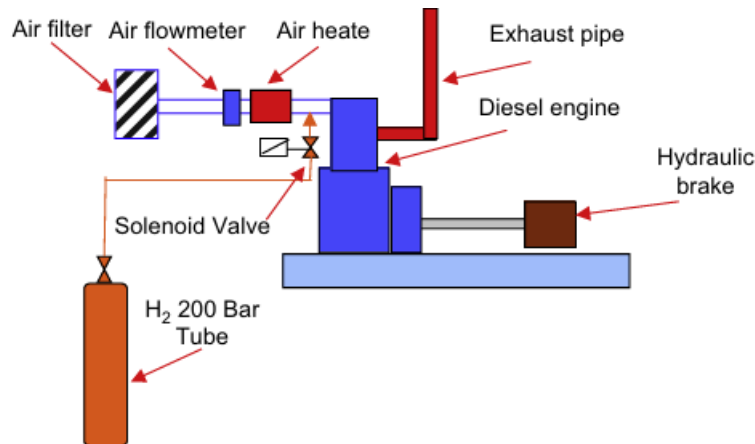


Figura 2:esquema set up experimental (J.M. Gomes Antunes, 2007)

Años más tarde, Tuan Le Anh (2018) en la Hanoi University of Science and Technology en Vietnam llevó a cabo la conversión de un motor diésel monocilíndrico de 273 [cm^3], cuyas características se muestran en la Tabla 3, de inyección directa, hacia el modo HCCI utilizando heptano como combustible. En este caso, el suministro se realizaba mediante inyección en el colector de admisión. La relación de compresión original del motor, de 20:1, permitió operar de manera estable en un rango relativamente acotado: entre 1600 y 2000 rpm y con cargas entre el 10 % y el 20 %. Sin embargo, al reducir la relación de compresión a 14,87:1 mediante el ajuste del grosor de la junta de culata, y sin recurrir a EGR, el rango operativo logró expandirse hasta el 50 % de carga y 3200 rpm. La combustión se retrasó debido a la menor presión y temperatura resultantes de una menor relación de compresión. Gracias a esta combustión retardada, se redujo la vibración del motor; por lo tanto, se pudo aumentar la carga y la velocidad del motor. El rango de operación del proceso HCCI, como se mencionó anteriormente, se amplió al 50 % y 3200 rpm a bajas relaciones de compresión, aunque a alta carga y velocidad, la señal de vibración del motor generada por el sensor de detonación fue significativamente mayor. Sin embargo, a condiciones más exigentes, como 50% de carga y 2400 rpm, la relación de compresión de 15,4:1 entregó mayor estabilidad del proceso HCCI, debido a un inicio de combustión adecuado y una menor tendencia al knocking. El montaje experimental utilizado en el estudio se muestra en el esquema presentado por el autor (Figura 3).

Tabla 3:características del motor utilizado

Parámetro	Valor
Motor	273 [cm^3]
Cilindrada	273 [cm^3]
Carrera	57 [mm]

Diámetro	78 [mm]
Relación de compresión	20:1 a 15,4:1
Inyección	Directa
Refrigeración	Aire
Temperatura de admisión	25°C

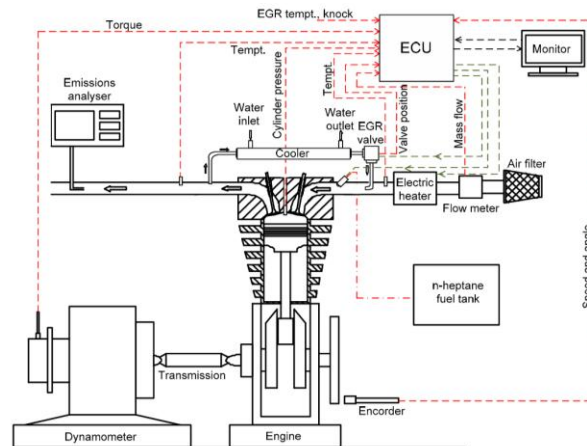


Figura 3:Esquema de instalaciones de equipos (Tuan Le Anh 1, 2018)

En 2020, Pochet (Maxime Pochet, 2020) en Bélgica desarrolló un estudio centrado en la combustión HCCI utilizando mezclas de amoníaco e hidrógeno, poniendo especial énfasis en cómo variables como la temperatura de admisión, la proporción de la mezcla, la relación de equivalencia y la recirculación de gases de escape influían en el rendimiento y las emisiones del motor. Para ello, trabajó con un motor Yanmar L100V monocilíndrico de 436 cm³ y relación de compresión de 22:1, cuyas principales características se resumen en la Tabla 4 .El set up experimental presentado en la Figura 4 compartía similitudes con el de trabajos anteriores, pero incorporaba una característica distintiva: el uso de nitrógeno como gas de dilución para controlar la temperatura de la cámara y, con ello, la autoignición de la mezcla amoníaco-hidrógeno, facilitando un mayor dominio del proceso de combustión bajo condiciones HCCI. La temperatura de admisión debió elevarse hasta 235 °C porque el amoníaco es un combustible de muy baja reactividad, con alta temperatura de autoignición. Otro factor importante fue la relación de compresión, se utilizó 22:1 dado que es el que entregaba mejor IMEP sin exceder los límites mecánicos del motor (P_{max} y M_{PRR}). Aunque operar con amoníaco puro requeriría una compresión cercana a 27:1, ese nivel generaría inestabilidad y ringing, especialmente cuando también debe funcionar con hidrógeno. Por eso se eligió 22:1 como punto óptimo y seguro.

Tabla 4:características motor Yanmar L100V

Parámetro	Valor
Motor	Yanmar L100V
Cilindrada	436 [cm ³]
Carrera	75 [mm]
Diámetro	86 [mm]
Relación de compresión	22:1
T° admisión	50°[C] a 240°[C]
Refrigeración	Aire

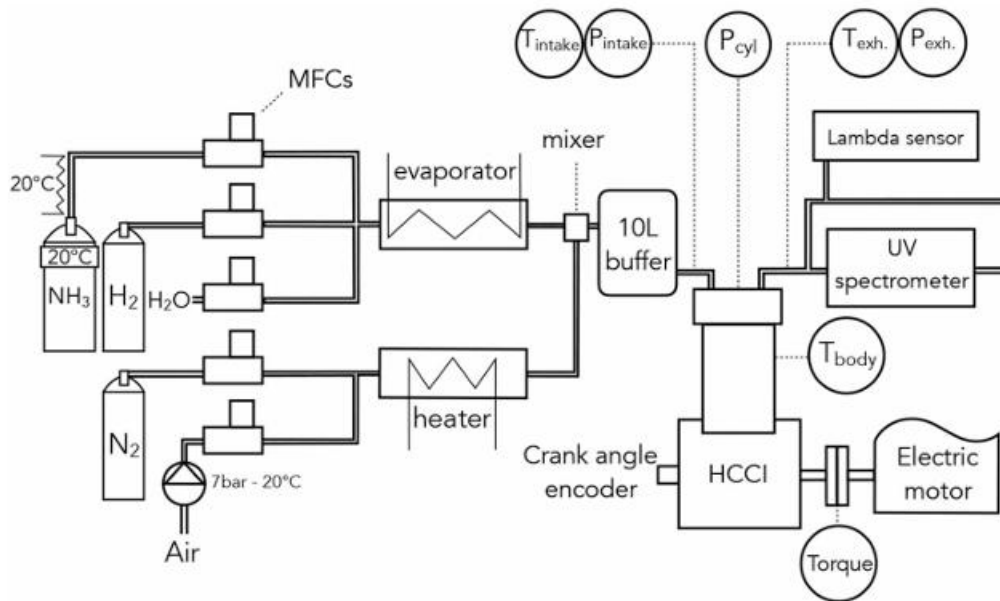


Figura 4: esquema del set up experimental (Maxime Pochet, 2020)

Posteriormente, Malaquias (2023), en la Universidad Federal de Minas Gerais en Brasil, empleó un motor AVL 5405 monocilíndrico de cuatro tiempos, originalmente diseñado para operar bajo el ciclo Otto, para lograr el modo HCCI utilizando hidrógeno. Las principales especificaciones del motor se presentan en la Tabla 5. El sistema de suministro incluía un compresor, resistencias para elevar la temperatura del aire de admisión, una bomba de alta presión, y un inyector controlado por computadora. Además, se integraron sensores de presión, lambda, encoder CKP, ECU y un completo sistema de análisis de gases. El esquema general del montaje puede observarse en la Figura 5, donde se ilustran los componentes principales utilizados en el estudio. Con este equipamiento fue posible controlar con precisión la autoignición, permitiendo estudiar el comportamiento del modo HCCI bajo diferentes condiciones de mezcla, temperatura y sincronización.

Tabla 5: Características motor AVL 5405

Parámetro	Valor
Motor	Mono cilíndrico AVL 5405
Cilindrada	
Relación de compresión	14,2:1
Diámetro	82 [mm]
Carrera	86 [mm]
Inyección	Directa
Refrigeración	Agua
Temperatura de admisión	--

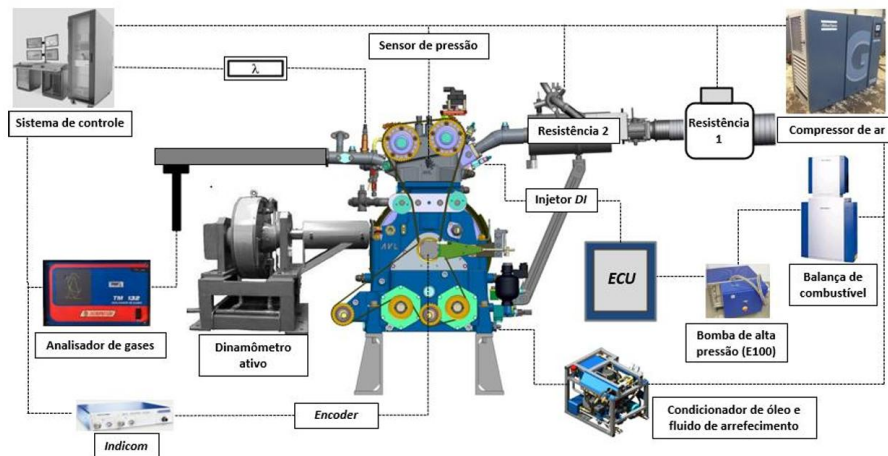


Figura 5:esquema ilustrativo con componentes principales (Malaquias, 2023)

Finalmente, Morales Rojas (2024), desde el Grupo de Investigación e Innovación en Energía de Colombia, modificó un motor diésel Lombardini 25 LD 425-2 para permitir la combustión HCCI utilizando hidrógeno como parte del estudio. Las principales características del motor se resumen en la Tabla 6. La relación de compresión se redujo desde 19:1 hasta 15,6:1 mediante el aplanamiento de la cavidad del pistón, con el fin de evitar detonación y disminuir las emisiones asociadas al uso de hidrógeno, siguiendo conclusiones de trabajos anteriores. El motor fue equipado con un set up completo que incluía sensores de presión de cámara, CKP, PMS, presión absoluta, termocuplas en admisión y escape, caudalímetro, analizador de NOx, sensor lambda y una plataforma de monitoreo y control basada en LabView. El esquema general del montaje experimental puede verse en la Figura 6, donde se muestran los principales componentes integrados en el estudio. Con estas modificaciones se logró ejecutar de manera controlada el modo HCCI, evaluando emisiones, estabilidad de combustión y comportamiento general del motor bajo diferentes condiciones experimentales.

Tabla 6: características motor ALombardini

Parámetro	Valor
Motor	Lombardini 25 LD425-2
Cilindrada	851 [cm ³]
Carrera	75 [mm]
Diámetro	85 [mm]
Relación de compresión	15,6:1
Refrigeración	Aire forzado
Temperatura admisión	--

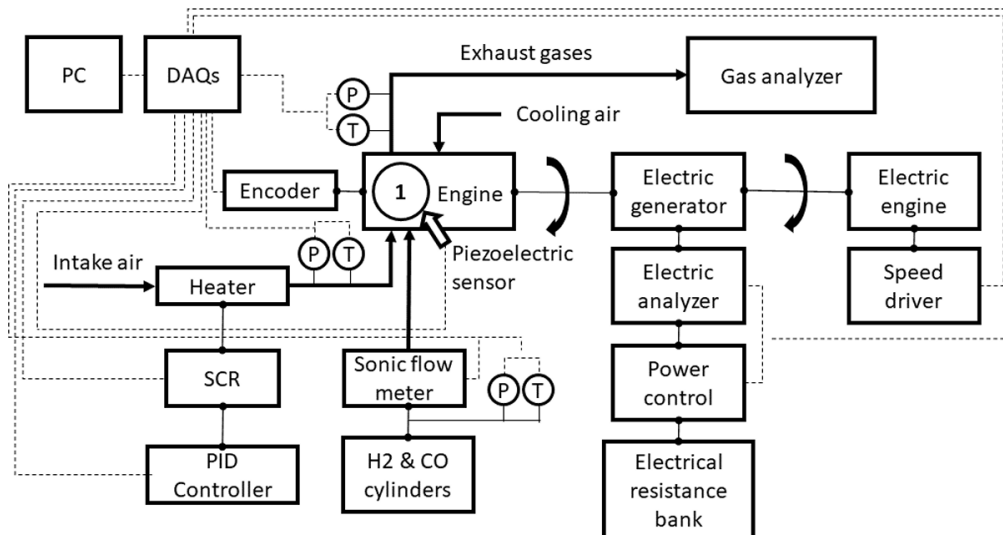


Figura 6: esquema experimental del set up (Andrés David Morales Rojas, 2024)

Capítulo 3

3 Proceso de recuperación motor Kubota DG972

En este capítulo se describen las etapas necesarias para la recuperación mecánica del motor Kubota DG972, las cuales se desarrollaron con el objetivo de asegurar un funcionamiento fiable antes de avanzar hacia las fases experimentales del proyecto. Estas etapas incluyen el reconocimiento del estado inicial del motor, la limpieza y reacondicionamiento de sus componentes, la verificación dimensional y la evaluación de aquellos elementos que pudiesen comprometer su operación.

La ejecución de este proceso previo resulta fundamental para garantizar que las mediciones, modificaciones y ensayos posteriores se realicen sobre una base mecánica sólida, libre de fallas que puedan afectar la repetibilidad de los resultados o la integridad del conjunto motor.

3.1 Reconocimiento y limpieza de componentes

Inicialmente, se constató que el motor se encontraba parcialmente desarmado, tal como se muestra en la Figura 7, por lo que fue necesario realizar un reconocimiento general de sus componentes. Este procedimiento tuvo como finalidad verificar la presencia de todas las piezas, evaluar su estado superficial y asegurar que no existieran elementos faltantes o dañados.

Previo al inicio de la limpieza, se reunieron los implementos necesarios y se habilitó un espacio de trabajo en el laboratorio (Box 3). Las piezas del motor fueron organizadas y clasificadas según su función y ubicación dentro del sistema, facilitando su posterior inspección y armado. Entre los implementos de limpieza utilizados se incluyeron desengrasante de alta acción, diluyente, brochas, WD-40, un set de machos para recorrido de hilos y paños de taller.



Figura 7: estado inicial motor

3.1.1 Limpieza general

En esta etapa se buscaba eliminar toda contaminación presente en los distintos componentes, como se aprecia en la Figura 8. El procedimiento fue el siguiente: primero, se rociaron todos los componentes con desengrasante para desprender la grasa y el aceite acumulado. Luego, se enjuagaron con agua y se repitió la aplicación de desengrasante. Este proceso se realizó en los pistones, superficies, bielas y culata. Dependiendo del componente, fue necesario repetir el procedimiento más de una vez. Posteriormente, tras el enjuague, se procedió al secado y a la lubricación de las piezas, con el fin de evitar posibles corrosiones a futuro.



Figura 8: Estado inicial de Componentes principales

3.1.2 Reparación y recorrido de hilos

Dado que el motor permaneció desarmado durante varios meses, se produjo corrosión en algunas zonas. El montaje de pernos en estas condiciones puede generar problemas, especialmente en componentes críticos como la culata. Una incorrecta aplicación del par de apriete puede comprometer la unión entre la culata y el bloque, lo que podría inducir fugas de compresión o refrigerante, deformaciones en la culata e incluso la rotura de los pernos.

Antes de iniciar el recorrido de hilos, fue necesario proteger y aislar el interior del motor para evitar su contaminación con residuos metálicos y óxido. Para ello, se utilizaron paños de taller. Una vez asegurada la aislación del interior, se procedió a aplicar WD-40 en todas las roscas para aflojar el óxido. Luego, utilizando machos M10, se recorrieron cada uno de los

hilos. Posteriormente, se aplicó nuevamente WD-40 con el fin de extraer todos los residuos presentes en el interior de las roscas. Este procedimiento se realizó en todas las roscas del motor que presentaban indicios de oxidación, incluyendo aquellas correspondientes a accesorios como el, el alternador, volante y múltiple de escape (a este último fue necesario cambiar todos sus prisioneros).

3.2 Mediciones y chequeo de componentes

Con el fin de evaluar el estado real del motor, se realizaron mediciones en los componentes críticos, tales como anillos, pistones y cigüeñal. Los instrumentos de medición utilizados, junto con su resolución, se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7: resolución de instrumentos de medición

Instrumento	Resolución [mm]
Pie de metro	0,01
Reloj comparador	0,001
Filer	0,001

3.2.1 medición de componentes críticos

Las mediciones se realizaron tomando como referencia los procedimientos y tolerancias establecidos por el fabricante en el manual de taller del motor Kubota DG972. La primera medición efectuada correspondió a la holgura lateral del cigüeñal (side clearance), la cual fue determinada utilizando un reloj comparador. El valor obtenido fue de 0,30[mm], encontrándose dentro del rango especificado por el fabricante, comprendido entre 0,15[mm] y 0,31[mm].

Para evaluar el desgaste de los anillos de pistón, se midió la apertura de los mismos (end gap) dentro del cilindro. Un exceso en esta holgura genera una disminución de la compresión, afectando directamente el rendimiento del motor. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 8, donde se observa que los valores obtenidos superan las especificaciones técnicas del fabricante, evidenciando un desgaste significativo respecto a las condiciones nominales.

Tabla 8: medición de end gap

Cilindro	Especificaciones	C1	C2	C3
Primer anillo	0,15 a 0,35 [mm]	0,48 [mm]	0,50 [mm]	0,48 [mm]
Segundo anillo	0,30 a 0,45 [mm]	0,56 [mm]	0,54 [mm]	0,54 [mm]

Tercer anillo	0,20 a 0,70 [mm]	0,72 [mm]	0,66 [mm]	0,68 [mm]
---------------	------------------	-----------	-----------	-----------

3.3 Resultados e informe de la situación del motor

El proceso de limpieza y desmontaje de los componentes permitió evidenciar diversas condiciones que comprometían el correcto funcionamiento del motor. En particular, se detectó el deterioro significativo de los retenes de válvula, tal como se muestra en la Figura 9, lo que motivó el desarme completo de la cabeza del block (culata) para su inspección y reacondicionamiento.

Durante este procedimiento, se constató que tanto las válvulas como sus respectivos asientos presentaban una considerable acumulación de óxido. Esta condición resulta especialmente crítica, ya que el óxido impide un asentamiento adecuado de las válvulas, comprometiendo el sellado hermético de la cámara de combustión y generando pérdidas de compresión. Además, la presencia de óxido acelera el desgaste de los asientos y de las propias válvulas, reduciendo su vida útil.

Otro riesgo asociado a este fenómeno es el desprendimiento de partículas de óxido, las cuales pueden ingresar al cilindro y provocar daños en las paredes del mismo, en el pistón o en los anillos, en la Figura 10 se observa el estado de los asientos de válvulas al momento del desmontaje, evidenciando la magnitud del deterioro superficial.

El análisis realizado en esta etapa resultó fundamental, ya que permitió definir con claridad qué componentes debían ser reemplazados, cuáles se encontraban ausentes y cuáles podían ser reutilizados tras su reacondicionamiento. A partir de esta evaluación, se elaboró un listado detallado de los repuestos necesarios para asegurar el correcto armado y funcionamiento del motor, el cual se presenta en la Tabla 9.



Figura 9: Retenes de válvulas



Figura 10: Asientos de válvulas

Tabla 9: listado de repuestos

Set de anillos	3 [unidades]
Empaquetadura culata	1 [unidad]
Empaquetadura tapa de válvulas	1 [unidad]
Set de retenes de válvulas	1 [unidad]
Cables de partida	3 [m]
Conector sensor CKP	1 [unidad]
Cable calibre 12	24 [m]
Radiador con mangueras	1 [unidad]
Aceite 10W-30	1 [unidad]
Filtro de aceite	1 [unidad]
Chapa de partida	1 [unidad]
Flexible de escape 2[in]	1 [unidad]
Abrazaderas de escape 2[in]	2 [unidad]
Codos de escape 2[in]	2 [unidad]
Prisioneros M5x1.25	5 [unidad]

3.4 Armado motor y cambio de componentes

Para el armado del motor se utilizó como referencia principal el manual de taller proporcionado por el fabricante Kubota, respetando en todo momento los procedimientos, secuencias y valores de apriete especificados. Asimismo, todos los componentes mecánicos críticos, o aquellos fundamentales para el correcto funcionamiento del motor, fueron reemplazados por repuestos originales, con el objetivo de asegurar compatibilidad dimensional, calidad y durabilidad del conjunto.

3.4.1 instalación de componentes y revisión de tolerancias

Cabeza del block (culata)

Debido al deterioro detectado en los retenes de válvula y a la presencia de óxido tanto en las válvulas como en sus asientos, fue necesario realizar el desarme completo de la culata para su limpieza y reacondicionamiento.

Para el desmontaje de las válvulas se utilizó una prensa tipo C, la cual permitió comprimir los resortes de válvula de forma controlada. Una vez comprimido el resorte, se procedió a retirar los seguros que fijan la válvula y el resorte al casquillo. Con los seguros retirados, la válvula quedó libre, pudiendo ser extraída desde el vástago.

Cada conjunto compuesto por válvula, resorte y seguros fue etiquetado y organizado según su posición original en la culata. Este procedimiento es relevante, ya que, aunque no se conozca con certeza el historial completo del motor, es posible que algunas piezas hayan desarrollado patrones de desgaste conjunto. Al reinstalarlas en su posición original se favorece un mejor acoplamiento y se reduce el riesgo de desajustes posteriores. Este procedimiento se repitió para los tres conjuntos de válvulas presentes en la culata.

Una vez retiradas las válvulas, se procedió a la extracción de los retenes utilizando un destornillador de paleta, protegiendo su punta con un paño de taller para evitar daños en los alojamientos. Posteriormente, se realizó una limpieza exhaustiva de la culata empleando brocha, diluyente y desengrasante, asegurando la remoción completa de óxido, residuos de aceite y carbonilla.

Con la culata completamente limpia y los componentes verificados, se dio inicio al proceso de armado, el cual incluyó la instalación de nuevos retenes, el asentamiento de válvulas y el posterior montaje de los resortes y seguros en su posición original.

El montaje de los nuevos retenes de válvula se realizó aplicando previamente una fina capa de aceite tanto en el alojamiento como en el propio retén, con el fin de facilitar su instalación y evitar daños por fricción. Gracias a esta lubricación, los retenes pudieron instalarse manualmente, sin necesidad de herramientas especiales.

Posteriormente, se procedió al asentamiento de las válvulas de admisión y escape, proceso fundamental para garantizar un sellado hermético entre la válvula y su asiento, condición indispensable para asegurar una correcta compresión del motor.

Inicialmente, se aplicó pasta esmeril de grano grueso sobre la superficie de contacto de la válvula. El asentamiento se realizó mediante un movimiento giratorio alternado, acompañado de ligeros impactos, utilizando diluyente como lubricante para facilitar el proceso. Una vez completada esta etapa, se repitió el procedimiento utilizando pasta esmeril de grano fino, con el objetivo de lograr un acabado más preciso y uniforme.

Finalizado el asentamiento, se limpiaron cuidadosamente las superficies de las válvulas y de sus asientos para eliminar cualquier residuo de pasta. Para verificar la calidad del contacto, se empleó azul de Prusia, el cual fue aplicado sobre la cara de la válvula. Al colocarla en su asiento y girarla levemente, se observó la transferencia del pigmento, siendo una marca continua y homogénea indicativa de un correcto asentamiento y un sellado adecuado.

Montaje del conjunto biela–pistón:

El armado del motor se realizó siguiendo un criterio de montaje desde el interior hacia el exterior. En primer lugar, se procedió a la instalación de los conjuntos biela–pistón. Previamente, fue necesario instalar los anillos del pistón, los cuales se disponen en el siguiente orden: el primer anillo corresponde al cortafuego, el segundo al anillo de compresión y el tercero al anillo aceitero.

Antes del montaje, se verificaron las holguras de los anillos dentro del cilindro, asegurando que los valores se encontraran dentro de las especificaciones del fabricante, tal como se presenta en las Tablas 10 y 11. Posteriormente, los anillos fueron posicionados angularmente respecto al pasador del pistón, considerando una separación de 120° para el anillo cortafuego, 120° para el anillo de compresión y 270° para el anillo aceitero, con el fin de minimizar la alineación de las aperturas y reducir pérdidas de compresión.

Para facilitar el montaje, el motor fue posicionado de forma horizontal. Los pernos de biela fueron ajustados con un torque de 30[Nm], de acuerdo con las especificaciones del fabricante. Una vez instalados los tres conjuntos biela–pistón, se verificó que el cigüeñal pudiera girar libremente, sin presentar restricciones ni puntos duros, confirmando un montaje correcto.

Una vez completada la instalación del conjunto móvil, se procedió al montaje del cárter. Para ello, se aplicó una capa delgada y uniforme de sellador Loctite 998 en el perímetro de la superficie de contacto entre el block y la tapa de distribución. Posteriormente, los pernos del cárter fueron ajustados siguiendo un patrón cruzado y con un torque de 10[Nm], asegurando un sellado adecuado y uniforme.

Tabla 10: medición ranura dentro del cilindro

Cilindro	N° anillo	Especificación fabrica	Medición
Numero 1	1	0,15 a 0,35 [mm]	0,279 [mm]
	2	0,30 a 0,45 [mm]	0,356 [mm]
	3	0,20 a 0,70 [mm]	0,610 [mm]
Numero 2	1	0,15 a 0,35 [mm]	0,229 [mm]
	2	0,30 a 0,45 [mm]	0,356 [mm]
	3	0,20 a 0,70 [mm]	0,533 [mm]
Numero 3	1	0,15 a 0,35 [mm]	0,279 [mm]
	2	0,30 a 0,45 [mm]	0,356 [mm]
	3	0,20 a 0,70 [mm]	0,584 [mm]

Tabla 11: mediciones de espacio libre en las ranuras del pistón

Cilindro	N° anillo	Especificación fabrica	Medición
Pistón 1	1	0,080 a 0,12 [mm]	0,089 [mm]
	2	0,065 a 0,10 [mm]	0,063 [mm]
	3	0,060 a 0,15 [mm]	0,073 [mm]
Pistón	1	0,080 a 0,12 [mm]	0,089 [mm]
	2	0,065 a 0,10 [mm]	0,063 [mm]
	3	0,060 a 0,15 [mm]	0,076 [mm]
Pistón 3	1	0,080 a 0,12 [mm]	0,089 [mm]
	2	0,065 a 0,10 [mm]	0,089 [mm]
	3	0,060 a 0,15 [mm]	0,076 [mm]

Una vez finalizada la instalación del conjunto móvil y del cárter, se procedió al montaje de la cabeza del block (culata). En primer lugar, se colocó la empaquetadura de culata sobre el block, asegurando su correcta orientación y alineación con los conductos de refrigeración y lubricación.

Posteriormente, la culata fue posicionada cuidadosamente sobre el block, evitando desplazamientos que pudieran dañar la empaquetadura. El apriete de los pernos de culata se realizó siguiendo estrictamente la secuencia y los valores de torque especificados en el manual de taller del fabricante.

El procedimiento de torque fue ejecutado en dos ciclos consecutivos. En la primera aplicación, la empaquetadura se acomoda a las superficies de contacto, expulsando el aire atrapado en su material. La segunda aplicación de torque permite asegurar una correcta compresión de la junta, evitando falsos aprietes y garantizando un sellado uniforme de la cámara de combustión. Este procedimiento es fundamental para prevenir fugas de gases, refrigerante o aceite durante la operación del motor.

Una vez instalada la culata, se continuó con el montaje de los accesorios del motor, entre los que se incluyen el alternador, el motor de partida, las correas, el volante de inercia y las bobinas de encendido.

La instalación de las mangueras del sistema de refrigeración se realizó una vez que el motor fue fijado de forma definitiva sobre su estructura de soporte. Para el sistema de refrigeración se utilizó un radiador de mayor capacidad a la requerida por el motor, debido a que era el disponible en el laboratorio. Esta elección no representa una limitación para el funcionamiento del motor y, por el contrario, contribuye a una mayor capacidad de disipación térmica durante la operación.

Con esto se dio por finalizado el proceso de armado mecánico del motor, quedando el conjunto preparado para su montaje sobre la estructura y para la posterior implementación del sistema eléctrico de arranque.

3.4.2 Elaboración de estructura para soporte de conjunto motor-generator

Con el objetivo de asegurar un soporte estructural adecuado para el motor y el generador, se diseñó y fabricó una estructura metálica capaz de soportar tanto el peso estático del conjunto como las vibraciones generadas durante su funcionamiento. El peso total del conjunto motor–generador se estimó en aproximadamente 120 kg, por lo que la estructura debía garantizar rigidez suficiente sin comprometer la estabilidad del sistema.

La estructura fue fabricada a partir de perfiles de acero cuadrados de sección 40×40×3 mm, seleccionados por su adecuada relación entre resistencia mecánica, rigidez y facilidad de fabricación. Previo a la construcción, se desarrolló un modelo tridimensional en software CAD, el cual permitió definir las dimensiones generales, los puntos de apoyo y la disposición de los elementos estructurales. El modelo desarrollado se muestra en la Figura 11.

En la base de la estructura se instalaron cuatro soportes de motor, cuya función principal es la reducción y amortiguación de las vibraciones transmitidas al suelo y a la estructura del laboratorio. Estos soportes fueron fijados a la estructura mediante tuercas soldadas en el interior de los perfiles, solución que permite un montaje firme y facilita el desmontaje del conjunto en caso de ser necesario.

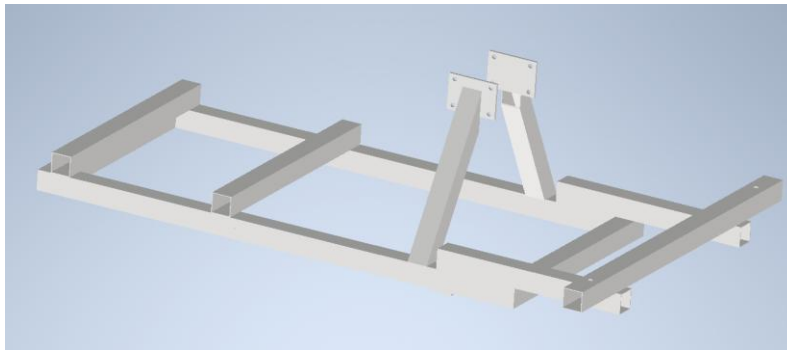


Figura 11: modelo CAD de estructura para soporte del conjunto motor-generator

Una vez fabricada la estructura, el motor y el generador fueron montados y alineados cuidadosamente sobre ella, asegurando la correcta posición relativa entre ambos equipos, tal como se muestra en la Figura 12. Esta alineación es fundamental para evitar esfuerzos adicionales en el eje y posibles fallas prematuras durante la operación. La estructura resultante proporcionó una base estable y segura para las pruebas de puesta en marcha y operación del motor.



Figura 12: montaje del conjunto motor–generador en el banco de pruebas

3.4.3 Fabricación de arnés eléctrico

Por razones de seguridad operacional, el arranque del motor debía realizarse desde fuera de la cabina de investigación (Box 3). Para ello, se diseñó y fabricó un arnés eléctrico que permitiera accionar el motor de partida y alimentar el módulo de encendido de manera segura y controlada.

Previo a la fabricación, se desarrolló un diagrama eléctrico del sistema de arranque utilizando software CAD, el cual permitió definir de forma clara los circuitos de control y de potencia, así como los elementos de protección y conmutación necesarios. El diagrama eléctrico del arnés diseñado se presenta en la Figura 13.

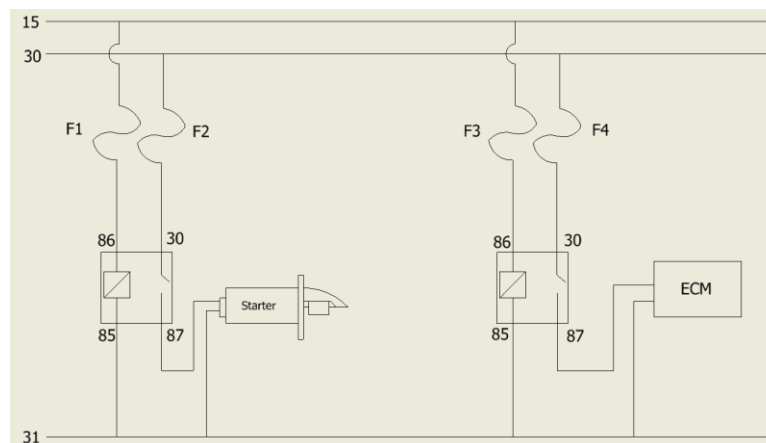


Figura 13:diagrama eléctrico sistema de arranque

Selección de conductores:

Para el diseño del arnés eléctrico se distinguieron dos tipos de circuitos: circuitos de control y señal, y circuitos de potencia.

Circuito de control y señal: dado que la corriente que circula es menor a 5 [A] se utilizó cable automotriz calibre 12 AWG para las señales de mando y bobinas de relés cuya sección es aproximadamente 3,31 [mm²], en base a lo estipulado por la norma SEC, mostrada en la Figura 14. ((SEC), 2021)

Sección nominal [mm ²]	Sección en sistema americano [AWG] ó [kcmil]	Resistencia eléctrica máxima en corriente continua a 20 °C [ohm/km]		
		Conductores sólidos (a)	Conductores concéntricos, comprimidos o compactados (a)	Conductores flexibles (b)
1,31	16	13,5	13,7	14,9
1,5	-	12,1	12,1	13,3
2,08	14	8,45	8,62	9,58
2,5	-	7,41	7,41	7,98
3,31	12	5,31	5,43	5,98
4	-	4,61	4,61	4,95
5,26	10	3,34	3,41	3,76
6	-	3,08	3,08	3,30
8,37	8	2,10	2,14	2,28
10	-	1,83	1,83	1,91
13,3	6	-	1,35	1,46
16	-	-	1,15	1,21
21,1	4	-	0,85	0,92
25	-	-	0,73	0,78
26,7	3	-	0,67	0,73
33,6	2	-	0,53	0,58
35,0	-	-	0,52	0,55
42,4	1	-	0,42	0,46
50,0	-	-	0,39	0,39
53,5	1/0	-	0,34	0,36
67,4	2/0	-	0,27	0,28
70	-	-	0,27	0,27
85	3/0	-	0,21	0,23
95	-	-	0,19	0,21
107	4/0	-	0,17	0,18
120	-	-	0,15	0,16

Figura 14: norma de conductores blandos ((SEC), 2021)

Circuito de potencia (alimentación de arranque): Considerando que la distancia entre la batería y el motor de partida es inferior a 1 m y que el motor no estaría sometido a múltiples ciclos de arranque consecutivos, se utilizó cable de batería de sección 21[mm²], correspondiente a calibre AWG #4. Esta sección permite conducir corrientes elevadas durante el arranque sin provocar caídas de tensión significativas ni sobrecalentamiento del conductor.

Elementos de conmutación y protección:

Para la conmutación de los distintos circuitos se emplearon relés automotrices, seleccionados por su robustez, disponibilidad y facilidad de reemplazo. Cada relé fue protegido mediante un fusible independiente, con el objetivo de aislar fallas y proteger tanto los conductores como los equipos asociados.

El dimensionamiento de los fusibles se realizó siguiendo el criterio utilizado en la industria automotriz, el cual establece que el valor nominal del fusible debe ser superior a la corriente máxima de operación del circuito, incorporando un factor de seguridad que permita tolerar

picos de corriente transitorios. Para el cálculo de la corriente de cada fusible se utilizó la expresión presentada en la Ecuación (1).

$$I_{fusible} = I_{Circuito\ max} \times 1,25 \quad (1)$$

En la Tabla 12 se presenta una comparación entre las corrientes máximas estimadas para cada circuito, los valores calculados para la protección y los valores nominales de fusibles seleccionados comercialmente. En el caso particular del fusible asociado al solenoide del motor de partida, el valor seleccionado se basó en prácticas habituales y estándares ampliamente utilizados en la industria automotriz.

Tabla 12: dimensionamiento de fusible

Circuito a proteger	Corriente máxima [A]	Corriente de fusible [A]	Corriente nominal fusible [A]
Relé (F1 Y F3)	0,5	0,625	5,0
ECM (F4)	5,5	6,875	7,5
Solenoide motor de partida (F2)	-	-	30,0

Montaje y protección del arnés:

Todo el cableado del arnés fue protegido mediante tubo corrugado, con el fin de evitar daños mecánicos y exposición directa a agentes externos. Los conductores fueron asegurados mediante amarras plásticas, garantizando un orden adecuado y evitando interferencias con componentes móviles o superficies calientes del motor.

Se utilizaron terminales de batería de acero inoxidable para minimizar la corrosión a largo plazo. Las conexiones a masa se realizaron asegurando una adecuada superficie de contacto, con el objetivo de reducir la resistencia eléctrica y evitar caídas de tensión que pudieran afectar el funcionamiento del sistema de arranque.

Con la fabricación e instalación del arnés eléctrico se garantizó un sistema de arranque seguro, confiable y acorde a los requerimientos del laboratorio, dejando el motor en condiciones de avanzar hacia la etapa de puesta en marcha.

Capítulo 4

4 Puesta en marcha

En este capítulo se describe el procedimiento seguido para la puesta en marcha del motor Kubota DG972, una vez finalizado el proceso de recuperación mecánica, montaje de componentes y fabricación del sistema de arranque. Se presentan las verificaciones previas necesarias para asegurar condiciones mínimas de operación, así como las pruebas de arranque y evaluación del comportamiento inicial del motor.

4.1 Revisión de estándares mínimo para su partida

Para que un motor de combustión interna pueda arrancar y operar de forma estable, es necesario que se cumplan al menos tres condiciones básicas: presencia de chispa, adecuada compresión en los cilindros y suministro de combustible.

Con el fin de verificar estas condiciones, se realizaron las pruebas correspondientes, obteniéndose los siguientes resultados. Los tres cilindros del motor presentaron una presión de compresión de 170 psi, valor que indica un estado adecuado de sellado del conjunto pistón-anillos-válvulas. Asimismo, se comprobó la presencia de chispa en los tres cilindros, verificando el correcto funcionamiento del sistema de encendido.

En cuanto al suministro de combustible, se midió la presión de gas natural en la línea de alimentación, obteniéndose un valor de 0,02 bar, suficiente para permitir el arranque y la operación inicial del motor. En base a estos resultados, se concluyó que el motor cumplía con los requisitos mínimos necesarios para su puesta en marcha.

4.2 Partida y verificación de un correcto funcionamiento

Una vez verificadas las condiciones mínimas de operación, se procedió al arranque del motor. Para facilitar la primera partida, se utilizó un comburente en spray, aplicado únicamente durante el primer intento de arranque. Tras esta primera activación, el motor logró operar de manera autónoma sin necesidad de asistencia adicional.

Posteriormente, el motor fue mantenido en funcionamiento durante algunos minutos, permitiendo la estabilización de sus parámetros básicos de operación. Luego, se realizaron nuevas partidas utilizando exclusivamente gas natural como combustible.

Durante estas pruebas se observó la ocurrencia de un fenómeno de backfire (explosión hacia el múltiple de admisión), el cual se presentó únicamente durante el momento de la partida.



Una vez superada esta etapa, el motor operó de manera estable, sin presentar fallas durante el funcionamiento continuo.

El motor mostró un comportamiento adecuado tanto a bajas como a altas revoluciones, respondiendo correctamente frente a variaciones bruscas en la apertura de la mariposa de admisión. Estos resultados permitieron confirmar el correcto funcionamiento del sistema mecánico, del sistema de encendido y del suministro de combustible, validando así el proceso de recuperación y armado realizado en las etapas previas.

Capítulo 5

5 Proyectar las modificaciones necesarias para operar a futuro el motor en modo HCCI con mezclas de hidrógeno y gas natural.

En este capítulo se analizan y proponen las modificaciones necesarias para permitir que el motor Kubota DG972 opere, en una etapa futura, bajo el modo de combustión HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) utilizando mezclas de gas natural e hidrógeno. A partir de la revisión del estado del arte y de las características propias del motor en estudio, se identifican las principales limitaciones técnicas asociadas a este tipo de combustión, así como los requerimientos mecánicos y de control necesarios para su implementación.

El funcionamiento en modo HCCI se caracteriza por la autoignición de una mezcla aire–combustible homogénea, proceso altamente sensible a las condiciones termodinámicas dentro del cilindro. En consecuencia, variables como la presión, la temperatura y la relación de compresión juegan un rol determinante en el inicio y estabilidad de la combustión, diferenciándose de manera significativa respecto a los motores de encendido por chispa convencionales.

Considerando estas exigencias, el primer aspecto a evaluar para la conversión del motor Kubota DG972 hacia el modo HCCI es su relación de compresión, ya que el valor actual resulta insuficiente para alcanzar condiciones de autoignición estable con gas natural. Por este motivo, a continuación, se analiza en detalle la relación de compresión del motor y se estudian las modificaciones mecánicas necesarias para incrementarla.

5.1 Relación de compresión

La relación de compresión constituye uno de los parámetros más relevantes para el funcionamiento de un motor en modo HCCI, ya que el inicio de la autoignición depende directamente de las condiciones de presión y temperatura alcanzadas durante la compresión de la mezcla aire–combustible. A diferencia de los motores de encendido por chispa, en los cuales la combustión puede iniciarse de manera controlada mediante un sistema de ignición, en HCCI la combustión es gobernada por la evolución termoquímica de la mezcla, lo que exige valores de relación de compresión considerablemente más elevados.

Diversos estudios reportados en la literatura coinciden en que relaciones de compresión cercanas o superiores a 15:1 permiten alcanzar condiciones adecuadas de autoignición para distintos combustibles gaseosos y líquidos, manteniendo un compromiso entre estabilidad de combustión y sollicitaciones mecánicas. Con el objetivo de establecer un criterio técnico para la selección de la relación de compresión objetivo, la Tabla 13 resume las principales características de motores utilizados en investigaciones HCCI reportadas en el estado del arte, considerando parámetros como tipo de motor, combustible, sistema de inyección y relación de compresión.

Tabla 13:características principales de motores utilizados para funcionamiento en HCCI

Proyecto	Tipo de motor	RC	Inyección	Combustible	Temperatura de admisión	Geometría	Refrigeración
(O. Stenlås, 2004)	Volvo TD100 6Cil	17:1	Directa	Hidrógeno	90°C a 115°C	--	Agua forzada
(J.M. Gomes Antunes, 2007)	Deutz F1L511	17:1	Directa	Hidrógeno	85°C	Subcuadrado	Aire
(Tuan Le Anh 1, 2018)	Diesel	20:1 – 14,87:1	Directa	Heptano	25°C	Supercuadrado	Aire
(Maxime Pochet, 2020)	Yanmar L100V	23:1	Directa	Amoniac o e hidrogeno	50°C a 240°C	Supercuadrado	Aire
(Malaquias, 2023)	Mono cilíndrico AVL 5405	14,2:1	Directa	Hidrógeno	--	Subcuadrado	Agua forzada
(Andrés David Morales Rojas, 2024)	Lombardini 25 LD425-2	15,6:1	Directa	Hidrógeno	--	Subcuadrado	Aire forzado

De la información presentada en la Tabla 14 se observa una clara tendencia a operar con relaciones de compresión comprendidas entre 14:1 y 17:1, independientemente del tipo de motor o combustible empleado. En particular, varios estudios que utilizan hidrógeno o mezclas con hidrógeno reportan valores cercanos a 15:1 como un punto de operación estable, lo que permite controlar el inicio de combustión sin generar tasas excesivas de subida de

presión. En base a esta evidencia, se adopta una relación de compresión objetivo del orden de 15:1 como referencia inicial para el motor Kubota DG972.

Actualmente, el motor en estudio presenta una relación de compresión (RC) calculada de aproximadamente 9,96:1, valor que fue determinado a partir de los parámetros indicados en la Tabla 14. Al comparar este resultado con el valor especificado por el fabricante, correspondiente a una relación de compresión de 9,2:1, se observa una diferencia significativa. Sin embargo, pese a ser superior al valor nominal del fabricante, la relación de compresión obtenida se encuentra aún por debajo de la requerida para cumplir con los objetivos planteados en el presente trabajo.

Tabla 14: mediciones para el cálculo de RC

Profundidad libre entre pistón y block	1,35 [mm]
Diámetro del cilindro	74 [mm]
Carrera	74,15 [mm]
Espesor de empaquetadura	0,4 [mm]
Diámetro del agujero empaquetadura	75 [mm]

El aumento de la relación de compresión puede lograrse, en términos generales, mediante distintas estrategias: reducción del volumen muerto a través de mecanizado de culata o block, aumento de la carrera mediante modificación del conjunto biela-cigüeñal, incremento del diámetro del cilindro o modificación de la geometría del pistón. Sin embargo, debido a la configuración constructiva del motor Kubota DG972, varias de estas alternativas resultan poco viables. La culata presenta una geometría plana sin cámara de combustión, lo que limita significativamente las posibilidades de mecanizado, y el block ofrece un margen reducido para rectificado que no permite alcanzar incrementos relevantes de relación de compresión, tal como se muestra en la Figura 15 y 16 respectivamente.



Figura 15: construcción de cabeza de block

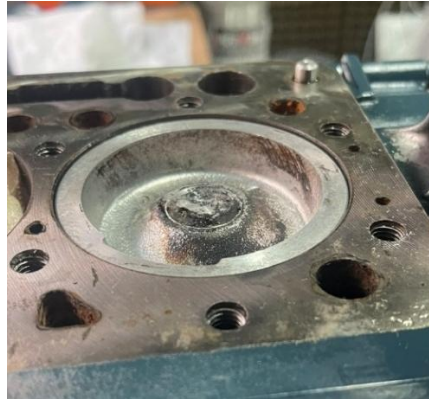


Figura 16: construcción del block

Considerando estas restricciones, la alternativa más factible para incrementar la relación de compresión consiste en la modificación del pistón, específicamente mediante la reducción de su volumen muerto. Para cuantificar este efecto, se realizó una medición experimental del volumen muerto del pistón, utilizando pipetas graduadas y una pera de vacío. El procedimiento se repitió en dos ocasiones para verificar la repetibilidad de la medición, obteniéndose un volumen muerto promedio del pistón de aproximadamente $28[cm^3]$, valor que se utilizó como base para el análisis de la relación de compresión, en la Figura 17 se aprecia el volumen muerto correspondiente a los $28[cm^3]$. A partir de este resultado, se desarrolló un análisis que relaciona la variación del volumen muerto con la relación de compresión, evidenciando que una reducción del volumen muerto hasta aproximadamente $15[cm^3]$ permitiría alcanzar una relación de compresión cercana a 15:1. Tal como se evidencia en la Figura 18.



Figura 17: piston motor Kubota DG972

PMS-BLOCK [mm]	E. empaqueta	D. empaquetad	V. muerto emp	V. muerto cilin	V. muerto pistón [cc]	V. muerto total	D. Cilindro	Carrera	V. desplazado	V. desplazado	CR
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	28	35,57	74	74,15	318907,31	318,91	9,96
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	25	32,57	74	74,15	318907,31	318,91	10,79
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	22	29,57	74	74,15	318907,31	318,91	11,78
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	20	27,57	74	74,15	318907,31	318,91	12,57
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	18	25,57	74	74,15	318907,31	318,91	13,47
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	15	22,57	74	74,15	318907,31	318,91	15,13
1,35	0,4	75	1767,15	5806,13	12	19,57	74	74,15	318907,31	318,91	17,29

Figura 18: RC para distintos volúmenes muertos del pistón

Con el fin de evaluar y visualizar esta modificación, el pistón fue modelado en el software Autodesk Inventor a partir de mediciones realizadas sobre un pistón nuevo, tal y como se muestra en la Figura 19. Este modelo tridimensional permitió analizar distintas configuraciones geométricas y verificar la factibilidad de la modificación propuesta desde el punto de vista dimensional y constructivo.

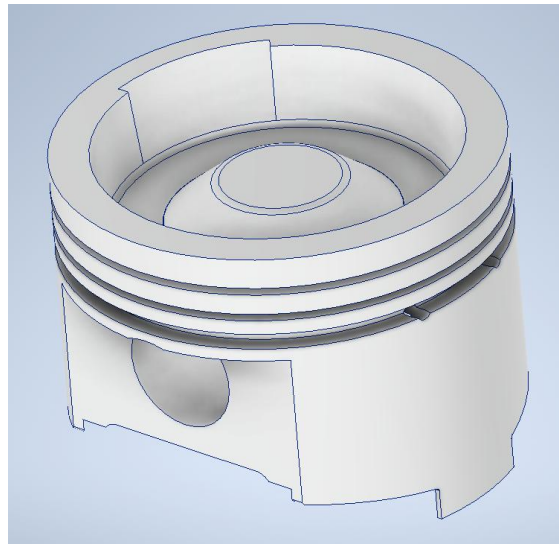


Figura 19: modelo 3D pistón

Como se mencionó anteriormente, otra forma de aumentar la relación de compresión (RC) es incrementando el diámetro de los cilindros, una opción relativamente práctica. Sin embargo, considerando que el aumento máximo permitido es de 2 mm, la RC se elevaría a 10,43:1, lo que representa un incremento de casi 1 punto, el cual no resulta significativo. En estos cálculos se consideró un aumento de 2 mm tanto en el cilindro como en el diámetro de la empaquetadura.

En síntesis, el análisis desarrollado en este apartado demuestra que el incremento de la relación de compresión mediante la modificación del pistón constituye una solución técnicamente viable y coherente con la literatura revisada. Esta modificación representa el primer paso fundamental para habilitar el funcionamiento del motor Kubota DG972 en modo HCCI, sirviendo como base para la incorporación posterior de sensores e instrumentos de control, los cuales se abordan en el punto 5.2.

5.2 Sensores e instrumentos de control

La operación de un motor en modo HCCI requiere un nivel de instrumentación y control considerablemente superior al de un motor de encendido por chispa convencional, debido a la alta sensibilidad del proceso de autoignición frente a pequeñas variaciones en las condiciones de operación. En este tipo de combustión, el inicio y desarrollo de la liberación de energía dependen directamente de variables termodinámicas como la presión, la temperatura y la composición de la mezcla, por lo que su monitoreo en tiempo real resulta fundamental para garantizar un funcionamiento estable y seguro.

El sensor más relevante para la operación en modo HCCI es el transductor de presión en la cámara de combustión. Este sensor permite registrar la evolución de la presión en función del ángulo de giro del cigüeñal, información indispensable para el cálculo de variables indicadas como la presión media efectiva indicada (IMEP), la tasa de liberación de calor y el ángulo CA50, parámetro ampliamente utilizado como referencia para el control del inicio de combustión en motores HCCI.

Para que la medición de presión en cámara sea útil, esta debe sincronizarse con un sensor de posición angular del cigüeñal (CKP) de alta resolución. Este sensor permite determinar con precisión la posición angular del motor y asociar cada medición de presión a un ángulo específico, posibilitando así el análisis ciclo a ciclo del proceso de combustión.

En complemento, se requiere la incorporación de un sensor de presión absoluta en el colector de admisión (MAP), el cual entrega información directa sobre la carga del motor y la cantidad de aire aspirado. Este dato es fundamental para la gestión del caudal másico de aire y para la estimación de la masa de mezcla presente en el cilindro. Asimismo, la temperatura del aire de admisión debe ser monitoreada mediante un termopar ubicado en el colector de admisión, dado que esta variable influye de manera directa en el momento de autoignición. El control de la temperatura de admisión, ya sea mediante calentamiento o enfriamiento, constituye una de las estrategias más utilizadas para ampliar el rango operativo del modo HCCI.

Para el control de la mezcla aire–combustible se considera indispensable la utilización de una sonda lambda instalada en el sistema de escape. Este sensor permite monitorear la relación aire–combustible y asegurar condiciones de mezcla homogénea dentro del rango de operación deseado. En este contexto, los sensores MAP y de temperatura de admisión podrían ser reemplazados por un sensor de flujo másico de aire (MAF), el cual entrega directamente la información del caudal de aire aspirado por el motor.

Adicionalmente, se debe incorporar un sensor de vibraciones o detonación (knock sensor) montado sobre el block del motor, con el objetivo de detectar fenómenos de ringing o aumentos excesivos en la tasa de subida de presión, característicos de la operación HCCI a cargas elevadas. La información entregada por este sensor resulta clave para implementar estrategias de protección que eviten daños mecánicos en componentes críticos como pistón, biela y cojinetes.

Todas las señales provenientes de los sensores descritos deben integrarse en una unidad de control electrónico (ECU) o sistema de adquisición de datos (DAQ) capaz de operar en tiempo real y ejecutar estrategias de control basadas en ángulo de cigüeñal. Este sistema permitirá realizar ajustes ciclo a ciclo sobre variables como la mezcla, la temperatura de admisión y las condiciones de operación, constituyendo la base para un control estable y seguro del motor Kubota DG972 en modo HCCI.

5.3 Transición a HCCI

Inicialmente, se consideró que la transición del modo de encendido por chispa (SI) hacia el modo de autoignición por compresión homogénea (HCCI) podría gestionarse progresivamente reduciendo la energía o la presencia de la chispa de encendido. La idea detrás de esta aproximación es intuitiva: al disminuir la influencia de la chispa, la combustión pudiera depender más de las condiciones de autoignición de la mezcla. Sin embargo, esta visión simplista no es consistente con los mecanismos físicos y las estrategias de control requeridas para lograr una transición estable entre modos de combustión en un motor real.

Yang y Zhu (2013) describen que la transición entre SI y HCCI es compleja porque los parámetros de operación que favorecen cada modo son distintos y, durante el proceso de transición, el motor debe mantener un rendimiento estable pese a cambios significativos en variables como la presión del colector de admisión (MAP), la relación aire-combustible (AFR) y la dinámica de los gases residuales. En lugar de controlar directamente la chispa como principal variable de transición, los autores presentan una estrategia de control basada en múltiples actuadores del motor, que incluye la regulación de la posición de la mariposa de aceleración para controlar el MAP, el ajuste individual de la cantidad de combustible por cilindro mediante métodos de control iterativo y la gestión de otros parámetros de operación, lo que permite una transición suave y minimiza las fluctuaciones de torque durante el proceso de cambio de modo.

En este contexto, no basta con desactivar o reducir la chispa para inducir HCCI. La combustión HCCI depende fundamentalmente de las condiciones termodinámicas de la mezcla (temperatura y presión) y de la gestión de gases residuales, más que de un disparo controlado por chispa, por lo que la estrategia de transición debe actuar sobre variables que influyen sobre estas condiciones. La propuesta de Yang y Zhu combina la regulación de la presión del colector de admisión y la cantidad de combustible con algoritmos iterativos de control, lo cual promueve una evolución controlada del proceso hacia HCCI sin que la estabilidad del motor se vea comprometida.

En consecuencia, la transición desde el funcionamiento en modo de encendido por chispa (SI) hacia el modo de combustión HCCI no puede basarse únicamente en la eliminación progresiva de la chispa de encendido. Para que la autoignición de la mezcla ocurra de manera estable, es necesario aplicar una estrategia de control integrada que permita ajustar las condiciones de operación del motor, tales como la presión, la temperatura y la composición

de la mezcla. Este enfoque pone de manifiesto la importancia de contar con una instrumentación adecuada y un sistema de control confiable, cuyos aspectos ya fueron abordados en el punto 5.2 de la presente memoria.

5.4 Factibilidad técnica motor Kubota DG972

A partir del análisis desarrollado en los apartados anteriores, es posible evaluar la factibilidad técnica de proyectar la operación del motor Kubota DG972 en modo de combustión HCCI utilizando mezclas de gas natural e hidrógeno. Esta evaluación se basa en las características constructivas del motor, en su estado mecánico actual y en las modificaciones conceptuales planteadas a lo largo del capítulo.

Desde el punto de vista mecánico, el motor fue recuperado y puesto en marcha satisfactoriamente, demostrando un funcionamiento estable en modo de encendido por chispa utilizando gas natural como combustible. Las mediciones realizadas durante el proceso de recuperación confirmaron que los principales componentes del motor se encuentran dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante, lo que constituye una base adecuada para futuras modificaciones y ensayos experimentales.

El principal desafío técnico identificado corresponde a la relación de compresión original del motor, cercana a 10:1, la cual resulta insuficiente para alcanzar condiciones de autoignición homogénea propias del modo HCCI. Sin embargo, tal como se analizó en los apartados previos, existen alternativas técnicamente viables para incrementar la relación de compresión, siendo la modificación del volumen muerto del pistón la opción más consistente con la geometría y las limitaciones constructivas del motor Kubota DG972. Esta solución permite proyectar relaciones de compresión del orden de 15:1, valores que se encuentran en concordancia con los reportados en la literatura para motores operando en modo HCCI.

Adicionalmente, el uso de combustibles gaseosos representa una ventaja relevante desde el punto de vista de la preparación de la mezcla, ya que facilita la obtención de una mezcla aire-combustible homogénea, condición fundamental para la operación HCCI. No obstante, la elevada sensibilidad del proceso de autoignición frente a variaciones en las condiciones de operación implica que la futura implementación del modo HCCI deberá realizarse bajo rangos acotados de carga y régimen, especialmente durante las primeras etapas experimentales.

En base a lo anterior, se concluye que la conversión del motor Kubota DG972 hacia un modo de combustión HCCI es técnicamente factible desde un punto de vista conceptual y mecánico, siempre que se implementen de manera controlada las modificaciones proyectadas y se limiten inicialmente las condiciones de operación.

Referencias

- (SEC), S. d. (2021). *RIC N°04: Conductores y canalizaciones*. Santiago, Chile: SEC.
- Andrés David Morales Rojas, S. H. (2024). Experimental Study of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine Using Hydrogen at High-Altitude Conditions. *Sustainability*, 5.
- Bengtsson, J. (2004). *Closed-Loop Control of HCCI Engine Dynamics*. Lund Institute of Technology, Lund, Suecia: Lund Institute of Technology, Lund, Suecia.
- J.M. Gomes Antunes, R. M. (2007). An investigation of hydrogen-fuelled HCCI engine. *Elsevier*, 3.
- M. M. Hasan, M. R. (2016). Homogeneous charge compression ignition combustion: Advantages. *Elsevier*.
- Malaquias, A. C. (2023). *CONCEPÇÃO DE UM SISTEMA DE COMBUSTÃO BASEADO NA AUTOIGNIÇÃO*.
- Maxime Pochet, H. J. (2020). compression ratio ammonia-hydrogen HCCI engine: combustion, load and emission performances. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 3-9.
- O. Stenlås, M. C. (2004). Reformed Methanol Gas as Homogeneous. *SAE International*, 6-10.
- Tuan Le Anh 1, V. N. (2018). Experimental Investigation on Establishing the HCCI. *Sustainability*, 10.
- Yao, M., Zheng, Z., & Liu, H. (2009). Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 400.
- Zhu, X. Y. (2013). SI and HCCI Combustion Mode Transition Control. *IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY*, 1-12.