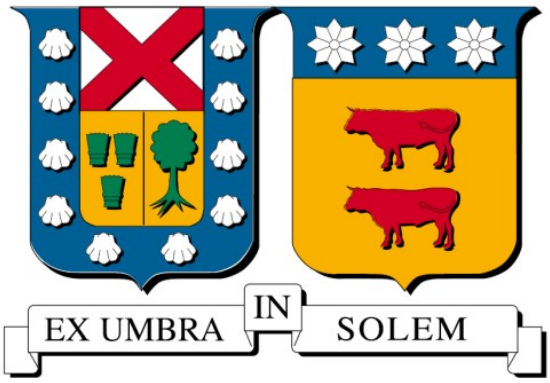
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO-CHILE



"Adecuación y puesta en marcha de un motor ciclo otto Kubota para operar con gas natural como combustible"

GONZALO FERNANDO OLIVARES MIGUELES

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TITULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Dr. GERMÁN AMADOR DIAZ
PROFESOR CORREFERENTE: Dr. MARIO TOLEDO TORRES

29 de junio del 2022

Agradecimientos

El periodo universitario ha sido sin duda una etapa fundamental en mi vida, marcado por la transición personal que se tiene siendo un adolescente lleno de sueño hasta ser un adulto con responsabilidades y viendo la vida de una forma distinta, consciente y creyendo que se puede contribuir a ser cambios, mejorando y ayudando a quienes lo necesiten, pues en este periodo uno adquiere distintas habilidades y conocimientos que me permitan contribuir a una sociedad mejor. El camino fue largo y lleno de altos y bajos, de alegrías y tristezas, de triunfos y derrotas , entre muchos vaivenes que la vida nos presenta. Sin embargo hay gente que siempre ha estado acompañándome en este camino, apoyándome desde lo que más y mejor pueden haberme entregado, el amor incondicional y ese amor viene por parte de mi familia: mi madre, mi padre y mi hermano. Es a ellos a quienes doy mis mayores agradecimientos porque estuvieron conmigo en todo este camino universitario y también son quienes estuvieron en la etapa previa y también sé que lo estarán en lo que continúe.

No puedo dejar atrás a todas las personas que también conocí y fueron parte de mi proceso universitario, a ellos y cada uno les agradezco por haber aportado o ayudado en mi formación y por supuesto en lo que hoy soy como persona. Y por ultimo, quiero darle las gracias al señor Daniel Galleguillos, apoyo académico del laboratorio de termofluidos quien estuvo conmigo durante todo este proceso, siempre con la mayor disposición para ayudarme y aportarme todo su conocimiento en el desarrollo de esta memoria y a ANID que a través del proyecto FONDECYT Iniciación N° 1190447 titulado "De-

velopment of a detailed chemical Kinetic mechanism for modeling autoignition and knock intensity in renewable gas spark ignition engines"permitió el desarrollo de esta memoria de titulación.

Resumen

El presente trabajo consiste en la adecuación del motor Kubota DG972, él cual es parte del gasificador GEK 10kW, para ser adaptado y alimentado de manera externa por gas natural en la cabina de motores del laboratorio de termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María, ubicada en la ciudad de Valparaíso. Para ello, se realiza el diseño de la linea de suministro de gas natural el cual contempla un layout para la distribución de las lineas de gas, aire y gases de escape y las presiones de operación del sistema a distintos diámetros de tubería para luego ser implementada en conjunto a la linea de syngas del gasificador y adaptado a las instalaciones propias de a cabina.

Posteriormente, instaladas las lineas de suministro se efectúa la implementación de instrumentos de seguridad, medición y control que permiten conocer los valores de operación entre ellos el diámetro de la linea de gas, la cual sera de 3/8 [in]. Luego se establece el protocolo de operación, tanto de encendido como de apagado de los equipos para trabajar de forma correcta y segura. Este protocolo fue utilizado para poner en marcha el motor, sin embargo, fue necesario realizar modificaciones en la linea y utilizar GLP en estas pruebas. Finalmente, se logra el objetivo de poner en marcha el motor y para ello se efectuaron cálculos de concentración másica de material particulado (MP) en función de la velocidad de giro del motor.

Los resultados obtenidos nos llevan a concluir que el motor no mantiene constante su velocidad y tiende a disminuir y así mismo lo ocurrido con los valores de concentración

de MP que dependiendo los rangos de velocidad del motor, es que tienden a aumentar o disminuir sus niveles. Al final de este trabajo se proponen un listado de recomendaciones y trabajos futuros que pueden ser necesario para posteriores investigaciones que se requieran realizar en el motor.

Abstract

The present work consists of the adaptation of the Kubota DG972 engine, which is part of the GEK 10kW gasifier, to be adapted and fed externally by natural gas in the engine cabin of the thermofluid laboratory of the Technical University Federico Santa María, located in the city of Valparaiso. For this, the design of the natural gas supply line is carried out, which includes a layout for the distribution of the gas, air and exhaust gas lines and the operating pressures of the system at different pipe diameters to be later implemented. together with the syngas line of the gasifier and adapted to the installations of a cabin.

Subsequently, once the supply lines are installed, the implementation of safety, measurement and control instruments is carried out that allow knowing the operating values, including the diameter of the gas line, which will be 3/8 [in]. Then the operation protocol is established, both for switching on and off the equipment to work correctly and safely. This protocol was used to start the engine, however, it was necessary to make modifications to the line and use LPG in these tests. Finally, the objective of starting the engine is achieved and for this calculations of mass concentration of particulate material (PM) were made based on the speed of rotation of the engine.

The results obtained lead us to conclude that the engine does not keep its speed constant and tends to decrease and likewise what happened with the concentration values of PM that depending on the speed ranges of the engine, is that they tend to increase or

decrease their levels. At the end of this work, a list of recommendations and future works that may be necessary for further investigations that are required to be carried out on the engine are proposed.

Nomenclatura

CH_4: Metano

C_2H_6: Etano

C_3H_8: Propano

C_4H_{10}: Butano

C_5H_{12}: Pentano

N_2: Nitrógeno

O_2: Oxigeno

A_r: Argón

$CO2$: Dióxido de carbono

H_2S: ácido sulfhídrico

H_2O: Agua

CO: Monóxido de Carbono

HC: Hidrocarburos

NO_x: Óxidos de Nitrógenos

GNL: Gas Natural Licuado

GNC: Gas Natural Comprimido

GLP: Gas Licuado de Petróleo

MP: Material Particulado

$\dot{m}_c$: Flujo másico de combustible [g/h]

P: Potencia [kW]

g_e: Consumo específico de combustible [g/kWh]

$\dot{Q}_c$: Caudal volumétrico de combustible [m^3S/h]

ρ_c: Densidad del combustible en condiciones estándar [kg/m^3S]

V: Velocidad del flujo [m/s]

PCS: Poder calorífico superior del gas [MJ/m^3S]

P_1: Presión absoluta inicial [bar]

P_2: Presión absoluta final [bar]

**D: Diámetro del tubo [in]

Y: Factor de superexpansibiliadad [-]

Cr: Factor de viscosidad, densidad y temperatura [-]

S: Densidad relativa del gas [-]

T: Temperatura absoluta del gas [K]

Z: Viscosidad del gas [cP]

L: Longitud del tubo [m]

$\dot{Q}_a$: Caudal volumétrico de aire [m^3S/h]

C_{total}: Cilindrada total del motor [cm^3]

ω_o: Velocidad de giro del motor [rpm]

F-NPT: Conector hembra (Female National Pipe Thread)

M-NPT: Conector macho (Male National Pipe Thread)

Índice General

1. INTRODUCCIÓN **1**

1.1. Motivación del Proyecto 1

1.2. Alcance 2

1.3. Objetivo General 3

1.4. Objetivos Específicos 3

2. ANTECEDENTES **4**

2.1. Contexto General 4

2.2. Gas Natural en Chile 5

2.3. Formatos para el Gas Natural 6

2.3.1. Gas Natural Licuado (GNL) 6

2.3.2. Gas Natural Comprimido (GNC) 6

2.4. Normativa Instalaciones de Gas Natural 6

2.5. Concentración de Material Particulado 7

2.6. Laboratorio de Termofluidos USM 7

2.7. Gasificador GEK 10 kW 9

2.7.1. Componente Principales del Gasificador GEK 10 kW 11

2.7.2. Funcionamiento del Gasificador 13

2.8. Motor Kubota 15

2.8.1. Especificaciones Técnicas Motor Kubota 15

2.8.2. Componentes Principales Motor-Gasificador 15

2.8.3. Funcionamiento Motor Kubota 18

3. MARCO TEÓRICO 20

3.1. Curvas Características de un Motor 20

3.1.1. Potencia 20

3.1.2. Torque o Par Motor 21

3.1.3. Consumo Especifico de Combustible 22

3.1.4. Flujo másico y caudal volumétrico de combustible 23

3.2. Capacidad Tubería a Gas 23

3.3. Caudal volumétrico de aire 24

4. DISEÑO SUMINISTRO DE GAS NATURAL PARA MOTOR KUBOTA EN EL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS 25

4.1. Layout 27

4.2. Propiedades del gas natural y parámetros de operación 27

4.3. Cálculos 28

4.3.1. Flujo másico de combustible 28

4.3.2. Caudal volumétrico de combustible 29

4.3.3. Variación de presión 29

4.3.4. Velocidad del flujo 31

4.3.5. Caudal volumétrico de aire 32

4.4. Resumen valores calculados de diseño 32

5. IMPLEMENTACIÓN LINEA DE SUMINISTRO DE GAS NATURAL EN CONEXIÓN A LINEA DE SYNGAS 33

5.1. Conexiones linea de syngas y aire del gasificador 33

5.2. Conexiones linea de gases de escape 35

5.3. Instrumentación 36

5.3.1. Controlador de Flujo de gas 37

5.3.2. Rotámetro para Aire 38

5.4. Implementos de Seguridad 38
5.4.1. Válvula de Corte 38
5.4.2. Válvula Antirretroceso de Llama 39
5.5. Instalación e implementación de instrumentos y elementos en las lineas de gas natural, aire y escape 39

6. PROTOCOLO DE OPERACIÓN Y BUEN FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR-GENERADOR 46
6.1. Externalización sistema de encendido del motor 47
6.2. Chequeo de elementos y cambio de piezas 48
6.3. Presurización de la línea de gas y detección de fugas 49
6.4. Protocolo de encendido 50
6.5. Protocolo de apagado 52

7. PRUEBAS EXPERIMENTALES DE OPERACIÓN DEL MOTOR 53
7.1. Resultado Obtenidos 57

8. CONCLUSIONES 62

9. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS 65
9.1. Recomendaciones 65
9.2. Trabajos Futuros 66

Referencia 67

ANEXOS 69
A. Layout Diseño de Montaje Experimental 69

Índice de Figuras

2.1. Laboratorio termofluidos USM 8
2.2. Cabina banco motores en laboratorio de termofludios USM 9
2.3. Gasificador GEK 10 kW 10
2.4. Principales componentes del gasificador GEK 10 kW 12
2.5. Diagrama de Funcionamiento Gasificador GEK 10 kW 14
2.6. Conjunto filtro de aire y servo 16
2.7. Mezclador 16
2.8. Trampa de condensado (circulo rojo) y válvula de retención de presión (circulo amarillo) 17
2.9. Actuador electrónico 17
2.10. Sensor O_2 18
2.11. Tubo de escape 18
2.12. Diagrama de Funcionamiento Motor Kubota 19

3.1. Curva característica potencia v/s rpm [10] 21
3.2. Curva característica par motor v/s rpm [10] 22
3.3. Curva característica consumo especifico de combustible v/s rpm [10] . . 22

4.1. Montaje conjunto motor al interior de la cabina 26
4.2. Curva de rendimiento Motor Kubota DG972 intesectada a 3.600 [rpm] . 28
4.3. Gráfica de Δ Presión v/s Diámetro de tubería 31

5.1. Admisión mezclador Tee 34

5.2. Sistema salida de escape 35
5.3. Linea de escape cabina motores 36
5.4. Conexión de tee y flexible al mezclador 40
5.5. Conexión válvula antirretroceso, válvula de corte y flexible 40
5.6. Instalación elementos linea de aire 42
5.7. Conexión tee con linea externa de aire y linea de aire del gasificador . . 42
5.8. Vista lineas de gas y de aire 43
5.9. Adaptación extensión tubo escape cabina 44
5.10. Adaptación escape para manguera flexible 45
5.11. Linea de escape soportada y protegida 45

6.1. Encendido y contacto del panel de control 47
6.2. Elementos de encendido del equipo 48
6.3. Ajuste de equipo 49
6.4. Cilindro de gas para presurización y detección de fugas 50
6.5. Detector de fuga 50

7.1. Ajuste linea de combustible 54
7.2. Vista de la cabina con la linea alternativa de combustible 55
7.3. eFilter Dekati [16] 56
7.4. Tacómetro Lutron 57
7.5. Gráfico medición N°1 58
7.6. Gráfico medición N°2 58
7.7. Gráfico medición N°3 59
7.8. Gráfico medición N°4 59
7.9. Gráfico medición N°5 60
7.10. Gráfico medición N°6 60

Índice de Tablas

2.1. Características generales gasificador GEK 10kW [9] 10
2.2. Composición del Syngas generado por el Gasificador GEK 10kW para algunos tipos de combustibles [8] 11
2.3. Especificaciones técnicas motor Kubota [11] 15

4.1. Propiedades del gas natural [4] 27
4.2. Parámetros para el cálculo de presión 29
4.3. Valores obtenidos de presión de entrada (P_1) y variación de presión (ΔP) para distintos diámetros de tubería 30
4.4. Valores de diseño 32

5.1. Conexiones mezclador Tee de combustible y aire 34
5.2. Conexión escape 35
5.3. Características del Controlador de Flujo 37
5.4. Características del Rotámetro 38
5.5. Válvula de corte 38
5.6. Válvula antirretroceso de llama 39

7.1. Controlador de flujo Aalborg 54
7.2. Resultados obtenidos 57

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación del Proyecto

En el marco del proyecto FONDECYT N° 11190447 titulado "Development of a detailed chemical kinetic mechanism for modeling autoignition and knock intensity in renewable gas spark ignition engines" se adecuará y pondrá en marcha un motor Kubota de tres cilindros para operar con gas natural, el cual se usará posteriormente para pruebas de investigación. Para ello se debe realizar el diseño y construcción del tren de suministro de gas natural (metano), así como su conexión con la actual línea de suministro de gas de síntesis (syngas) que proviene del gasificador de biomasa. Además, se desarrollará un protocolo de operación que permita operar de manera segura y eficiente el equipo conjunto motor-generador.

1.2. Alcance

La realización del diseño requerido del proyecto necesita conocer el origen del motor con el cual se trabajará y que se encuentra acoplado al gasificador GEK 10 kW, por lo que la adaptación no solo considera la linea de gas natural con la linea del syngas sino también la linea de aire y la de los gases de escape, ya que debe ser instalado al interior de la cabina del laboratorio de termofluidos de la Universidad por lo que al realizar intervenciones y desacoples de las partes del gasificador no se afecte el funcionamiento de los equipos y la trazabiladad en general. Por lo que, en este trabajo se presentan los componentes y las piezas en donde se realizaron las conexiones para llevar a cabo toda la instrumentación necesaria que a futuro permita trabajar de manera confiable y segura con el equipo. Además, parte del diseño contemplará rangos de trabajo y parámetros de operación los cuales tendrán sus bases teóricas que permiten determinar los equipos a utilizar.

Por último, se efectuaran pruebas sencillas para verificar la puesta en marcha del motor las cuales serán mediante el suministro de una botella de GLP en donde el paso de gas es controlado por una válvula de corte para variar la velocidad del motor y conocer las concentraciones másicas de material particulado en función de lo anterior.

1.3. Objetivo General

Adecuar y poner en marcha un motor ciclo otto Kubota para operar con gas natural como combustible.

1.4. Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema de suministro de gas natural para el motor Kubota en el Laboratorio de Termofluidos.

2. Implementar línea de suministro de gas natural en conexión con línea de gas de síntesis que proviene del gasificador de biomasa.

3. Establecer un protocolo de operación para garantizar seguridad y el buen funcionamiento del motor-generador.

4. Desarrollar pruebas experimentales de operación del motor.

Capítulo 2

ANTECEDENTES

2.1. Contexto General

El uso de gas natural en motores surge como una alternativa para enfrentar las problemáticas de contaminación que actualmente existen el mundo. El uso de combustibles fósiles líquidos, como lo son la gasolina y el petroleo se encuentra en agotamiento y además, el daño producido por la combustión y los gases generados del motor afectan la salud de las persona y el medio ambiente por lo que es necesario el uso de nuevas alternativas. Para ello, se requiere realizar estudios y pruebas que permitan conocer los niveles de emisiones generados de las nuevas alternativas y siempre pensando en la reducción de la huella de carbono.

Si bien, el gas natural es un combustible fósil hoy en día es una de las fuentes de energía más utilizadas en el mundo. su principal componente es el metano (CH_4), quien se encuentra formando casi el 90 % del gas natural. Además, se conforma por una gran cantidad de gases, como es el caso del etano (C_2H_6), propano (C_3H_8), butano (C_4H_10), pentano (C_5H_12) y algunas cantidades variables de nitrógeno (N_2), dióxido de carbono ($CO2$), ácido sulfhídrico (H_2S) y Agua (H_2O). El metano al presentar solo un átomo de carbono, emite menos CO_2 en el proceso de combustión a diferencia de

lo que generan los motores convencionales [1].

2.2. Gas Natural en Chile

La región de Magallanes (XII) es la única zona de de nuestro país donde se extrae gas natural. Esta explotación se inicio a gran escala a partir de los años 70 con la creación de la Empresa Nacional de Petroleo (ENAP). Sin embargo, con el pasar del tiempo y la alta demanda existente por la industria que utiliza gas natural, la generación de electricidad y el uso en los hogares provoca que la cantidad extraída no sea suficiente para la demanda que hay. Es por ello que es necesario la importación del gas natural a nuestro país, para ello, Chile cuenta con dos terminales y plantas que reciben el gas licuado que se transporta por barcos donde es recibido y regasificado. Los puertos receptores del gas se ubican en Quinteros y Mejillones, donde distribuyen el gas a cinco regiones del país las cuales son: Antofagasta (II), Valparaíso (V), Metropolitana (RM), Libertador Bernardo O'Higgins (VI) y Bío Bío (VIII).

El uso principal que se le da al gas natural es para la generación de electricidad, donde se emplea en centrales termoeléctricas de ciclo combinado. El Sistema Interconectado Norte Grande (SING) utiliza este combustible en el 36,6 % de su potencia neta; el Sistema Interconectado Central (SIC) en el 11,6 %; el sistema eléctrico de Magallanes en un 84,2 %, y Aysén e Isla de Pascua no utilizan este combustible. Otros usuarios de gas, aunque en menor volumen, son el sector industrial y minero, el sector comercial, residencial y público, y en un porcentaje muy bajo, el transporte [2] .

2.3. Formatos para el Gas Natural

2.3.1. Gas Natural Licuado (GNL)

Para poder licuar el gas natural es necesario someterlo a un proceso de temperaturas aproximadamente de -160 [ºC] a presión atmosférica generando la condensación del gas y una reducción de su volumen de hasta 600 veces menor. Esto es equivalente alrededor del 45 % de su volumen en agua. Como mencionamos anteriormente, este proceso favorece el transporte y almacenamiento del gas natural.

2.3.2. Gas Natural Comprimido (GNC)

Para la obtención de este producto, es necesario someter el gas natural a altas presiones (200 a 250 [bar]) y almacenarlo en depósitos, los cuales deben soportar una gran cantidad de energía. Por lo que es un inconveniente en caso de un accidente, ya que a mayor energía almacena, mayor serán los daños y efectos negativos que se ocasionen [3] .

2.4. Normativa Instalaciones de Gas Natural

- **Decreto 66 "Aprueba Reglamento de Instalaciones Interiores y Medidores de Gas":** [4] Este reglamento establece los requisitos mínimos de seguridad que deberán cumplir las instalaciones interiores de gas, sean individuales o colectivas, abastecidas a través de una red - gas de red- o de envases a presión -cilindros- como asimismo sus medidores de gas, que sean parte integrante de edificios colectivos o casas, de uso residencial, comercial, industrial y público. Además, esta normativa regula todas las actividades asociadas a las instalaciones de gases en ámbitos de proyectos, ejecución o construcción, puesta en servicio, instalación de equipos, entre otras actividades relacionadas.

- **ANSI/ASME B1.20.1 Pipe Threads, General Purpose (Inch):** [5] Normativa utilizada en el roscado de tuberias y sus accesorios. Considera como unidad las pulgadas, es ampliamente referenciado, cubre las dimensiones y el calibre de las roscas de tubería más comunes del mundo: NPT, NPSC, NPTR, NPSM y NPSL.

2.5. Concentración de Material Particulado

El material particulado (MP) es un contaminante atmosférico que corresponde a aquellas partículas líquidas o sólidas que se encuentran en suspensión, siendo posible clasificarlo según su diámetro en MP10 (diámetro de partícula menor a 10 microns) y MP2,5 (diámetro de partícula menor a 2,5 microns). También existe el denominado MP ultrafino, de alrededor de 0,1 μm de diámetro de partícula.

La concentración de MP es el valor promedio temporal detectado en el aire y se mide en microgramos por metro cúbico normal ($\mu g/m^3N$) [6].

2.6. Laboratorio de Termofluidos USM

Laboratorio de la Universidad Técnica Federico Santa María dedicado a la aplicación de ciencias básicas de la ingeniería: termodinámica y mecánica de fluidos, particularmente en el estudio de maquinas térmicas e hidráulica. Cuenta con una gran cantidad de equipos como turbinas térmicas a vapor y gas, turbocompresores y turbinas hidráulicas (Pelton, Francis, Kaplan), túnel aerodinámico de viento, canal hidráulico, analizadores de gases de combustión y vertedero hidráulico ubicados con sus respectivos bancos de prueba para efectuar experiencias docentes que sean en beneficio del aprendizaje de los estudiantes [7]. Algunas de ellas son:

- Bancos de ensayos dinamométricos para motores de ciclo Diesel y Otto.
- Banco de ensayo de quemadores para combustibles líquidos y gaseosos.

- Banco de ensayos de bombas centrífugas.
- Banco de pruebas hidrostáticas y de medición de flujo.
- Banco de pérdidas de carga en piping.

En particular, el banco de motores de ciclo Otto y Diesel esta conformado por tres motores: motor otto BMW, motor diesel Perkins y motor diesel Mercedes-Benz. De los cuales el único operativo es el Perkins ya que cuenta con la instrumentación necesaria para efectuar experiencias docentes. El motor Mercedes-Benz se encuentra en un proceso de trabajos de proyecto para ser instrumentado al igual que el Perkins y cumplir todas las condiciones necesarias para funcionar próximamente en temas académicos y docentes. Para efectos de este trabajo, se ha determinado retirar el motor BMW para ser reemplazado por el equipo a utilizar en este proyecto, el cual corresponde a un motor Kubota.



Figura 2.1: Laboratorio termofluidos USM

Cada uno de estos motores se encuentra instalado al interior de cabinas de seguridad del

laboratorio. Estas cabinas tienen la finalidad de que quienes participan de la experiencia de laboratorio puedan ubicarse externamente y visualizar a través de un vidrio de seguridad lo que que ocurre en su interior mientras se opera y controla de manera externa la operación del motor. Además, las cabinas se encuentran aisladas acústicamente con el fin de mitigar todo tipo de sonido que genere la maquina y presentan una salida para canalizar gases de escape propios del motor. Estas cabinas tienen una altura de 2,35 [m] y un área superficial de aproximadamente 16 [m^2] que permite ubicar comodante motores convencionales en su interior.



Figura 2.2: Cabina banco motores en laboratorio de termofludios USM

2.7. Gasificador GEK 10 kW

La gasificación se define como un proceso de transformación de un combustible sólido a un combustible gaseoso, como es el caso de la biomasa. También pueden ser utilizados residuos o materia que tenga un gran contenido de carbono. Para que ocurra la

gasificación es necesario la presencia de un agente gasificante el cual puede ser aire, oxigeno o vapor de agua. La gasificación de la materia genera gas de síntesis (Syngas), el cual es utilizado como recurso energético para la producción de energía. Este gas esta compuesto principalmente de CO_2, N_2, H_2, CO y CH_4. También se generan residuos solidos que no son de utilidad y que deben filtrarse en el desarrollo del proceso [8] .

Particularmente el equipo encargo de realizar el proceso de gasificación es el GEK 10kW (Fig. 2.3) que tiene las siguientes características:

Tabla 2.1: Características generales gasificador GEK 10kW [9]

Peso	499 kg
Dimensiones	1.2m x 1.2m x 1.8m (largo x ancho x alto)
Salida de Potencia	3-10 kW
Consumo de biomasa	12 kg/hr (a 10 kW)



Figura 2.3: Gasificador GEK 10 kW

La Tabla 2.2 muestra la composición en % de volumen del syngas generado por ciertos combustibles que son utilizados por el gasificador.

Tabla 2.2: Composición del Syngas generado por el Gasificador GEK 10kW para algunos tipos de combustibles [8]

Combustible	**Volumen [%]**				
	CO	H_2	CH_4	CO_2	N_2
Carbón	28-31	5-10	1-2	1-2	55-60
Madera (12 a 20 % humedad)	17-22	16-20	2-3	10-15	55-60
Pellets de paja de trigo	14-17	17-19	0	11-14	0
Caña de azúcar	15-18	15-18	0	12- 14	0
Hojas de coco	16-20	17- 19,5	0	10-15	0

Para poder adaptar el suministro de gas y controlar el funcionamiento del motor, es necesario conocer como opera en conjunto al gasificar GEK 10 kW y así determinar los mejores lugares donde intervenir los canales de suministro e implementar instrumentos que me permitan dirigir y manipular los parámetros de interés a desarrollar en el proyecto.

2.7.1. Componente Principales del Gasificador GEK 10 kW

El gasificador es un equipo compuesto por una gran cantidad de elementos, sin embargo mencionaremos los principales componentes que lo conforman.



Figura 2.4: Principales componentes del gasificador GEK 10 kW

1. Tolva
2. Reactor
3. Sopladores de aire y Syngas
4. Ciclón
5. Panel de control
6. Sistema de filtrado de Syngas
7. Motor Kubota
8. Generador eléctrico
9. Antorcha

2.7.2. Funcionamiento del Gasificador

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la gasificación es un proceso de transformación de combustible sólido a gaseoso, es por ello que la tolva es la encargada de almacenar la biomasa con la que se trabajara. Una vez cargada la tolva, se procede a encender el gasificador en el panel de control. Es importante mencionar que una vez realizada la ignición de la biomasa, ésta debe alcanzar cierto grado de temperatura para obtener una syngas de buena calidad, este proceso tarda un tiempo en concretarse, por lo que es necesario el uso de válvulas que me permite abrir y cerrar ciertos conductos por donde se desea controlar la salida de los gases de producto. Cuando las temperaturas son bajas y por ende, el syngas de una calidad menor, es necesario que el gas producido circule a la antorcha para que sea quemado.

Con la tolva cargada y el gasificador encendido es momento de realizar la ignición de la biomasa. Este procedimiento es realizado en el reactor y requiere inicialmente de la inyección de parafina o gasolina para iniciar la combustión. Para ello, es utilizado un soplete durante un periodo de tiempo hasta alcanzar los niveles de temperatura requeridos para posteriormente apagarlo y trabajar con los sopladores de aire y syngas del gasificador. Estos sopladores son regulados y monitoreados en el panel de control y tienen la función de elevar la temperatura al interior hasta alcanzar los valores requerido para obtener los gases de síntesis de buena calidad.

Ya iniciado el proceso de gasificación, es momento de alcanzar las condiciones de operación necesarias para generar el syngas deseado. Con ello, se requiere el uso del ciclón para separar el polvo en suspensión que es generado por el reactor y posteriormente, el uso del sistema de filtrado de syngas, el cual cumple la función de filtración para entregar un gas lo mas limpio posible y de buena calidad. También cumple la función de reducción de temperatura, ya que el gas debe ingresar al motor y por ello, la temperatura de suministro no puede ser muy elevada. Finalmente, es necesario el corte del

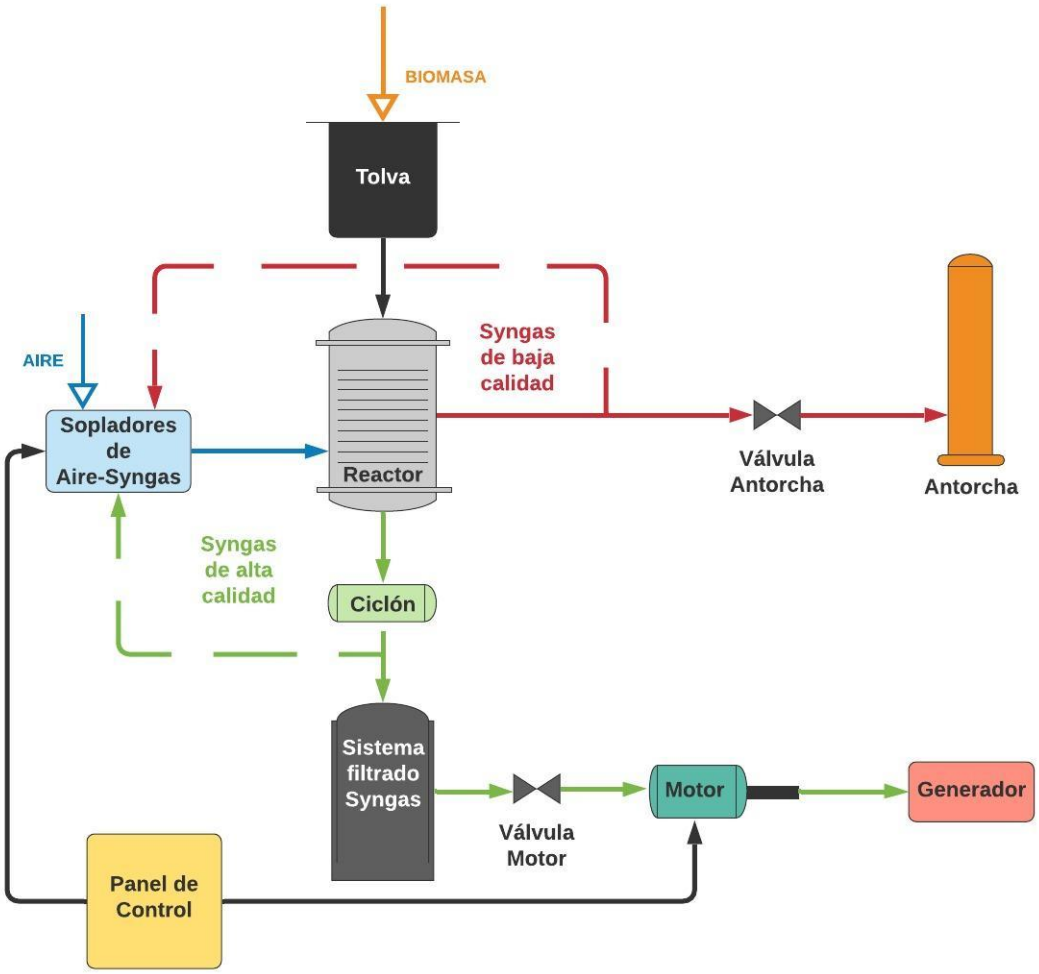


Figura 2.5: Diagrama de Funcionamiento Gasificador GEK 10 kW

conducto de gas quemado en la antorcha cuando las temperaturas de gasificación hayan alcanzado los niveles correspondientes y proceder a la apertura de la válvula ubicada a la salida del sistema de filtrado de syngas para ceder el paso a la alimentación del motor Kubota del gasificador y así proceder a iniciar el funcionamiento del generador de electricidad. Por supuesto, dependiendo de la carga que se requiera conseguir es necesario mayor o menor suministro de combustible al motor [8].

2.8. Motor Kubota

Sin duda, el motor es el principal elemento en el desarrollo de este trabajo. Es el equipo encargado de alimentar al generador de energía y para ello, requiere de la mezcla de aire y combustible necesario para conseguir una buena combustión. Para ello conoceremos las especificaciones técnicas del motor y como funciona en conjunto al gasificador.

2.8.1. Especificaciones Técnicas Motor Kubota

A continuación se describen las principales especificaciones del motor Kubota:

Tabla 2.3: Especificaciones técnicas motor Kubota [11]

Modelo	DG972-ES
Potencia	17.6 kW ($\sim 22HP$)
Número de cilindros	3
Combustible	Gas Natural
Peso	72 kg
Velocidad máxima	3600 rpm
Tipo	Motor de 4 ciclos
Diámetro x carrera	74.5x73.6 mm
Desplazamiento total	962 cm^3

2.8.2. Componentes Principales Motor-Gasificador

- Filtro de Aire
- Servo
- Mezclador
- Trampa de Condensado
- Válvula de Retención de Presión
- Actuador Electrónico
- Sensor O_2

- Tubo de escape

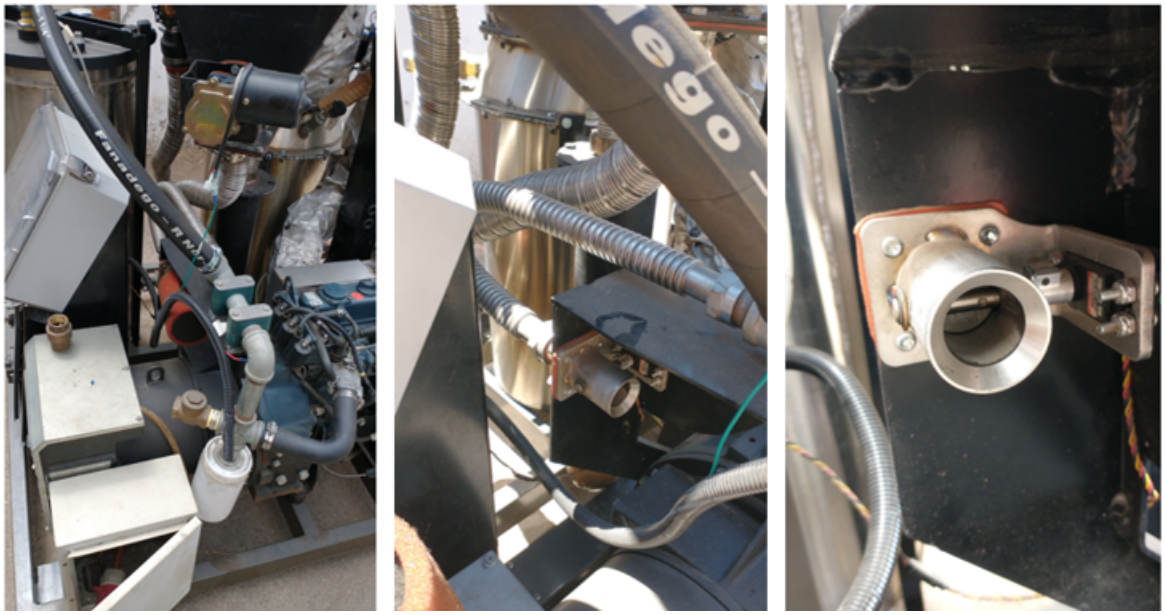


Figura 2.6: Conjunto filtro de aire y servo

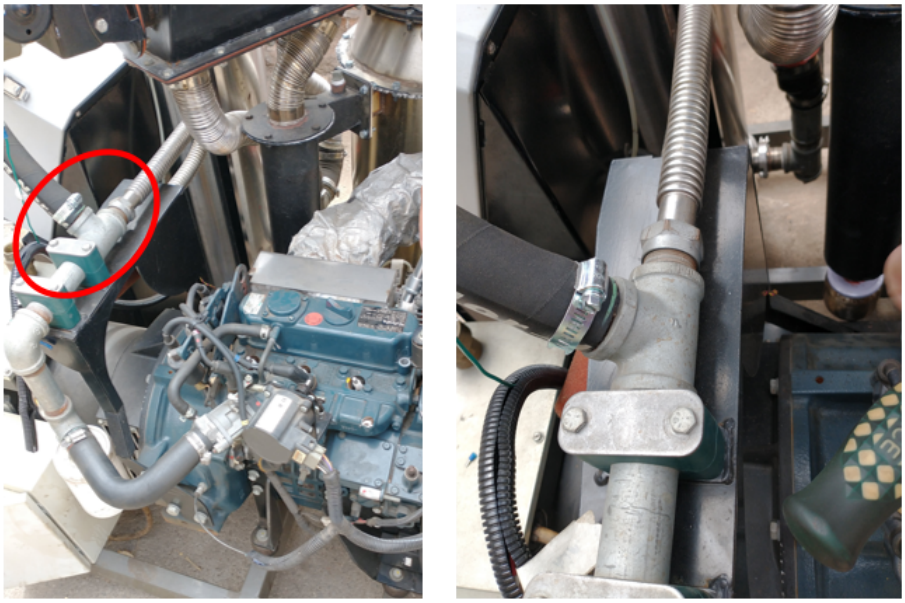


Figura 2.7: Mezclador

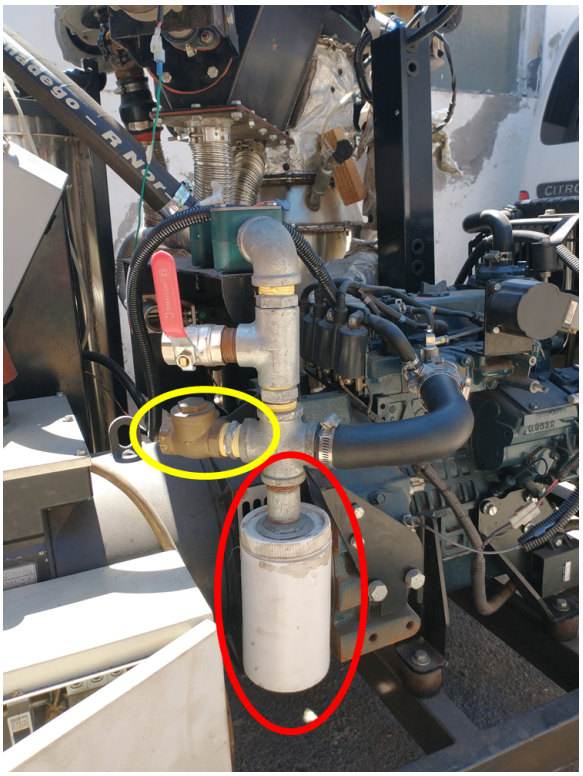


Figura 2.8: Trampa de condensado (circulo rojo) y válvula de retención de presión (circulo amarillo)

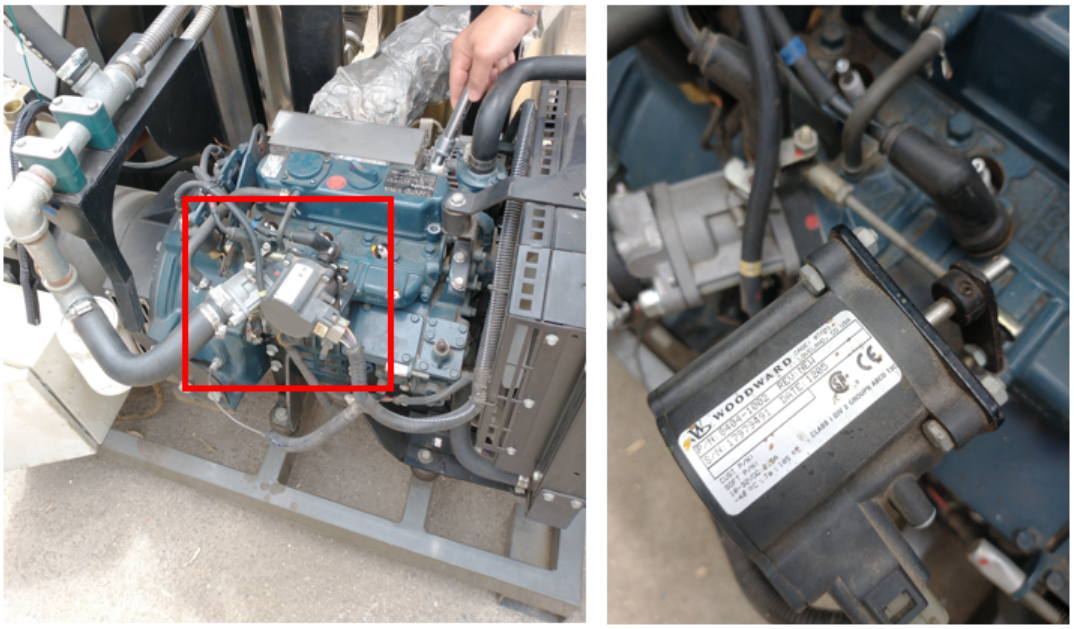


Figura 2.9: Actuador electrónico



Figura 2.10: Sensor O_2



Figura 2.11: Tubo de escape

2.8.3. Funcionamiento Motor Kubota

El motor es alimentado por el syngas de buena calidad generado en el reactor del gasificador cuando éste alcanza los niveles de operación requeridos, para posteriormente ser enviado hasta el Sistema de filtrado syngas en donde se filtra y reduce su temperatura

para ingresar al motor. Este combustible llega a un mezclador, en donde se junta con el aire para ingresar al motor y comenzar a funcionar. Por su parte, los gases de escape generados son enviados hasta el tubo de escape para ser liberados.

Existen elementos de seguridad que forman parte del funcionamiento del motor, las cuales son la trampa de condensado y la válvula de retención de presión. La trampa cumple la función de ser el último filtro en caso de haber algún material mas denso y decante en él para que no ingrese con la mezcla al motor y para el caso de la válvula de retención o antirretorno es usada para evitar la inversión del flujo en caso de alguna detención del equipo.

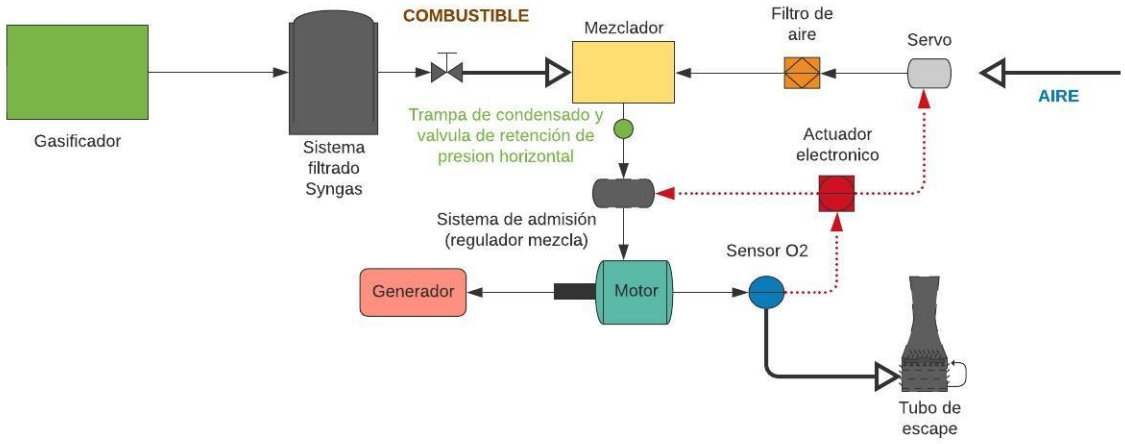


Figura 2.12: Diagrama de Funcionamiento Motor Kubota

Este sistema es conformado por un actuador electrónico ubicado en la entrada de admisión de combustible del motor. Este actuador esta conectado al servo (servomotor), quien regula la cantidad de aire que pasa a través de un filtro hasta llegar al mezclador. Además, el actuador también se encuentra conectado a un sensor de O_2, el cual se ubica en la zona de gases de escape. En su conjunto, tanto el actuador como el servo y el sensor permiten regular la cantidad de mezcla que requiera ingresar al motor, debido a la carga que se genere [8].

Capítulo 3

MARCO TEÓRICO

3.1. Curvas Características de un Motor

Son representaciones gráficas que me permiten conocer el comportamiento de ciertos parámetros importantes de un motor de combustión interna, entre los cuales se distinguen la potencia, el torque o par motor y el consumo especifico de combustible en función del crecimiento de la velocidad de rotación del cigüeñal [10].

3.1.1. Potencia

La potencia es empleada para indicar la cantidad de trabajo que se puede realizar en una unidad de tiempo. Para este caso (Fig. 3.1), la curva de potencia nos indica que a medida que aumentamos la velocidad de giro, la potencia al freno incrementa de forma lineal hasta un punto, en que por seguridad, el regulador de combustible disminuye el ingreso de éste y genera una disminución de la potencia pese a tener una alta velocidad de giro.

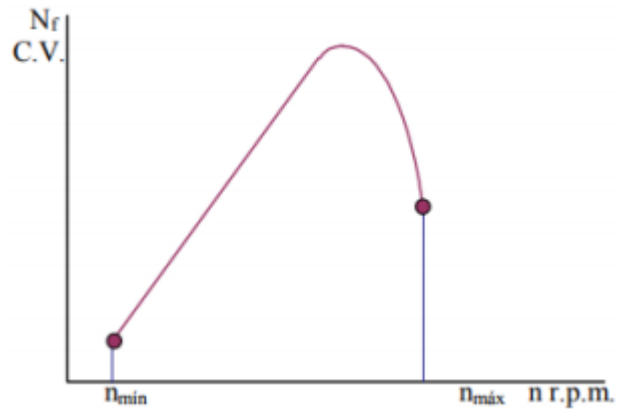


Figura 3.1: Curva característica potencia v/s rpm [10]

3.1.2. Torque o Par Motor

El torque o par motor mide la fuerza aplicada a un eje que gira sobre si mismo a una determinada velocidad. En este caso, nos referirnos a la fuerza necesaria para que el cigüeñal gire y sea capaz de transmitir movimiento a los otros elementos del motor. Esta fuerza es realizada por el pistón, la cual no es constante en la etapa de expansión ya que al interior del cilindro el valor máximo de potencia es generado con la ignición del combustible, llevando consigo el valor de par máximo. Además, es importante mencionar que el par producido depende de la potencia que se genera en el interior de los cilindros, la que a su vez, se ve afectada por el rozamiento que existe y que a medida que la velocidad aumenta, genera perdidas de potencia mas significativas.

La Fig. 3.2 correspondiente a la curva característica de par motor, muestra que existen dos partes, una zona de funcionamiento no flexible y otra de funcionamiento flexible. Las que se encuentran delimitadas por el par máximo generado.

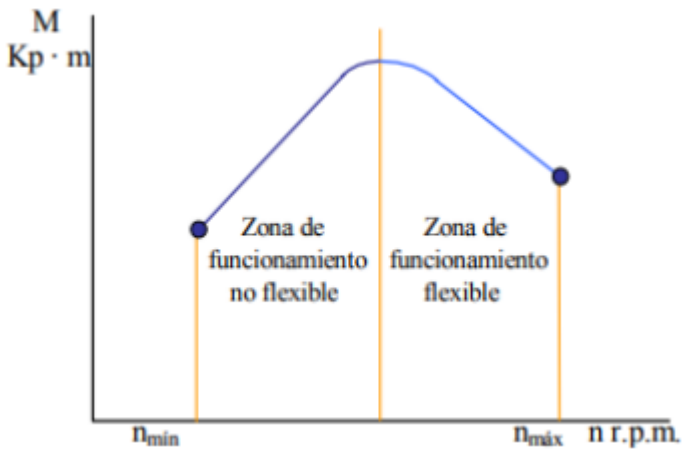


Figura 3.2: Curva característica par motor v/s rpm [10]

3.1.3. Consumo Especifico de Combustible

La curva de consumo especifico de combustible (g_e) viene representada por el caudal de combustible consumido por el motor y la potencia proporcionada. Tiene la finalidad de comparar la eficiencia de distintos motores para encontrar el combustible óptimo, es decir, saber cual es el combustible que se consume en menor cantidad y me otorga mayor cantidad de potencia. Su unidad de medida es de $[\frac{g}{kWh}]$.

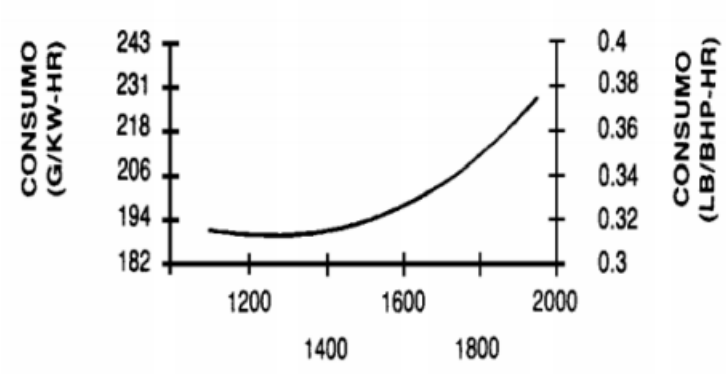


Figura 3.3: Curva característica consumo especifico de combustible v/s rpm [10]

3.1.4. Flujo másico y caudal volumétrico de combustible

Dependiendo del fabricante, estas curvas se presentan por separadas o todas juntas en un mismo diagrama, dicha información me permite determinar el flujo másico de combustible para alguna velocidad en especifico mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_c = P \cdot g_e \tag{3.1}$$

y el caudal volumétrico de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c \cdot 1000} \tag{3.2}$$

3.2. Capacidad Tubería a Gas

Las capacidades de las tuberías para presiones iguales o superiores a 10[kPa] están sujetas a las condiciones de presión de trabajo del sistema a diseñar [4] .
Para el caudal, tendremos la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_c = 0,12426 \cdot (D \cdot 25,4)^{2,623} \cdot [(P_1^2 - P_2^2) \cdot \frac{Y}{C_r \cdot L}]^{0,541} \tag{3.3}$$

para el caso de la potencia:

$$P = 0,0345 \cdot (D \cdot 25,4)^{2,623} \cdot [(P_1^2 - P_2^2) \cdot \frac{Y}{C_r \cdot L}]^{0,541} \cdot PCS \tag{3.4}$$

donde:

$$Cr = 0,00639 \cdot S \cdot T \cdot (\frac{Z}{S})^{0,152} \tag{3.5}$$

y para la velocidad del gas:

$$V = 1,25 \cdot \dot{Q}_c \cdot \frac{T}{P_2 \cdot (D \cdot 25,4)} \tag{3.6}$$

De acuerdo a lo establecido por la norma, si las presiones son superiores a la de abastecimiento directo del equipo, independiente del tipo de gas a utilizar, la velocidad del flujo deberá ser inferior a 40 [m/s].

3.3. Caudal volumétrico de aire

Para obtener el caudal volumétrico de aire, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_a = C_{total} \cdot 0,5 \cdot \omega_o \cdot \frac{60}{1000000} \tag{3.7}$$

Además, se aplica un factor 0,5 que considera la mitad de la cilindra por ser un motor de cuatro tiempos y requerir de 2 revoluciones completas para realizar un ciclo.

Capítulo 4

DISEÑO SUMINISTRO DE GAS NATURAL PARA MOTOR KUBOTA EN EL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS

Debido a la altura que presenta el gasificador con todo sus respectivos componentes y el acceso que tiene la cabina del laboratorio para poder ingresar equipos es que se procede a desacoplar algunos elementos que para efectos de este trabajo no son relevantes y así, realizar el montaje de los principales componentes que forman parte del motor y que permitan la puesta en marcha del mismo. De tal manera, nos permite conocer las conexiones propias de cada uno de sus elementos para el diseño de las lineas de suministro de aire, combustible y escape que se instalaran en la cabina del laboratorio.

Como se presento en el capitulo anterior de los componentes del sistema motor-gasificador, cada uno de estos elementos están dependiendo entre si, por ende, no es factible desacoplarlos del gasificador ya que existen conexiones electrónicas que regulan el funcionamiento de algunos componentes y además, no son piezas de gran tamaño que

compliquen el montaje al interior de la cabina.

Las piezas que se desinstalaron fueron las siguientes:

- Tolva
- Antorcha
- Reactor
- Sopladores
- Tubo de escape
- Tambor sistema de filtrado Syngas
- Ciclón



Figura 4.1: Montaje conjunto motor al interior de la cabina

El conjunto quedo montado al interior de la cabina (Fig. 4.1) y como se puede apreciar, éste cuente con los componentes principales del motor, además de estar sobre en una estructura de acero que permite dar seguridad, altura y facilitar los trabajos que se realizan sobre el equipo.

Ya con el equipo a disposición completa en el interior de la cabina del laboratorio se pueden reconocer las principales conexiones para la admisión y el escape del equipo.

4.1. Layout

El layout preliminar del diseño considera el trayecto más conveniente para la instalación de los elementos del suministro de gas natural, aire y gases de escape. Entre ellos se consideran las conexiones a cada uno de sus instrumentos y el acoplamiento a las lineas ya existentes por parte del gasificador. Para mayor detalle revisar Anexo A (Layout Diseño de Montaje Experimental) al final del documento.

4.2. Propiedades del gas natural y parámetros de operación

Tabla 4.1: Propiedades del gas natural [4]

Propiedad	**Unidad de Medida**	**Valor**
Densidad (cond. estándar)	kg/Sm^3	0,717
Densidad Relativa	-	0,87
Poder Calorifico	MJ/m^3	37,54
Viscosidad	cP	0,0012
Factor de supercompresibilidad	-	0,9992
Temperatura del gas	°C	-160

4.3. Cálculos

4.3.1. Flujo másico de combustible

Para determinar el flujo másico de combustible, es necesario el uso de las curvas de rendimiento del motor efectuado a su máxima velocidad, es decir, a los 3.600 [rpm] e intersectando la curva de combustible especifico neto intermitente (9) a esta velocidad.

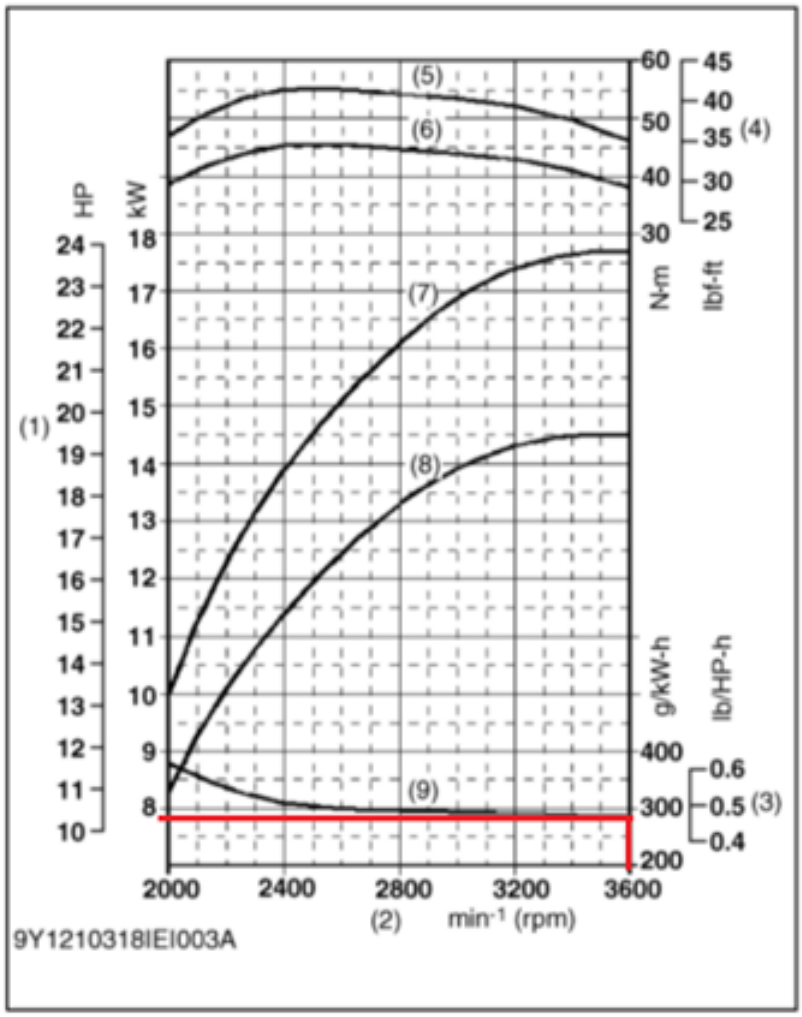


Figura 4.2: Curva de rendimiento Motor Kubota DG972 intesectada a 3.600 [rpm]

De acuerdo al valor que entrega la curva de la Fig. 4.2 el consumo específico de combustible a 3.600 [rpm] es de aproximadamente 290 [g/kW-hr]. Además, cuando el mo-

tor se encuentra operando a su máxima velocidad, la potencia generada es de 17,6 [kW]. Por lo tanto, usando la Ec. 3.1 el flujo másico de combustible debe ser de 5.104 [g/h] cuando el motor opera a toda velocidad.

4.3.2. Caudal volumétrico de combustible

Con el flujo másico de combustible obtenido se procede a utilizar la Ec. 3.2 para determinar el caudal volumétrico de combustible necesario para operar el motor a su máxima velocidad de 3.600 [rpm] a condiciones estándar el cual nos da un valor de 7,12 [m^3S/h]

4.3.3. Variación de presión

Este cálculo considera distintos diámetros de tubería y como esto afecta la variación de presión que debe existir en el sistema. Como se menciona anteriormente, la entrada de admisión de combustible es de 1 [in] y se mantiene constante en el ingreso del mezclador y de allí hacia la cámara de combustión del motor. Además, consideraremos el punto 1 o de partida la salida del regulador de presión y como punto 2 o final, la entrada al mezclador. Para fines del diseño, se consideran los siguientes parámetros:

Tabla 4.2: Parámetros para el cálculo de presión

Parámetros	**Datos**
Caudal [m^3S/h]	7,12
P_2 [bar]	1
Longitud tubería [m]	6
Diámetros de tubería [in]	1/4 3/8 1/2 3/4 1 2

Para cada uno de estos diámetros, se determina la presión de entrada (P_1) que debiese tener el sistema a la salida del regulador de presión de tal manera que al momento de

establecer la presión esta sea la adecuada y no encontrar una situación de baja presión que impida que el gas circule hasta el motor o el caso contrario, un exceso de presión que pueda afectar la linea de combustible, que genere mayor caudal de ingreso al motor o que pueda desviarse por la linea de aire y salir al exterior de la cabina.

Para determinar P_1, se procede a utilizar la Ec. 3.3, pues el gas de trabajo se encuentra a presiones mayores que la atmosférica (100 [kPa]), por ello se despeja el termino a conocer obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 4.3: Valores obtenidos de presión de entrada (P_1) y variación de presión (ΔP) para distintos diámetros de tubería

Diámetro tubería [in]	P_1 **entrada [bar]**	ΔP **[bar]**
1/4	1,147094	0,147094
3/8	1,021874	0,021874
1/2	1,005467	0,005467
3/4	1,000767	0,000767
1	1,000190	0,000190
2	1,000007	0,000007

Graficando los valores:

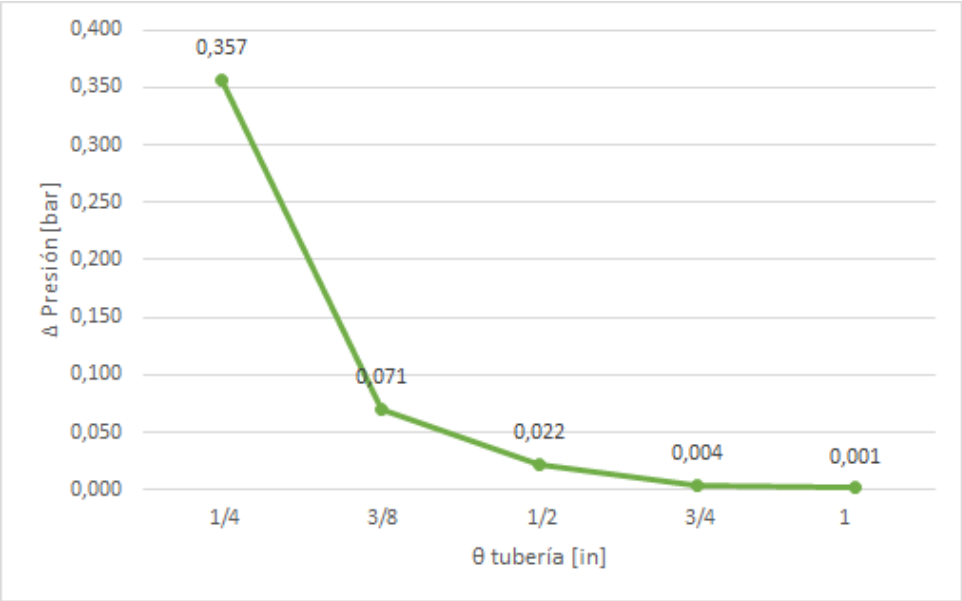


Figura 4.3: Gráfica de Δ Presión v/s Diámetro de tubería

Como podemos notar, a medida que el diámetro de la tubería aumenta la variación de presion es cada vez mas pequeña y tiende a cero [abs]. Desde el punto de vista de la linea de gas del sistema significa que la presion que debe operar el cilindro una vez que salga del regulador debe ser similar a la atmosférica. Por supuesto que para diámetros de trabajo muy pequeños, este valor aumenta pero viendo las magnitudes que esta presenta aún así son bajas y no generan mayor diferencia para distintos de diámetro. Es por ello, que la limitante del tamaño de la sección vendrá determina por los elementos o instrumento que se instalen en la linea de acuerdo capacidades que estos presenten.

4.3.4. Velocidad del flujo

De acuerdo a la Ec. 3.6 la velocidad del flujo obtenida es de 39,59 [m/s] y se encuentra dentro del valor establecido por la norma.

4.3.5. Caudal volumétrico de aire

De acuerdo a la Ec. 3.7 con los datos del motor y la velocidad de operación del mismo el caudal volumétrico de aire operando el motor a su máxima velocidad es de 103,90 $[m^3S/h]$

4.4. Resumen valores calculados de diseño

Tabla 4.4: Valores de diseño

Parámetros	**Valor obtenido**
$\dot{m}_c$ [g/h]	5.104
$\dot{Q}_c$ $[Sm^3/h]$	7,12
Presión de servicio [bar]	1,15 - 1
V [m/s]	39,59
$\dot{Q}_a$ $[m^3S/h]$	103,90

Capítulo 5

IMPLEMENTACIÓN LINEA DE SUMINISTRO DE GAS NATURAL EN CONEXIÓN A LINEA DE SYNGAS

Para conseguir la implementación de la linea de gas natural, es necesario conocer las conexiones existentes en el gasificador una vez desacoplado de él algunas de sus parte e instalado en la cabina de motores del laboratorio. Además, para poder conseguir la puesta en marcha del motor, se requiere considerar las conexiones tanto del aire, como de los gases de escape para ser adaptados a las salidas existentes que presenta la cabina y armar las lineas respectivas de forma segura y utilizando adecuadamente los fitting que el sistema requiera.

5.1. Conexiones linea de syngas y aire del gasificador

La linea de syngas y aire que presenta el sistema de gasificación finaliza en la conexión Tee que tiene la función de mezclador, en la cual dos de sus vías reciben tanto el syngas

como el aire y una tercera vía para la extracción de la mezcla de ambos hacia el motor (Fig. 5.1a).



(a) Lineas de flujo mezclador Tee (b) Conexiones mezclador Tee

Figura 5.1: Admisión mezclador Tee

Al desconectar ambas mangueras se nota el tipo de conexión que tienen (Fig. 5.1b) que serian las siguientes:

Tabla 5.1: Conexiones mezclador Tee de combustible y aire

Linea	**Tipo de conexión**	**Diámetro [in]**
Combustible	F-NPT	1
Aire	M-NPT	1

Para ambos casos se considera lo establecido en el layout para adaptar el tren de suministro en conjunto a la linea del syngas y del aire , de tal manera que podamos trabajar con el gas natural de manera externa o un combustible externo, con el syngas propio de la gasificación e incluso, con la mezcla de ambos si a futuro se quisieran realizar pruebas. Por otra parte, se requiere instrumentar ambas lineas para poder controlar y conocer los parámetros de funcionamiento del motor.

5.2. Conexiones linea de gases de escape

En el caso del escape, este tiene un sistema flexible de acero que permite ser maniobrado fácilmente para ser posicionado según sea conveniente (Fig. 5.2a).



(a) Manguera flexible de ecape



(b) Conexión roscada interior del escape

Figura 5.2: Sistema salida de escape

En particular, la salida de este aparato esta diseñada para ser conectada mediante una placa al reactor del gasificador, sin embargo para los efectos de este proyecto se cuenta con una conexión roscada en su interior (Fig. 5.2b) con las siguientes características:

Tabla 5.2: Conexión escape

Linea	**Tipo de conexión**	**Diámetro [in]**
Escape	F-NPT	1 1/2"

La salida del escape propia de la cabina de motores es un tubo de acero galvanizado liso de 2 [in] de diámetro (Fig. 5.3) , el cual puede ser cortado y soldado en caso de ser requerido para realizar la conexión con el escape del motor.



Figura 5.3: Linea de escape cabina motores

5.3. Instrumentación

En esta sección se presentan los instrumentos que son necesario instalar para poder conocer y controlar los distintos parámetros que estarán presentes en el funcionamiento del motor y que además, serán restrictivos al momento de dimensionar sus conexiones debido a que las capacidades requeridas limitan y afectan directamente en el tamaño de los instrumentos utilizados. Por otra parte, es necesario mencionar los elementos de seguridad que deberán implementarse al sistema.

Al momento de la cotización y adquisición de todos estos elementos la limitante fue la válvula de antirretroceso de llama, la cual solo estaba disponible con un diámetro de 3/8 [in], lo mismo el controlador de flujo, debido a la capacidad de trabajo que debe tener,

éste solo se encontraba disponible para diámetros entre 3/8 y 3/4[in]. Es por ello, que la linea de suministro de combustible está configurada a 3/8 [in] debido a las capacidades y limites de los equipos e instrumentos que deben ser instalados y también, para evitar cambios de secciones, tratando de que el sistema solo varíe de sección cuando se está en la Tee de mezclado. De acuerdo a lo calculado en el punto de diseño, no es perjudicial utilizar este diámetro ya que las variaciones de presion son muy pequeñas.

5.3.1. Controlador de Flujo de gas

Tabla 5.3: Características del Controlador de Flujo

	▪ **Marca:** Brooks Instrument [12] ▪ **Modelo:** GF101 ▪ **Conexión:** 3/8 [in] M-NPT ▪ **Rango de medición:** 0 - 200 [SLPM] ▪ **Precisión:** 0,5 % ▪ **Tipo de lectura:** Digital ▪ **Puede configurarse para operar distintos fluidos**

5.3.2. Rotámetro para Aire

Tabla 5.4: Características del Rotámetro

	▪ **Marca:** Brooks Instrument [13] ▪ **Modelo:** 3810G ▪ **Conexión:** 1 [in] F-NPT ▪ **Rango de medición:** 18 - 150 $[Sm^3/h]$ ▪ **Precisión:** 5 % ▪ **Rango Tº:** -15 [ºC] a 75 [ºC] ▪ **Tipo de lectura:** Análoga

5.4. Implementos de Seguridad

5.4.1. Válvula de Corte

Tabla 5.5: Válvula de corte

	▪ **Tipo de válvula:** De bola [14] ▪ **Material:** Acero inoxidable AISI 316 ▪ **Conexión:** 3/8 [in] F-NPT ▪ **Presión máx de trabajo:** 1.000 [Psi] (69 [bar]) ▪ **Tº máx. de trabajo:** 180 [ºC]

5.4.2. Válvula Antirretroceso de Llama

Tabla 5.6: Válvula antirretroceso de llama

	▪ **Marca:** Witt [15] ▪ **Modelo:** RF53N ▪ **Conexión de entrada:** 3/8 [in] F-NPT ▪ **Conexión de salida:** 3/8 [in] M-NPT ▪ **Presión máx de trabajo:** 5 [bar]

5.5. Instalación e implementación de instrumentos y elementos en las lineas de gas natural, aire y escape

La implementación de la linea de gas es una de los procesos claves de la puesta en marcha y en particular, es la que presenta mayor complejidad debido a las limitantes de sus elementos, las adaptaciones que se requieren en sus conexiones, los cambios de sección para poder ser conectado al mezclador y que las uniones queden bien selladas para evitar fugas en el sistema.

De acuerdo al punto anterior, la válvula de antirretroceso de llama es el elemento limitante en cuanto al tamaño de la linea de gas y además, por la función que esta cumple, es la que debe estar más cercana al mezclador. Sin embargo los diámetros de la válvula y del mezclador son distintos, para ello se deben agregar una serie de fitting que permitan ir reduciendo la linea de 1 [in] hasta 3/8 [in].

En primera instancia se requiere adaptar la linea de gas con la existente del gasificador, para ello se pondrá una tee unida al mezclador de tal manera de que por una vía ingrese el syngas de gasificación si es que se requiere y por la otra, el gas naturalque se

suministrará de forma externa. Luego, se une a esto un flexible de acero inoxidable que permita realizar las conexiones con la linea y sus elementos de forma cómoda y segura (Fig. 5.4). Se utiliza este flexible, pues la vibración propia del motor una vez funcionando puede generar algún tipo de falla si se utilizara una conexión rígida debido a que se expone a mayores esfuerzos.



Figura 5.4: Conexión de tee y flexible al mezclador

Posteriormente, con el uso de fitting y reducciones de sección se une la linea con la válvula de antirretroceso incorporando una válvula de corte (Fig. 5.5) que cierre el paso de gas externo y que solo permita el uso de syngas en el sistema.



Figura 5.5: Conexión válvula antirretroceso, válvula de corte y flexible

Para armar la linea de gas, se utilizaron tubos de acero inoxidable y se instalaron siguiendo el layout por el interior de la cabina hasta la parte externa de ella donde llegara a un mesón para ubicar el controlador de flujo.

Según lo presentado en el layout de diseño, las lineas de aire de del gasificador y de alimentación externa deben operar de manera independiente, en la cual esta última contempla la instrumentación de un rotámetro. Además, debe existir la condición de que la linea propia de admisión de aire del proceso de gasificación también este presente en caso de ser requerida. Es por ello, que se utilizarán ciertos fitting en la adaptación y unión de ciertos elementos de la linea, la cual a su vez, es de manguera de goma.

Como se menciona anteriormente, la conexiones en el mezclador son roscadas y de 1 [in], el rotámetro por su parte cuenta con las dimensiones para acoplarse correctamente a la linea y tiene la capacidad de operar bajo las condiciones calculadas.

Ya en la etapa de instalación de los elementos, éstos deben ser ubicados afuera de la cabina. El rotámetro estará sobre el mesón de trabajo y con ello, una válvula de corte a la salida para permitir o no el ingreso de aire cuando sea requerido (Fig. 5.6a). Siguiendo la linea, se utilizaron niples de acero para realizar conexiones con los codos y la manguera, las cuales fueron fijadas mediante abrazaderas (Fig. 5.6b) hasta llegar al punto en donde debemos realizar la implementación con la linea de aire del sistema de gasificación.



(a) Instalación rotámetro y válvula de corte



(b) Instalación de niples y abrazaderas

Figura 5.6: Instalación elementos linea de aire

Llegado este punto se requiere la instalación de una tee que permita recibir por una parte, la linea de alimentación externa y por la otra vía, la linea existente del gasificador. A esta última se le incorporará una válvula de corte, que al igual que la anterior, permite o no el ingreso de aire si es requerido. Finalmente, la tercera vía de esta tee, deberá conectarse al mezclador para cerrar el circuito de aire y así mezclarse con el gas de trabajo hasta llegar al motor (Fig. 5.7).



Figura 5.7: Conexión tee con linea externa de aire y linea de aire del gasificador

Finalmente, la Fig. 5.8 muestra la instalación de las lineas de gas y aire al interior de la cabina con sus respectivas adaptaciones al sistema de gasificación.



(a) Vista interior de la cabina



(b) Vista superior

Figura 5.8: Vista lineas de gas y de aire

Para realizar la instalación de la linea de escape es necesario extender un tubo que permita llegar al escape de la cabina y a su vez, requerir de una unión en el flexible propio de la salida del motor que permita poder ser acoplado para efectuar la conexión como tal y además, poder desacoplarse en el caso que se requiera retirar el equipo y no perjudique ningún elemento propio del gasificador.



(a) Zona soldada al escape



(b) Extremo roscado con unión americana

Figura 5.9: Adaptación extensión tubo escape cabina

Mencionado esto, se utiliza un tubo que permita la conexión al escape de la cabina (Fig. 5.9a), el cual era curvo en uno de sus extremos y a través de soldadura y algunos cortes se unió a lo existente. Por el otro extremo, presentaba una unión de tipo americana (Fig. 5.9b) que en conjunto a otra sección de tubo con rosca en sus extremos (Fig. 5.10a) se unían entre si y además permitía realizar la conexión con la manguera flexible propia del equipo (Fig. 5.10b). La implementación de esta sección facilita enormemente el desacople del equipo con la linea de escape de la cabina y su vez, permite ser intervenida en caso de recurrir en trabajos de investigación en la linea de escape ya que se puede tomar muestras que necesiten alguna especie de mecanizado o instalación de algún elemento del sistema.



(a) Sección de tubo con unión americana



(b) Sección de tubo roscado

Figura 5.10: Adaptación escape para manguera flexible

Por último, debido al peso de los tubos que se extendieron en la linea se procede a dar soporte y a proteger con una cinta de aislación térmica (Fig. 5.11) con el fin de brindar seguridad en el sistema de escape.



Figura 5.11: Linea de escape soportada y protegida

Capítulo 6

PROTOCOLO DE OPERACIÓN Y BUEN FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR-GENERADOR

En esta sección del trabajo se establece un protocolo de operación enfocado en la seguridad y el buen funcionamiento del equipo, para eso es necesario considerar algunos factores previos como el encendido del gasificador, ya que con ello se activan los elementos electrónicos que son parte del motor como es el caso del regulador o actuador electrónico que se encuentra en la admisión y permite el ingreso de la mezcla a los cilindros del motor y que además, trabaja en conjunto al sensor de O_2 y el generador eléctrico que regula el flujo dependiendo de la carga existente. Por otra parte, se tiene la llave de contacto del motor para darle el arranque, la cual también se ubicada en el panel de control (Fig. 6.1).



Figura 6.1: Encendido y contacto del panel de control

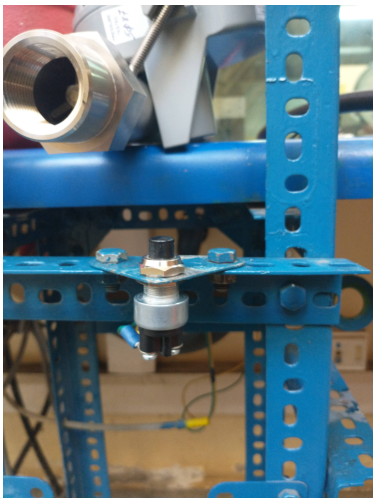
6.1. Externalización sistema de encendido del motor

Como el panel de control se encuentra ubicado al interior de la cabina se vuelve un riesgo el proceso de encendido del motor, por ende, se hicieron intervenciones en el circuito interno del panel sin afectar ni comprometer nada al interior del cableado con el fin de extender el circuito al exterior de la cabina y así, poder trabajar en la puesta en marcha afuera de la cabina de motores. Con esta acción se resguarda el bienestar de quienes operaran los equipos para trabajar de manera segura en las etapas siguientes del proyecto.

Ambos elementos (el interruptor y la llave de contacto) se reubicaron en el mesón de trabajo, en una especie de soporte externo de la cabina y se conectaron a través de un interruptor para dar el on/off del equipo (Fig. 6.2a) mediante un pulsador que cumple la función de ser la llave de contacto del motor (Fig. 6.2b).



(a) Interruptor



(b) Pulsador de arranque motor

Figura 6.2: Elementos de encendido del equipo

6.2. Chequeo de elementos y cambio de piezas

Es importante la realización de un chequeo de cada una de las conexiones y los elementos que se encuentran en la linea de gas, aire y su posterior mezclado para verificar que las uniones se encuentren apretadas y que no hayan piezas faltantes que generen alguna especie de fuga en el trayecto. Es por ello, que se reemplaza una válvula de corte que venia con el equipo (Fig. 6.3a), la cual no cumplía ninguna función. Se reemplazó por un tapón de acero (Fig. 6.3b). Este mismo sistema fue aplicado en la entrada del syngas, ya que como se menciono en un inicio, se desacoplaron elementos del gasificador ya que en particular no se iba a utilizar como tal.



(a) Equipo con válvula de corte



(b) Equipo con tapón de acero

Figura 6.3: Ajuste de equipo

6.3. Presurización de la línea de gas y detección de fugas

Para realizar esta actividad fue necesario conectar al sistema una alimentación de un cilindro de GLP con su respectivo regulador de presión. Esto se conecto a la linea externa de gas implementada anteriormente y ubicada en el mesón de la cabina (Fig. 6.4). Además, se instala un manómetro que permite comprobar que la presion a la salida del regulador sea la misma a medida que el flujo avanza y también se le agrega una válvula de corte para brindar seguridad en caso de cualquier imprevisto que pueda ocurrir. Por otra parte, para realizar la detección de fugas se cerró la válvula de corte ubicada a la salida de la válvula antirretroceso. Efectuado lo anterior se abre el paso de gas para presurizar la linea, en caso de notar una caída de presion se requiere el uso de un detector de fuga (Fig. 6.5) con el cual se inspecciona cada una de las conexiones del sistema desde el cilindro de gas hasta la válvula de antirretroceso y así, volver a apretar y fijar las uniones en si. En caso de no presentar caída de presion, se considera que el sistema no presenta fugas y por ende la linea esta en condiciones seguras para poder

comenzar la siguiente etapa de encendido del motor. De igual forma es recomendable inspeccionar nuevamente las conexiones con el detector.



Figura 6.4: Cilindro de gas para presurización y detección de fugas



Figura 6.5: Detector de fuga

6.4. Protocolo de encendido

- Realizar una inspección visual del motor, las conexiones, las lineas de gas, aire y escape para verificar que se encuentran operables y que no existan elementos en su alrededor que puedan ocasionar algún daño mientras los equipos se encuentren encendido.

- Verificar que la llave de paso de aire del sistema de gasificación se encuentre cerrada.
- Verificar que la llave de paso ubicada a la salida de la válvula de antirretroceso de llama se encuentre abierta.
- Despejar la cabina en cuanto a personas, para que no haya nadie en su interior y así, mantener cerrada la puerta una vez iniciada la actividad.
- Encender el extractor de aire para mantener limpio el aire de la cabina y extraer gases dañinos o inflamables que pueden estar presentes antes de la partida del motor.
- Levantar interruptor de encendido del equipo. Se debe esperar hasta que el panel de control quede completamente encendido.
- Abrir válvula de corte del aire ubicada a la salida del rotámetro.
- Encender el controlador de flujo.
- Abrir la válvula de paso del cilindro de gas. Es importante verificar que la presión a la salida del regular debe ser cercana a 0 [kPa]. Esto se debe a que la presion absoluta a la salida del regulador debe ser similar a la atmosférica y la medida que nos entrega el regulador son manométricas.
- Contar con un extintor de gases cuando se realicen la pruebas.
- Abrir suavemente la válvula de corte de gas ubicada en el mesón de trabajo (al 50 %) y comenzar a presionar el pulsador (llave de contacto) para dar arranque al motor.
- Soltar el pulsador una vez efectuado el arranque del motor.
- Abrir al máximo la válvula de corte de gas.
- Trabajar con los equipos.

6.5. Protocolo de apagado

- Cerrar la llave de paso del cilindro de gas. Al efectuar esto, el motor seguirá operando con el gas residual que tenga la linea hasta consumirlo completamente. Esto ayuda a evitar que quede gas en el interior y ocasionará el apagado del motor.
- Esperar a que el motor se apague.
- Cerrar la válvula de corte del aire ubicada a la salida del rotámetro.
- Cerrar la válvula de corte de gas ubicada en el mesón de trabajo.
- Apretar el interruptor de apagado del equipo.
- Apagar el controlador de flujo.
- Esperar unos minutos que el extractor de aire siga funcionado para extraer gases tóxicos que quedar en el aire al interior de la cabina, luego de ese periodo apagar el extractor.
- Ingresar al interior de la cabina y cerrar la válvula de corte de gas ubicada a la salida de la válvula antirretroceso de llama.

Capítulo 7

PRUEBAS EXPERIMENTALES DE OPERACIÓN DEL MOTOR

En esta sección del trabajo se mencionan las pruebas experimentales que se realizaron en el motor para su puesta en marcha, en donde se trabaja con el protocolo de funcionamiento mencionado en el inciso anterior. Sin embargo, las pruebas se hicieron con GLP y con un controlador de flujo distinto, con otras capacidades y características debido a que no se disponía de uno similar al requerido, además se uso GLP ya que existieron retrasos en la adquisición de gas natural o metano para poder efectuar las pruebas, lo mismo para el caso del controlador de flujo. Pese a esto, el objetivo de este trabajo es poner en marcha el motor, comprobar que las lineas funcionan correctamente y que el motor puede sostenerse encendido durante un periodo de tiempo y así no retrasar trabajos futuros o de otros integrantes del equipo. De cierto modo, el sistema es trazable e independientemente del gas que se utilice, los procedimientos siguen siendo los mismo y solo se deben adecuar las cantidades y presiones del sistema de trabajo.

El controlador de flujo suplente es el siguiente:

Tabla 7.1: Controlador de flujo Aalborg

	▪ **Marca:** Aalborg ▪ **Modelo:** GFC17 ▪ **Conexión:** 1/8 [in] M-NPT ▪ **Rango de medición:** 0 - 5 [SLPM] ▪ **Precisión:** 1 % ▪ **Tipo de lectura:** Digital ▪ **Gas:** CH_4

A continuación se describen las 4 pruebas realizadas para la puesta en marcha del motor. Estas se efectuaron con y sin el controlador de flujo suplente y también realizando un ajuste en la linea de gas, la cual ingresaba directamente a la admisión del motor (Fig. 7.1), pues ahí existía un venturi que permitía el ingreso del gas.

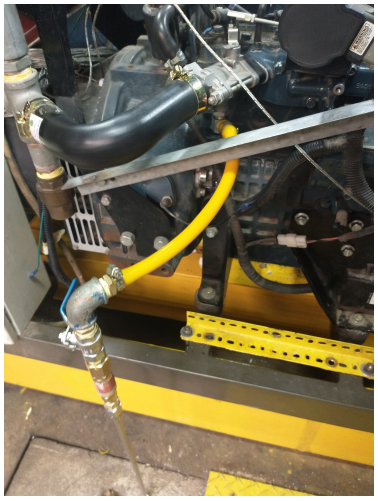


Figura 7.1: Ajuste linea de combustible

1° Prueba: GLP con controlador de flujo

Durante esta prueba se trabajo con el controlador de flujo, ajustando distintos caudales de gas dentro del la capacidades que el equipo podía aportar. El rango de operación era pequeño hasta 5 [LPM], sin embargo no se logro el encendido del motor y tampoco se efectuaron intentos de arranque de su parte.

2° Prueba: GLP sin controlador de flujo

Para esta prueba se quito el controlador de flujo, pues se considero que el caudal de operación era pequeño y el equipo no contaba con la capacidad que se requería para dar inicio al encendido del motor. Además, en esta prueba se verificó si el gas estaba llegando correctamente y por ello, se decide utilizar el detector de fugas en la conexión tee donde estaba el tapón de acero por donde se realiza la admisión del syngas y se comprobó que el gas no estaba llegando ya que el detector no dio ninguna señal de gas en la linea. Es por ello que la prueba finalmente no dio ningún tipo de resultado y se decide buscar otra alternativa donde suministrar el gas, la cual era directamente en la admisión del motor.



Figura 7.2: Vista de la cabina con la linea alternativa de combustible

3° Prueba: GLP con controlador de flujo en linea alternativa de combustible

Como se menciona anteriormente, se cambia la linea de gas y con ello, se vuelve a utilizar el controlador de flujo, pues el hecho de que no haya encendido el motor puede ser causado por cantidad inadecuada de suministro de caudal de gas y por ello hay que comprobarlo. Se repite el arranque del motor, el cual no tuvo éxito pese a que nuevamente se realizaron los ajustes en el controlador de flujo.

4° Prueba: GLP sin controlador de flujo en la linea alternativa de combustible

Finalmente se quita el controlador de flujo y se realiza el procedimiento de encendido del motor, el cual da arranques y después de un par de intentos logra encender de manera exitosa. Sin embargo, el no contar con un controlador de flujo se desconoce la cantidad de gas que se le esta suministrando al motor, la única herramienta usada para controlar el sistema es una válvula de corte ubicada en el mesón de trabajo, la cual no entrega información del flujo. Debido a las condiciones mencionadas y la falta del controlador se proceden a realizar pruebas para determinar la concentración másica de MP a distintas velocidades del motor en un rango determinado de tiempo y las cuales se irán midiendo a través de dos equipos, el eFilter y un tacómetro digital respectivamente.



Figura 7.3: eFilter Dekati [16]



Figura 7.4: Tacómetro Lutron

7.1. Resultado Obtenidos

Los resultados obtenidos para esta prueba se presentan en la Tabla 7.2. Las mediciones realizadas consideran la velocidad de giro inicial con su hora respectiva y su velocidad final con su hora respectiva. Para cada una de las mediciones se considera un rango de 5 minutos y se registran los valores finales de la velocidad.

Tabla 7.2: Resultados obtenidos

N°de Medición [-]	**Velocidad inicial** [rpm]	**Hora Inicial** [hh:mm:ss]	**Velocidad final** [rpm]	**Hora final** [hh:mm:ss]
1	3.371	12:03:00	3.254	12:08:00
2	2.032	12:09:00	2.017	12:14:00
3	3.040	12:17:00	2.974	12:22:00
4	2.523	12:25:00	2.477	12:30:00
5	3.173	12:33:00	3.141	12:38:00
6	2.213	12:43:00	2.210	12:48:00

Para cada una de las mediciones realizadas se van registrando las concentraciones de MP segundo a segundo y se puede notar su comportamiento en las siguientes gráficas:

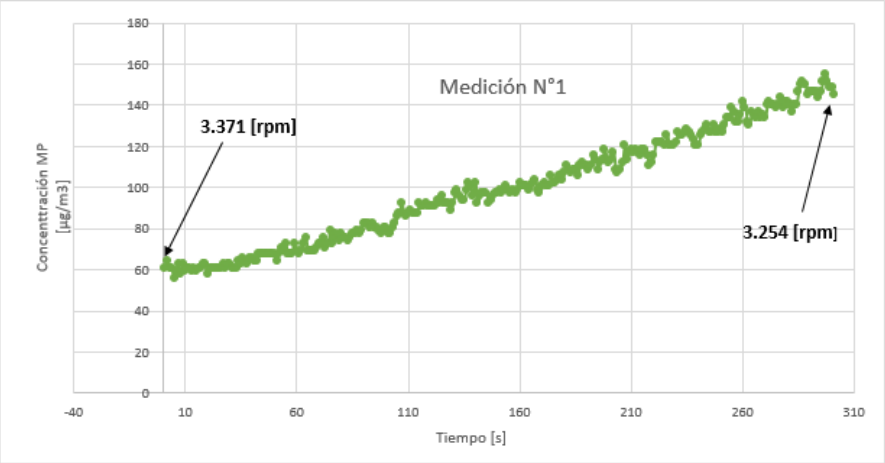


Figura 7.5: Gráfico medición N°1

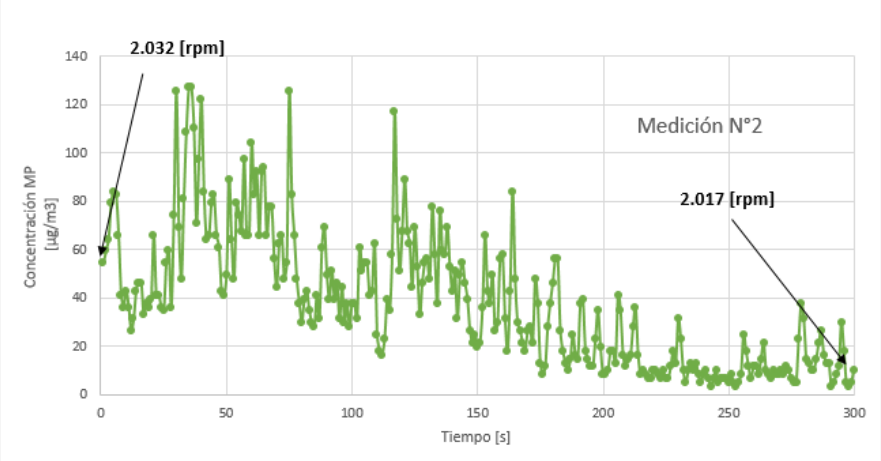


Figura 7.6: Gráfico medición N°2

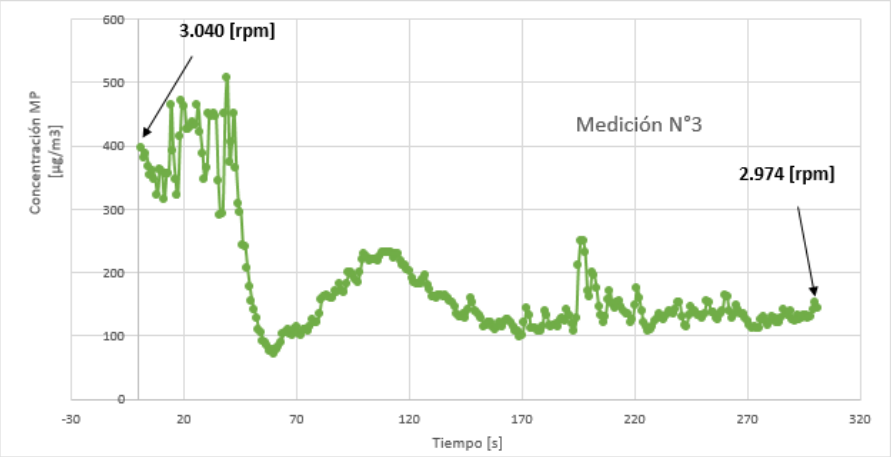


Figura 7.7: Gráfico medición N°3

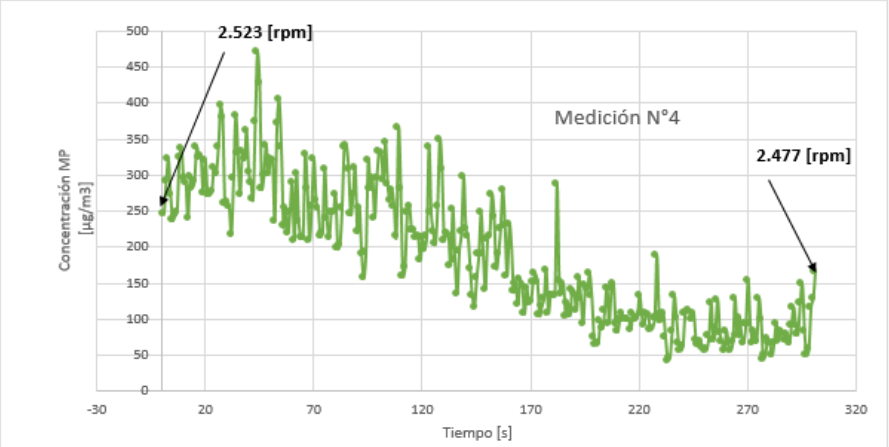


Figura 7.8: Gráfico medición N°4

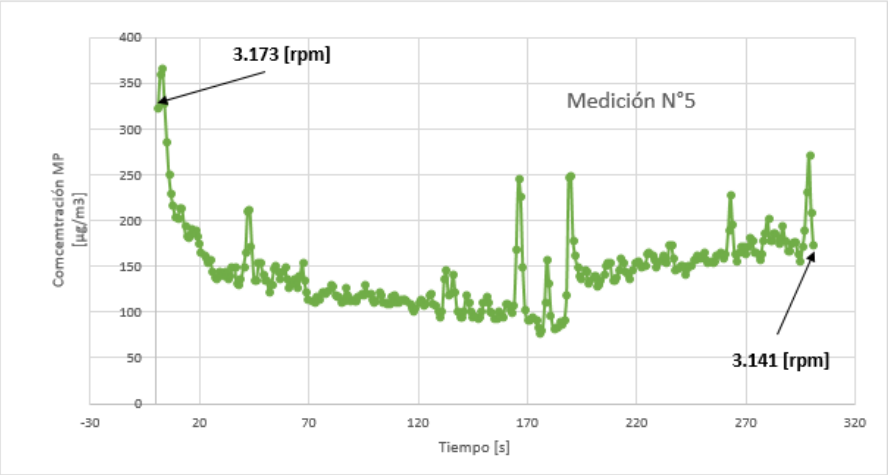


Figura 7.9: Gráfico medición N°5

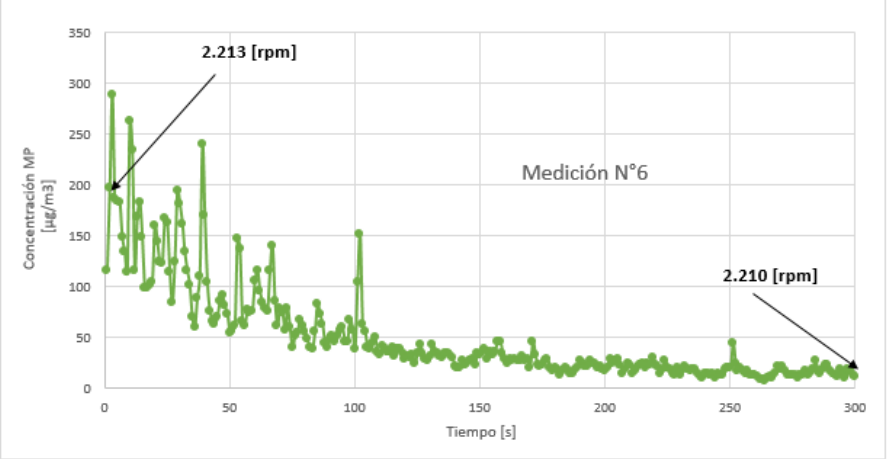


Figura 7.10: Gráfico medición N°6

Al momento de efectuar cada una de las pruebas se presenta una disminución en la velocidad del motor, es decir, no se logra sostener una valor constante y por ende los niveles de concentración de MP se ven afectados y en muchas de ellas no se puede determinar una tendencia de su comportamiento ya que se presenta muchas oscilaciones en los datos registrados. La primera medición es la que tiene una comportamiento mas estable y presenta resultados convergentes, si bien el motor tiende a disminuir su velocidad, en particular esta medición muestra un aumento de concentración de MP a medida que disminuye la velocidad, esto ocurre para velocidades por sobre las 3.250 [rpm]. Para el

caso de velocidades que fluctúan entre 2.200 y 2.500 [rpm] el comportamiento tiende a presentar una disminución del MP pero bajo mucha oscilación de marcas (gráfico 4 y 6). Para el caso de la medición N°2 se presentan datos que no tienen ningún significado y además, a esos niveles de velocidad el motor tendía a ahogarse y podía haberse apagado por falta de gas.

Capítulo 8

CONCLUSIONES

Para concluir este trabajo podemos señalar las siguientes los resultados de acuerdo a los objetivos mencionados en un inicio:

- Se cumple con la adecuación y puesta en marcha del motor al interior de la cabina de motores del laboratorio de Termofluidos de la Universidad Técnica Federico Santa María, sin embargo no se realizó con gas natural como se pretendía, para ello las pruebas fueron realizadas con GLP y tuvieron éxito.

- Se logro diseñar el sistema de suministro de gas natural, para que se pudiese operar en el laboratorio de termofluidos de la Universidad de manera externa y segura, sin embargo se tuvieron que realizar desacoplamientos en las piezas del gasificador debido al tamaño y la altura que presentaba y por ende, no lograba entrar en la cabina. Además, es imposible utilizar el gasificador en el mismo laboratorio, pues requiere de espacio abierto para trabajar debido a las condiciones y los parámetros de operación que debe tener. Por otra parte, no se pudo comprobar si los caudales, las presiones y la velocidad del gas eran las correctas debido a no poder trabajar con gas natural ni contar con el controlador de flujo adecuado.

- Como se menciona en el punto anterior, no es viable utilizar el gasificador en el laboratorio por no contar con las condiciones de trabajo adecuadas, sin embargo,

las lineas de gas quedaron adaptadas para poder recibir el syngas en un caso hipotético de querer trabajar con él. Por otra parte, el proceso de implementación, requería no solo la linea de gas, sino que también adaptar las lineas de aire y de los gases de escape, por lo que se implementaron al sistema de tal forma que permitieron el trabajo al interior de la cabina, para ello fue necesario extender y realizar algunas modificaciones, agregar conectores y fittings quedando todo bien seguro para operar el motor.

- Se logra establecer un protocolo para la operación de los equipos, este consistía en un instructivo para el encendido y el pagado de los equipos. Este protocolo se utilizo correctamente para las pruebas de puesta en marcha y así garantizar la seguridad de quienes se encontraban efectuando pruebas y/o trabajos en la cabina de motores.

- Las pruebas experimentales, pese a ser con GLP, sirvieron para corroborar que el protocolo de funcionamiento estaba bien, para verificar que las lineas eran seguras, que no presentaban fugas y que se podía trabajar en ellas. Importante es mencionar que es necesario el uso de los equipos adecuados, ya que permite conocer con precisión las variables de trabajo, en particular me refiero al uso de controlador de flujo, ya que no era el indicado y por ello, no se pudo conocer las cantidades de gas para dar la puesta en marcha del motor. Esto se realizo mediante prueba y error. Además, es más riesgoso para el sistema incorporar el gas de forma descontrolada. Por otra parte, al momento de mantener en funcionamiento el motor y efectuar mediciones de concentración de MP en función de la velocidad de giro del motor, éste tendía a tener un comportamiento inestable debido a que su velocidad no lograba mantenerse constante y disminuía con el paso del tiempo y por ende, las resultados obtenidos no permiten concluir mucha información ya que se requiere conocer y controlar otros parámetros del motor como el flujo de gas o la potencia entregada a través del generador. Lo que si, el desarrollo de estas pruebas permiten respaldar que el motor funciona y puede

operar sostenidamente.

Capítulo 9

RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. Recomendaciones

- De acuerdo a lo establecido por la norma de instalaciones interiores es necesario considerar que los cilindros de gas, independiente de su origen, deben ubicarse al exterior del laboratorio. Para ello, deben asesorarse con instaladores profesionales que puedan dar la certificación y así las lineas se encuentren aprobadas bajo las normas nacionales.

- El rotámetro de aire, se encuentra instalado en el mesón de trabajo al exterior de la cabina de manera horizontal, sin embargo, es necesario que este se ubique de forma vertical, debido al mecanismo de trabajo, el cual tiene una especie de flotador que funciona por gravedad en su interior cuando se genera la succión de aire, se eleva para determinar el caudal de operación. Es por ello, que al ubicarlo de forma horizontal el marcador no baja cuando disminuye la demanda de aire.

- Se presentaron inconvenientes del motor de partida ya que en ciertas ocasiones cuando se intento dar el arranque, este no genero ningún tipo de señal eléctrica.

Esto puede deberse a que la batería del motor este fallando y por ende, descargándose rápidamente o bien, el motor de partida esta presentando fallas.

9.2. Trabajos Futuros

- Por supuesto el trabajo necesario a realizar es la puesta en marcha con gas natural, considerando el diseño descrito en este trabajo. Además, se debe operar con el controlador de flujo correspondiente. Esto permitiría conocer los índices de trabajo del motor, además, se puede determinar la relaciones de combustible, ya que a través del rotámetro se conocer el caudal de aire y como éste puede variar de acuerdo a la demanda de combustible que se suministra al motor.

- Considerar la parte electrónica del sistema motor-generador, existen muchas dudas al respecto y se desconoce como opera el motor cuando al generador se le someten diversas cargas. Por la misma linea de la electrónica, se puede realizar trabajo en el regulador electrónico de la admisión de la mezcla, este esta configurado por parte del gasificador y limita el funcionamiento del motor si a este lo queremos someter a trabajos a plena carga.

- Poder realizar trabajos en conjunto al gasificador y determinar comportamientos y parámetros de operación cuando el motor se encuentre alimentado por syngas y gas natural.

Bibliografía

[1] Metrogas. Folleto técnico gas natural.
$http://www.metrogas.cl/userfiles/file/folleto_metrogas_gas_natural.pdf$

[2] Fundación Chile. Gas natural. Ministerio de Energía. https://www.aprendeconenergia.cl/gas-natural/

[3] Garcia Narvaez, C. (2015). Influencia contaminante del uso del gas natural como carburante automotriz.

[4] de Economía, (2008, Agosto). Decreto 66 (02-ago-2008) M. de Economíal Ley Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

[5] The American Society of Mechanical Engineers (ASME). Pipe Threads, General Purpose, Inch B1.20.1 - 2013(R2018)
$https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b1-20-1-pipe-threads-general-purpose-inch$

[6] Material Particulado. Ministerio del Medio Ambiente.
https://airechile.mma.gob.cl/faq

[7] Departamento de Ingeniería Mecánica. Laboratorios. Universidad Técnica Federico Santa María. https://www.mecanica.usm.cl/laboratorios

[8] Cáceres Larraín, R. C. (2015). Determinar parámetros óptimos de operación para funcionamiento de gasificador 10kW junto con el diseño de un plan de mantención del equipo.

[9] All Power Labs Catalog. 10kW 20kW GEK Power Pallet. $https : //www.allpowerlabs.com/wp - content/uploads/2011/10/Catalog_092011.pdf$

[10] Marín Arias, D. Toro Ladino, M. (2018). Caracterización de las curvas de presión, par y potencia de un motor de combustión interna monocilíndrico bajo diferentes regímenes de operación.

[11] Kubota. (2009). Workshop Manual Gasoline, LPG, Natural Gas Engine WG972-E2, DF972-E2,DG972-E2.

[12] Brooks Instrument. Mass Flow Controllers. https://www.brooksinstrument.com/en/products/mass-flow-controllers

[13] Brooks Instrument, Variable Area Flow Meters (Rotameters). https://www.brooksinstrument.com/en/products/variable-area-flow-meters

[14] Danus Conexiones. Válvulas. https://www.danus.cl/wp/product-category/valvulas/page/2/

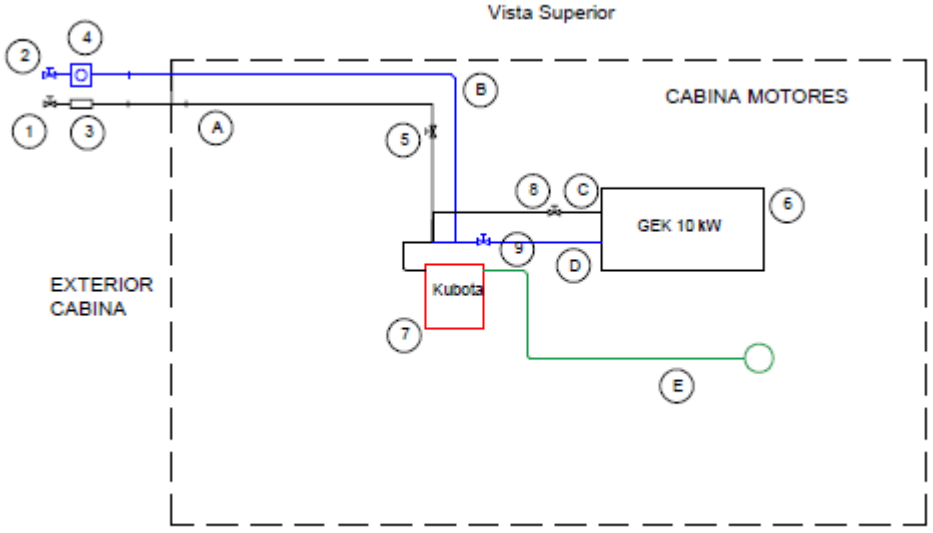
[15] VS Insumos. Valvulas antirreceso de llama. https://vsinsumos.cl/product/valvulas-anti-retroceso-de-llama/

[16] Dekati. (2020). eFilter User Manual Ver 1.4.

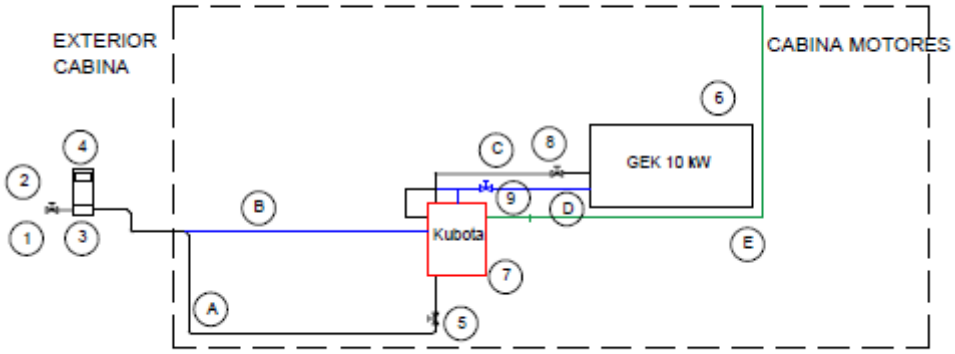
Anexos

A. Layout Diseño de Montaje Experimental

Vista Superior



Vista Lateral



ID	NOMBRE	ID	NOMBRE
A	Línea de gas natural	1	Válvula de corte gas natural
B	Línea de aire exterior	2	Válvula de corte aire exterior
C	Línea de syngas gasificador	3	Controlador de flujo
D	Línea de aire gasificador	4	Rotámetro
E	Línea de gases de escape	5	Válvula antirretroceso de llama
		6	Gasificador GEK 10kW
		7	Motor Kubota DG976
		8	Válvula de corte syngas
		9	Válvula de corte aire gasificador