

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN A SISTEMA BI-FUEL (GAS NATURAL – DIESEL) DE MOTORES DIESEL UTILIZADOS EN GENERADORES DE SERVICIO INTERMITENTE

CARLOS ARNULFO SÁNCHEZ REYES



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETROLEOS
BUCARAMANGA**

2012

ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN A SISTEMA BI-FUEL (GAS NATURAL – DIESEL) DE MOTORES DIESEL UTILIZADOS EN GENERADORES DE SERVICIO INTERMITENTE

CARLOS ARNULFO SÁNCHEZ REYES

Trabajo de Grado para optar al título de Especialista en Ingeniería del Gas

Director

LEONARDO ESTEBAN PACHECO SANDOVAL

PhD en Ciencias Térmicas

M.Sc. Dinámica de fluidos y de transferencias - Ingeniero Mecánico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2012

A mis padres, por su cariño y su incansable dedicación.

A mis hermanos, por su apoyo y tolerancia.

A mi sobrina Manuela Valentina por regalarme tantos momentos de alegría.

A mis amigos y compañeros por su colaboración y apoyo para iniciar y terminar este proyecto.

Carlos.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de manera especial y sincera a las personas que de forma desinteresada colaboraron con el desarrollo de la monografía.

A Leonardo Esteban Pacheco, PhD en Ciencias Térmicas y director del proyecto, por las oportunas orientaciones en la planeación y desarrollo del trabajo.

A Cesar Julio Criollo, Ingeniero Mecánico y Director de Mantenimiento de Estaciones Compresoras de TGI S.A. ESP por su incondicional colaboración y apoyo en el campo laboral.

A Jorge Meneses, Magister en Ingeniería Mecánica, por los valiosos aportes para llevar a feliz término este trabajo.

A Iván Darío Martínez, Jefe División Altronic & GTI Bi-Fuel por su asesoría en los equipos de conversión y la tecnología Altronic.

A los compañeros, profesores y personal de la Escuela de Ingeniería de Petróleos por su colaboración profesional.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	15
1. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVOS	16
1.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL	16
1.1.1 Admisión	16
1.1.2 Compresión	17
1.1.3 Combustión – expansión	17
1.1.4 Escape	18
1.2 PRINCIPALES PARTES DEL MOTOR DIESEL	18
1.2.1 Bloque	18
1.2.2 Cigüeñal	18
1.2.3 Culata	19
1.2.4 Pistón	20
1.2.5 Camisas	20
1.2.6 Bielas	20
1.2.7 Válvulas	20
1.2.8 Árbol de levas	21
1.2.9 Inyector	21
1.2.10 Turbo compresor de aire	21
1.3 SISTEMAS DE MCI A DIESEL	21
1.3.1 Sistema de lubricación	22
1.3.2 Sistema de refrigeración	22
1.3.3 Sistema de admisión y escape	23
1.3.4 Sistema de inyección Diesel	24
1.3.5 Sistema eléctrico y de control	25

2. COMBUSTIBLES	26
2.1 DIESEL	26
2.1.1 Especificaciones del combustible diesel	26
2.1.2 Descripción del proceso de combustión diesel	27
2.2 GAS NATURAL	28
2.2.1 Especificaciones del gas natural	29
2.2.2 Descripción del proceso de combustión del gas natural	30
2.2.3 Cromatografía del gas natural	31
3. SISTEMA BI-FUEL	34
3.1 OPERACION	35
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA BI-FUEL	36
3.2.1 Mezclador de aire / combustible	36
3.2.2 Válvula de potencia de gas	37
3.2.3 Tren de gas	37
3.2.4 Sistema de control del motor	38
3.3 RANGO DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS BI-FUEL.	39
3.4 SISTEMAS BI-FUEL EN COLOMBIA.	41
4. ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA BI-FUEL	43
4.1 ESPECIFICACIONES DE LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS	43
4.2 SELECCIÓN DEL KIT BI FUEL	44
4.3 CONSIDERACIONES DEL GAS COMBUSTIBLE	46
4.3.1 Calculo del flujo de gas combustible	47
4.3.2 Cálculo de la tubería de gas combustible hacia el generador	50
4.4 ACCESORIOS PARA LA INSTALACION	56
4.4.1 Válvula reguladora de presión	56
4.4.2 Válvula manual de bola	58
4.4.3 Kit de conversión Bi-Fuel	58
4.5 CONSIDERACIONES AMBIENTALES	59

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA BI-FUEL	62
5.1 COSTOS DE ADQUISICIÓN E INSTALACION DEL SISTEMA BI-FUEL	62
5.2 AHORRO DE COMBUSTIBLE	64
5.3 ANALISIS DEL RETORNO SOBRE LA INVERSION	66
6. CONCLUSIONES	68
7. RECOMENDACIONES	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	73

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1 Diagrama termodinámico (P-v) del ciclo Diesel	17
Figura 1.2 Principales partes del motor Diesel	19
Figura 1.3 Sistema simplificado para admisión y escape	23
Figura 1.4 Sistema básico de inyección de combustible	24
Figura 3.1 Esquema sistema Bi-Fuel	34
Figura 3.2 Mezclador de aire / combustible	37
Figura 3.3 Válvulas de potencia	37
Figura 3.4 Tren de gas	38
Figura 3.5 Sistema de control el motor	39
Figura 4.1 Equipo electrógeno de estación de compresión de gas Miraflores	45
Figura 4.2 Plano as-built de estación compresora a	48
Figura 4.3 Esquema de válvula reguladora Fisher serie Y600A	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Especificaciones del diesel corriente	27
Tabla 2.2 Especificaciones del gas natural	30
Tabla 2.3 Cromatografía del gas combustible	32
Tabla 2.4 Propiedades del gas combustible	33
Tabla 3.1 Carta de aplicaciones de los Kits GTI Bi-Fuel	40
Tabla 4.1 Listado de equipos electrógenos en estaciones compresoras	44
Tabla 4.2 Criterios de selección de kits Bi-Fuel	46
Tabla 4.3 Consumo de combustible diesel para motores Perkins	49
Tabla 4.4 Consumo Bi-Fuel (70% gas natural – 30% diesel)	49
Tabla 4.5 Consumo Bi-Fuel (50% gas natural – 50% diesel)	50
Tabla 4.6 Factor de diseño, F	54
Tabla 4.7 Factor longitudinal de unión, E	55
Tabla 4.8 Tabla de factor de corrección por temperatura, T	55
Tabla 4.9 Flujo para válvulas reguladoras Y600A de 1" NPT	57
Tabla 4.10 Flujo de válvula reguladora Y600A corregida por G	58
Tabla 4.11 Factores de emisión de carbono y CO ₂ por combustible (kg/GJ)	60
Tabla 5.1 Resumen de costos kit Altronic GTI 5015-1A	63
Tabla 5.2 Resumen de costos kit Altronic GTI 2514-1A	64
Tabla 5.3 Consumo de 100% diesel a diferentes niveles de carga	65
Tabla 5.4 Costo del consumo combustible 30% diesel – 70% gas	66
Tabla 5.5 Costo del consumo combustible 50% diesel – 50% gas	66
Tabla 5.6 Tiempo en horas y días para recuperar la inversión	67

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Bulletin 71-1Y600A	73
ANEXO B Pantallazos FECOC CO2 y SO2	85
ANEXO C Test GTI Bi-Fuel	88

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA CONVERSIÓN A SISTEMA BI-FUEL (GAS NATURAL – DIESEL) DE MOTORES DIESEL UTILIZADOS EN GENERADORES DE SERVICIO INTERMITENTE¹

AUTOR: Carlos Arnulfo Sánchez Reyes **

PALABRAS CLAVES: Bi-Fuel, diesel, gas, natural, conversión, electrógeno.

DESCRIPCIÓN: Este trabajo tiene por objetivo presentar el análisis técnico económico para evaluar la instalación de sistemas de conversión Bi-Fuel en equipos electrógenos de servicio intermitente.

El estudio inicia con una recopilación de información teórica referente a los motores diesel: funcionamiento, partes y sistemas; los combustibles: sus propiedades y proceso de combustión; y los kits de conversión Bi-Fuel: operación, componentes y rangos de aplicación. Posteriormente se presenta la ingeniería conceptual y básica para la implementación del sistema Bi-Fuel, utilizando normas internacionales API y ASME para los cálculos y consideraciones técnicas, para la aplicación en motores diesel Perkins de las series 1006, 1106 y 1306, utilizando gas natural a condiciones del Reglamento Único de Transporte para la sustitución parcial de diesel. Finalmente se presenta el análisis económico para evaluar la viabilidad del proyecto.

Los sistemas Bi-Fuel pueden presentar un porcentaje de sustitución del 50% al 70%, manteniendo la eficiencia del motor y sin realizar modificaciones a los componentes internos del motor. Adicionalmente debido a que para el sistema de transporte por gasoductos el gas combustible tiene un precio significativamente menor al del combustible diesel, se puede recuperar rápidamente la inversión y disminuir los costos de operación.

Con la conversión de los motores diesel a sistema Bi-Fuel se disminuye el impacto ambiental ya que se estima una reducción en la producción de sustancias contaminantes de la siguiente forma: se reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en un 26%, se reducen hasta un 70% las emisiones de óxidos de azufre, (SO_x) y se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) desde un 8% en adelante.

¹ Monografía

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería de Petróleos, Director: PhD. Leonardo Esteban Pacheco Sandoval.

SUMMARY

TITLE: PRE-FEASIBILITY STUDY FOR THE CONVERSION TO BI-FUEL SYSTEM (NATURAL GAS - DIESEL) OF DIESEL ENGINES USED IN GENERATORS THAT OPERATE UNDER INTERMITTENT SERVICE

AUTHOR: Carlos Arnulfo Sánchez Reyes**

KEY WORDS: Bi-Fuel, diesel, gas, natural, conversion.

SUMMARY: This paper aims to present a technical and economic analysis to evaluate the feasibility of conversion to bi-fuel systems of Diesel engines used in Generators that operate under intermittent service.

The study begins with a collection of theoretical information concerning diesel engines: performance, parts and systems; fuels: their properties and combustion process, and conversion kits Bi-Fuel: operation, components and application rates. Conceptual and basic engineering is presented, with calculations and considerations made according to the international standards API and ASME, which were applied on Perkins Diesel engines (Series 1006, 1106 and 1306), using natural gas under conditions stipulated by the Reglamento Único de Transporte. Finally we present the economic analysis to assess the viability of the project.

When converting towards bi-fuel systems, replacement rates from 50 to 70% can be achieved without inducing negative impact on engine performance nor requiring modification of the internal components of the engine. In addition, initial investment can be recovered rapidly and operational cost can be reduced, given the significantly lower fee for natural gas in the transport system compared to diesel.

By converting fuel system of diesel engines to bi-fuel, emissions of Carbon Dioxide (CO₂), Sulfur Oxide (SO_x) and Nitrogen Oxides (NO_x) are reduced to rates up to 26%, 70% and 8% respectively, assuaging negative impact on the environment.

* Monograph

** Physicochemical Faculty of Engineering, School of Petroleum Engineering, Director: PhD. Leonardo Esteban Pacheco Sandoval.

INTRODUCCION

Las dificultades para el transporte de diesel desde las estaciones de servicio (EDS) hasta las instalaciones de las estaciones de compresión del sistema de transporte de gas, la constante búsqueda por disminuir las emisiones contaminantes y el cumplimiento de los requisitos ambientales, determinaron el desarrollo del estudio de pre-factibilidad para la implementación de sistemas de combustible dual para los equipos electrógenos de emergencia de las estaciones de compresión.

Con el objetivo de evaluar técnica y económicamente la implementación de los sistemas Bi-Fuel se consultó la información referente a los motores diesel: funcionamiento, partes y sistemas; los combustibles: sus propiedades y proceso de combustión; y los kits de conversión: operación, componentes y rangos de aplicación, así como la revisión de los casos de implementación en el país. Con esta información y la aplicación de las normas internacionales API y ASME se realizó la revisión y cálculo de las facilidades de superficie, existentes y requeridas para la instalación, y la selección de los kits de conversión a combustible dual para los motores diesel de los equipos electrógenos.

Después se presentan los beneficios ambientales de la sustitución de diesel por gas natural y el análisis económico de la propuesta que define el retorno de la inversión y los costos de operación. Finalmente se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

1. MOTORES DE COMBUSTION INTERNA ALTERNATIVOS

El objetivo de cualquier motor de combustión interna alternativo es transformar en energía mecánica la energía térmica liberada en el proceso de combustión que tiene lugar en el interior de los cilindros o cámaras de combustión. El proceso de combustión consistente en la reacción química de oxidación entre el combustible utilizado y el oxígeno contenido en el aire.

En general, según el tipo de encendido, podemos clasificar los motores de combustión interna alternativos (MCIA) en dos grupos: los Motores de Encendido Provocado (MEP) o de ciclo Otto, en el cual se comprime una mezcla de aire y combustible, produciéndose la combustión por una causa externa, es decir, por el salto de chispa de la bujía; y los Motores de Encendido por Compresión (MEC) o de ciclo Diesel, en el cual se comprime aire hasta que este adquiere una gran presión y temperatura, momento en el cual se inyecta el combustible y se produce la combustión por auto- inflamación del combustible inyectado.

Los equipos electrógenos objeto de aplicación del presente trabajo, operan con motores de ciclo Diesel. A continuación se tratará el funcionamiento, las principales partes y los sistemas asociados a este tipo de motores.

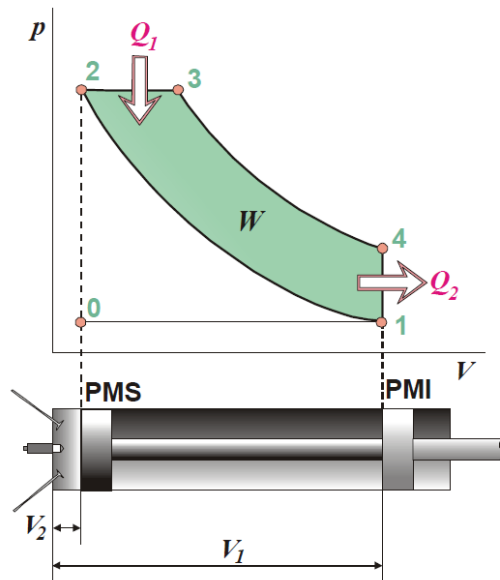
1.1 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIESEL

La figura 1 muestra el diagrama termodinámico P-v idealizado del ciclo diesel, donde se identifican las etapas del ciclo: admisión-compresión-combustión escape. A continuación se describen las etapas del ciclo diesel:

1.1.1 Admisión. (Transformación isobara 0-1) en este momento, el pistón se encuentra en el Punto Muerto Superior (PMS), se abre la válvula de admisión, se

inicia el descenso del pistón hacia el Punto Muerto Inferior (PMI), entrando en el cilindro solo comburente (aire).

Figura 1.1 Diagrama termodinámico (P-v) del ciclo Diesel



Transformación 0-1 y 1-0 \Rightarrow Isóbara a presión atmosférica.

Transformación 1-2 \Rightarrow Adiabática

Transformación 2-3 \Rightarrow Isóbara

Transformación 3-4 \Rightarrow Adiabática

Transformación 4-1 \Rightarrow Isocora

$Q_1 \Rightarrow$ Calor generado en la combustión.

$Q_2 \Rightarrow$ Calor cedido al ambiente o perdido.

Fuente: SANZ, Santiago. Motores, mantenimiento de vehículos autopropulsados.

1.1.2 Compresión. (Transformación adiabática 1-2) cuando el pistón llega al punto muerto inferior (PMI) se cierra la válvula de admisión y el pistón inicia su ascenso hasta el PMS comprimiendo considerablemente el aire. Esta compresión eleva la temperatura del aire.

1.1.3 Combustión – expansión. (Transformación isobárica 2-3 y adiabática 3-4) cuando el pistón se encuentra próximo al PMS, por el inyector, se introduce el combustible a gran presión, produciéndose una explosión como consecuencia del calor desprendido en el roce del aire con el combustible, aumentando considerablemente la presión dentro del cilindro. En este momento se inicia la única carrera útil del ciclo haciendo que el pistón pase desde el PMS al PMI.

1.1.4 Escape. (Transformación isocora 4-1 e isobara 1-0) cuando el pistón llegue de nuevo al PMI se abre la válvula de escape provocando la evacuación de los gases quemados a la atmósfera. El resto de los gases son expulsados por el pistón en su ascenso al PMS. Cuando llega al PMS se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión iniciándose un nuevo ciclo con el descenso del pistón.

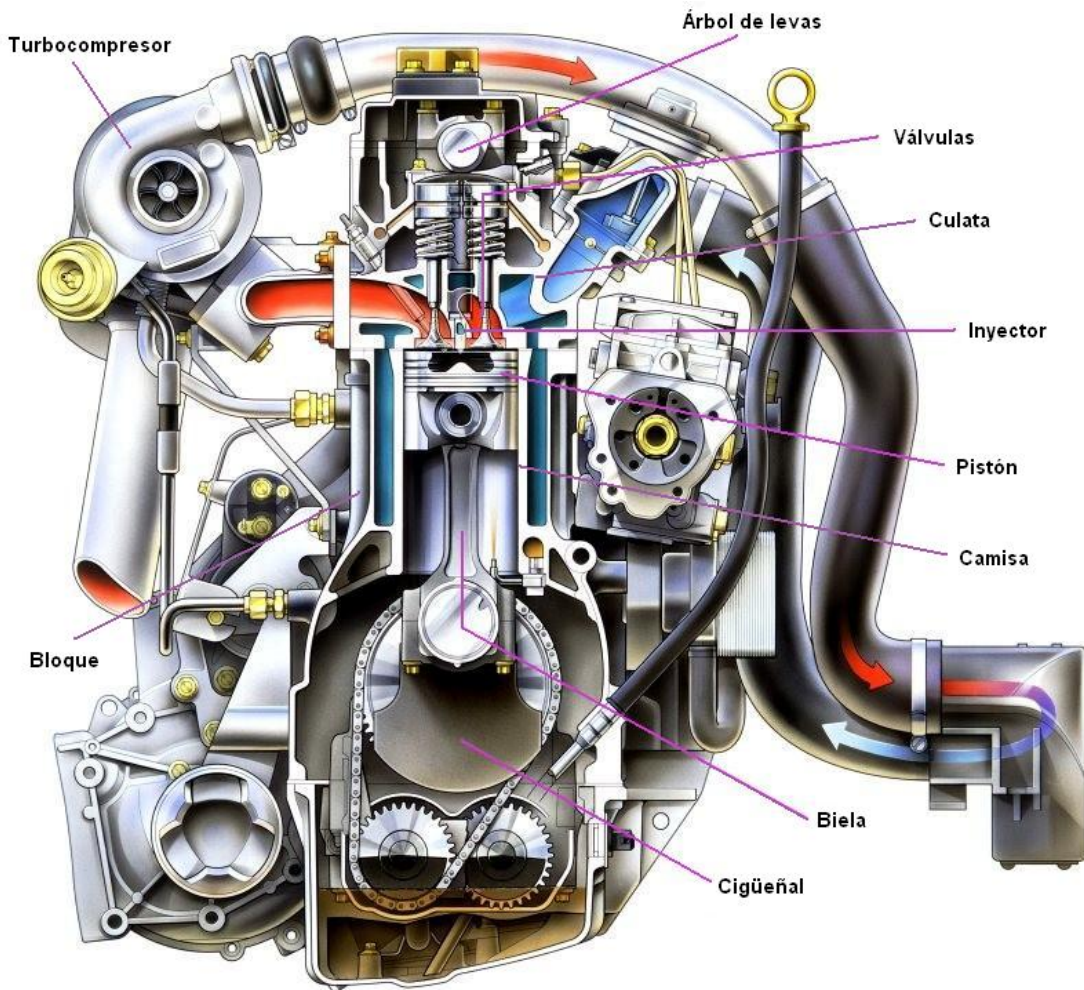
1.2 PRINCIPALES PARTES DEL MOTOR DIESEL

La Figura 1.2 muestra las partes principales que componen un motor de combustión interna de ciclo Diesel, las cuales son: bloque, cigüeñal, culata, pistón, camisas, bielas, válvulas, árbol de levas, inyector y turbocompresor de aire.

1.2.1 Bloque. Es la estructura básica del motor. Generalmente son de fundición de hierro o aluminio. Pueden llevar los cilindros en línea o en forma de V. Lleva una serie de alojamientos donde se insertan los cilindros, varillas de empuje del mecanismo de válvulas, conductos del refrigerante, los ejes de levas, apoyos de los cojinetes de bancada y en la parte superior lleva unas perforaciones roscadas donde se sujeta el conjunto de culata.

1.2.2 Cigüeñal. Es el componente mecánico que transforma el movimiento alternativo en movimiento rotativo. Está montado en el bloque en los cojinetes principales o de bancada, los cuales están lubricados. El cigüeñal se puede considerar como una serie de pequeñas manivelas. La distancia entre el eje del muñón de bancada y el eje del muñón de biela se denomina el radio del cigüeñal, que determina la distancia que la biela y el pistón puede moverse. Dos veces este radio es la carrera del pistón.

Figura 1.2 Principales partes del motor Diesel



Fuente: Página de internet <http://www.furgovw.org>

1.2.3 Culata. Es el elemento del motor que cierra los cilindros por la parte superior, dejando un volumen comprendido entre ella y el pistón que se denomina cámara de combustión o de compresión, en la cual se quema el fluido activo.

La culata puede ser fabricada de fundición de hierro o aluminio. Sirve de soporte para otros elementos del motor como son: válvulas, balancines, inyectores, etc. Lleva los orificios de los tornillos de apriete entre la culata y el bloque, además de los de entrada de aire por las válvulas de admisión, salida de gases por las válvulas de escape, entrada de combustible por los inyectores, paso de varillas de

empujadores del árbol de balancines, pasos de agua entre el bloque y la culata para refrigerar, etc. Entre la culata y el bloque del motor se monta una junta que queda prensada entre los dos a la que se llama habitualmente empaque de culata.

1.2.4 Pistón. Es un embolo cilíndrico que sube y baja deslizándose por el interior de un cilindro del motor. Son generalmente de aluminio, cada uno tiene por lo general de dos a cuatro anillos o segmentos. El anillo superior es el de compresión, diseñado para evitar fugas de gases. El anillo inferior es el de engrase y está diseñado para limpiar las paredes del cilindro de aceite cuando el pistón realiza su carrera descendente. Cualquier otro segmento puede ser de compresión o de engrase, dependiendo del diseño del fabricante. Llevan en su centro un bulón que sirve de unión entre el pistón y la biela.

1.2.5 Camisas. Son los cilindros por cuyo interior se desplazan los pistones con movimiento rectilíneo alternativo. Suelen ser de hierro fundido y tienen la superficie interior endurecida por inducción y pulida. Normalmente suelen ser intercambiables para poder reconstruir el motor colocando unas nuevas.

1.2.6 Bielas. Las bielas son las que conectan el pistón y el cigüeñal, transmitiendo la fuerza de uno al otro. Tienen dos casquillos para poder girar libremente alrededor del cigüeñal y el bulón que las conecta al pistón. La biela debe absorber las fuerzas dinámicas necesarias para poner el pistón en movimiento y pararlo al principio y final de cada carrera. Asimismo la biela transmite la fuerza generada en la carrera de explosión al cigüeñal.

1.2.7 Válvulas. Las válvulas abren y cierran las lumbreras de admisión y escape en el momento oportuno de cada ciclo. La válvula de admisión suele ser de mayor tamaño que la de escape. La parte de la cabeza que está rectificada y finamente esmerilada se llama cara y asienta sobre un inserto alojado en la culata. Este asiento también lleva un rectificado y esmerilado fino. El rectificado de la cara de

la válvula y el asiento se hace a ángulos diferentes, para asegurar que el contacto entre la cara y el asiento se realice sobre una línea fina, proporcionando un cierre hermético en toda la periferia del asiento.

Las válvulas se cierran por medio de resortes y se abren por empujadores o impulsores accionados por el árbol de levas. La posición de la leva durante la rotación determina el momento en que ha de abrirse la válvula.

1.2.8 Árbol de levas. Para abrir las válvulas se utiliza un árbol de levas que va sincronizado con la distribución del motor y cuya velocidad de giro es la mitad que la del cigüeñal.

1.2.9 Inyector. Está situado en la culata del motor. Introduce a alta presión el combustible en la cámara de combustión, finamente pulverizado.

El inyector de combustible puede ser accionado mecánica o hidráulicamente. Los inyectores de combustible accionados mecánicamente se utilizan en muchos motores diesel.

1.2.10 Turbo compresor de aire. Está formado por una turbina y un compresor centrífugos, unidos por un eje coaxial. Se utiliza para sobrealimentar el motor, para lo cual se suministra aire a una presión elevada, forzando la entrada en los cilindros de una cantidad mayor de aire, que queda disponible para la combustión. Para la compresión del aire se aprovechan los gases calientes (gases de escape) que pasan por la turbina, provenientes de los pistones.

1.3 SISTEMAS DE MCIA DIESEL

Los motores de combustión interna alternativos (MCIA) de ciclo Diesel cuentan con diversos sistemas que permiten el óptimo funcionamiento del motor, entre los

cuales se tienen: sistema de lubricación, sistema de enfriamiento o refrigeración, sistema de admisión y escape, sistema de inyección de combustible y sistema eléctrico y de control. Estos tres últimos son considerados en el desarrollo del presente trabajo.

1.3.1 Sistema de lubricación. Este sistema tiene una importancia extrema para que la operación de un motor sea satisfactoria; mantiene lubricadas todas las partes móviles, evita el desgaste excesivo y la acumulación de depósitos, así como elimina el calor de las zonas del motor en las que la temperatura es relativamente alta.

El funcionamiento es el siguiente: una bomba, generalmente de engranajes, toma el aceite del depósito del motor, usualmente el cárter, y lo envía al filtro a una presión regulada. Se distribuye a través de conductos interiores y exteriores del motor a las partes móviles que se van a lubricar y/o enfriar, luego pasa por el radiador donde se extrae parte del calor absorbido y retorna al depósito o cárter del motor, para reiniciar el ciclo.

1.3.2 Sistema de refrigeración. Este sistema elimina el exceso de calor generado en el motor. Consta de una bomba de circulación, un fluido refrigerante, uno o más termostatos, un radiador o intercambiador de calor según el motor, un ventilador y conductos rígidos y flexibles para efectuar las conexiones de los componentes.

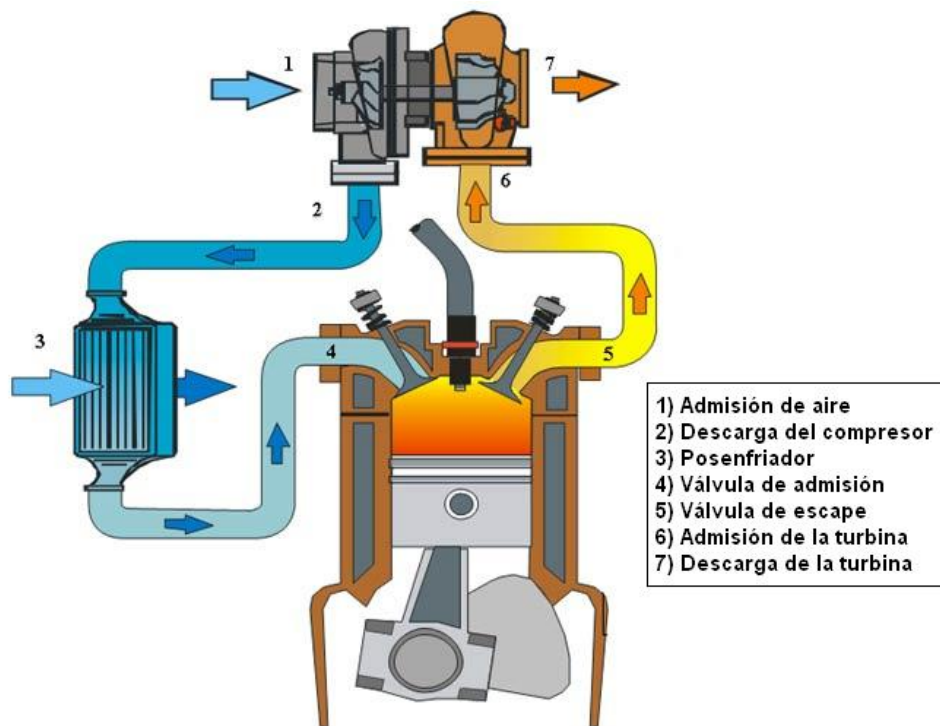
En la mayoría de los sistemas de refrigeración, la bomba de circulación toma el refrigerante del radiador, que repone su nivel del tanque de refrigerante o tanque de expansión, y lo impulsa al interior del motor refrigerando aquellas partes más expuestas al calor, como las camisas, culatas, radiador de aceite, etc. El refrigerante pasa a través de uno o varios termostatos y regresa al radiador donde se enfría al circular por tubos pequeños de gran superficie de disipación; el

intercambio de calor generalmente se realiza con el aire circundante el cual es forzado a través del radiador utilizando un ventilador que generalmente es accionado por el mismo motor.

1.3.3 Sistema de admisión y escape. Está conformado por las siguientes partes como se muestra en la figura 1.3: caja de filtros y elemento filtrante (no indicados en la figura), tubería y conexiones al turbocargador, posenfriador y válvulas de admisión y escape.

La turbina accionada por los gases de escape impulsa el rotor del compresor instalado en el mismo eje. Cuando gira, el rotor aspira el aire del ambiente a través del filtro, lo comprime y a través de un posenfriador, lo envía a la entrada de aire del motor, desde donde pasa a los cilindros.

Figura 1.3 Sistema simplificado para admisión y escape

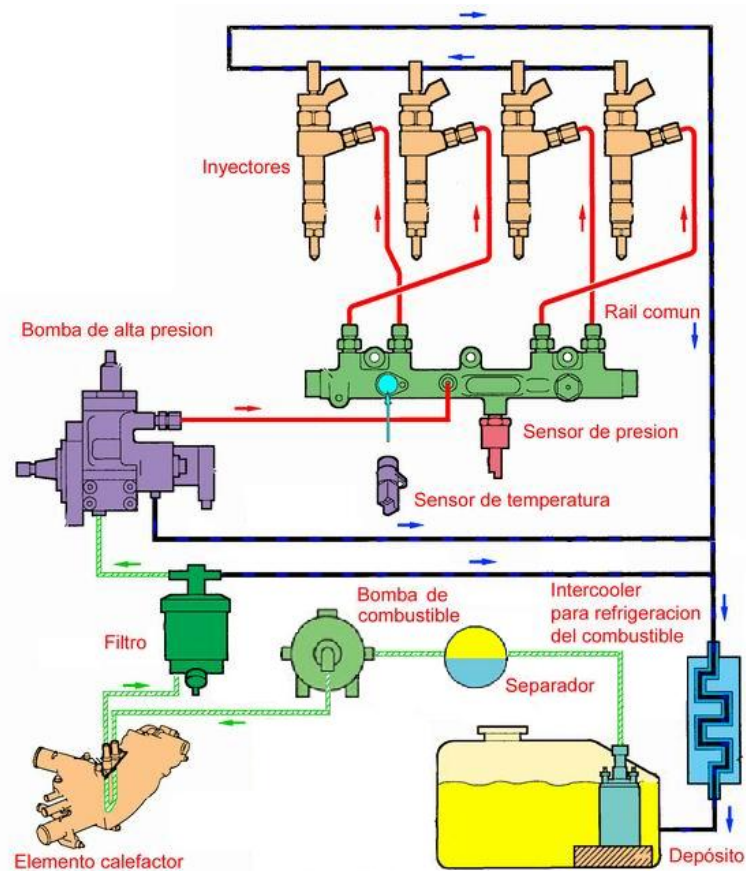


Fuente: CHALLEN, Bernanrd and BARANESCU, Rodica. Diesel engine reference book.

1.3.4 Sistema de inyección Diesel. Este sistema proporciona control sobre el inicio, la duración y la cantidad de la inyección, también atomiza y distribuye parcialmente el combustible en la cámara de combustión. Existen muchos sistemas de inyección diesel, pero todos ellos comparten la mayoría de las características.

Los componentes de un sistema de inyección típico se muestran en la figura 1.4 y son: el tanque de combustible y unidad de captación, separador de agua del combustible, bomba de suministro de combustible, filtro de combustible, calentador de combustible, bomba de inyección de combustible y toberas de inyección.

Figura 1.4 Sistema básico de inyección de combustible



Fuente: FERNANDEZ, José Luis. Inyección Diesel

El combustible almacenado en el tanque es aspirado a través de la unidad de captación por una bomba de suministro de combustible.

El combustible atraviesa un separador agua-combustible hasta la bomba de suministro. Desde allí, pasa por un calentador de combustible (opcional), luego por un filtro hasta la bomba de inyección. Esta bomba presuriza el combustible a una presión alta y lo lleva hasta la tobera en el momento adecuado. La tobera atomiza y pulveriza el combustible en la cámara de combustión. El exceso de combustible bombeado por la bomba de transferencia enfría y lubrica la bomba y la tobera de inyección. Este combustible, llamado combustible de retorno, o desbordamiento, es devuelto al tanque a través del conducto de retorno de combustible. El sistema de combustible también impide que entre aire en el sistema, controlando una de las razones de un mal funcionamiento.

1.3.5 Sistema eléctrico y de control. Suministra la energía necesaria para arrancar el motor, energizar las protecciones, controladores, sensores e indicadores. El sistema eléctrico se compone de batería, motor de arranque y alternador con su regulador incorporado.

Los componentes electrónicos que forman parte del sistema eléctrico permiten el control de las diferentes variables del motor como dosificación del combustible y sincronización, velocidad, emisiones, temperatura, además de optimizar el desempeño del motor.

2. COMBUSTIBLES

2.1 DIESEL

El diesel corriente, o el aceite combustible para motores (ACPM), o Fuel Oil grado N° 2D, es una mezcla de hidrocarburos entre 10 y 28 átomos de carbono formada por fracciones combustibles proveniente de diferentes procesos de refinación del petróleo tales como destilación atmosférica, ruptura catalítica e hidrocraqueo.

2.1.1 Especificaciones del combustible diesel. Las características de combustión de los combustibles diesel se expresan en términos del número de cetanos, una medida del retraso en el encendido. Es conveniente un retraso corto en el encendido, es decir el periodo entre la inyección y el encendido, para que el motor funcione de manera suave. Este combustible puede contener pequeñas cantidades de aditivos que permitan mejorar las condiciones de su desempeño.

Otra característica importante de los combustibles es el poder calorífico, que consiste en la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico del diesel es de 138000 BTU/galón [Saucedo].

El diesel corriente está diseñado para utilizarse como combustible en motores tipo diesel de automotores de trabajo medio y pesado que operan bajo condiciones de alta exigencia en vías y carreteras, así como en maquinaria usada en explotación minera, construcción, agricultura, etc.

También puede ser usado para generar energía mecánica o eléctrica y en quemadores de hornos, secadores y calderas. Las especificaciones del diesel corriente que se distribuye en Colombia se presentan en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Especificaciones del diesel corriente

PROPIEDADES / CARACTERÍSTICAS	UNIDADES	MÉTODO	ESPECIFICACIÓN	
			Mínimo	Máximo
Agua y sedimento	mL/100 mL	ASTM D-1796 ó ASTM D-2709		0,05
Azufre	mg/kg	ASTM D-2622 ó ASTM D-4294 ó ASTM D-5453		500
Contenido de aromáticos	mL/100 mL	ASTM D-1319 ó ASTM D-5186		33
Cenizas	g / 100 g	ASTM D 482		0,01
Contenido de biocombustible	ml/100 mL	EN 14078	1,8	2,2
Color ASTM	Clasificación	ASTM D 1500		3,0
Corrosión lámina de cobre, 3 h a 50°C	Clasificación	ASTM D 130		2 (2)
Destilación	°C	ASTM D 86		
Punto inicial de ebullición			Reportar	
Temp. 50% vol. recobrado			Reportar	
Temp. 95% vol. recobrado				370
Punto final de ebullición				390
Gravedad API	° API	ASTM D-4052 ó ASTM D-1298	Reportar	
Índice de cetano (3)	N/A	ASTM D-4737 ó ASTM D-976	45	
Número de cetano (4)	N/A	ASTM D-613 ó ASTM D-6890	43	
Punto de fluidez	°C	ASTM D 97 ó ASTM D 5949		3
Punto de nube	°C	ASTM D 2500	Reportar	
Punto de inflamación	°C	ASTM D 93	52	
Temperatura obturación filtro frío	°C	ASTM D 6371	Reportar	
Residuos carbón micro, (10% fondos) (5)	g / 100 g	ASTM D 4530		0,20
Viscosidad cinemática a 40°C (6)	mm ² /s	ASTM D 445	1,9	5,0
Lubricidad a 60°C (7)	Micrómetros	ASTM D 6079		450

Notas:

- (1) Diesel regular y sus mezclas con biocombustible hasta el 5% vol. (aplica para el producto de las Refinerías de Barrancabermeja y Cartagena).
- (2) El valor 2 se refiere a valores 2a, 2b o 2c. Corrosión: Norma internacional, máximo 3.
- (3) Aplica a diesel producido en destilación atmosférica y productos craqueados y a mezclas de ellos. El método ASTM D-4737 no aplica al diésel mezclado con biodiesel.
- (4) Para diesel que contenga componentes provenientes de procesos de ruptura catalítica y/o térmica, y/o aditivos mejoradores de cetano y/o biocombustibles.
- (5) Residuos carbón micro, la norma ASTM D-4530 no está mencionada en la norma internacional. La norma que se utiliza internacionalmente es la ASTM D 524, con valor máximo de 0,35% masa.
- (6) Viscosidad: la norma internacional, el límite máximo es 4.1 mm²/s
- (7) Lubricidad: norma europea: 460. Norma americana: 520 máx.

Fuente: ECOPETROL. Nuestros productos

2.1.2 Descripción del proceso de combustión diesel. El primer fenómeno que ocurre una vez inyectado el combustible es la atomización, en la que el combustible líquido se disgrega en ligamentos o gotas de pequeño tamaño. Cuanto menor sea el tamaño de las gotas mejor es el posterior proceso de

evaporación, debido a que diámetros menores conducen a una mayor transferencia de calor hacia el líquido como consecuencia de una mayor relación superficie/volumen y a la mejora del coeficiente de película.

El siguiente fenómeno que se produce es el englobamiento de aire, mecanismo durante el cual la interacción del chorro inyectado con el aire provoca la entrada de este último dentro de la periferia del propio chorro. Esto produce un aumento en el grosor del chorro y una disminución tanto de su velocidad como de su densidad. Las gotas de pequeño tamaño, rodeadas de aire caliente comienzan rápidamente a evaporarse.

Después de la evaporación, cuando la mezcla formada por combustible evaporado y aire englobado se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad, y debido al calor transmitido por el aire caliente, dicha mezcla reacciona químicamente en un proceso de combustión premezclada débilmente exotérmico.

Por último, el proceso de combustión exotérmico ocurre fundamentalmente en el frente de llama. Los productos parcialmente oxidados de la combustión premezclada se aportan al frente de llama por medio de un proceso combinado de convección y difusión, mientras que por la parte exterior se suministra el oxígeno necesario. En dicho frente se libera el resto del contenido energético del combustible, es decir, entre el 85 y el 90 %, y prácticamente se alcanza la temperatura adiabática de llama.

2.2 GAS NATURAL

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos en estado gaseoso, en su mayor parte compuesta por metano y etano, y en menor proporción por propano, butanos, pentanos e hidrocarburos más pesados. Si el contenido de hidrocarburos de orden superior al metano es alto se le denomina gas rico, de lo contrario se

conoce como gas seco. Las principales impurezas que puede contener la mezcla son vapor de agua, gas carbónico, nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y helio, entre otros.

2.2.1 Especificaciones del gas natural. Las características del gas natural son definidas a partir de sus propiedades físicas y químicas, rango de inflamabilidad y la equivalencia energética. El octanaje es el número usado para describir la calidad antidetonante de los combustibles comerciales. El gas natural tiene un octanaje de aproximadamente 130 RON, por sus siglas en inglés Research Octane Number. Las especificaciones del gas natural que se distribuye en Colombia se presentan en la tabla 2.2.

El gas natural se distribuye a través de las redes de transmisión y distribución de gas existentes (Gasoductos) en las principales ciudades y zonas industriales del país. En el sector industrial, el gas natural se utiliza como combustible en varios tipos de equipos, como hornos, secadores y calderas. Como materia prima se emplea en las industrias petroquímicas que requieren en sus procesos metano.

En el sector térmico se utiliza en motores de combustión interna y en turbinas de gas para generación de energía eléctrica. En el sector residencial se emplea principalmente para la cocción de alimentos y en sistemas de calefacción de agua. También se utiliza como combustible en el sector vehicular.

Tabla 2.2 Especificaciones del gas natural

DEFINICIÓN DE ATRIBUTOS POR CADA UNO DE LOS PRODUCTOS		
ESPECIFICACIONES	Sistema internacional	Sistema inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) (2)	42,8 MJ/m ³	1.150 BTU/ft ³
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) (2)	35,4 MJ/m ³	950 BTU/ft ³
Contenido de líquido (3)	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H ₂ S máximo	6 mg/m ³	0,25 grano/100 PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/m ³	1,0 grano/100 PCS
Contenido CO ₂ , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N ₂ , máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen (4)	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0,10%	0,10%
Contenido máximo de vapor de agua	97 mg/m ³	6,0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49°C	120°F
Temperatura de entrega mínimo	7,2°C	45°F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión (5)	1,6 mg/m ³	0,7 grano/1.000 pc

Notas:

- (1) El gas natural es una mezcla de hidrocarburos livianos, principalmente constituida por metano, que se encuentra en los yacimientos en forma libre o en forma asociada al petróleo. El Reglamento Único de Transporte y sus resoluciones modificatorias, establece las especificaciones de calidad con que debe cumplir el gas natural entregado al transportador por el agente, en el punto de entrada del sistema de transporte y por el transportador en el punto de salida. No obstante, es posible establecer acuerdos entre el productor-comercializador, remitente y transportador, para el suministro y transporte de gas natural en especificaciones de calidad diferentes a las establecidas.
- (2) Todos los datos sobre metro cúbico ó pie cúbico de gas están referidos a condiciones estándar.
- (3) Los líquidos pueden ser: hidrocarburos, agua y otros contaminantes en estado líquido.
- (4) Se considera como contenido de inertes la suma de los contenidos de CO₂, nitrógeno y oxígeno.
- (5) El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones.

El punto de rocío de hidrocarburos para cualquier presión no deberá superar el valor de 45°F (7,2°C).
Fuente: Resoluciones CREG 071/99, CREG 054/07 y CREG 041/08.

Fuente: ECOPETROL. Nuestros productos

2.2.2 Descripción del proceso de combustión del gas natural. En la cámara de combustión de MCIA de encendido provocado desde el momento en que ocurre el salto de la chispa, se forma un frente de llama, que divide el volumen de la cámara en dos zonas bien definidas: una zona de mezcla quemada donde la presión y temperatura son muy elevadas y otra zona donde se encuentra la mezcla fresca, que desde el inicio de la combustión es continuamente comprimida por los productos de combustión.

A pesar de que el salto de la chispa indica el comienzo del proceso de combustión, se sabe que debido a las propiedades termofísicas de la mezcla aire-combustible existe un corto período de tiempo durante el cual no se observa crecimiento importante de la presión dentro del cilindro. La cantidad de masa

quemada es demasiado pequeña, aproximadamente entre un 5 a 10%, por lo tanto el crecimiento de la presión se atribuye al propio proceso de compresión más que a la combustión que esté ocurriendo en ese instante. Por la misma razón anterior el porcentaje de energía liberado durante este período es muy pequeño, aproximadamente un 5%. Durante este tiempo se alcanzan las condiciones adecuadas para la formación del frente de llama que aseguran su propagación a través de todo el volumen de la cámara de combustión.

La fase secundaria o principal abarca desde el punto de separación hasta que se alcanza la máxima presión del ciclo. Con la finalidad de obtener la máxima potencia dentro del cilindro del motor es importante lograr que esta fase se desarrolle de forma simétrica en las cercanías del PMS. Para un motor trabajando con carga completa la cantidad de masa quemada durante esta fase, es aproximadamente del 90%, correspondiendo a un 85% de la energía liberada.

En las zonas más alejadas de la cámara de combustión donde existe dificultad para que la llama penetre y debido a las altas presiones generadas se aloja un porcentaje de mezcla fresca que puede ser quemado a último momento y que de lo contrario contribuye a la formación de hidrocarburos de combustión incompleta. Por lo tanto, en vista de que para el instante en que el frente de llama alcance estas zonas el pistón estará en una posición bastante avanzada de su carrera de expansión, se define una fase final de combustión o fase residual.

2.2.3 Cromatografía del gas natural. Las Estaciones de compresión de TGI comprimen el gas natural que proviene principalmente de dos campos de producción: Cusiana y Ballena, y que se suministra al sistema de transporte. Este gas es el mismo que alimenta la línea de gas combustible de los equipos moto-compresores y el gas que alimentaría el motor del generador. En la tabla 2.3 se presenta la cromatografía para el gas combustible utilizado en las estaciones de compresión.

Tabla 2.3 Cromatografía del gas combustible²

Componente	Unidad	Campo de producción	
		Cusiana	Guajira
NITROGENO	%	0,78944	1,57233
CO ₂	%	1,85426	0,04221
METANO	%	82,60330	98,02470
ETANO	%	9,88472	0,26325
PROPANO	%	3,61485	0,04851
I-BUTANO	%	0,53702	0,00715
N-BUTANO	%	0,54600	0,01615
I_PENTANO	%	0,07986	0,00162
N_PENTANO	%	0,05991	0,00603
C ₆₊ O HEXANO	%	0,03063	0,01805
HEPTANO	%	0,00000	0,00000
OCTANO	%	0,00000	0,00000
NONANO	%	0,00000	0,00000
TOTAL	%	100,00000	100,00000

Fuente: TGI S.A. ESP. Información de cromatogramos propios

Con las composiciones químicas presentadas en la tabla 2.3 se determinan las propiedades de poder calorífico, gravedad específica y densidad, como se muestran en la tabla 2.4

² Información correspondiente al mes de septiembre de 2012

Tabla 2.4 Propiedades del gas combustible

Propiedad	Unidad	Campo de producción	
		Cusiana	Guajira
HV	BTU/ft ³	1147,07	996,76
GRAV ESPEC.		0,68041	0,56447
DENSIDAD	lbm/ft ³	0,05167	0,04296

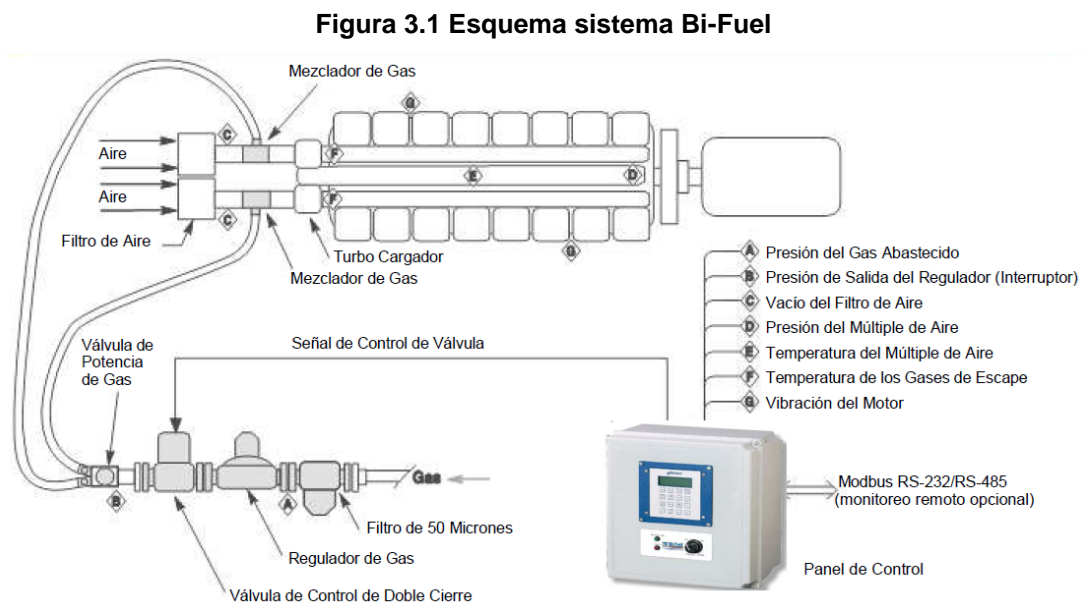
Fuente: El autor

3. SISTEMA BI-FUEL

El Sistema Bi-Fuel opera mediante la mezcla de diesel y gas natural en la cámara de combustión. Esto se logra mediante el uso del así denominado “kit BI-FUEL” que es capaz de realizar una mezcla óptima de gas y aire. El aire y el gas que son premezclados en la entrada de aire del motor, pasan luego a la cámara de combustión a través de la válvula de admisión del motor.

Una característica importante del Sistema Bi-Fuel es su capacidad de pasar de la mezcla diesel-gas a solo diesel, sin interrupción en el funcionamiento del motor, manteniendo su velocidad y carga.

La figura 3.1 muestra el esquema del sistema Bi-Fuel, presentado por un fabricante de kits de conversión.



Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.1 OPERACION

El gas combustible es introducido por un lugar de la tubería después del filtro de aire del motor y antes del turbo cargador. El gas combustible es abastecido a temperatura ambiente aproximadamente, usando un mezclador de aire y combustible. Después de salir del mezclador, la mezcla de aire/gas es comprimida en el turbo cargador y entonces distribuida para cada cilindro por las entradas del múltiple de aire del motor. La mezcla no-inflamable es comprimida en el cilindro durante el ciclo de compresión del pistón y es encendida cuando el inyector rocía una pequeña cantidad de combustible diesel dentro de la cámara de combustión, el diesel actúa como piloto para la ignición del combustible primario, en este caso el gas natural. Debido a la alta temperatura de auto-ignición del gas natural, la mezcla de aire-gas no se enciende durante la carrera de compresión, ya que no hay presente suficiente calor para facilitar la combustión.

El flujo de gas para el motor depende de la carga y varía conforme a los cambios en el flujo de aire de combustión. El Sistema Bi-Fuel utiliza un sistema de control que ajusta al flujo de gas conforme a variaciones en el nivel de succión del motor. Esta técnica permite al sistema bi-combustible responder a las exigencias de combustible del motor al mismo tiempo que mantiene la integridad del gobernador de diesel original del fabricante. El Sistema Bi-Fuel contiene una válvula de potencia que puede ser ajustada manualmente para controlar el nivel de sustitución de gas. La inyección diesel es controlada por el sistema de control original del equipo durante ambos modos Bi-Fuel (gas–diesel) y mono-Fuel (Diesel).

El panel de control electrónico del Sistema de Bi-Fuel monitorea varios parámetros del sistema y del motor como la presión de aire y temperatura del múltiple, temperatura de los gases de escape, succión de entrada, presión de gas y vibración del motor. Esa información permite al controlador determinar cuándo

activar o desactivar la operación bi-combustible dependiendo del rendimiento del motor, nivel de carga, temperatura ambiental, límites de pre-detonación o niveles de presión del gas abastecido. El controlador de algunos fabricantes [Altronic] permite comunicarse remotamente con un sistema de monitoreo para el motor del usuario vía una conexión RS-232/RS-485 (ASCII o protocolo MODBUS).

El rendimiento del motor durante la operación bi-combustible es típicamente equivalente a los niveles normales de diesel. Los niveles de radiación de calor de los sistemas de enfriamiento y escape del motor son mantenidos dentro de los parámetros normales determinados por el fabricante. La respuesta del motor a variaciones de carga en el modo bi-combustible es generalmente igual a, o mejor que, el rendimiento a 100% diesel debido al diseño del Sistema Bi-Fuel y de las características de combustión asociadas a la mezcla de aire/gas.

3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA BI-FUEL

El sistema está compuesto principalmente por mezclador de aire combustible, válvula de potencia, tren de gas y el sistema de control del motor.

3.2.1 Mezclador de aire / combustible. La mezcla de aire con combustible es conseguida por medio de un mezclador de venturi fijo que evita la reducción de eficiencia de la válvula de aire. El mezclador de aire/combustible de baja restricción asegura que un adecuado flujo de aire será abastecido al motor, y que la eficiencia de la operación no sea comprometida por la instalación del componente. El mezclador no tiene partes móviles y una vez instalado en el motor, el sistema de entrada de aire no requiere mantenimiento periódico.

Figura 3.2 Mezclador de aire / combustible



Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.2.2 Válvula de potencia de gas. El sistema Bi-Fuel usa un regulador de flujo de gas ajustable instalado antes del mezclador de aire/combustible. La válvula de potencia es un componente que regula el nivel máximo de flujo de gas para una determinada carga y nivel de succión. La válvula trabaja en sintonía con el mezclador de aire/combustible y el regulador de cero-presión para suministrar al motor la cantidad de gas requerida.

Figura 3.3 Válvulas de potencia

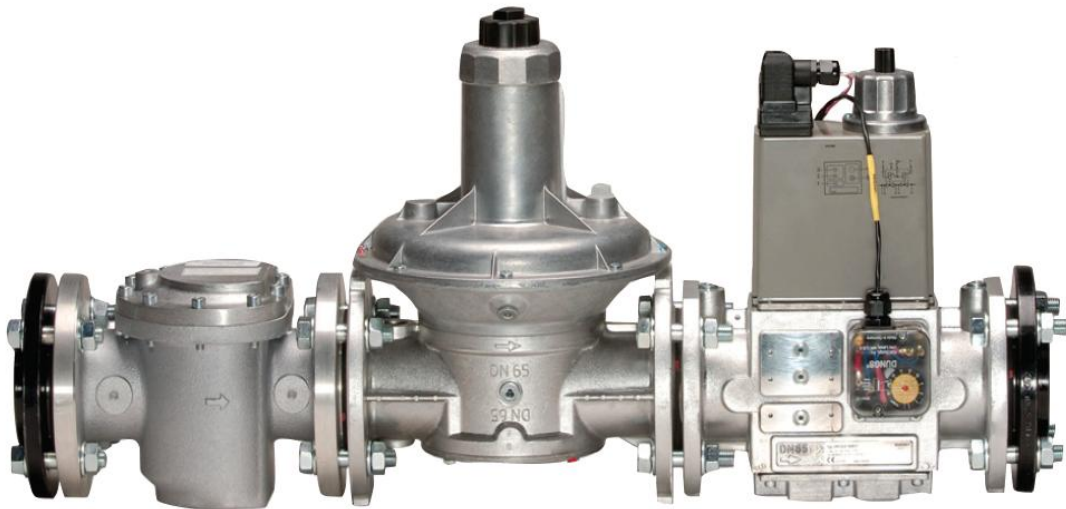


Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.2.3 Tren de gas. El acondicionamiento y preparación del gas natural antes de su admisión en el motor es una importante parte del Sistema Bi-Fuel. El Sistema “tren de gas” incluye un filtro de gas de 50 micrones, una válvula solenoide electrónica activada durante una emergencia o parada del sistema, y un regulador

de gas de cero presión. Ese último componente reduce la presión del gas que entra (1-5 psi) aproximadamente a la presión atmosférica. Con una presión de salida negativa, el diseño permite al sistema usar un esquema de control de acuerdo con la demanda, en que la entrada de flujo de aire determina el flujo de gas al motor. A medida que la carga del motor varia, cambios correspondientes en el volumen de entrada de aire automáticamente traen mayor cantidad de gas para el mezclador.

Figura 3.4 Tren de gas



Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.2.4 Sistema de control del motor. El Sistema de Control del Motor está basado en el panel de control que abastece un control avanzado de motores y monitoreo de paradas de seguridad. El Sistema monitorea una variedad de puntos de presión y temperatura. Y devuelve al motor a una operación 100% diesel si cualquier desviación de los parámetros pone en riesgo la integridad del motor.

Figura 3.5 Sistema de control el motor



Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.3 RANGO DE APLICACIÓN DE LOS SISTEMAS BI-FUEL.

Los kits de conversión a sistema Bi-Fuel se encuentran en rangos de potencia que permiten adaptarse a diversos tamaños de motor. Generalmente se aplican a motores diesel de velocidad alta (> 1200rpm) y potencia hasta 4000 caballos de fuerza (3000kW).

El Sistema Bi-Fuel de Altronic ofrece cinco modelos estándar que cubren un amplio rango de potencia del motor o generador (hp o kWe), adicionalmente se indica cuales kits están certificados para áreas clasificadas Clase I, División 2³. En la tabla 3.1 se presenta los cinco modelos de kits Bi-Fuel y el contenido de cada kit de conversión.

³ CLASE I: (Gas) Gases o vapores flamables presentes en el aire en cantidades suficientes para producir una ignición o explosión.

DIVISIÓN 2: Concentraciones inflamables de gases, vapores ó líquidos que no están presentes en condiciones normales de operación.

Tabla 3.1 Carta de aplicaciones de los Kits GTI Bi-Fuel

GTI Series	Engine Power Rating	Engine Type	Gas Train Kit	Gas Mixers	GTI Series No.	Vibration Sensor(s)	STEPCON Option	CSA Certified**
25*	Up to 75 kWe	In-line engine	1" NPT	1 x 3"	2513-OE	NA	NA	No
	75-150 kWe	In-line engine	1" NPT	1 x 4"	2514-1E	NA	NA	No
					2514-1A	Opt. (1)	NA	No
50	75-150 kWe	In-line engine	1" NPT	1 x 4"	5014-OE	NA	NA	No
					5014-1A	Opt. (1)	NA	Yes
	150-300 kWe	In-line engine	DN50/2" NPT	1 x 5"	5015-OE	NA	NA	No
					5015-1A	Opt. (1)	NA	Yes
65	300-600 kWe	In-line or V-engine, com. manifold	DN65/2.5" NPT	1 x 6"	6516-1B	Std. (2)	Optional	Yes
		V-engine	DN65/2.5" NPT	2 x 6"	6526-1B			
	600-1200 kWe	V-engine, common manifold	DN65/2.5" NPT	2 x 6"	6526-2B	Std. (2)	Optional	Yes
					6546-2B			
					6526-2C			
					6546-2C			
V-engine, dual manifold	DN65/2.5" NPT	2 x 6"	6526-2D					
			6546-2D					
V-engine, qual manifold	DN65/2.5" NPT	2 x 6"	6526-2D					
			6546-2D					
80	1200-3000 kWe	V-engine, common manifold	DN80/3" NPT	2 x 7"	8027-2B	Std. (2)	Optional	Yes
				4 x 6"	8046-2B			
				4 x 7"	8047-2B			
		V-engine, dual manifold	DN80/3" NPT	2 x 7"	8027-2C			
				4 x 6"	8046-2C			
				4 x 7"	8047-2C			
		V-engine, qual manifold	DN80/3" NPT	2 x 7"	8027-2D			
				4 x 6"	8046-2D			
				4 x 7"	8047-2D			

* Series 25 kits require 12Vdc Power; all other Series require 24Vdc Power.

** CSA CERTIFIED CLASS 1, DIV. 2, System available — contact Altronic sales office for details.

Fuente: ALTRONIC. GTI Bi-fuel

3.4 SISTEMAS BI-FUEL EN COLOMBIA.

Los sistemas de combustible dual (diesel-gas) son una tecnología desarrollada en la última década. En Colombia se tienen pocos casos desarrollados sobre este tema dentro de las cuales se destacan los siguientes:

❏ Instalación de un kit Bi-Fuel GTI Altronic en un motor CAT 3612 de 4000 hp utilizado para bombeo de crudo en la estación Miraflores - OCENSA (2012) – Gas industrial con 85% metano.

❏ Instalación de kits Bi-Fuel GTI Altronic en dos motores CAT 3412 de 500kW utilizado para generación en Caricare - Occidental de Colombia OXY (2009) – Gas de pozo con 50% metano.

❏ Instalación de un kit Bi-Fuel ECO-D CRAM en un motor CAT C27 de 1105 hp utilizado para generación en el campo Sardinas - PERENCO (2011) – Gas de pozo con 77% metano.

El costo de instalación, el porcentaje de reducción de emisiones y la reducción de costos de operación para cada instalación depende de los siguientes aspectos:

❏ La composición del gas ya que estos sistemas pueden trabajar con gas natural de gasoducto, gas natural licuado (GNL), Gas natural comprimido (GNC), gas de pozo, Bio-gas y gas de lecho de carbón. Las propiedades del gas pueden llegar a definir el porcentaje máximo de sustitución.

❏ La potencia y características del motor que define el tamaño del kit de conversión.

⊠ Las condiciones de lugar (altitud) y del gas combustible (presión y temperatura) que definen los reguladores de presión, tuberías y demás accesorios para la instalación.

⊠ La clasificación del área, para determinar qué tipo de equipos se deben instalar: a prueba de explosión o intrínsecamente seguros.

En el siguiente capítulo se presenta el estudio previo, considerando los anteriores aspectos, para la adquisición de los equipos y accesorios (ingeniería conceptual y básica), con los cálculos y consideraciones técnicas, ambientales y económicas para tomar la decisión de invertir en la tecnología Bi-Fuel.

4. ANÁLISIS TÉCNICO PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA BI-FUEL

En el presente capítulo se determinan las necesidades mínimas para la ingeniería y montaje del sistema Bi-Fuel, a instalar en los motores diesel de los generadores eléctricos de emergencia de las estaciones de compresión de gas de TGI S.A. ESP.

El sistema Bi-Fuel permite a los motores operar con seguridad y sustituir variaciones de porcentaje de gas natural entre 50% y 70% del total del combustible diesel. Los motores convertidos a diesel-gas tienen un desempeño similar a los motores 100% diesel en factores como eficiencia, estabilidad y manejo de carga

4.1 ESPECIFICACIONES DE LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS

Las estaciones compresoras del sistema de transporte de gas natural de la TGI S.A. ESP, cuentan con un generador eléctrico de emergencia en cada estación para atender las fallas en el suministro de la red eléctrica. Cada grupo electrógeno está conformado por un motor de combustión interna de encendido por compresión marca Perkins y un generador eléctrico marca Stamford, Olympian o Newage International. En la tabla 4.1 se presenta la relación de los equipos electrógenos.

Se tienen 3 tipos de motores de marca Perkins: serie 1000, serie 1100 y serie 1300, estos motores operan los generadores en un rango de potencia eléctrica entre los 135 y 220 kW. En la figura 4.1 se muestra un equipo electrógeno de estación compresora.

Tabla 4.1 Listado de equipos electrógenos en estaciones compresoras

EQUIPOS ELECTRÓGENOS EN ESTACIONES COMPRESORAS					
Estación de Compresión	Grupo Electrónico	Unidad	Marca	Tipo	Modelo
HATONUEVO	GEP 175	Motor	Perkins	Diesel	1306-9TG
		Generador	Olympian		
LA JAGUA DEL PILAR	P-175	motor	Perkins	Diesel	1106C-E66TAG3
		generador	Stamford		UCI274G
CASACARA	P-215	motor	Perkins	Diesel	1306C-E87TAG4
		generador	Stamford		UCI274H
CURUMANI	P-175	motor	Perkins	Diesel	1106C-E66TAG3
		generador	Stamford		UCI274G
NOREAN	GEP 175	Motor	Perkins	Diesel	1306-9TG2
		Generador	Newage International		MO6511976701
SAN ALBERTO	P-175	motor	Perkins	Diesel	1106C-E66TAG3
		generador	Stamford		UCI274G
BARRANCABERMEJA	P-200	motor	Perkins	Diesel	1306C-E87TAG3
		generador	Stamford		UCI274H
VASCONIA	GEP 175	Motor	Perkins	Diesel	1306-9TG
		Generador	Olympian		
PADUA	P-135	motor	Perkins	Diesel	1006TAG
		generador	Stamford		UCI274E
MARIQUITA	P-215	motor	Perkins	Diesel	1306C
		generador	Stamford		GEP-150
MIRAFLORES	GEH 221-2	motor	Perkins	Diesel	GCD325A
		generador	Olympian		GEH220-2
PUENTE GUILLERMO	P-175	motor	Perkins	Diesel	1106C-E66TAG3
		generador	Stamford		UCI274G

Fuente: El autor

4.2 SELECCIÓN DEL KIT BI FUEL

En el país no se cuenta con fabricantes de equipos de conversión Bi-Fuel. Se consultaron dos marcas de fabricantes de kits de conversión: Altronic (Estados Unidos) y ComAp (República Checa), que tienen representación en Colombia para ventas y soporte técnico, a través de FTC energy group S.A. y Comap Systems C3 respectivamente.

Figura 4.1 Equipo electrógeno de estación de compresión de gas Miraflores



Fuente: El autor.

ALTRONIC produce sistemas de ignición y control para equipos reciprocantes a gas de encendido por chispa que son utilizados actualmente en las plantas de compresión de TGI S.A. ESP. Desde el año 2002 ALTRONIC ha fabricado el sistema patentado GTI Bi-Fuel® System el cual convierte un motor diesel estándar en un motor que pueda operar con diesel-gas, reduciendo así costos operativos, extendiendo el tiempo de operación en combustible diesel almacenado y reduciendo significativamente la emisiones contaminantes. Adicionalmente ALTRONIC ha instalado más de 3000 sistemas Bi-Fuel. Por estas razones se ha decidido considerar la marca ALTRONIC para la selección del kit de conversión.

Para la selección del kit de conversión al sistema Bi-Fuel se deben considerar entre otros, tres aspectos principales: potencia del motor, tipo de configuración de

los cilindros y clasificación del área. La tabla 4.2 resume los aspectos mencionados para los equipos electrógenos de TGI S.A. ESP y presenta en la última columna el kit seleccionado de acuerdo a la información de la tabla 3.1

Tabla 4.2 Criterios de selección de kits Bi-Fuel

Estación de Compresión	Motor	Tipo arreglo de cilindros	Potencia Eléctrica kW	Clasificación de área	Kit Altronic
HATONUEVO	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
LA JAGUA DEL PILAR	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
CASACARA	Perkins	6 en línea	215	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
CURUMANI	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
NOREAN	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
SAN ALBERTO	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
BARRANCABERMEJA	Perkins	6 en línea	200	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
VASCONIA	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
PADUA	Perkins	6 en línea	135	Clase I, Div 2, Grupo D	2514-1A
MARIQUITA	Perkins	6 en línea	215	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
MIRAFLORES	Perkins	6 en línea	220	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A
PUENTE GUILLERMO	Perkins	6 en línea	175	Clase I, Div 2, Grupo D	5015-1A

Fuente: El autor.

De acuerdo a la tabla 4.2 se seleccionan dos referencias Altronic de kit Bi-Fuel: el sistema GTI 5015-1A que aplica para 11 motores y el sistema GTI 2514-1A que aplica solo para el generador de la estación Padua.

4.3 CONSIDERACIONES DEL GAS COMBUSTIBLE

El gas natural disponible para alimentar el sistema Bi-Fuel de los motores diesel proviene de la línea de gas combustible utilizada para alimentar los motores Caterpillar y Waukesha de los equipos compresores de las Estaciones. El gas

cumple con las especificaciones del Reglamento Único de Transporte (RUT) que se presentaron en la tabla 2.2.

El sistema toma el gas de la línea del cabezal de succión o descarga, que se encuentra en un rango de presiones entre los 600 y 1200 psi, fluye por el sistema de filtración de la estación compresora y después pasa por un sistema de regulación para obtener una presión de salida de 150 psi, en tubería de diámetros de 3" o 4" (de acuerdo a la estación de compresión). La tubería que se utiliza y la instalación cumplen con la norma ASME B 31.3 y ASME B 31.8. La figura 4.2 ilustra un plano as-built del sistema de gas combustible de una estación compresora.

4.3.1 Calculo del flujo de gas combustible. El cálculo del caudal depende de la cantidad máxima de sustitución de diesel o relación diesel gas en la cámara de combustión del motor del equipo electrógeno de emergencia.

La tabla 4.3 muestra la relación de consumo de combustible diesel por hora en función del porcentaje de la potencia eléctrica nominal del generador. Con esta información y la equivalencia energética de los dos combustibles se determina el volumen de gas natural que se requiere para realizar el 70% y el 50% de la sustitución de diesel.

Tabla 4.3 Consumo de combustible diesel para motores Perkins

CONSUMO DE COMBUSTIBLE – litros/hora (US galones/hora)				
Tipo de motor	% DE POTENCIA NOMINAL			
	110	100	75	50
Perkins 1006	41,3 (10,9)	37,6 (9,9)	28,9 (7,6)	19,4 (5,1)
Perkins 1106	50,4 (13,3)	41,3 (10,9)	36,8 (9,7)	25,5 (6,7)
Perkins 1306	56,9 (15,0)	51,5 (13,6)	38,5 (10,2)	26,5 (7,0)

Fuente: Catálogos Perkins de las series 1006, 1106 y 1306

Para el cálculo del consumo con el sistema Bi-Fuel se consideran los poderes caloríficos del diesel y de gas natural tomados del numeral 2.1.1 y de la tabla 2.4 del capítulo 2 (poder calorífico del diesel 138000 BTU/galón y poder calorífico del gas natural⁴ 1000 BTU/scf) y el factor de conversión entre galones y pies cúbicos ($1 \text{ ft}^3 = 7.4805 \text{ galones}$). Con esta información se presenta el flujo o consumo estimado de los dos combustibles por hora, realizando la sustitución del 70% de diesel por gas natural en la tabla 4.4 y del 50% en la tabla 4.5.

Tabla 4.4 Consumo Bi-Fuel (70% gas natural – 30% diesel)

CONSUMO BI-FUEL (70% GAS NATURAL - 30% DIESEL)									
% DE POTENCIA NOMINAL									
		110		100		75		50	
Combust.	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	
Tipo motor									
Perkins 1006	12,39 (3,27)	29,84 (1053,94)	11,28 (2,98)	27,17 (959,52)	8,67 (2,29)	20,88 (737,50)	5,82 (1,54)	14,02 (495,07)	
Perkins 1106	15,12 (3,99)	36,42 (1283,16)	12,39 (3,27)	29,84 (1053,94)	11,04 (2,92)	26,59 (939,10)	7,65 (2,02)	18,43 (650,74)	
Perkins 1306	17,07 (4,51)	41,12 (1452,03)	15,45 (4,08)	37,22 (1314,23)	11,55 (3,05)	27,82 (982,48)	7,95 (2,10)	19,15 (676,25)	

Fuente: El autor

⁴ Se considera para los cálculos el gas Guajira

Tabla 4.5 Consumo Bi-Fuel (50% gas natural – 50% diesel)

CONSUMO BI-FUEL (50% GAS NATURAL - 50% DIESEL)									
% DE POTENCIA NOMINAL									
		110		100		75		50	
Combust.	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	Diesel litros/h (gal./h)	Gas m3/h (scf/h)	
Tipo motor									
Perkins 1006	20,65 (5,46)	21,32 (752,81)	18,80 (4,97)	19,41 (685,37)	14,45 (3,82)	14,92 (526,79)	9,70 (2,56)	10,01 (353,62)	
Perkins 1106	25,2 (6,66)	26,01 (918,68)	20,65 (5,46)	21,32 (752,81)	18,40 (4,86)	18,99 (670,79)	12,75 (3,37)	13,16 (464,81)	
Perkins 1306	28,45 (7,52)	29,37 (1037,17)	25,75 (6,80)	26,58 (938,74)	19,25 (5,09)	19,87 (701,77)	13,25 (3,5)	13,68 (483,04)	

Fuente: El autor

Para efectos de diseño se considera operación ininterrumpida durante 24 horas a la máxima exigencia del equipo electrógeno, por lo tanto se considera un flujo máximo diario de 1452 SCFH⁵ (0.035 MMSCFD) de gas natural.

4.3.2 Cálculo de la tubería de gas combustible hacia el generador. La revisión hidráulica de la línea de proceso para el sistema de gas combustible del generador comprende la verificación de las siguientes especificaciones:

✚ Cálculo de la velocidad erosional del gas.

La velocidad erosional está dada por la ecuación 4.1 tomada de la norma API RP 14E

$$u_e = \frac{100}{\sqrt{\frac{29 * G * P}{Z * R * T}}} \quad (\text{Ecuación 4.1})$$

Dónde:

μ_e = velocidad erosional (ft/sec);

G = gravedad específica del gas (adimensional);

P = presión mínima operacional (psia);

Z = factor de compresibilidad (adimensional);

⁵ SCFH: Pies cúbicos estándar por hora (scf/h)

T = Temperatura del gas ($^{\circ}\text{R}$);

$R = 10.73 \text{ ft}^3 \cdot \text{psia}/\text{lbmol} \cdot ^{\circ}\text{R}$

Para $G = 0,56447$; $P = 164.6 \text{ psia}$; $Z = 0.981$ y $T = 546 \text{ }^{\circ}\text{R}$ se obtiene una velocidad erosional $\mu_e = 146 \text{ ft/s}$.

▣ Cálculo de la velocidad máxima del flujo

La velocidad máxima en la tubería está dada por la ecuación 4.2 tomada de la GPSA

$$u_s = 0.05093 * \frac{Q_b}{D^2} * \frac{P_b * T_s * Z}{T_b * P_s} \quad (\text{Ecuación 4.2})$$

Dónde:

u_s = velocidad en tubería (ft/s);

D = diámetro (pulgadas);

P = presión operacional (psia);

T = temperatura del gas ($^{\circ}\text{R}$)

Z = factor de compresibilidad (adimensional);

Q_b = flujo de gas (ft^3/h)

$T_b = 520 \text{ }^{\circ}\text{R}$

$P_b = 14.7 \text{ psia}$

Para $D = 1.049''$; $P = 164.6 \text{ psia}$; $T = 546 \text{ }^{\circ}\text{R}$; $Z = 0.981$ y $Q_b = 1452 \text{ ft}^3/\text{h}$ se obtiene una velocidad máxima en la tubería de 71 ft/s .

Se cumple la condición de que la velocidad del flujo de gas sea inferior a la velocidad erosional, esto aplica para el sistema de gas combustible con tubería estándar desde 1".

☒ Cálculo del número de Reynolds

El número Re se utiliza para revisar el régimen de flujo de una línea de transmisión de gas y está dado por la ecuación 4.3 tomada de la GPSA

$$Re = 46,42 * \frac{Q_b * G}{D} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

Dónde:

Q_b = rata de flujo de gas a condiciones estándar (ft³/h);

G = gravedad del gas (adimensional);

D = diámetro interno de la tubería (pulgadas).

Para $Q_b = 1452 \text{ ft}^3/\text{h}$; $G = 0,56447$ y $D = 1.049''$ se obtiene el número de Reynolds de 36270.

☒ Cálculo de la caída de presión en la tubería.

Para flujo calcular el flujo se utiliza la ecuación 4.4 de Panhandle A.

$$Q = 435.87 \left(\frac{T_b}{P_b} \right)^{1.0788} E \left[\frac{P_1^2 - P_2^2}{S^{0.853} L_m T_{avg} Z_{avg}} \right]^{-0.5392} d^{2.6182} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Dónde:

Q_b = rata de flujo de gas (SCFD);

P_1 = presión (psia);

T = temperatura (°R);

Z = factor de compresibilidad (adimensional);

S = gravedad específica del gas (adimensional);

D = diámetro interno de la tubería (pulgadas).

L = longitud de la tubería (millas)

$E = 0.92$ tomado de la GPSA

$T_b = 520 \text{ °R}$

$P_b = 14.7 \text{ psia}$

Para $Q_b = 34848$ SCFD; $P_1 = 164.7$ psia; $T = 546$ °R; $Z = 0.981$; $S = 0,56447$; $D = 1.049$ " y $L = 0.094697$ millas (500 ft) se calcula de acuerdo a la ecuación 4.4 una presión al final de la línea $P_2 = 164.6$ psia (149.9 psig). La caída de presión en el tramo de tubería es despreciable cerca de 0.1 psi en los 500 ft de tubería.

La longitud de 500 ft para llevar la línea de gas combustible desde el rack de tuberías hasta la caseta del generador, se determinó de acuerdo a la información de los planos de planta de las estaciones de compresión.

✚ Cálculo del espesor de la tubería.

Para cálculo del espesor de tubería se utiliza la ecuación de la norma ASME B31.8 que se presenta en la ecuación 4.5.

$$P = \frac{2St}{D} FET \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

Dónde:

S = esfuerzo mínimo de fluencia del material (psi);

t = espesor de la tubería (in);

D = diámetro nominal externo de la tubería (in);

F = factor de diseño (adimensional);

E = factor de unión (adimensional);

T = factor de corrección por temperatura (adimensional).

Se selecciona tubería API 5L grado B que cuenta con un esfuerzo mínimo de fluencia $S = 35500$ psi⁶. El diámetro exterior de la tubería NPS de 1" es 1.315" ⁷. La presión de diseño se considera el máximo valor del rating ANSI 150⁸ para el material de la tubería que es 256 psi (17.7 bar)

⁶ Tomado de la Tabla 6 Requirements for the results of tensile tests for PSL 1 pipe, norma API 5L - 2007

⁷ Tomado de la Tabla 1 Dimensions and weights of welded and seamless wrought steel pipe, norma ASME B36.10M - 2010

⁸ Tomado de la Tabla 2-1.1 Pressure-Temperature Ratings for Group 1.1 Materials, norma ASME B16.5 - 2003

De la tabla 4.6 se considera el factor de diseño $F = 0.50$ para tubería de estaciones compresoras Clase 1 División 2. De la tabla 4.7 se selecciona el factor de unión $E = 1.00$ para tubería API 5L sin costura. De la tabla 4.8 se selecciona el factor de corrección por temperatura $T = 1.000$ por la temperatura de operación inferior a 250 °F.

Tabla 4.6 Factor de diseño, F

Facility	Location Class				
	1		2	3	4
	Div. 1	Div. 2			
Pipelines, mains, and service lines [see para. 841.2.1(b)]	0.80	0.72	0.60	0.50	0.40
Crossings of roads, railroads without casing:					
(a) Private roads	0.80	0.72	0.60	0.50	0.40
(b) Unimproved public roads	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40
(c) Roads, highways, or public streets, with hard surface and railroads	0.60	0.60	0.50	0.50	0.40
Crossings of roads, railroads with casing:					
(a) Private roads	0.80	0.72	0.60	0.50	0.40
(b) Unimproved public roads	0.72	0.72	0.60	0.50	0.40
(c) Roads, highways, or public streets, with hard surface and railroads	0.72	0.72	0.60	0.50	0.40
Parallel encroachment of pipelines and mains on roads and railroads:					
(a) Private roads	0.80	0.72	0.60	0.50	0.40
(b) Unimproved public roads	0.80	0.72	0.60	0.50	0.40
(c) Roads, highways, or public streets, with hard surface and railroads	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40
Fabricated assemblies [see para. 841.1.9(a)]	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40
Pipelines on bridges [see para. 841.1.9(b)]	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40
Pressure/flow control and metering facilities [see para. 841.1.9(c)]	0.60	0.60	0.60	0.50	0.40
Compressor station piping	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40
Near concentration of people in Location Classes 1 and 2 [see para. 840.3(b)]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40

Fuente: ASME B31.8 Sistemas de tubería de transporte y distribución de gas.

Tabla 4.7 Factor longitudinal de unión, E

Spec. No.	Pipe Class	E Factor
ASTM A 53	Seamless	1.00
	Electric-Resistance-Welded	1.00
	Furnace-Butt Welded, Continuous Weld	0.60
ASTM A 106	Seamless	1.00
ASTM A 134	Electric-Fusion Arc-Welded	0.80
ASTM A 135	Electric-Resistance-Welded	1.00
ASTM A 139	Electric-Fusion Arc-Welded	0.80
ASTM A 333	Seamless	1.00
	Electric-Resistance-Welded	1.00
ASTM A 381	Submerged-Arc-Welded	1.00
ASTM A 671	Electric-Fusion-Welded	
	Classes 13, 23, 33, 43, 53	0.80
	Classes 12, 22, 32, 42, 52	1.00
ASTM A 672	Electric-Fusion-Welded	
	Classes 13, 23, 33, 43, 53	0.80
	Classes 12, 22, 32, 42, 52	1.00
ASTM A 691	Electric-Fusion-Welded	
	Classes 13, 23, 33, 43, 53	0.80
	Classes 12, 22, 32, 42, 52	1.00
ASTM A 984	Electric-Resistance-Welded	1.00
ASTM A 1005	Double Submerged-Arc-Welded	1.00
ASTM A 1006	Laser Beam Welded	1.00
API 5L	Electric Welded	1.00
	Seamless	1.00
	Submerged-Arc Welded (Longitudinal Seam or Helical Seam)	1.00
	Furnace-Butt Welded, Continuous Weld	0.60

GENERAL NOTE: Definitions for the various classes of welded pipe are given in para. 804.7.3.

Fuente: ASME B31.8 Sistemas de tubería de transporte y distribución de gas.

Tabla 4.8 Tabla de factor de corrección por temperatura, T

Temperature, °F (°C)	Temperature Derating Factor, <i>T</i>
250 (121) or less	1.000
300 (149)	0.967
350 (177)	0.933
400 (204)	0.900
450 (232)	0.867

GENERAL NOTE: For intermediate temperatures, interpolate for derating factor.

Fuente: ASME B31.8 Sistemas de tubería de transporte y distribución de gas.

Aplicando los valores anteriores en la ecuación 4.5 se calcula un espesor mínimo de .019" para la tubería de gas combustible del sistema Bi-Fuel de los generadores. Se selecciona el espesor comercial de la tubería API 5L NPS de 1"schedule 40⁹ que es .133".

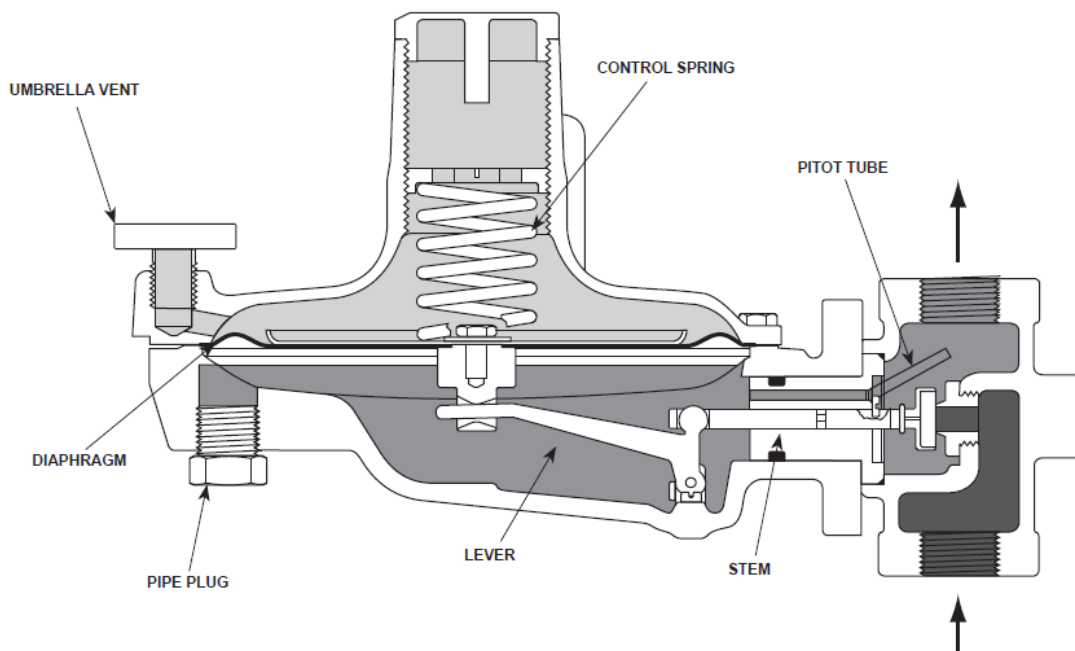
4.4 ACCESORIOS PARA LA INSTALACION

4.4.1 Válvula reguladora de presión. El gas de la línea de gas combustible de los motores de los equipos compresores se encuentra a 150 psi, esta presión no permite la dosificación directa al motor de combustión interna diesel del equipo electrógeno. La función de la válvula reguladora de presión es reducir la presión a los requerimientos de trabajo del motor, la presión debe ser superior a la presión atmosférica y no superior a los 5 psi. En la figura 4.3 se muestra un esquema de válvula reguladora con piloto interno.

Se realiza la selección de la válvula reguladora de presión consultando la tabla 4.9 para reguladores Fisher de la serie Y600A, que considera el flujo máximo de gas natural ($G=0.60$) que puede trabajar la válvula con una entrada de 1" NPT para un rango de presión regulada de 2.5 a 4.5 psig, una presión máxima de entrada de 150 psig y un orificio de regulación de 3/16". Con estos valores se determina un rango de flujo de 2880 a 4090 SCFH.

⁹ Tomado de la Tabla 1 Dimensions and weights of welded and seamless wrought steel pipe, norma ASME B36.10M - 2010

Figura 4.3 Esquema de válvula reguladora Fisher serie Y600A



Fuente: FISHER – EMERSON, Bulletin 71.1:Y600A

Tabla 4.9 Flujo para válvulas reguladoras Y600A de 1" NPT

OUTLET PRESSURE RANGE, CONTROL SPRING PART NUMBER, AND COLOR	OFFSET FROM SETPOINT	OUTLET PRESSURE SETTING	INLET PRESSURE, PSIG (bar)	1 NPT BODY SIZE					
				Capacities in SCFH (Nm ³ /h) of 0.6 Specific Gravity Natural Gas					
				Orifice Size, Inches (mm)					
				1/8 (3,2)	3/16 (4,8)	1/4 (6,3)	3/8 (9,5)	1/2 (13)	9/16 (14)
2.5 to 4.5 psig (172 to 310 mbar) 1B537227022 Light blue	0.3 psig (21 mbar)	2.5 psig (172 mbar)	4 (0,28)	140 (3,8)	180 (4,8)	190 (5,1)	410 (11,0)	430 (11,5)	480 (12,9)
			8 (0,55)	180 (4,8)	320 (8,6)	360 (9,6)	710 (19,0)	740 (19,8)	900 (24,1)
			12 (0,82)	190 (5,1)	400 (10,7)	490 (13,1)	930 (24,9)	960 (25,7)	
			30 (2,1)	430 (11,5)	620 (16,6)	900 (24,1)	1830 (49,0)		
			60 (4,1)	660 (17,7)	1610 (43,1)	1740 (46,6)	2970 (79,6)		
			150 (10,3)	2010 (53,9)	4090 (110)	6660 (178)			
	4.5 psig (310 mbar)	4.5 psig (310 mbar)	8 (0,55)	120 (3,2)	190 (5,1)	250 (6,7)	490 (13,1)	520 (13,9)	540 (14,5)
			12 (0,82)	160 (4,3)	210 (5,6)	320 (8,6)	610 (16,3)	850 (22,8)	
			30 (2,1)	390 (10,4)	520 (13,9)	760 (20,4)	1360 (36,4)		
			60 (4,1)	630 (16,9)	840 (22,5)	1230 (32,9)	2580 (69,1)		
			150 (10,3)	1390 (37,3)	2880 (77,2)	4990 (134)			

Fuente: FISHER – EMERSON, Bulletin 71.1:Y600A

De acuerdo a la información del fabricante los flujos determinados se multiplican por 0.7757 y se dividen por la raíz cuadrada de G para corregir a la gravedad específica. En la tabla 4.10 se presentan los cálculos para Q considerando la corrección para la gravedad específica de los gases de Cusiana y Guajira.

Tabla 4.10 Flujo de válvula reguladora Y600A corregida por G

Gas	Presión regulada (2.5 psig)	Presión regulada (4.5 psig)
Guajira (G = 0.565)	4217 SCFH	2969 SCFH
Cusiana (G = 0.680)	3844 SCFH	2707 SCFH

Fuente: El autor

Se observa que los resultados de Flujo son superiores al flujo de 1452 SCFH requerido para la operación de los equipos electrógenos de las estaciones de compresión con sistema Bi-Fuel. De acuerdo a este resultado se confirma la selección de la válvula reguladora de presión FISHER tipo Y600A, 1" NPT, de diámetro de orificio de 3/16" y rango de presión de 2.5 a 4.5 psig.

4.4.2 Válvula manual de bola. El uso de las válvulas de bola es la mejor manera para cerrar el suministro de gas. Las válvulas ofrecen una total estanqueidad para gases y funcionan durante años sin mantenimiento. Además, la posición de su manecilla indica claramente si la válvula está cerrada o abierta. Esta válvula es comandada por el operador, cortando o alimentando el suministro de gas, según se presenten las condiciones del sistema y decisión del operador.

Para la instalación de cada kit Bi-Fuel se seleccionan 2 válvulas de bola ANSI 150 para instalar aguas arriba y aguas debajo de la válvula reguladora de presión.

4.4.3 Kit de conversión Bi-Fuel. En el capítulo 3 se trataron los componentes del kit Bi-Fuel que permiten y controlan el flujo de gas combustible hacia el motor desde el punto de gas a construir en la caseta del equipo electrógeno. En las tabla 4.2 fueron seleccionadas dos referencias Altronic de kit Bi-Fuel: el sistema GTI 5015-1A que aplica para los motores de 11 estaciones de compresión y el sistema GTI 2514-1A que aplica solo para el generador de la estación Padua.

El sistema está compuesto principalmente el sistema de control del motor, mezclador de aire combustible, válvula de potencia que es un componente que regula el nivel máximo de flujo de gas y el tren de gas que incluye un filtro de gas, una válvula solenoide electrónica de corte, y un regulador de gas de cero presión.

4.5 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Los contaminantes más importantes emitidos por un motor diesel son los óxidos de nitrógeno (NOx), las partículas (compuestas de hollín, hidrocarburos, sulfatos, nitratos, etc.), el monóxido de carbono (CO), los compuestos orgánicos gaseosos (hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados) y los óxidos de azufre (SOx).

Con la conversión de motores diesel a sistema Bi-Fuel se consigue como uno de los beneficios la reducción de la producción de óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, hidrocarburos reactivos, dióxido de carbono y de material particulado.

Con relación al dióxido de carbono, y asumiendo que el diesel tiene una composición aproximada de 86% de carbón y 14% de hidrógeno, se tiene que la combustión completa de un galón de diesel genera 10.89 kg de dióxido de carbono. En cambio, en la combustión completa del gas natural compuesto principalmente por metano (CH₄), 138 ft³ de gas (este volumen es equivalente energéticamente a 1 galón de diesel), generan 8.05 kg de dióxido de carbono. Por lo tanto, la disminución debida a la substitución será de 2.84 kg por cada galón sustituido, que equivale a una reducción del 26% de emisiones de CO₂.

Las emisiones de CO₂ en kilogramos para cada una de los combustibles; fueron calculados utilizando los consumos de combustibles con sus factores de emisión

propios, obtenidos mediante el programa FECOC¹⁰ (Factores de Emisión para Combustibles Colombianos), desarrollado por la Academia de Ciencias para la UPME. Los factores de emisión se presentan en la tabla 4.11.

Debido a la peligrosidad de los óxidos de azufre (SOx), a nivel mundial se está haciendo un gran esfuerzo en reducir la presencia de azufre de los combustibles. La legislación colombiana cada vez más estricta, orienta sus esfuerzos en mejorar la calidad del combustible diesel (LEY 1205 DE 2008), donde a partir del 31 de diciembre del 2012 queda prohibido distribuir, comercializar, consumir o transportar combustibles diésel que contengan más de 50 ppm de azufre. En este sentido la instalación del sistema Bi-Fuel reduce las emisiones contaminantes de óxidos de azufre (SOx), ya que el gas natural del sistema de transporte nacional por gasoductos no contiene azufre. Mediante el programa FECOC se puede calcular que con cada galón de diesel sustituido por gas natural se dejan de generar 27.5 gramos de SO₂.

Tabla 4.11 Factores de emisión de carbono y CO2 por combustible (kg/GJ)

Combustible	Estado	Factor de emisión (kg C/GJ) ^a	Factor de emisión (kg CO ₂ /GJ) ^b
Carbón	Sólido	26.8	94.53
Crudo	Líquido	20	73.28
Diesel		20.2	74.01
Gasolina		18.9	69.25
Kerosene		19.5	71.45
Gas propano GLP		17.2	63.02
Natural gas	Gas	15.3	56.06

a. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual IPCC. Bracknell, U.K.

b. Calculado a partir de la ecuación estequiométrica: C + O₂ = CO₂

Fuente: ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES. Factores de emisión de los combustibles colombianos.

Pruebas realizadas por Pay & Brinck Motor's han demostrado reducción de emisiones de NOx desde un 8% a un 17,5% utilizando las diversas mezclas gas / diesel. Adicionalmente cuando se ha cambiado manualmente el tiempo de

¹⁰ Tomado del software FECOC – UPME contenido en el informe Factores de emisión de los combustibles colombianos : combustibles líquidos – ACPM 2003

inyección de combustible en el motor, las emisiones de NOx se redujeron hasta en un 56%.

5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE PRE-FACTIBILIDAD PARA LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA BI-FUEL

En el presente capítulo se presentan los costos asociados a la instalación de los kits de conversión a sistema Bi-Fuel GTI Altronic, así como los beneficios económicos en el ahorro de combustible.

Los generadores eléctricos de las estaciones de compresión operan durante las fallas que se presentan en la red eléctrica eléctrico, ya sea por corte del suministro o por falta de potencia eléctrica en horas pico. También operan mínimo un día a la semana para evidenciar las fallas ocultas que se pueden presentar en este tipo de equipos cuando permanecen en stand-by.

5.1 COSTOS DE ADQUISICIÓN E INSTALACION DEL SISTEMA BI-FUEL

Para la estimación de costos se considera el valor del kit Bi-Fuel Altronic GTI seleccionado para los equipos electrógenos de las estaciones de compresión, el costo de los accesorios y tubería necesarios para la instalación, así como el servicio de soldadura y tendido de la misma, finalmente se presenta el valor del servicio técnico para el montaje y el comisionamiento (commissioning) del equipo de conversión Bi-Fuel.

La tabla 17 resume los costos para la instalación de cada kit Altronic GTI 5015-1A seleccionado para 11 estaciones de compresión de acuerdo a lo presentado en la tabla 4.2.

Tabla 5.1 Resumen de costos kit Altronic GTI 5015-1A

KIT SERIE 5015-1A (IN-LINE ENGINE, 1X4" MIXER)						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1,1	GGT0050	Basic gas train kit, 2"	UND	1	\$ 5.985.000	\$ 18.912.600
1,2	GPA0005-20	Panel accessory kit, series 50xx-1A	UND	1	\$ 3.327.660	
1,3	GPN1000	Control panel, Series 50xx-1A, 65xx-1A, 65xx-1B	UND	1	\$ 9.599.940	
2	GMX0041AA	Mixer 4"	UND	1	\$ 2.872.800	\$ 2.872.800
3	G11079	Hose clamp, 1"	UND	2	\$ 23.940	\$ 47.880
4	G11080-5	Hose, 1.0" x 5 ft.	UND	1	\$ 172.368	\$ 172.368
5	G20021	Hump hose adapter kit 4"x4"	UND	2	\$ 95.760	\$ 191.520
6	G20011	Manual shutoff valve kit, 2"	UND	1	\$ 299.250	\$ 299.250
TOTAL OFERTA 1 SISTEMA GTI BI-FUEL (Entrega DDP-BOGOTÁ)						\$ 22.496.418
ACCESORIOS						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1	Type Y600A, Body Cast Iron, End connection 1 in NPT, Spring Range 2,5 to 4,5 psi, Orifice Port 3/16 in, Fisher Manufacturing Cert		UND	1	\$ 1.479.660	\$ 1.479.660
2	Tubería API 5L NPS de 1" schedule 40		M	152,4	\$ 30.000	\$ 4.572.000
3	Valvula de bola ANSI 150 NPT 1"		UND	2	\$ 22.000	\$ 44.000
TOTAL OFERTA ACCESORIOS						\$ 6.095.660
SERVICIO TÉCNICO						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1	Servicio técnico de Instalación del sistema GTI Bi-Fuel Serie 5015-1A en las instalaciones de TGI en sitio (campo), para un (1) motor por un (1) Ingeniero, un (1) Técnico electromecánico y un (1) Auxiliar electromecánico de FTC ENERGY GROUP S.A. (Literal O, condiciones comerciales, Servicio Técnico para la puesta en marcha)		GLB	1	\$ 24.646.353	\$ 24.646.353
2	Material nacional para la instalación del sistema GTI Bi-Fuel (incluye soportería para panel de control y trenes de gas, tubería para el cableado, accesorios, amarres, tornillería)		GLB	1	\$ 2.015.750	\$ 2.015.750
3	Servicio de soldadura y tendido de tubería desde la línea de gas combustible hasta la caseta del generador		GLB	1	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
TOTAL OFERTA SERVICIO TECNICO DE ASESORIA Y MATERIAL NACIONAL						\$ 34.662.103
TOTAL					\$ 63.254.181	

Fuente: El autor

La tabla 5.2 resume los costos para la instalación del kit Altronic GTI 2514-1A seleccionado para la estación de compresión Padua de acuerdo a lo presentado en la tabla 4.2.

Tabla 5.2 Resumen de costos kit Altronic GTI 2514-1A

KIT SERIE 2514-1A (IN-LINE ENGINE, 1X4" MIXER)						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1,1	GGT0025A-12	Basic gas train kit, 1"	UND	1	\$ 2.753.100	\$ 15.561.000
1,2	GPA0005-10	Panel accessory kit, series 25xx-1A	UND	1	\$ 3.207.960	
1,3	GPN1000-12	Control panel, Series 25xx-1A	UND	1	\$ 9.599.940	
2	GMX0041AA	Mixer 4"	UND	1	\$ 2.872.800	\$ 2.872.800
3	G11079	Hose clamp, 1"	UND	2	\$ 23.940	\$ 47.880
4	G11080-5	Hose, 1.0" x 5 ft.	UND	1	\$ 172.368	\$ 172.368
5	G20021	Hump hose adapter kit 4"x4"	UND	2	\$ 95.760	\$ 191.520
6	G20010	Manual shutoff valve kit, 1"	UND	1	\$ 114.912	\$ 114.912
TOTAL OFERTA 1 SISTEMA GTI BI-FUEL (Entrega DDP-BOGOTÁ)						\$ 18.960.480
ACCESORIOS						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1	Type Y600A, Body Cast Iron, End connection 1 in NPT, Spring Rage 2,5 to 4,5 psi, Orifice Port 3/16 in, Fisher Manufacturing Cert		UND	1	\$ 1.479.660	\$ 1.479.660
2	Tubería API 5L NPS de 1" schedule 40		M	152,4	\$ 30.000	\$ 4.572.000
3	Valvula de bola ANSI 150 NPT 1"		UND	2	\$ 22.000	\$ 44.000
TOTAL OFERTA ACCESORIOS						\$ 6.095.660
SERVICIO TÉCNICO						
ITEM	DETALLE		UNID.	CANT.	V/ UNITARIO	V/ TOTAL
1	Servicio técnico de Instalación del sistema GTI Bi-Fuel Serie 2514-1A en las instalaciones de TGI en sitio (campo), para un (1) motor por un (1) Ingeniero, un (1) Técnico electromecánico y un (1) Auxiliar electromecánico de FTC ENERGY GROUP S.A. (Literal O, condiciones comerciales, Servicio Técnico para la puesta en marcha)		GLB	1	\$ 12.323.176	\$ 12.323.176
2	Material nacional para la instalación del sistema GTI Bi-Fuel (incluye soportería para panel de control y trenes de gas, tubería para el cableado, accesorios, amarres, tornillería)		GLB	1	\$ 1.411.025	\$ 1.411.025
3	Servicio de soldadura y tendido de tubería desde la línea de gas combustible hasta la caseta del generador		GLB	1	\$ 8.000.000	\$ 8.000.000
TOTAL OFERTA SERVICIO TECNICO DE ASESORIA Y MATERIAL NACIONAL						\$ 21.734.201
TOTAL					\$ 46.790.341	

Fuente: El autor

5.2 AHORRO DE COMBUSTIBLE

Una de las ventajas que presenta la conversión Bi-Fuel es el ahorro de combustible diesel debido a la significativa diferencia de precio con el gas natural. Para los cálculos que se presentan a continuación se referencia la tabla 4.3 de

consumo de combustible diesel para motores Perkins y se considera un precio promedio de combustible diesel de \$ 8.200 y el precio del gas natural combustible para las estaciones de compresión que es de 3.91 \$USD/MBTU. Al realizar la equivalencia energética se tienen que 138 SCF de gas natural equivalen a 1 galón de diesel y este volumen de gas tiene un precio calculado de \$ 982 (una octava parte del precio de 1 galón de diesel).

En la tabla 5.3 se presenta el costo de la operación por hora de los motores con 100% diesel a diferentes niveles de carga del generador.

Tabla 5.3 Consumo de 100% diesel a diferentes niveles de carga

CONSUMO DE COMBUSTIBLE DIESEL - \$/hora				
Tipo de motor	% DE POTENCIA NOMINAL			
	110	100	75	50
Perkins 1006	\$ 89.380	\$ 81.180	\$ 62.320	\$ 41.820
Perkins 1106	\$ 109.060	\$ 89.380	\$ 79.540	\$ 54.940
Perkins 1306	\$ 123.000	\$ 111.520	\$ 83.640	\$ 57.400

Fuente: El autor

En la tabla 5.4 se presenta el costo por hora de la operación de los motores con el sistema Bi-Fuel, con 30% diesel y 70% gas natural a diferentes niveles de carga del generador. Con esta relación se logra un ahorro de dinero del 62% por el concepto de combustible

En la tabla 5.5 se presenta el costo por hora de la operación de los motores con el sistema Bi-Fuel, con 50% diesel y 50% gas natural a diferentes niveles de carga del generador. Con esta relación se logra un ahorro de dinero del 44% por el concepto de combustible.

Tabla 5.6 Tiempo en horas y días para recuperar la inversión

		PERIODO PARA RECUPARAR INVERSION	
		75% DE POTENCIA NOMINAL	
Combust. Tipo motor	INVERSION	GENERACIÓN 50% diesel -50% gas horas (días)	GENERACIÓN 30% diesel - 70% gas horas (días)
Perkins 1006 Kit Bi-Fuel GTI 2514-1A	\$ 46.790.341	1716 (71)	1222 (51)
Perkins 1106 Kit Bi-Fuel GTI 5015-1A	\$ 63.254.181	1340 (56)	956 (40)
Perkins 1306 Kit Bi-Fuel GTI 5015-1A	\$ 63.254.181	1266 (53)	906 (38)

Fuente: El autor

Para los equipos de emergencia no es posible proyectar la utilización ya que esto depende de la confiabilidad de la red eléctrica¹¹, sin embargo se puede realizar una aproximación con las horas de generación eléctrica del año 2011. De acuerdo a los datos de utilización de los equipos electrógenos consignados en las estaciones compresoras se puede indicar que el retorno sobre la inversión (ROI) puede ser aproximadamente de dos años.

¹¹ Las localidades donde se encuentran las estaciones de compresión presentan continuas fallas en el suministro eléctrico.

6. CONCLUSIONES

Con base en la información recopilada y en el desarrollo de análisis técnico y económico se puede concluir que:

La implementación del sistema de combustible dual (gas–diesel) mediante la adquisición e instalación de kits Bi-Fuel para los equipos electrógenos de las estaciones compresoras de TGI S.A. ESP es viable técnica y económicamente.

La significativa diferencia de precio entre los dos combustibles, debido a que energéticamente el precio del gas natural para TGI S.A. ESP es la octava parte del precio del diesel, permiten el retorno sobre la inversión en aproximadamente dos años y un ahorro considerable de costos de operación en los años siguientes.

Con la conversión de los motores diesel a sistema Bi-Fuel se disminuye el impacto ambiental ya que se estima una reducción en la producción de sustancias contaminantes. Se reducen las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en un 26%, se reduce en un 70% las emisiones de óxidos de azufre, (SO_x) y se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) desde un 8% en adelante.

El Sistema Bi-Fuel tiene la capacidad de pasar de la mezcla diesel-gas a solo diesel, sin interrupción en el funcionamiento del motor, manteniendo su velocidad y carga, lo cual garantiza la confiabilidad del sistema de emergencia eléctrico de las estaciones compresoras.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda instalar un kit de conversión Bi-Fuel en una de las estaciones compresoras de gas, como Puente Guillermo o Curumaní, que presentan fallas más frecuentes en el suministro de energía eléctrica, para considerarla como piloto de prueba para el estudio de esta propuesta.

Se recomienda realizar una visita a uno de los campos o estaciones referenciados en el numeral 3.4 “Sistema Bi-Fuel en Colombia” para considerar las lecciones aprendidas de la instalación y operación de los sistemas de combustible dual.

Se recomienda considerar el protocolo de pruebas para la instalación del piloto Bi-Fuel, de acuerdo a lo desarrollado por Sergio Perez en su trabajo de monografía (referenciado en la bibliografía) y de acuerdo a los ensayos desarrollados por Pay & Brinck Motor’s presentados en el anexo C. En estos trabajos se realizan mediciones de consumo diesel-gas para diferentes porcentajes de potencia nominal, análisis de aceite y análisis de emisiones.

Se recomienda incluir en la página web de TGI S.A. ESP los resultados de este trabajo para promocionar el uso del gas natural como una alternativa económica y ambiental, en la sustitución de combustible diesel para motores estacionarios

BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES. Factores de emisión de los combustibles colombianos. Bogotá: ACCEFYN, 2003.

ALTRONIC. GTI Bi-Fuel: for heavy-duty diesel engines. [Citado 8 octubre de 2012]. Disponible en internet: <http://www.gti-altronic.com/>

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 5L Specification for line pipe. 42 ed. Washington: API Publications, 2000.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.3 Process piping. New York: ASME, 2002.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B31.8 Gas transmission and distribution piping systems. New York: ASME, 2010.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B36.10M Welded and seamless wrought steel pipe. New York: ASME, 2000.

ARANGO, Jorge Humberto. Calidad de los combustibles en Colombia. En: Revista de ingeniería. Universidad de los Andes. Mayo, 2009. Vol. 29.

CHALLEN, Bernanrd and BARANESCU, Rodica. Diesel engine reference book. 2 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1999. 714 p.

COMAP Systems. Bi-fuel (dual fuel) conversion of diesel & hfo generating sets. [citado 8 octubre de 2012]. Disponible en internet:

<http://www.comapsystems.com/solutions/bi-fuel-conversions/high-speed-conversions/>

ECOPETROL. Catálogo de productos: Gas natural - Diesel corriente. [citado 20 octubre de 2012]. Disponible en internet: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/Catalogo_de_Productos/index.html

FERNANDEZ, Jose. Inyección Diesel. [Citado 22 octubre de 2012]. Disponible en internet: <http://jose-luis-automocion.blogia.com/temas/inyeccion-diesel.php>

FYGUEROA, Simón y ARAQUE, Jesús. El proceso de combustión en Motores de combustión interna. Mérida: Consejo de estudios de postgrado, 2005

GAS PROCESSORS SUPPLIERS ASSOCIATION. Engineering data book. 12 ed. Oklahoma: GPSA, 2004. 821 p.

GONZALEZ, David. Motores. Madrid: Ediciones Paraninfo, 2011. 403 p.

JUNTA DE ANDALUCIA. Termodinámica y motores térmicos. [citado 16 octubre de 2012]. Disponible en internet: http://www.juntadeandalucia.es/averroes/ies_sierra_magina/d_tecnologia/LIBRO/pdf/termopri.pdf

PEREZ COLLADO, Javier. Modelado cinético-químico del proceso de combustión diesel para la estimación de contaminantes gaseosos, tesis doctoral. Cuenca: Ediciones de la UCLM, 2007. 256 p.

PEREZ SUA, Sergio. Factibilidad de implementar un sistema “Bi-Fuel” para reducir el consumo de combustible diesel en los motores utilizados en las facilidades de producción aplicación campo sardinas. Monografía. Bucaramanga: UIS, 2011.

RECALDE, Luis. Diseño e implementación de un sistema de mezcla para inyección de gas en motores de combustión interna a diesel. Tesis de grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2012.

RUIZ R, Alvaro. Diseño, Construcción, Operación y Mantenimiento de Gasoductos. Bucaramanga: Publicaciones UIS, 2011.

SANZ, Santiago. Motores, Mantenimiento de vehículos autopropulsados. Madrid: Editorial Editex SA, 2007

SAUCEDO B, Juan. Canasta de energéticos colombianos. [citado 16 octubre de 2012]. Disponible en internet: <http://www.sci.org.co/images/pdf/energeticaoct15.pdf>

ANEXOS

ANEXO A. Bulletin 71-1Y600A

Bulletin 71.1:Y600A

January 2010

Y600A Series Pressure Reducing Regulators



Figure 1. Type Y600A Pressure Reducing Regulator

Introduction

Y600A Series direct-operated, spring-loaded regulators provide economical pressure-reducing control for a variety of residential, commercial, and industrial applications.

The large diaphragm area provides more accurate control at low-pressure settings, and the pitot tube of the Type Y600A or Y600AR regulator also creates a dynamic boost that helps provide greater capacity.

The Type Y600A features internal registration. The Type Y600AR has internal registration and relief. The Type Y600AM uses external registration with a 1/2 NPT downstream control line connection and an O-ring stem seal.

Features

- **Precision Control at Low-Pressure Settings**—The large diaphragm area provides more accurate control at low-pressure settings. The pitot tube of Types Y600A and Y600AR (Figure 2) regulators also creates a dynamic boost that helps provide greater capacity.
- **Easy Conversion Between Types Y600A and Y600AM**—The throat seal can be modified to either version. A new lower casing is not needed.
- **Tamper-Resistant Adjustment**—The closing cap and spring case (Figure 2) allow the installation of sealing wire to discourage or detect unauthorized adjustment of the pressure setting.
- **Easy to Maintain**—Trim parts can be replaced without removing the regulator body from the pipeline. A two-bolt connection between the body and diaphragm casing simplifies disassembly for maintenance.



www.fisherregulators.com



Bulletin 71.1:Y600A

Specifications

<p>Available Configurations See Table 1</p> <p>Body Sizes and End Connection Style 3/4 or 1 NPT</p> <p>Maximum Inlet Pressure (Body Rating)⁽¹⁾ 150 psig (10,3 bar)</p> <p>Outlet Pressure Ranges⁽¹⁾ See Table 2</p> <p>Maximum Outlet (Casing) Pressure⁽¹⁾ 20 psig (1,4 bar)</p> <p>Maximum Operating Outlet Pressure to Avoid Internal Parts Damage⁽¹⁾ 2 psig (0,14 bar) above outlet pressure setting</p> <p>Flow and Sizing Coefficients See Table 4</p>	<p>Pressure Registration See Table 1</p> <p>Temperature Capabilities⁽¹⁾ -20° to 180°F (-29° to 82°C)</p> <p>Spring Case Vent Connection 1/4 NPT</p> <p>Diaphragm Case (Control Line) Connection 1/2 NPT</p> <p>Construction Materials See Table 5</p> <p>Pressure Setting Adjustment Adjusting screw</p> <p>Approximate Weight 13 pounds (6 kg)</p>
--	---

1. The pressure/temperature limits in this Bulletin and any applicable standard or code limitation should not be exceeded.

Table 1. Available Configurations

CONSTRUCTION FEATURE	TYPE NUMBER		
	Y600A	Y600AR	Y600AM
Internal pressure registration with pitot tube	X	X	----
External pressure registration with 1/2 NPT downstream control line connection and O-ring stem seal	----	----	X
Internal relief	----	X	----

Construction Features

- Internal Relief**—The Type Y600AR regulator (Figure 2) has limited capacity internal relief across the diaphragm to help minimize overpressure that could occur due to seat leakage. Any outlet pressure above the start-to-discharge point of the non-adjustable relief valve spring moves the diaphragm off the relief valve seat, allowing excess pressure to bleed out through the spring case vent.
- Downstream Control Line Connection**—The Type Y600AM regulator (Figure 2) has a blocked throat and a 1/2 NPT control line tapping in the diaphragm casing. A regulator with a downstream control line is used for monitoring installations or other applications where there is other equipment installed between the regulator and the pressure control point.

Bulletin 71.1:Y600A

Table 2. Outlet Pressure Ranges

TYPES	CONTROL SPRING COLOR	CONTROL SPRING PART NUMBER	SPRING WIRE DIAMETER, INCHES (mm)	SPRING FREE LENGTH, INCHES (mm)	OUTLET PRESSURE RANGE WITH SPRING CASE ABOVE DIAPHRAGM ¹⁾	APPROXIMATE POINT ABOVE PRESSURE SETTING AT WHICH TYPE Y600AR INTERNAL RELIEF START-TO-DISCHARGE
Y600A, Y600AM, Y600AR	Red	1B653827052	0.085 (2,16)	3.625 (92,1)	4 to 8-inches w.c. (10 to 20 mbar)	10 to 24-inches w.c. (25 to 60 mbar)
	Unpainted	1B653927022	0.105 (2,67)	3.750 (95,2)	7 to 16-inches w.c. (17 to 40 mbar)	10 to 26-inches w.c. (25 to 65 mbar)
	Yellow	1B537027052	0.114 (2,90)	4.312 (110)	15-inches w.c. to 1.2 psig (37 to 83 mbar)	
	Green	1B537127022	0.156 (3,96)	4.060 (103)	1.2 to 2.5 psig (0,08 to 0,17 bar)	0.5 to 2 psig (0,03 to 0,14 bar)
	Light blue	1B537227022	0.187 (4,75)	3.938 (100)	2.5 to 4.5 psig (0,17 to 0,31 bar)	0.5 to 3 psig (0,03 to 0,21 bar)
	Black	1B537327052	0.218 (5,54)	3.980 (101)	4.5 to 7 psig (0,31 to 0,48 bar)	1 to 4 psig (0,07 to 0,28 bar)

1. Minimum outlet pressure setting may be approximately 1-inch w.c. (2 mbar) lower if spring case is below diaphragm.

Table 3. Maximum Operating Inlet Pressures

ORIFICE SIZE, INCHES (mm)	MAXIMUM OPERATING INLET PRESSURE, PSIG (bar)			
	With 1.2 Psig (0,08 bar) or Less Outlet Pressure Setting	With 1.2 to 2.5 Psig (0,08 to 0,17 bar) Outlet Pressure Setting	With 2.5 to 4.5 Psig (0,17 to 0,31 bar) Outlet Pressure Setting	With 4.5 to 7 Psig (0,31 to 0,48 bar) Outlet Pressure Setting
1/8 (3,2)	150 (10,3)	150 (10,3)	150 (10,3)	150 (10,3)
3/16 (4,8)				
1/4 (6,3)	75 (5,2)	60 (4,1)	60 (4,1)	60 (4,1)
3/8 (9,5)	35 (2,4)			
1/2 (13)	8 (0,55)	10 (0,69)	12 (0,83)	12 (0,83)
9/16 (14)	5 (0,34)	6 (0,41)	8 (0,55)	8 (0,55)

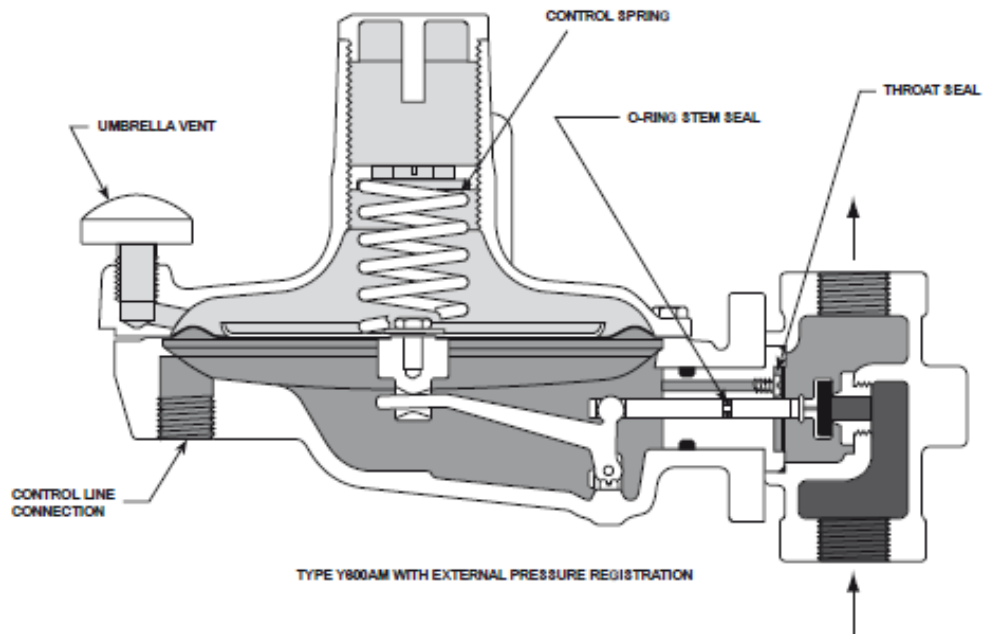
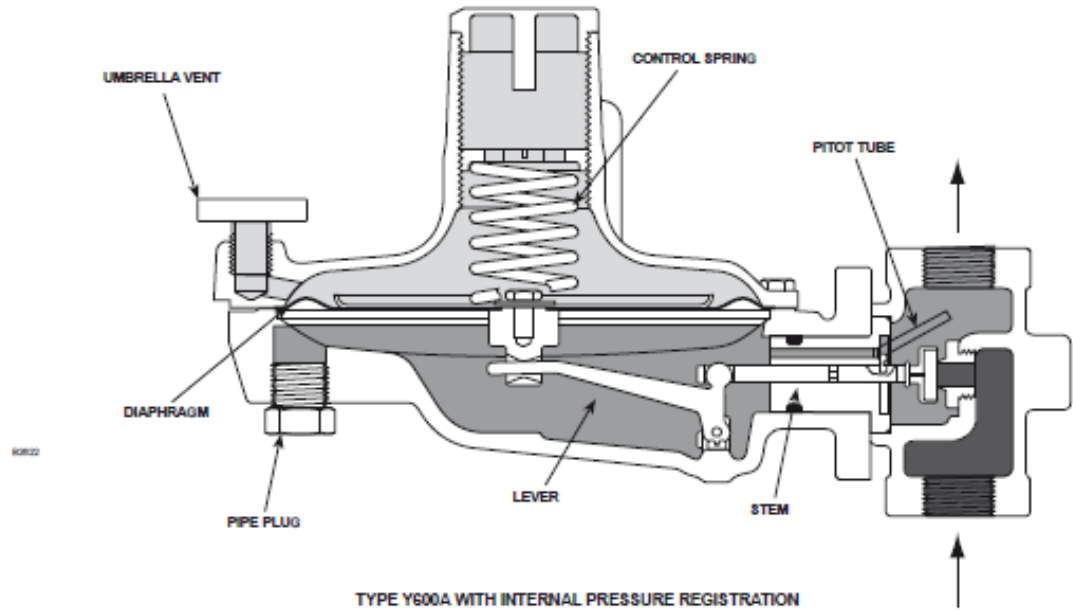
Table 4. Flow and Sizing Coefficients

ORIFICE SIZE, INCHES (mm)	WIDE-OPEN FLOW COEFFICIENTS FOR EXTERNAL RELIEF SIZING		C ₁	IEC SIZING COEFFICIENTS		
	C _v	C _v		X _v	F ₀	F _L
1/8 (3,2)	12.3	0.35	35	0.78	0.50	0.89
3/16 (4,8)	27.6	0.79				
1/4 (6,3)	50	1.43				
3/8 (9,5)	110	3.14				
1/2 (13)	200	5.71				
9/16 (14)	250	7.14				

Table 5. Construction Materials

BODY, DIAPHRAGM CASING, AND SPRING CASE	ORIFICE	SPRING AND LEVER	DIAPHRAGM AND DISK	PUSHER POST	ADJUSTING SCREW AND DISK HOLDER	CLOSING CAP	STEM	PITOT TUBE (FOR TYPES Y600A AND Y600AR ONLY) AND RELIEF VALVE SPRING
Cast Iron	Aluminum	Zinc-plated steel	Nitrile (NBR)	Types Y600A and Y600AM: Aluminum Type Y600AR: Zinc	Aluminum	Thermoplastic	Stainless steel	Stainless steel

Bulletin 71.1:Y600A



- INLET PRESSURE
- OUTLET PRESSURE
- ATMOSPHERIC PRESSURE

Figure 2. Y600A Series Operational Schematic

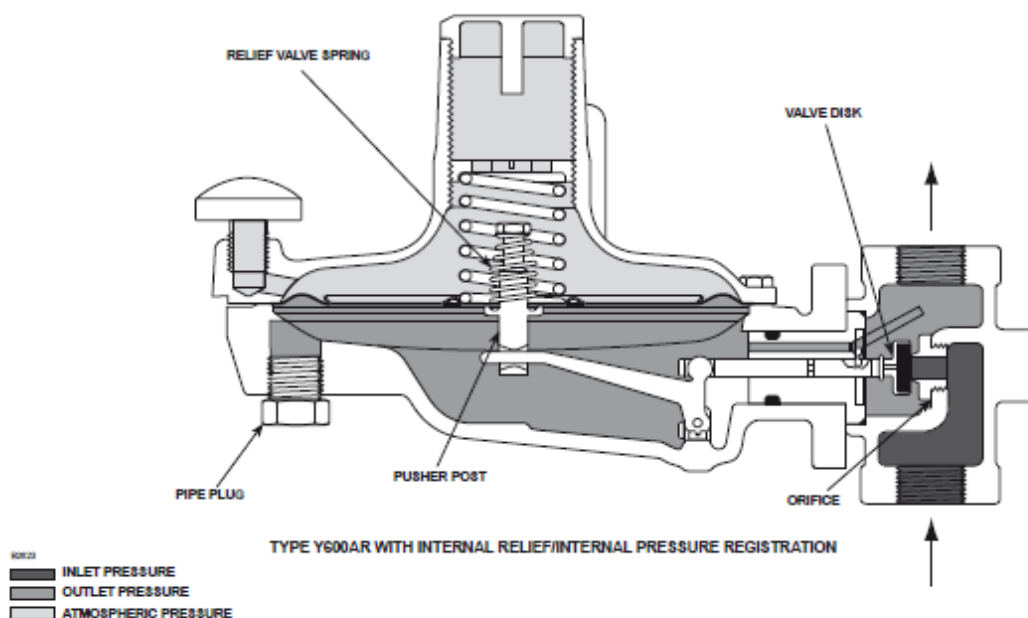


Figure 2. Y600A Series Operational Schematic (continued)

Principle of Operations

Refer to Figure 2. When downstream demand decreases, the pressure under the diaphragm increases. This pressure overcomes the regulator setting (which is set by a spring). Through the action of the pusher post assembly, the valve disk moves closer to the orifice and reduces gas flow. If demand downstream increases, pressure under the diaphragm decreases. Spring force pushes the pusher post assembly downward and the valve disk moves away from the orifice.

The Type Y600AR regulator includes an internal relief valve for over pressure protection. If the downstream pressure exceeds the regulator setting by 10-inches w.c. to 4 psig (25 mbar to 0,28 bar) (depending on the main spring used), the relief valve opens and excess gas is vented through the stabilizer vent in the upper spring case.

Installation

A Y600A Series regulator may be installed in any orientation as long as flow through it matches the direction of the arrow cast on the body. Normal installation is with the spring case vertical above or below the diaphragm case. External dimensions and connections are shown in Figure 3.

Fisher® provides an instruction manual with every regulator shipped. Refer to this for complete installation, operation and maintenance instructions. Included is a complete listing of individual parts and recommended spare parts.

Overpressure Protection

Like most pressure-reducing regulators, Y600A Series regulators have outlet pressure ratings that are lower than their inlet pressure ratings. A pressure relieving or pressure limiting device is needed if the inlet pressure can exceed the outlet pressure rating. A Type Y600AR regulator—because of its internal relief—does provide limited downstream overpressure protection, but this internal relief should not be considered complete protection against overpressure. Overpressuring any portion of a regulator or associated equipment may cause personal injury, leakage, or property damage due to bursting of pressure-containing parts or explosion of accumulated gas. Regulator operation within ratings does not prevent the possibility of damage from external sources or from debris in the pipeline. Refer to the Capacity Information section and the relief sizing coefficients in Table 4 to determine the required relief valve capacity.

Bulletin 71.1:Y600A

Capacity Information

Tables 6 and 7 give the natural gas regulating capacities of Y600A Series regulators at selected inlet pressures and outlet pressure settings. Flows are in SCFH (60°F and 14.7 psia) of 0.6 specific gravity gas. To determine equivalent capacities for air, propane, butane, or nitrogen, multiply the Table 6 or 7 capacity by the following appropriate conversion factor: 0.775 for air, 0.628 for propane, 0.548 for butane, or 0.789 for nitrogen. For gases of other specific gravities, multiply the given capacity by 0.775, and divide by the square root of the appropriate specific gravity. Then, if capacity is desired in normal cubic meters per hour at 0°C and 1,01325 bar, multiply SCFH by 0.0168. To determine wide-open flow capacities for relief sizing, use the following formula:

where,

$$Q = \sqrt{\frac{520}{GT}} C_g P_1 \text{SIN} \left(\frac{3417}{C_1} \sqrt{\frac{\Delta P}{P_1}} \right) \text{deg}$$

- C_g = gas sizing coefficient from Table 4
- C_1 = C_g / C_v or 35 from Table 4
- G = gas specific gravity (air = 1.0)
- $P_{1\text{abs}}$ = inlet pressure, psia (add 14.7 psi to gauge inlet pressure to obtain absolute inlet pressure)
- Q = flow rate, SCFH
- T = absolute temperature of gas at inlet in °Rankine
- ΔP = differential pressure, psid

Table 6. Y600A Series Capacities for 3/4 NPT Body Size

OUTLET PRESSURE RANGE, CONTROL SPRING PART NUMBER, AND COLOR	OFFSET FROM SETPOINT	OUTLET PRESSURE SETTING	INLET PRESSURE, PSIG (bar)	3/4 NPT BODY SIZE						
				Capacities in SCFH (Nm³/h) of 0.6 Specific Gravity Natural Gas						
				Orifice Size, Inches (mm)						
				1/8 (3,2)	3/16 (4,8)	1/4 (6,3)	3/8 (9,5)	1/2 (13)	9/16 (14)	
4 to 8-Inches w.c. (10 to 20 mbar) 1B653827052 Red	1-Inch w.c. (2 mbar)	7-Inches w.c. (17 mbar)	1 (0,07)	90 (2,4)	170 (4,6)	230 (6,2)	250 (6,7)	410 (11,0)	440 (11,8)	
			5 (0,34)	220 (5,9)	280 (7,5)	450 (12,1)	490 (13,1)	520 (13,9)	970 (25,9)	
			8 (0,55)	230 (6,2)	480 (12,9)	530 (14,2)	540 (14,5)	590 (15,8)		
			20 (1,4)	520 (13,9)	600 (16,1)	620 (16,6)	650 (17,4)			
			35 (2,4)	660 (17,7)	670 (18,0)	840 (22,5)	900 (24,1)			
			75 (5,2)	770 (20,6)	840 (22,5)	960 (25,7)				
			150 (10,3)	1680 (45,0)	2310 (61,9)					
7 to 16-Inches w.c. (17 to 40 mbar) 1B653927022 Unpainted	1-Inch w.c. (2 mbar)	11-Inches w.c. (27 mbar)	1 (0,07)	90 (2,4)	130 (3,5)	160 (4,3)	190 (5,1)	230 (6,2)	250 (6,7)	
			5 (0,34)	160 (4,3)	250 (6,7)	280 (7,5)	350 (9,4)	530 (14,2)	750 (20,1)	
			8 (0,55)	170 (4,6)	350 (9,4)	430 (11,5)	450 (12,1)	540 (14,5)		
			20 (1,4)	350 (9,4)	490 (13,1)	590 (15,8)	610 (16,3)			
			35 (2,4)	520 (13,9)	530 (14,2)	620 (16,6)	650 (17,4)			
			75 (5,2)	650 (17,4)	660 (17,7)	940 (25,2)				
			150 (10,3)	1680 (45,0)	2060 (55,2)					
15-Inches w.c. to 1.2 psig (37 mbar to 83 mbar) 1B537027052 Yellow	5.5-Inches w.c. (14 mbar)	15-Inches w.c. (37 mbar)	2 (0,14)	90 (2,4)	340 (9,1)	500 (13,4)	900 (24,1)	1100 (29,5)	1150 (30,8)	
			6 (0,41)	250 (6,7)	540 (14,5)	930 (24,9)	1640 (43,9)	2100 (56,3)		
			10 (0,69)	340 (9,1)	800 (21,4)	1380 (37,0)	1940 (51,9)			
			30 (2,1)	680 (18,2)	1450 (38,8)	2390 (64,0)	2450 (65,7)			
			60 (4,1)	1160 (31,1)	2460 (66,0)	3480 (93,3)				
			150 (10,3)	2570 (68,8)	2710 (72,6)					
		1.2 psig (83 mbar)		2 (0,14)	90 (2,4)	260 (7,0)	410 (11,0)	600 (16,1)	810 (21,7)	700 (18,7)
	6 (0,41)			250 (6,7)	460 (12,3)	700 (18,7)	1290 (34,6)	1420 (38,0)		
	10 (0,69)			310 (8,3)	660 (17,7)	1020 (27,3)	1420 (38,0)			
	30 (2,1)			670 (18,0)	1109 (29,7)	2060 (55,2)	2430 (65,1)			
	60 (4,1)			1140 (30,6)	2180 (58,4)	3350 (89,8)				
	150 (10,3)			2480 (66,5)	2650 (71,0)					

Shaded areas indicate where maximum operating inlet pressure for a given orifice size is exceeded.

- continued -

Bulletin 71.1:Y600A

Table 6. Y600A Series Capacities for 3/4 NPT Body Size (continued)

OUTLET PRESSURE RANGE, CONTROL SPRING PART NUMBER, AND COLOR	OFFSET FROM SETPOINT	OUTLET PRESSURE SETTING	INLET PRESSURE, PSIG (bar)	3/4 NPT BODY SIZE					
				Capacities in SCFH (Nm ³ /h) of 0.6 Specific Gravity Natural Gas					
				Orifice Size, Inches (mm)					
				1/8 (3,2)	3/16 (4,8)	1/4 (6,3)	3/8 (9,5)	1/2 (13)	9/16 (14)
1.2 to 2.5 psig (83 to 172 mbar) 1B537127022 Green	0.2 psig (14 mbar)	1.2 psig (83 mbar)	2 (0,14)	120 (3,2)	170 (4,6)	220 (5,9)	350 (9,4)	490 (13,1)	520 (13,9)
			6 (0,41)	180 (4,8)	340 (9,1)	450 (12,1)	740 (19,8)	850 (22,8)	1070 (28,7)
			10 (0,69)	190 (5,1)	440 (11,8)	590 (15,8)	1010 (27,0)	1170 (31,3)	
			30 (2,1)	560 (15,0)	900 (24,1)	1550 (41,5)	1720 (46,1)		
			60 (4,1)	860 (23,1)	1110 (29,7)	2480 (66,5)	2340 (62,7)		
		150 (10,3)	1990 (53,3)	3480 (93,3)	3500 (93,8)				
		2.5 psig (172 mbar)	6 (0,41)	140 (3,8)	190 (5,1)	260 (7,0)	450 (12,1)	590 (15,8)	680 (18,2)
			10 (0,69)	170 (4,6)	340 (9,1)	490 (13,1)	570 (15,3)	860 (23,1)	
			30 (2,1)	430 (11,5)	660 (17,7)	980 (26,3)	1030 (27,6)		
			60 (4,1)	750 (20,1)	850 (22,8)	1940 (51,9)	2250 (60,3)		
150 (10,3)	1480 (39,7)		2320 (62,2)	3350 (89,8)					
2.5 to 4.5 psig (172 to 310 mbar) 1B537227022 Light blue	0.3 psig (21 mbar)	2.5 psig (172 mbar)	4 (0,28)	130 (3,5)	180 (4,8)	190 (5,1)	310 (8,3)	370 (9,9)	480 (12,9)
			8 (0,55)	140 (3,8)	280 (7,5)	360 (9,6)	520 (13,9)	710 (19,0)	800 (21,4)
			12 (0,82)	190 (5,1)	360 (9,6)	490 (13,1)	680 (18,2)	930 (24,9)	
			30 (2,1)	430 (11,5)	620 (16,6)	900 (24,1)	1110 (29,7)		
			60 (4,1)	660 (17,7)	1010 (27,0)	1730 (46,4)	1830 (49,0)		
		150 (10,3)	1570 (42,1)	2060 (55,2)	4620 (124)				
		4.5 psig (310 mbar)	8 (0,55)	120 (3,2)	190 (5,1)	250 (6,7)	400 (10,7)	520 (13,9)	540 (14,5)
			12 (0,82)	160 (4,3)	210 (5,6)	320 (8,6)	530 (14,2)	720 (19,3)	
			30 (2,1)	300 (8,0)	460 (12,3)	760 (20,4)	830 (22,2)		
			60 (4,1)	590 (15,8)	810 (21,7)	1230 (32,9)	1340 (36,0)		
150 (10,3)	1230 (32,9)		1640 (43,9)	3610 (96,8)					
4.5 to 7 psig (310 to 483 mbar) 1B537327052 Black	0.7 psig (48 mbar)	4.5 psig (310 mbar)	9 (0,62)	190 (5,1)	310 (8,3)	430 (11,5)	620 (16,6)	930 (24,9)	990 (26,5)
			12 (0,83)	210 (5,6)	400 (10,7)	560 (15,0)	810 (21,7)	1150 (30,8)	
			30 (2,1)	520 (13,9)	860 (23,1)	1100 (29,5)	1810 (48,5)		
			60 (4,1)	860 (23,1)	1520 (40,7)	2050 (55,0)	2710 (72,6)		
			150 (10,3)	1960 (52,5)	3480 (93,3)	5040 (135)			
		7 psig (483 mbar)	9 (0,62)	160 (4,3)	210 (5,6)	270 (7,2)	520 (13,9)	620 (16,6)	660 (17,7)
			12 (0,83)	190 (5,1)	310 (8,3)	370 (9,9)	650 (17,4)	860 (23,1)	
			30 (2,1)	370 (9,9)	700 (18,7)	900 (24,1)	1330 (35,6)		
			60 (4,1)	800 (21,4)	1290 (34,6)	1720 (46,1)	2450 (65,7)		
			150 (10,3)	1910 (51,2)	3350 (89,8)	4050 (109)			

Shaded areas indicate where maximum operating inlet pressure for a given orifice size is exceeded.

Bulletin 71.1:Y600A

Table 7. Y600A Series Capacities for 1 NPT Body Size

OUTLET PRESSURE RANGE, CONTROL SPRING PART NUMBER, AND COLOR	OFFSET FROM SETPOINT	OUTLET PRESSURE SETTING	INLET PRESSURE, PSIG (bar)	1 NPT BODY SIZE							
				Capacities in SCFH (Nm ³ /h) of 0.6 Specific Gravity Natural Gas							
				Orifice Size, inches (mm)							
				1/8 (3,2)	3/16 (4,8)	1/4 (6,3)	3/8 (9,5)	1/2 (13)	9/16 (14)		
4 to 8-inches w.c. (10 to 20 mbar) 1B653827052 Red	1-inch w.c. (2 mbar)	7-inches w.c. (17 mbar)	1 (0,07)	90 (2,4)	220 (5,9)	250 (6,7)	300 (8,0)	410 (11,0)	530 (14,2)		
			5 (0,34)	220 (5,9)	430 (11,5)	450 (12,1)	1140 (30,6)	1900 (50,9)	1920 (51,5)		
			8 (0,55)	230 (6,2)	490 (13,1)	530 (14,2)	2140 (57,4)	2360 (63,3)			
			20 (1,4)	520 (13,9)	970 (25,9)	1810 (48,5)	1170 (31,4) ¹⁾				
			35 (2,4)	710 (19,0)	1480 (39,7)	2300 (61,6) ¹⁾	930 (24,9) ¹⁾				
			75 (5,2)	1030 (27,6)	1100 (29,5) ¹⁾	1390 (37,3) ¹⁾					
7 to 16-inches w.c. (17 to 40 mbar) 1B653927022 Unpainted	1-inch w.c. (2 mbar)	11-inches w.c. (27 mbar)	1 (0,07)	90 (2,4)	160 (4,3)	170 (4,6)	210 (5,6)	230 (6,2)	250 (6,7)		
			5 (0,34)	160 (4,3)	300 (8,0)	310 (8,3)	520 (13,9)	620 (16,6)	1160 (31,1)		
			8 (0,55)	170 (4,6)	360 (9,6)	430 (11,5)	1160 (31,1)	1460 (39,1)			
			20 (1,4)	350 (9,4)	580 (15,5)	780 (20,9)	1630 (43,7)				
			35 (2,4)	560 (15,0)	1030 (27,6)	2840 (76,1)	1190 (31,8) ¹⁾				
			75 (5,2)	1230 (32,9)	1290 (34,6)	1510 (40,5) ¹⁾					
15-inches w.c. to 1.2 psig (37 mbar to 83 mbar) 1B6537027052 Yellow	5.5-inches w.c. (14 mbar)	15-inches w.c. (37 mbar)	2 (0,14)	90 (2,4)	460 (12,3)	500 (13,4)	1100 (29,5)	1160 (31,1)	1300 (34,8)		
			6 (0,41)	250 (6,7)	750 (20,1)	930 (24,9)	2500 (67,0)	2800 (75,0)			
			10 (0,69)	340 (9,1)	920 (24,7)	1590 (42,6)	3250 (87,1)				
			30 (2,1)	680 (18,2)	1560 (41,8)	2830 (75,8)	5460 (146)				
			60 (4,1)	1160 (31,1)	2550 (68,3)	4620 (124)					
			150 (10,3)	2570 (68,9)	2770 (74,2)						
		1.2 psig (83 mbar)	2 (0,14)	90 (2,4)	400 (10,7)	460 (12,3)	820 (22,0)	840 (22,5)	900 (24,1)		
			6 (0,41)	250 (6,7)	630 (16,9)	700 (18,7)	1550 (41,5)	1610 (43,1)			
			10 (0,69)	320 (8,6)	860 (23,1)	1020 (27,3)	2320 (62,2)				
			30 (2,1)	670 (18,0)	1540 (41,3)	2550 (68,3)	4390 (118)				
			60 (4,1)	1140 (30,6)	2550 (68,3)	4190 (112)					
			150 (10,3)	2570 (68,9)	3100 (83,1)						
			1. Indicates capacity limited due to boost. - Shaded areas indicate where maximum operating inlet pressure for a given orifice size is exceeded.								

- continued -

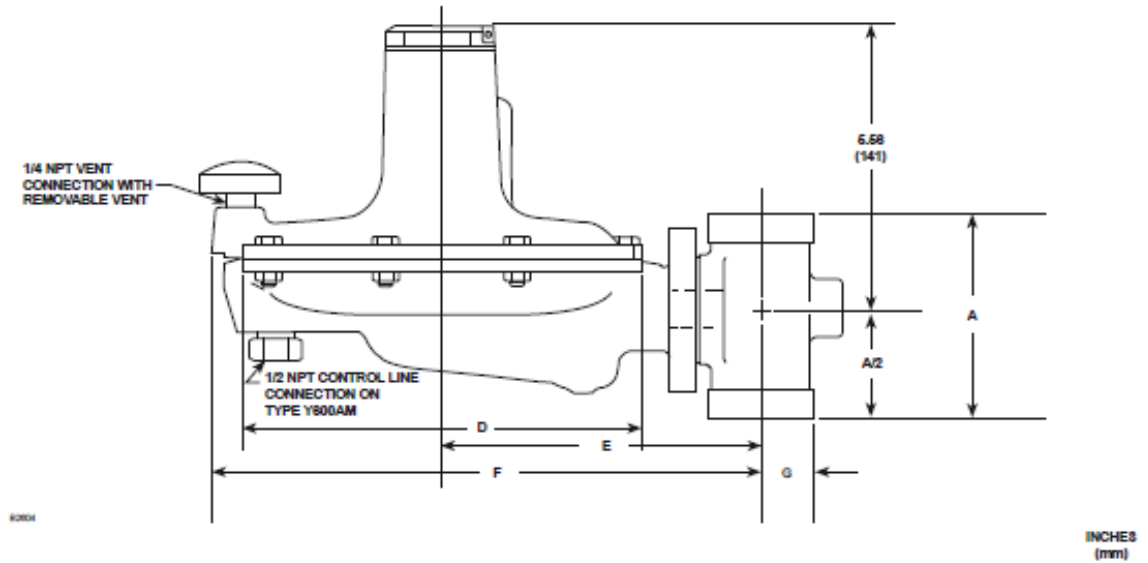
Bulletin 71.1:Y600A

Table 7. Y600A Series Capacities for 1 NPT Body Size (continued)

OUTLET PRESSURE RANGE, CONTROL SPRING PART NUMBER, AND COLOR	OFFSET FROM SETPOINT	OUTLET PRESSURE SETTING	INLET PRESSURE, PSIG (bar)	1 NPT BODY SIZE					
				Capacities in SCFH (Nm ³ /h) of 0.6 Specific Gravity Natural Gas					
				Orifice Size, Inches (mm)					
				1/8 (3,2)	3/16 (4,8)	1/4 (6,3)	3/8 (9,5)	1/2 (13)	9/16 (14)
1.2 to 2.5 psig (83 to 172 mbar) 1B537127022 Green	0.2 psig (14 mbar)	1.2 psig (83 mbar)	2 (0,14)	120 (3,2)	210 (5,6)	230 (6,2)	360 (9,5)	620 (16,6)	660 (17,7)
			6 (0,41)	180 (4,8)	340 (9,1)	450 (12,1)	750 (20,1)	880 (23,6)	1080 (29,0)
			10 (0,69)	190 (5,1)	560 (15,0)	650 (17,4)	1150 (30,8)	1750 (47,0)	
			30 (2,1)	630 (16,9)	1230 (32,9)	1600 (42,9)	1910 (51,2)		
			60 (4,1)	1010 (27,0)	2450 (65,7)	3600 (96,5)	2420 (64,9)		
		150 (10,3)	2440 (65,4)	3480 (93,3)	3870 (104)				
		2.5 psig (172 mbar)	6 (0,41)	140 (3,8)	260 (7,0)	270 (7,2)	500 (13,4)	670 (18,0)	680 (18,2)
			10 (0,69)	180 (4,8)	450 (12,1)	490 (13,1)	710 (19,0)	860 (23,1)	
			30 (2,1)	570 (15,3)	720 (19,3)	1030 (27,6)	1640 (43,9)		
			60 (4,1)	850 (22,8)	1830 (49,1)	2520 (67,5)	3130 (83,9)		
150 (10,3)	2190 (58,7)		3350 (89,8)	3480 (93,3)					
2.5 to 4.5 psig (172 to 310 mbar) 1B537227022 Light blue	0.3 psig (21 mbar)	2.5 psig (172 mbar)	4 (0,28)	140 (3,8)	180 (4,8)	190 (5,1)	410 (11,0)	430 (11,5)	480 (12,9)
			8 (0,55)	180 (4,8)	320 (8,6)	360 (9,6)	710 (19,0)	740 (19,8)	900 (24,1)
			12 (0,82)	190 (5,1)	400 (10,7)	490 (13,1)	930 (24,9)	960 (25,7)	
			30 (2,1)	430 (11,5)	620 (16,6)	900 (24,1)	1830 (49,0)		
			60 (4,1)	660 (17,7)	1610 (43,1)	1740 (46,6)	2970 (79,6)		
		150 (10,3)	2010 (53,9)	4090 (110)	6660 (178)				
		4.5 psig (310 mbar)	8 (0,55)	120 (3,2)	190 (5,1)	250 (6,7)	490 (13,1)	520 (13,9)	540 (14,5)
			12 (0,82)	160 (4,3)	210 (5,6)	320 (8,6)	610 (16,3)	850 (22,8)	
			30 (2,1)	390 (10,4)	520 (13,9)	760 (20,4)	1360 (36,4)		
			60 (4,1)	630 (16,9)	840 (22,5)	1230 (32,9)	2580 (69,1)		
150 (10,3)	1390 (37,3)		2880 (77,2)	4990 (134)					
4.5 to 7 psig (310 to 483 mbar) 1B537327052 Black	0.7 psig (48 mbar)	4.5 psig (310 mbar)	9 (0,62)	210 (5,6)	310 (8,3)	430 (11,5)	770 (20,6)	970 (25,9)	1050 (28,1)
			12 (0,83)	230 (6,2)	400 (10,7)	560 (15,0)	1010 (27,0)	1290 (34,6)	
			30 (2,1)	520 (13,9)	860 (23,1)	1100 (29,5)	2080 (55,7)		
			60 (4,1)	880 (23,6)	1520 (40,7)	2050 (55,0)	3650 (97,8)		
			150 (10,3)	2060 (55,2)	3510 (94,1)	6000 (161)			
		7 psig (483 mbar)	9 (0,62)	160 (4,3)	210 (5,6)	270 (7,2)	590 (15,8)	620 (16,6)	660 (17,7)
			12 (0,83)	210 (5,6)	310 (8,3)	370 (9,9)	770 (20,6)	890 (23,9)	
			30 (2,1)	370 (9,9)	700 (18,7)	900 (24,1)	1650 (44,2)		
			60 (4,1)	800 (21,4)	1290 (34,6)	1720 (46,1)	2760 (74,0)		
			150 (10,3)	2010 (53,9)	3390 (90,9)	4140 (111)			

Shaded areas indicate where maximum operating inlet pressure for a given orifice size is exceeded.

Bulletin 71.1:Y600A



BODY SIZE	DIMENSION, INCHES (mm)					APPROXIMATE SHIPPING WEIGHT, POUNDS (kg)
	A	D (Diameter)	E	F	G	
3/4 and 1	4 (102)	8.38 (213)	6.25 (159)	10.69 (272)	1.00 (25)	13 (6)

Figure 3. Dimensions

Ordering Information

When ordering, specify:

Application

1. Type of regulator
2. Body, spring case, diaphragm case, and trim materials
3. Control spring range in psig (bar)

Construction

Refer to the Specifications section on page 2 and to each referenced table. Specify the desired selection whenever there is a choice to be made. Always be sure to specify the regulator type number.

Ordering Guide

Type (Select One)

- Y600A (internal pressure registration)***
- Y600AM (external pressure registration)**
- Y600AR (internal relief/internal pressure registration)**

Body Size (Select One)

- 3/4 NPT***
- 1 NPT***

Orifice Size (Select One)

- 1/8-inch (3,2 mm)***
- 3/16-inch (4,8 mm)***
- 1/4-inch (6,4 mm)***
- 3/8-inch (9,5 mm)***
- 1/2-inch (13 mm)***
- 9/16-inch (14 mm)***

Outlet Pressure Ranges (Select One)

- 4 to 8-inches w.c. (10 to 20 mbar), Red***
- 7 to 16-inches w.c. (17 to 40 mbar), Unpainted***
- 15-inches w.c. to 1.2 psig (37 to 83 mbar), Yellow***
- 1.2 to 2.5 psig (0,08 to 0,17 bar), Green***
- 2.5 to 4.5 psig (0,17 to 0,31 bar), Light Blue***
- 4.5 to 7 psig (0,31 to 0,48 bar), Black***

Regulators Quick Order Guide	
***	Standard - Readily Available for Shipment
**	Non-Standard - Allow Additional Time for Shipment
.	Special Order, Constructed from Non-Stocked Parts. Consult your local Sales Office for Availability.
Availability of the product being ordered is determined by the component with the longest shipping time for the requested construction.	

Specification Worksheet	
Application:	
Specific Use	_____
Line Size	_____
Gas Type and Specific Gravity	_____
Gas Temperature	_____
Does the Application Require Overpressure Protection?	
<input type="checkbox"/> Yes <input type="checkbox"/> No If yes, which is preferred:	
<input type="checkbox"/> Relief Valve <input type="checkbox"/> Monitor Regulator <input type="checkbox"/> Shutoff Device	
Is overpressure protection equipment selection assistance desired? _____	
Pressure:	
Maximum Inlet Pressure (P_{1max})	_____
Minimum Inlet Pressure (P_{1min})	_____
Downstream Pressure Setting(s) (P_2)	_____
Maximum Flow (Q_{max})	_____
Performance Required:	
Accuracy Requirements?	_____
Need for Extremely Fast Response?	_____
Other Requirements: _____	

Bulletin 71.1:Y600A

Industrial Regulators

Emerson Process Management Regulator Technologies, Inc.

USA - Headquarters
McKinney, Texas 75069-1872 USA
Tel: 1-800-558-5853
Outside U.S. 1-972-548-3574

Asia-Pacific
Shanghai, China 201206
Tel: +86 21 2892 9000

Europe
Bologna, Italy 40013
Tel: +39 051 4190611

Middle East and Africa
Dubai, United Arab Emirates
Tel: +971 4811 8100

For further information visit www.fisherregulators.com

Natural Gas Technologies

Emerson Process Management Regulator Technologies, Inc.

USA - Headquarters
McKinney, Texas 75069-1872 USA
Tel: 1-800-558-5853
Outside U.S. 1-972-548-3574

Asia-Pacific
Singapore, Singapore 128461
Tel: +65 6777 8211

Europe
Bologna, Italy 40013
Tel: +39 051 4190611
Gallardon, France 28320
Tel: +33 (0)2 37 33 47 00

TESCOM

Emerson Process Management Tescom Corporation

USA - Headquarters
Elk River, Minnesota 55330-2445 USA
Tel: 1-763-241-3238

Europe
Selmsdorf, Germany 23923
Tel: +49 (0) 38823 31 0

The Emerson logo is a trademark and service mark of Emerson Electric Co. All other marks are the property of their prospective owners. Fisher is a mark owned by Fisher Controls, Inc., a business of Emerson Process Management.

The contents of this publication are presented for informational purposes only, and while every effort has been made to ensure their accuracy, they are not to be construed as warranties or guarantees, express or implied, regarding the products or services described herein or their use or applicability. We reserve the right to modify or improve the designs or specifications of such products at any time without notice.

Emerson Process Management does not assume responsibility for the selection, use or maintenance of any product. Responsibility for proper selection, use and maintenance of any Emerson Process Management product remains solely with the purchaser.

ANEXO B Pantallazos FECOC CO2 y SO2

COMBUSTIBLES LIQUIDOS

Tipo de combustible ←

←

Poder Calorífico

LHV input	42,37 MJ/kg
HHV input	45,30 MJ/kg

Volumen de gas quemado

Gas Quemado	10,43 m ³ /kg
Vreal	10,43 m ³ /kg
Consumo de aire	11,17 m ³ /kg
Lambda	1,25 ▼

Características del combustible

(Composición porcentual en peso)

Tipo de combustible	ACPM	
C	86,6000%	N
H	13,0000%	Cl
S	0,4000%	F
O		Cenizas
H ₂ O		

Factores de emisión de CO₂ del IPCC

Tipo de Combustible	Factores de Emisión kg/TJ
Oil Crude	73333
Fuel Oil	77367
Diesel	74067
Gasoline	69300
Kerosene	71867

Factores de Emisión

Factores de Emisión de CO ₂	74869 kg/TJ
	304038 mg/m ³
Factores de Emisión de SO ₂	188,8 kg/TJ
	766,7 mg/m ³

[Ver Grafico](#)

[Ir a Inicio](#)

[Editar Combustible](#)

COMBUSTIBLES GASEOSOS

Tipo de combustible

Gas Natural Guajira

Poder Calorífico

LHV input	35,51 MJ/Nm ³
HHV input	39,40 MJ/Nm ³

Volumen de gas quemado

Gas Quemado	8,48 m ³ /m ³
Vreal	8,48 m ³ /m ³
Consumo de aire	9,46 m ³ /m ³
Lambda	1,1 <input type="button" value="v"/>

Características del combustible

(Composición porcentual en volumen)

Tipo de combustible:		Gas Natural Guajira			
Componente	% vol.	n	PM CO ₂ * / PM comp.	g CO ₂ * / m ³ gas quemado	kg CO ₂ * / TJ
CH ₄	97,7600%	1	2,74	227,65	54372,77
C ₂ H ₆	0,3800%	2	1,46	1,77	422,85
C ₂ H ₄		2	1,57		
C ₂ H ₂		2	1,69		
C ₃ H ₈	0,2000%	3	1,00	1,42	338,93
C ₃ H ₆		3	1,05		
C ₄ H ₁₀ n		4	0,76		
C ₄ H ₁₀ i		4	0,76		
C ₄ H ₈		4	0,78		
C ₅ H ₁₂ n		5	0,63		
C ₅ H ₁₂ i		6	0,49		
C ₆ H ₁₄		7	0,44		
C ₇ H ₁₆		8	0,39		
CO		1	1,57		
CO ₂	0,3700%	1	1,00	0,86	205,98
N ₂	1,2900%				
H ₂ S		1	1,88		
H ₂					

*SO₂ para compuestos con azufre

Factores de emisión de CO₂ del IPCC

Tipo de Combustible	Factores de Emisión kg/TJ
LPG	63067
Natural Gas (household)	56100
Natural Gas (power)	56100
Natural Gas (transport)	56100

Factores de emisión

Factores de Emisión de CO ₂	55341 kg /TJ 231,71 g/m ³
Factores de Emisión de SO ₂	kg /TJ g/m ³

[Ver Grafico Comparativo](#)

[Ir a Inicio](#)

[Editar Combustible](#)

COMBUSTIBLES GASEOSOS

Tipo de combustible

Gas Natural Cusiana

Poder Calorífico

LHV input	41,66 MJ/Nm ³
HHV input	45,93 MJ/Nm ³

Volumen de gas quemado

Gas Quemado	9,89 m ³ /m ³
Vreal	9,89 m ³ /m ³
Consumo de aire	10,92 m ³ /m ³
Lambda	1,1 <input type="button" value="v"/>

Características del combustible

(Composición porcentual en volumen)

Tipo de combustible:		Gas Natural Cusiana			
Componente	% vol.	n	PM CO ₂ * / PM comp.	g CO ₂ * / m ³ gas quemado	kg CO ₂ * / TJ
CH ₄	76,5000%	1	2,74	152,71	36271,12
C ₂ H ₆	10,8600%	2	1,46	43,37	10301,77
C ₂ H ₄		2	1,57		
C ₂ H ₂		2	1,69		
C ₃ H ₈	5,3600%	3	1,00	32,60	7743,27
C ₃ H ₆		3	1,05		
C ₄ H ₁₀ n	0,7800%	4	0,76	6,47	1536,81
C ₄ H ₁₀ i	0,6800%	4	0,76	5,64	1339,78
C ₄ H ₈		4	0,78		
C ₅ H ₁₂ n	0,0800%	5	0,63	0,82	194,01
C ₅ H ₁₂ i	0,1300%	6	0,49	1,24	294,14
C ₆ H ₁₄	0,0500%	7	0,44	0,60	141,70
C ₇ H ₁₆		8	0,39		
CO		1	1,57		
CO ₂	5,0700%	1	1,00	10,13	2406,12
N ₂	0,4400%				
H ₂ S		1	1,88		
H ₂					

*SO₂ para compuestos con azufre

Factores de emisión de CO₂ del IPCC

Tipo de Combustible	Factores de Emisión kg/TJ
LPG	63067
Natural Gas (household)	56100
Natural Gas (power)	56100
Natural Gas (transport)	56100

Factores de emisión

Factores de Emisión de CO ₂	60229 kg /TJ 253,58 g/m ³
Factores de Emisión de SO ₂	kg /TJ g/m ³

[Ver Grafico Comparativo](#)

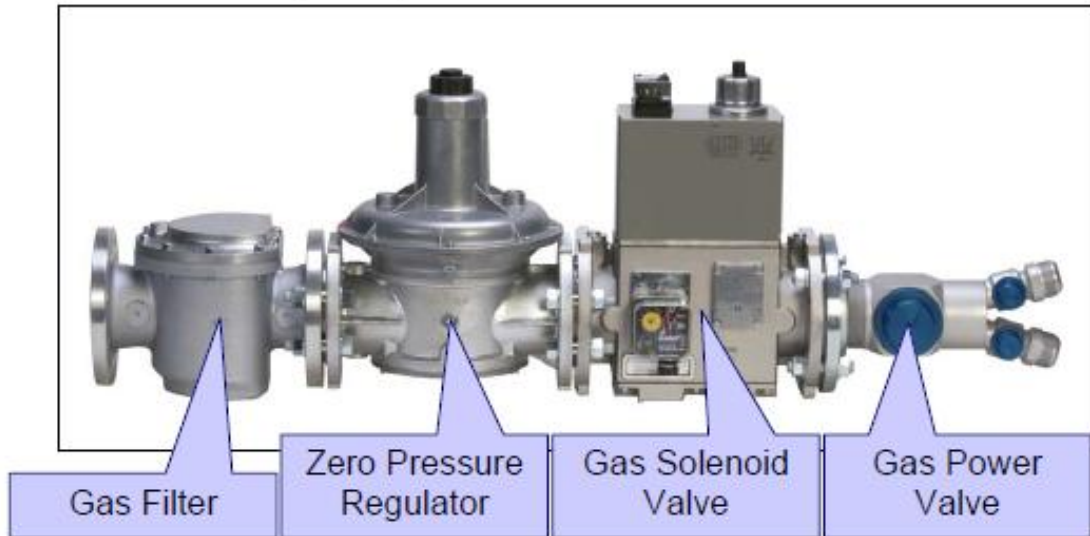
[Ir a Inicio](#)

[Editar Combustible](#)

ANEXO C Test GTI Bi-Fuel

Pay Brinck Motor's Dual - Fuel Test

Picture: GTI's Gas Injection System



Haugesund, Norway
November 2003

Project Leader and Written By:
Jim Doyle, Pay & Brinck Motor

Technical Written Analysis and Conclusion :
Jannik Stanger, Pay & Brinck Motor
Roland Braams, Geveke Motoren

Table of Contents

1.0	Executive Summary.....	1
2.0	Introduction	2
3.0	Test Objective	4
4.0	Test Results.....	5
4.1	TEST OBSERVATION	5
4.2	TEST CONCLUSION.....	10
5.0	Emission Test Protocol.....	12
5.1	DEN NORSKE VERITAS EMISSION TEST	12
5.2	TEST CYCLE	13
5.3	TEST PARAMETERS.....	14
5.4	MARPOL NOX CURVE	17
6.0	Test Site and Diesel Engine Details	18
7.0	GTI Component Description	19
	Appendix 1: Letter of Intent	22
	Appendix 2: Actual Engine Parameter Data Captured	24
	Appendix 3: Transient response	36
	Appendix 4: NOx Figures Taken by Caterpillar EAME	41
	Appendix 5: Photographs of DNV Emissions Equipment.....	43
	Appendix 6: DNV Emissions Report	44
	Appendix 7: Engine Vibration Graphs	45

1.0 Executive Summary

Pay & Brinck Motor re-initiated a dual-fuel test, as their marine customers are demanding a Caterpillar dual-fuel option. The primary objective is to determine emission levels particularly NOx using GTI's gas injection system as well as ascertain other determinants of the diesel engine when subjected to LNG as a fuel alternative.

The GTI Bi-Fuel™ System allows compression ignition engines to operate on a mixture of diesel fuel and natural gas while retaining the capability to operate on 100% diesel fuel if needed. Fuel modes can be switched during full or part load conditions, without interruption in engine speed, power, or stability. As gas is introduced to the engine, the engine governing system detects more fuel than needed for the current load condition as engine rpm increases. The engine will then maintain the pre-set speed by quickly adjusting the 'rack' position.

The test cycle ranged from (0% to 80%) gas to (100% to 20%) diesel using D2 IMO Marpol 73/77 reg. 13, load testing protocol (10%, 25 %, 50%, 75%, 100% loads). Though the emissions are not certified, Den Norske Veritas, Norway's shipping classification society, did the emissions' tests.

Under the standard Caterpillar fuel-timing map, the NOx emissions were reduced according to test cycle D2 by 8% to 17,5% using the various gas/diesel mixtures. When the fuel-timing map was manually changed, the NOx emissions were lowered up to 56 %, which means, at first glance, that this system may assist obtain significant NOx savings and may enter the competitive arena.

The next step is another test on manually adjusting the fuel-timing map. Furthermore, the adaptation to Safety regulations would follow along with determining what is required to become certified by a ship's classification society.

2.0 Introduction

The purpose of this report is to determine the emission readings and capabilities of Gas Technology Inc's (GTI) gas injection system. Pressured by their customers, Pay & Brinck Motor re-initiated this testing in cooperation with Geveke Motoren, Caterpillar EAME and GTI, see Appendix 1: Letter of Intent. The gas train and other GTI equipment were retrofitted to the test engine, a 3508B generator set engine, and operated up to and including 80% natural gas and 20% diesel using the D2 load test cycle. GTI states that their system would lower exhaust emissions up to 50% while extending diesel fuel tank run-time, reduce fuel expenses and prolong engine life and maintenance. So, the Haugesund Maritime & Technical School in Haugesund, Norway volunteered to use their facilities to run the test.

The GTI Bi-Fuel System is a retrofit technology that allows compression ignition engines to operate on a mixture of diesel fuel and natural gas while retaining the capability to operate on 100% diesel fuel if needed. Fuel modes can be switched during full or part load conditions, without interruption in engine speed, power, or stability. The Bi-Fuel System utilizes a gas delivery method whereby gas is delivered to the engine at the turbo-compressor inlet, is distributed via the engine air-intake manifold, and then ignited by a diesel "pilot" which acts as a spark source for the air-gas mixture. As gas is introduced to the engine, the engine governing system detects a momentary increase in engine rpm, as the engine temporarily has more fuel than needed for the current load condition. In order to maintain the pre-set speed, the governor quickly adjusts the position of the diesel fuel "rack", thereby maintaining engine rpm and allowing the substitution of natural gas.

Den Norske Veritas' (DNV) role was to conduct a simulated emission compliance test program following the Northest method for simplified NOx emission measurements. The measurements will include NOx, CO, CO2, O2 and ambient air conditions and the engine loads are as specified in test cycle D2 in IMO Marpol 73/78 Annex VI, reg. 13 NOx technical code.

The Stakeholders for this testing program include PON Customers, PBM, GMOT, GTI, DNV, CAT, PON Holding, and the competition.

The report's section include the test objective, the test results, emission protocol and the

actual test data.

Technical questions or comments concerning this report may be directed to:

- Jannik Stanger, Pay & Brinck Motor
- Roland Braams, Geveke Motoren

3.0 Test Objective

The purpose of the test is to determine the emission readings and capabilities of Gas Technology Inc's (GTI) gas injection system.

In order of priority, the objective of this test was to determine the following:

1. GTI's stated a possible NOx reduction of 50%. As a basis for comparison, below is the NOx level of the Cat 3508B, S/N:3DM00168, using TMI data to calculate according to test cycle D2. The goal of the test is to reach 50 % of the 7,47 g/kWh, or 3,75 g/kWh.

test cycle type D2 for "Constant speed aux. engine"					
Engine:	3508B	DITA JW			
RPM	1500				
BkW	856	kW			
A/C Temp	30	°C			
Strategy	IMO				
Load (kW)	Load (%)	Speed (%)	Weight factor	NOx (gr/hr)	
842	100	100	0.05	7233	
628	75	100	0.25	4600	
419	50	100	0.3	2832	
213	25	100	0.3	1628	
88	10	100	0.1	1174	
Weighted NOx				7.47 g/kWh	
Requirements IMO				10.42 g/kWh	

Figure 1: TMI Data for Weighted NOx Emissions

2. Any variance to engine's performance, stability, durability and response to load variations at different gas/diesel mixtures.
3. Obtain an impression if GTI's equipment is suitable for PBM's and PPS's various markets and applications.

4.0 Test Results

4.1 Test Observation

4.1.1 Engine Operation and NOx emissions at Different Gas Content.

The engine was tested at 5 loads according to test cycle D2 with gas content from 10%-80 %. Below, there is a summary of engine performance and NOx reduction.

	LOAD STEPS					IMO D2/% reduction
	10 %	25 %	50 %	75 %	100 %	
Gas %	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW	
Automatic Fuel-Timing						
0 %	Diesel Running at normally and at expected Parameters					
NOx [g/kWh]	15,9	8	7,5	7,6	8,8	8
10 %	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	
NOx [g/kWh]	10,8	5,8	6,7	7,6	8,6	7,2/ 10 %
30 %	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	
NOx [g/kWh]	9,5	7,2	6,8	7,4	9	7,4/ 7,5 %
50 %	Stable	Stable	Stable	Stable	Stable	
NOx [g/kWh]	9,3	8,4	6,3	7,1	8,8	7,3/ 8,75 %
70 %	Unstable:	Stable	Stable	Stable	Stable	
NOx [g/kWh]	7,3	7,3	7,1	5,3	8,7	6,6 / 17,5 %
75 %	---	---	---	---	Stable	
NOx [g/kWh]					8,6	---
80% NOx [g/kWh]	Unstable	Unstable	Unstable	Stable	Valve and Pipe restriction	
NOx [g/kWh]				7,3		---
Manually Adjusting Fuel-Timing						
70 %	---	---	---	Stable	---	
NOx [g/kWh]				3,3		

Table 1: Summary of engine performance & NOx Reduction Findings

Lowest NOx reduction was achieved at 70 % gas compared to 100 % diesel, which gave 17,5 % reduction. The NOx emission at 70 % gas and 75 % load gave the lowest NOx level for all single loads without any timing adjustment. Reference is made to Chap 4.1.3 for manual adjustment of timing.

The engine was unstable at a various gas/diesel mixtures and loads, as indicated in the table. At 70 % gas and 10 % engine load, the sign of changed engine behaviour could be observed as rpm dropped to 1466 rpm. The engine started to run rough due to misfire, being a result of too much gas.

At 80% gas, combustion instability was observed at 10%, 25% and 50% loads. At 75% load the combustion was stable again and performed a full parameter data collection. At 100% load, pipe and valve restriction was experienced so no readings at this level were taken. The gas content was reduced to 75% and full parameter data was collected. See Appendix 2: Actual Engine Parameter Data Captured.

4.1.2 Transient Response.

The DNV marine classification society requires a maximum of 10 % RPM frequency variation for loads 0-50% and 100-0%. Transient response tests at the gas/diesel mixtures confirm that the engine behaviour is the same or better when compared to 100% diesel. The table below summarizes the total rpm variance at different gas and Appendix 3: Transient response houses the transient graphs.

Block load	Rpm variance			
	100 % diesel	70 % gas	50 % gas	30 % gas
0-50 %	1 %	1 %	2 %	3 %
100-0%	7 %	7 %	5 %	4.5 %

Table 2: Transient response at different diesel/gas mixtures

4.1.3 NOx reduction at manual Timing Change

During the last half day of testing, the timing was manually changed to determine NOx reduction but only at 75 % load. The values were taken by CAT and are posted in the appendix (Appendix 4: NOx Figures Taken by Caterpillar EAME) but they are not adjusted according to IMO NOx technical code.

At 75% load at 70% gas, the timing was automatically set to 7.3 deg BTDC. The measured NOx reading was 544 ppm, compared to 100% diesel (882 ppm). From this point, the timing was retarded manually by 3.3 deg BTDC ending at 4 deg BTDC to determine further

NOx reduction. This gave the NOx value of 3,3 g/kWh (364 ppm), which is 56,6% reduction compared to 100% diesel (7,6 g/kWh).

The summary results are illustrated in Figure 2: Summary NOx Values at Manual Timing Settings.

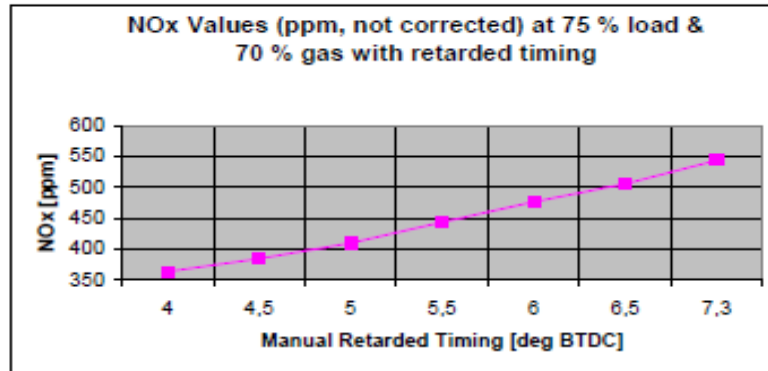


Figure 2: Summary NOx Values at Manual Timing Settings

4.1.4 Diesel versus Gas Consumption

The diesel consumption savings at different gas mixture is shown in the Figure 3: Fuel Consumption at Gas Compositions. Therefore, using an approximation of 1-litre diesel equals 1-m³ of gas, the graph also indicates the gas consumption. More exactly, the lower heat value for the LNG has been calculated to 35,69 MJ/Nm³ while the lower heat value for diesel is 42,8 MJ/kg. Density is 0,856.

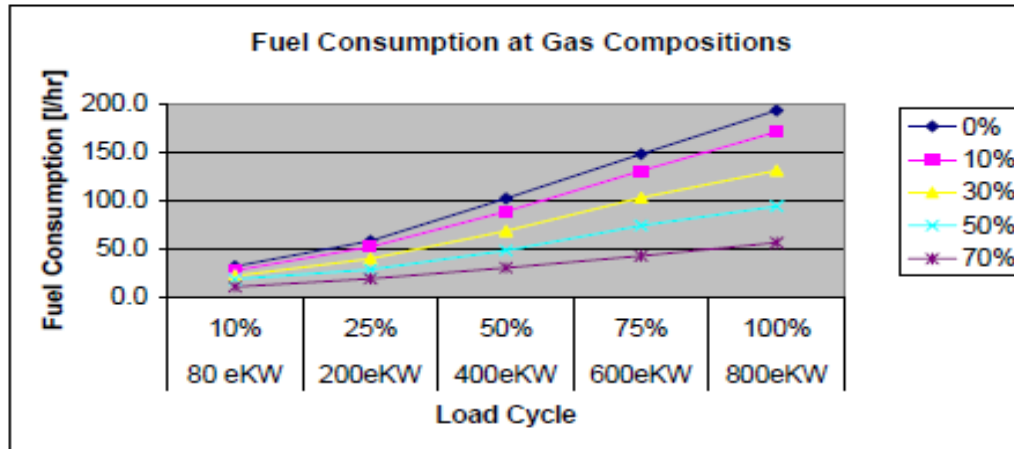


Figure 3: Fuel Consumption at Gas Compositions

4.1.5 Vibration Graphs

Engine vibrations were taken on port side, cylinder #2 and starboard side, and cylinder # 7 of the engine. From GTI's readings, the vibration of the engine was minimum and Appendix 7: Engine Vibration Graphs are shown.

4.1.6 Comments to Test Parameters

The water at LT and HT cooling circuit was cooled down by a 3000-liter "sea water" tank located at the facility. The ambient air cooled down this tank but this was not sufficient so the temperature in the tank rose throughout the day. Thus, higher LT cooling water temperature gave higher charge air temperature resulted in higher exhaust temperatures. The test using 10 % gas was performed late Thursday and gave high LT cooling water temp in general. Figure 4: AC Water Temp In below shows the development LT water temperature to aftercooler.

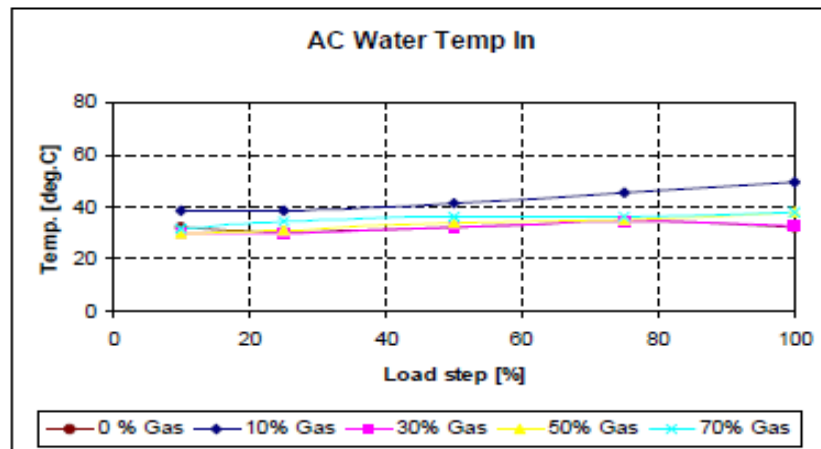


Figure 4: AC Water Temp In

In general, it appears that the heat balance of the engine is not being significantly disturbed when running on gas. As shown in the figure below, the exhaust temperature remains stable at all gas/diesel ratios, and the small variance can be explained partly by the increasing LT cooling water temperature.

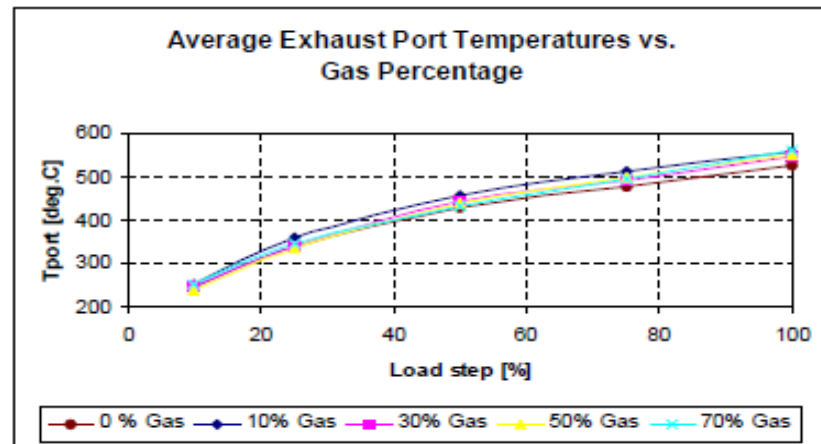


Figure 5: Average Exhaust Temperatures

The manifold pressure after the aftercooler was also stable at all diesel/gas ratios as shown in Figure 6: Manifold Pressure. This amplifies the theory that the heat balance using gas is stable.

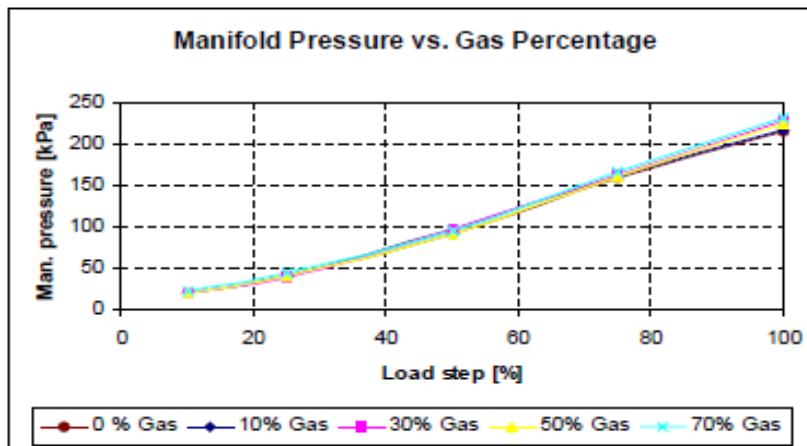


Figure 6: Manifold Pressure

The smoke readings being a derivative of particle matter (PM) shows no improvement when running the engine on several gas to diesel ratio's.

4.2 Test Conclusion

The best NO_x value, weighted according to IMO NO_x curve, and without fuel-adjustment timing was accomplished at 70 % gas. In order to reach 50 % NO_x reduction, manually adjusting the fuel timing to 4 deg BTDC gave a 56,6% NO_x reduction at 75% load.

Next step for this application is do additional testing when manually adjusting the fuel timing and collecting extensive data under various gas composition and loads in order to completely understand the engine characteristics. Furthermore, safety certification and marine classification may also become part of this next testing.

It seems to be possible to lower the emission of NOx if we adjust the software of the engine. How the software of the engine is designed is not clear, based on experience we expect that new timing maps and fuel maps need to be created (by Caterpillar) to retard timing to a point where the combustion temperatures and pressures are reduced significantly.

On the other hand, retarded timing to reduce the NOx emission will at 100% diesel entail very poor fuel consumption and higher visual smoke. The new fuel maps with possibilities for retarded timing should therefore be developed as a function of the gas amount. In other words, retarded timing should be available only at a certain % gas.

Maintenance schedule. Due to slightly higher exhaust temperatures and unforeseen other negative influence on engine components, the maintenance schedules might have to be adjusted downwards. Based on our experience with 3500B product this should not cause problems since in general we have enough margin compared to the standard Caterpillar maintenance schedules.

5.0 Emission Test Protocol

5.1 Den Norske Veritas Emission Test

The measuring principles followed the Northeast method for the test but the results were not in accordance to the IMO NO_x Technical Code. This Code requires accurate measurements of fuel consumption, shaft power, etc., which is outside the scope of this test. The measurements will include NO_x, CO, CO₂, O₂ and ambient air conditions and the engine loads are as specified in test cycle D2, IMO Marpol 73/78 reg. 13 NO_x technical code.

The overall emission parameters are stated in Table 3: Emission Parameters Measured.

Nitrogen Dioxide	NO ₂
Nitrogen Monoxide	NO
Oxygen	O ₂
Carbon dioxide	CO ₂
Carbon Monoxide	CO
Bosch No.	

Table 3: Emission Parameters Measured

DNV performed the measurements by extracting gas from the exhaust pipe for a minimum of 5 minutes using a multi gas analyser (HORIBA) for determination of gas concentrations, see Appendix 5: Photographs of DNV Emissions Equipment. The multi-gas analyser uses the following measuring principles:

- Non-dispersive Infrared analyser (NDIR) for the measurement of carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO₂)
- Chemiluminescent detector (CLD) for the measurement of nitrogen oxides (NO_x)
- Zirconium Dioxide Detector (ZRDO) for the measurement of oxygen (O₂)

In addition, DNV requires actual diesel and gas consumption at specific times as well as the boost temperature after the after-cooler and power output.

DNV will not award any certification to GTI's equipment during this test nor to the emissions levels or to the application itself. If anything, this test will provide DNV a chance to review the equipment and the systems involved.

In Appendix 6: DNV Emissions Report can be found.

5.2 Test Cycle

For load determination, the test cycle will be according to D2 technical code (see Table 4: Test Cycle D2). The basis being the resolution of the 1997 MARPOL Conference, Resolution 2: NO_x, Technical Code, Test Cycle for "Constant-Speed auxiliary Engine" application.

Test Cycle D2	Speed	100%	100%	100%	100%	100%
	Power	10%	25%	50%	75%	100%
	Weighting Factor	0.05	0.25	0.3	0.3	0.1
	EkW	80	200	400	600	800
	BkW	86.3	213.4	419.3	628.9	842.1

Table 4: Test Cycle D2

The gas-diesel mixture ranged from 10% gas to 80% gas (see Table 5: Various Gas % and Diesel % Mix) using the D2 load cycle. During each step, the test will be measuring emissions at different loads while capturing the pre-determined parameters that are listed in the next section.

Mixture Gas % - Diesel %	0% - 100%	10% - 90%	30% - 70%	50% - 50%	70% - 30%	80% - 20%
	D2 Cycle	D2 Cycle	D2 Cycle	D2 Cycle	D2 Cycle	D2 Cycle

Table 5: Various Gas % and Diesel % Mix

5.3 Test Parameters

During each gas-diesel mixture, a full D2 load test was done in order to capture approximately 60 diesel engine parameters. Below are two tables, which outline the full data collection test. Some parameter data was collected by two different methods but the most accurate parameter was chosen for calculations. The full test results are presented in the Appendix 2: Actual Engine Parameter Data Captured.

Gas ??? Diesel ???						
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system						
Type	3508B		RPM	1500		
Applic.	Mar. Aux genset		Power	850kW		
Serial #	07SM00168		Actemp	30 deg.C		
OT/2T #	0K2110					
Date	Nov 6/03					
Time	18:15					
Engine hours			Atmospheric pressure [mbar]	1030		
Timing	Electronic		Ambient temperature [deg.C]	25		
Flash-file	Flash-file		Relative humidity [%]	41%		
			LOAD STEPS			
			10%	25%	50%	75%
			100%			
			Read	80 eKW	200eKW	400eKW
			600eKW	800eKW		
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser				
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser				
	Oil pressure [kPa]	ET				
Air	T boost left	Laser				
	T boost right	Laser				
	T air manifold [deg.C]	Laser				
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB				
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB				
	Manifold pressure [kPa] 2	ET				
	Air filter restriction: Left	ET				
Air filter restriction: Right	ET					
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser				
	D T fuel out [deg.C]	Laser				
	D Fuel pressure [kPa]	ET				
	D Fuel consumption [ltr./hr] CAT Meter	GTI				
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser				
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser				
	T JW pump	Laser				
	T Engine in	Laser				
	T Engine out	Laser				
Emission	O2 [%]	BB				
	CO [ppm]	BB				
	CO2 [ppm]	BB				
	NO [ppm]	BB				
	NO2 [ppm]	BB				
	Combine NOx					
	SO2 [ppm]					
Bosch value 1 (avg of 2)	BB					

Table 6: Diesel Engine Parameter Capture, Master Sheet A.

		LOAD STEPS					
		Read	10%	25%	50%	75%	100%
			80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP					
	T cylinder 2	CP					
	T cylinder 3	CP					
	T cylinder 4	CP					
	T cylinder 5	CP					
	T cylinder 6	CP					
	T cylinder 7	CP					
	T cylinder 8	CP					
	T cylinder avg [deg.C]	Calculated					
	T cylinder minimum	Calculated					
	T cylinder maximum	Calculated					
	T exhaust left	ET					
	T exhaust right	ET					
	T stack [deg.C]	CP					
ET	Engine Load Factor	ET					
	Fuel Position	ET					
	Rated Fuel Limit	ET					
	FRC Fuel Limit	ET					
	Injection duration	ET					
	Desired Engine Speed	ET					
	Actual Engine Speed	ET					
	Throttle Pos.	ET					
Load	U1/U2/U3 Average						
	I1/I2/I3 Average						
Bank	Cos phi						
	Load						
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI					
Reading	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI					
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI					
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI					
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI					
	Air Filter Restriction 1	GTI					
	Air Filter Restriction 2	GTI					
	Kilowatt Percent	GTI					
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI					
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI					
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI					
	Hold Position	GTI					

Table 7: Diesel Engine Parameter Capture, Master Sheet B

5.4 Marpol NOx Curve

IMO NOx curve below is representative the NOx gr/kWh as a function of the rpm. All NOx numbers in this test is weighted and related according to this curve.

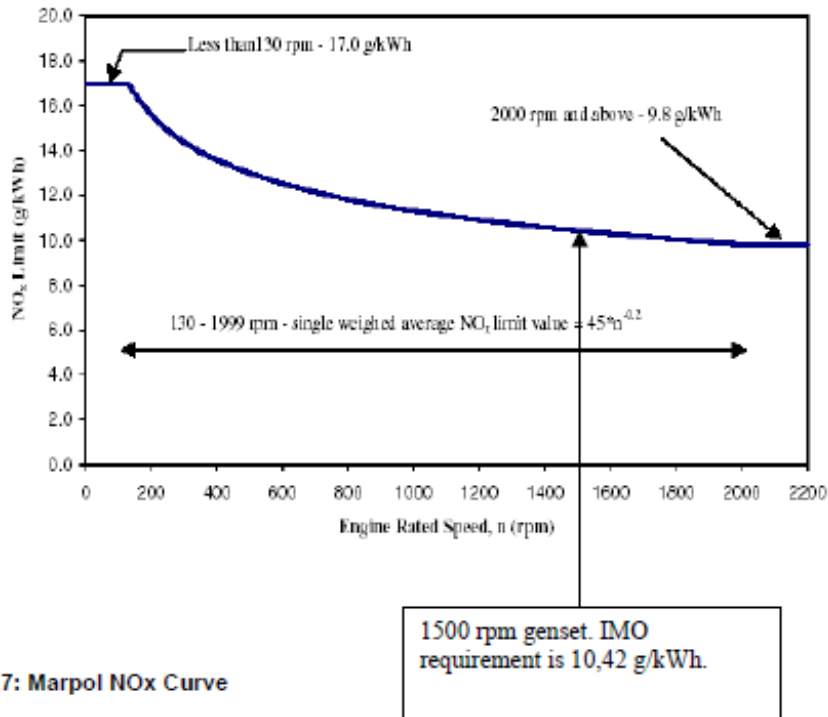


Figure 7: Marpol NOx Curve

6.0 Test Site and Diesel Engine Details

The Haugesund Maritime & Technical School facility operates one (1) reciprocating engine generator, 3508B (see Table 8: Test Engine Specifications), for educational training purposes. The engine has limited annual power production of no more than 40 000 KW-Hr/Yr. The emission compliance test program was conducted while the engine was operated between 80 to 800 eKW, while co-firing natural gas and diesel oil.

Engine Specifications	Engine CAT 3508B
Serial No.	3DM 00168
eKW @ 1500 rpm	800
bKW @ 1500 rpm	856
RPM	1500
Fuel consumption @ 100 load	197 l/hr
Bore x Stroke	170 x 190 mm
Displacement	34.5 Liter
Generator, S/N	2FN 01228
Date Manufactured	5. January 2000
Tested	14. January 2000

Table 8: Test Engine Specifications

7.0 GTI Component Description

GTI's gas train is very sensitive and require

Gas Supply Line

For the proposed marine applications using LNG as a fuel supply, it will be critically important that the vaporization system be capable of deliver a constant pressure to the GTI gas train as pressure tolerance of about +/- .2 psig (.014 bar), with little or no oscillation or spiking. This is the same pressure tolerance required for pipeline-supplied applications. Therefore, the issue of fuel storage / delivery system design is to be resolved with the customer.

VIB (Vibration) Transducer (see photo)	Model STS 484 E_123_020_00 S/N 197320	0 to 2.0 IPS or 50.8 mm/s 4 to 20 mA
VIB transducer is mounted on the engine block or cylinder head. For optimum operation and vibration sensing, the VIB transducer should be mounted in the same plane as the engine cylinders. For V configured engines, two sensors are used and should be mounted at opposite ends of the engine on opposite corners.		
VAC Transducer (Vacuum) (photo)	Altronic Pressure Transducer	PU Gg1206 – 50
The VAC transducer is installed in the engine air-intake system. The VAC transducer should be mounted AFTER the air-cleaner and BEFORE the turbocharger compressor inlet, in a position where it can sense engine vacuum.		
Gas Reducer	1M1 Bailey Manchester England	Gh regulator 2042 GN Gas density -20C to +100C

Gas Filter	Dungs type GF40065/3 pmas: 4 ar – 15T80	ID: CE 0085AQ0122 DN 65 gas filter Dungs # D22263g
<p>Made of random laid non-woven polypropylene fabric with a stainless steel support frame and a pore width of approximately 50 microns. The filter housing is a cast aluminium two-piece design with NBR seals. If the storage capacity of the filter is exceeded or if there is an excessive pressure differential, the filter will lose its protective function. The filter element should be changed a minimum of once per year or anytime the pressure differential has increased 100% compared to a new filter or when pressure differential exceeds 10 mbar. The gas filter is supplied with pressure taps upstream and downstream of filter element in order to measure the pressure differential across the filter.</p>		
Dungs Pressure Regulator	Regulator Type FRNG 5065	Pmax: 50 mbar pwa gleichrechregulato p1max: 200 mbar
<p>A "zero governor" style gas regulator that reduces input gas pressure to approximately atmospheric pressure. The regulator consists of a cast aluminum housing containing working diaphragms, an adjustable pressure set-point spring and a pre-loaded counter spring. The regulator utilizes NBR diaphragms and seals, contains no non-ferrous metals and is suitable for methane based gasses up to 0.1% H₂S, dry. The regulator operates according to the differential pressure between the inlet port and outlet port in order to maintain the set delivery pressure. The regulator detects changes in engine vacuum as engine load increases or decreases and adjusts gas flow rate in order to maintain the set outlet pressure.</p>		
Woodward Actuator Valve	PN 8235 – 25 g SN 13600575 030g	
<p>A dynamic controller to amount of fuel allowed into the system. A recently added addition to GTI's system.</p>		

Dungs Double Solenoid	DMV-DLE 5065/11 pmax 500 mbar	Cast Aluminium housing, powered by 24VDC from GTI control panel.
The gas valve utilizes NBR seals, contains no non-ferrous metals and is suitable for methane based gasses up to 0.1% H ₂ S, dry. When the valve is energized, i.e. when Bi-Fuel mode is activated, the secondary valve opens slowly, taking approx. 30 seconds to reach the fully open position. When de-energized, the gas solenoid valve instantly closes resulting in immediate transition of the engine to 100% diesel mode.		
Bi-fuel	Main Adjustment Solenoid	Pt# GPV 2025 AAT
No description of this.		
Gates Hoses	24L5L 1-3/8 inch SAE 100R5 500 psi max hyd. Wp,	Made in USA
No description of this.		
Fuel Flow Diesel Meter	Floscan Seattle, WA	Model 236 F 2K S/N g616F
No description of this.		

Appendix 1: Letter of Intent

Pay & Brinck Motor's Dual-Fuel Test November 2003

Global concerns over the environmental effect of carbon dioxide and nitrogen oxides emissions have led to the extensive research and development in alternative fuel sources, such as hydrogen, methanol, fuel cell technology, bio-diesel fuel, hybrid alternatives, etc.

Governments, Environmental and consumer groups in Western countries have successfully:

- Established emission standards by passing laws and levying heavy fines.
- Provided facts about diesel fuel use and its affect to our health and environment.
- Offering tax incentives to assist in reducing the capital costs changes.
- Increased peer pressure for all companies to embrace social responsibility.

Norway's government is currently building three large LNG plants with more plans to improve its' infrastructure. Pay & Brinck Motor's prime revenue drivers, the Marine and Offshore markets, are under relentless pressures and are demanding a *Dual-Fuel* alternative.

Warstila, PBM's primary competitor in the area, has successfully developed dual fuel engines which, in gas mode, produce 20% less CO₂ and 90% less NO_x than conventional diesel engines. Though there are mix reports in the field as to its reliability, the issue remains that they are years ahead of Caterpillar in execution.

Gas Technologies Incorporated, GTI, offers a solution that is currently applied to a number of CAT engines in various applications. We believe that the following are potential projects in Norway:

Phillips	4 x PSV	4 x 4 x 3516 B Genset
Statoil	5 x PSV	5 x 4 x 3516 B
Statoil	2 x Tugs	2 x 2 x 3600
Gov/Ferry Market	5 x Ferries	5 x 24 x 3516 HD
TOTAL	60 engines using bi-fuel	

Pay & Brinck Motor's objective in November is to organize and execute a dual-fuel test using GTI's equipment. Den Norske Veritas (DNV) said there are very interested as they too are under tremendous pressures from the government to be more involved in research for lowering emissions.

According to GTI's extensive experience with CAT engines, they have found that there were able to reduce NO emissions by 50% for example. GTI also mentioned that the diesel-gas mixture would not affect the load transient behavior and this test will verify such. If verified, this means that all transient load factors can be transferable for all 3500 series engines.

The test dates are Monday November 3 to November 7 and the estimate budget for the test is outlined below:

Appendix 1 continued:

Bi-Fuel Test

Cost of Engine		Zero
Diesel Cost		25,000
Cost of LNG		35,000
Measurement Company: According to ISO standards.		110,000
Load Bank Rental, including transport		25,000
Temporary Gas Storage on site: Kommune Charge		25,000
PBM commissioning: mechanics		35,000
DNV Involvement		25,000
AGA Involvement (breakdown below)		86,500
Tank transport + crane	25,000	
Tank Rental (11m3) + vapourizer	10,000	
Service for installation of tank/removal of tank	12,500	
AGA technician to support	30,000	
"Diett" and accomodation for technician +10 %.	9,000	
PBM officials: Flights and accomodations		20,000
Project Cost		20,000
TOTAL ESTIMATED COST		kr 406,500
		€ 48,780

PBM is committed in offering an alternative solution to its customers so any additional funding and involvement is much appreciated.

Sincerely yours,
Pay & Brinck Motor AS

Trond Skaufel
Managing Director.

Appendix 2: Actual Engine Parameter Data Captured

Gas 0% Diesel 100%							
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system							
Type	3508B	RPM	1500				
Applic.	Mar. Aux genset	Power	850kW				
Serial #	07SM00168	Actemp	30gr.C				
OT/2T #	0K2110						
Date	Nov 6/03						
Time	10:30						
Engine hours		Atmospheric pressure [mbar]	1030				
Timing	Electronic	Ambient temperature [deg.C]	25				
Flash-file	Flash-file	Relative humidity [%]	41%				
		LOAD STEPS					
		10%	25%	50%	75%	100%	
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser	90.3	91.3	94.7	97.4	99
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser	83.5	84.7	86.6	87.6	89.7
	Oil pressure [kPa]	ET	463	438	449	440	431
Air	T boost left	Laser	68.2	56.6	96	134	166.5
	T boost right	Laser	54.2	64	104	145	178.4
	T air manifold [deg.C]	Laser	56.2	53.6	52.8	54.9	57.8
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB	0.5	30	83	150	205
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB	0.4	25	22	140	195
	Manifold pressure [kPa] 2	ET	20	40	92	158	216
	Air filter restriction: Left	ET	0.1	0.2	0.3	0.6	1
	Air filter restriction: Right	ET	0.1	0.2	0.4	0.6	1
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser	41	41	28	27.6	30
	D T fuel out [deg.C]	Laser	48	49.3	43	41.5	42.8
	D Fuel pressure [kPa]	ET	443	437	431	413	383
	D Fuel consumption [ltr./hr] CAT Meter	GTI	31.85	58.26	102.36	148.7	194.08
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser	32	30.3	32.2	34.5	32.5
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser	31.9	30.3	33	37.3	38.6
	T JW pump	Laser	80.2	82.1	81.5	82.6	82.9
	T Engine in	Laser	31.4	26	26.6	28.4	30.4
	T Engine out	Laser	80.9	82.2	82	84.2	85
Emission	O2 [%]	BB	16.54	14.2	12.24	11.35	10.51
	CO [ppm]	BB	254	145	211	142	121
	CO2 [ppm]	BB	3.2%	5.1%	6.5%	7.1%	7.7%
	NO [ppm]	BB	0	0	0	815	1036
	NO2 [ppm]	BB	0	0	0	51	69
	Combine NOx		529	555	705	866	1105
	SO2 [ppm]		0.3	0.1	0.2	0	0.1
	Bosch value 1 (avg of 2)	BB	0	0	0	0	6

Gas 0% Diesel 100%

		LOAD STEPS					
			10%	25%	50%	75%	100%
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP	258	345	432	429	518
	T cylinder 2	CP	256	335	431	481	521
	T cylinder 3	CP	235	330	418	469	515
	T cylinder 4	CP	248	340	432	485	527
	T cylinder 5	CP	263	360	433	485	529
	T cylinder 6	CP	223	324	450	501	537
	T cylinder 7	CP	242	333	427	483	536
	T cylinder 8	CP	225	337	425	490	544
	T cylinder avg [deg.C]	Calc	243.75	338	431	477.875	528.375
	T cylinder minimum	Calc	223	324	418	429	515
	T cylinder maximum	Calc	263	360	450	501	544
T exhaust left	ET	258	343	453	513	557	
T exhaust right	ET	271	355	450	508	556	
T stack [deg.C]	CP	250	280	345	320	390	
ET	Engine Load Factor	ET	12	23	41	61	83
	Fuel Position	ET	71	89	128	170	214
	Rated Fuel Limit	ET	243	243.4	243.7	244.1	244
	FRC Fuel Limit	ET	300	300	300	300	300
	Injection duration	ET	1220	1540	2232	2950	3760
	Desired Engine Speed	ET	1493	1483	1482	1478	1478
	Actual Engine Speed	ET	1493	1483	1481	1478	1475
	Throttle Pos.	ET	73.2	71.6	70.8	70.8	70.8
Load	U1/U2/U3	Average	0.0	364.7	362.3	377.7	376.3
Bank	I1/I2/I3	Average	0	0	597	908	1208
	Cos phi		1	1	1	1	1
	Load		80	200	400	600	800
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
Readings	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Air Filter Restriction 1	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Air Filter Restriction 2	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Kilowatt Percent	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI	0.24	0.39	0.33	0.37	0.47
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI	0.23	0.24	0.28	0.34	0.45
	Hold Position	GTI	0%	0%	0%	0%	0%

Gas 10% Diesel 90%								
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system								
Type	3508B		RPM	1500				
Applic.	Mar. Aux genset		Power	850kW				
Serial #	07SM00168		Actemp	30gr.C				
OT/2T #	0K2110							
Date	Nov 6/03							
Time	18:15							
Engine hours			Atmospheric pressure [mbar]	1030				
Timing	Electronic		Ambient temperature [deg.C]	25				
Flash-file	Flash-file		Relative humidity [%]	41%				
LOAD STEPS								
			10%	25%	50%	75%	100%	
			Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser	92	92.7	95.8	97.7	100	
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser	85.9	86.2	88.2	90.3	91.8	
	Oil pressure [kPa]	ET	460	452	449	440	433	
Air	T boost left	Laser	85.9	86.3	108.5	147.5	180.7	
	T boost right	Laser	50.8	74.5	116.9	157.5	191.3	
	T air manifold [deg.C]	Laser	55.8	57.8	59.8	63.2	68.9	
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB	10	23	80	148	208	
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB	0	15	70	132	190	
	Manifold pressure [kPa] 2	ET	20	40	96	160	218	
	Air filter restriction: Left	ET	0.1	0.2	0.4	0.7	1	
	Air filter restriction: Right	ET	0.2	0.2	0.4	0.7	1	
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser	41.4	42.4	43.2	44.2	44	
	DT fuel out [deg.C]	Laser	53.6	53.1	52.9	53.2	52.7	
	DFuel pressure [kPa]	ET	438	432	421	405	380	
	DFuel consumption [litr./hr] CAT Meter	GTI	27.44	52.01	88.96	131.23	171.74	
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser	38.4	38.6	41.2	45.6	49.6	
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser	38	38.6	42.9	49.3	55.6	
	T JW pump	Laser	81.3	81.7	82.3	83	82.6	
	T Engine in	Laser	39.4	41	43.6	46.5	49.4	
	T Engine out	Laser	82	83.8	83.9	86.5	86.9	
Emission	O2 [%]	BB	162	19.86	12.08	11.1	10.19	
	CO [ppm]	BB	727	806	845	684	485	
	CO2 [ppm]	BB	3.2%	4.9%	6.2%	7.0%	7.7%	
	NO [ppm]	BB	305	345	611	800	1034	
	NO2 [ppm]	BB	61	66	62	66	80	
	Combine NOx		366	411	673	866	1114	
	SO2 [ppm]		125	100	63	37	19	
	Bosch value 1 (avg of 2)	BB	0	0	0	0	0	

Gas 10% Diesel 90%

		Read	LOAD STEPS				
			10%	25%	50%	75%	100%
			80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP	235	366	410	469	515
	T cylinder 2	CP	254	351	423	473	517
	T cylinder 3	CP	237	329	406	463	517
	T cylinder 4	CP	245	371	459	521	562
	T cylinder 5	CP	280	418	484	532	576
	T cylinder 6	CP	267	354	540	561	602
	T cylinder 7	CP	263	355	462	532	585
	T cylinder 8	CP	243	345	463	541	589
	T cylinder avg [deg.C]	Calculated	253	361.125	455.875	511.5	557.875
	T cylinder minimum	Calculated	235	329	406	463	515
	T cylinder maximum	Calculated	280	418	540	561	602
	T exhaust left	ET	268	364	488	545	594
	T exhaust right	ET	281	383	475	535	590
T stack [deg.C]	CP	260	310	370	400	420	
ET	Engine Load Factor	ET	11	20	37	55	74
	Fuel Position	ET	69	82.5	119	157	196
	Rated Fuel Limit	ET	243	243.7	243.9	244.4	244.8
	FRC Fuel Limit	ET	300	300	300	300	300
	Injection duration	ET	1224	1420	2060	2760	3410
	Desired Engine Speed	ET	1493	1495	1492	1492	1491
	Actual Engine Speed	ET	1493	1495	1492	1492	1492
	Throttle Pos.	ET	74	74	73.2	73.2	73.2
Load	U1/U2/U3 Average		386.3	385.7	384.7	384.7	383.3
Bank	I1/I2/I3 Average		116	295	596	898	1198
	Cos phi		1	1	1	1	1
	Load		80	200	400	600	800
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI	37	37	37	38	38
Reading	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI	45	45	49	56	64
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI	37	39	38	39	40
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI	31	32	32	32	32
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI	3.6	3.4	3.4	3.5	3.6
	Air Filter Restriction 1	GTI	6.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Air Filter Restriction 2	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Kilowatt Percent	GTI	24.3	31.4	43.4	55.5	67.5
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI	2.5	4.4	12.1	21.2	29.4
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI	0.25	0.27	0.3	0.31	0.4
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI	0.29	0.26	0.26	0.31	0.4
	Hold Position	GTI	14%	16%	17%	17%	17%

Gas 30% Diesel 70%							
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system							
Type	3508B		RPM	1500			
Applic.	Mar. Aux genset		Power	850	kW		
Serial #	07SM00168		Actemp	30	gr.C		
OT/2T #	0K2110						
Date	Nov 6/03						
Time	11:40						
Engine hours			Atmospheric pressure [mbar]				1030
Timing	Electronic		Ambient temperature [deg.C]				25
Flash-file	Flash-file		Relative humidity [%]				41%
LOAD STEPS							
			10%	25%	50%	75%	100%
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser	91.2	91.2	94.5	97.9	98.7
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser	83.8	84.7	86.3	87.7	89.2
	Oil pressure [kPa]	ET	460	452	448	439	431
Air	T boost left	Laser	45.9	57.8	98.6	138	173.5
	T boost right	Laser	49.2	64.5	107.7	147.5	184
	T air manifold [deg.C]	Laser	53.6	51.6	53.9	56.6	58.5
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB	9	25	83	152	220
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB	3	20	77	140	203
	Manifold pressure [kPa] 2	ET	20	38	96	162	228
	Air filter restriction: Left	ET	0.1	0.2	0.4	0.4	1.1
Air filter restriction: Right	ET	0.2	0.2	0.4	0.6	1	
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser	30.1	30.2	31.1	31.1	313.2
	DT fuel out [deg.C]	Laser	46.6	45	47.4	46	46
	DFuel pressure [kPa]	ET	445	443	436	427	411
	DFuel consumption [ltr./hr] CAT Meter	GTI	21.7	39.75	68.5	103.23	131.54
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser	29.8	30.1	32.4	34.5	33
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser	29.6	30.4	33	37.7	40
	T JW pump	Laser	80.9	82.3	82.2	82.8	82.7
	T Engine in	Laser	21.6	22.7	25.2	28.2	31.4
	T Engine out	Laser	81.5	83.5	85	85.5	86
Emission	O2 [%]	BB	16.42	14.01	12.16	11.36	10.47
	CO [ppm]	BB	1548	1592	1833	1524	1312
	CO2 [ppm]	BB	2.9%	4.6%	5.9%	6.5%	7.1%
	NO [ppm]	BB	272	437	633	791	884
	NO2 [ppm]	BB	50	79	44	56	63
	Combine NOx		322	516	677	847	947
	SO2 [ppm]		392	222	185	113	80.6
	Bosch value 1 (avg of 2)	BB	0	0	0	0	0

Gas 30% Diesel 70%

		LOAD STEPS					
		10%	25%	50%	75%	100%	
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP	226	324	431	463	520
	T cylinder 2	CP	233	336	430	472	521
	T cylinder 3	CP	256	307	412	461	513
	T cylinder 4	CP	230	351	440	500	554
	T cylinder 5	CP	265	365	465	514	559
	T cylinder 6	CP	267	333	474	508	586
	T cylinder 7	CP	275	341	452	508	563
	T cylinder 8	CP	246	353	445	512	571
	T cylinder avg [deg.C]	Calculated	249.75	338.75	443.625	492.25	548.375
	T cylinder minimum	Calculated	226	307	412	461	513
	T cylinder maximum	Calculated	275	365	474	514	586
	T exhaust left	ET	242	358	470	529	583
T exhaust right	ET	278	356	471	526	577	
T stack [deg.C]	CP	240	290	360	382	410	
ET	Engine Load Factor	ET	10	15	28	42	56
	Fuel Position	ET	648	75	100	132	159.5
	Rated Fuel Limit	ET	244	244	244.3	244.6	244
	FRC Fuel Limit	ET	300	300	300	300	300
	Injection duration	ET	1130	1350	1750	2304	2830
	Desired Engine Speed	ET	1474	1473	1472	1470	1470
	Actual Engine Speed	ET	1476	1472	1472	1470	1470
	Throttle Pos.	ET	69.2	69.2	68	68.8	68.4
Load	U1/U2/U3 Average		358.7	375.3	373.7	373.3	371.7
Bank	I1/I2/I3 Average		114	301	613	930	1245
	Cos phi		1	1	1	1	1
	Load		80	200	400	600	800
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI	31	30	30	31	
Read	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI	36	37	40	45	50
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI	32	32	32	0	33
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI	27	26	27	26	26
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI	2.5	2.6	2.3	2.2	2
	Air Filter Restriction 1	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Air Filter Restriction 2	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Kilowatt Percent	GTI	24.1	31.4	43.4	55.6	67.9
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI	2.9	4.1	13.5	23.2	32
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI	0.19	0.35	0.31	0.35	0.41
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI	0.22	0.27	0.27	0.32	0.43
	Hold Position	GTI	22%	22%	missing	25%	27%

Gas 50% Diesel 50%							
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system							
Type	3508B	RPM	1500				
Applic.	Mar. Aux genset	Power	850kW				
Serial #	D7SM00168	Actemp	30gr.C				
OT/2T #	DK2110						
Date	Nov 6/03	Note:	Load bank broke down at 100% L				
Time	13:45						
Engine hours		Atmospheric pressure [mbar]	1030				
Timing	Electronic	Ambient temperature [deg.C]	25				
Flash-file	Flash-file	Relative humidity [%]	41%				
		LOAD STEPS					
		10%	25%	50%	75%	100%	
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser	89.4	92	93	96.3	96.9
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser	83.7	84.9	87.8	88.1	88.6
	Oil pressure [kPa]	ET	463	458	451	443	438
Air	T boost left	Laser	45.2	59.2	95.8	140	172
	T boost right	Laser	48.4	64.5	0	149.9	185.4
	T air manifold [deg.C]	Laser	50.1	52.6	55.6	58.4	62
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB	10	28	80	152	212
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB	0	20	70	140	200
	Manifold pressure [kPa] 2	ET	20	40	91	160	224
	Air filter restriction: Left	ET	0.3	0.3	0.5	0.7	1
	Air filter restriction: Right	ET	0.3	0.3	0.5	0.8	1
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser	31.5	32.4	33	35	29.6
	D T fuel out [deg.C]	Laser	49.5	47.4	48	48.5	46.4
	D Fuel pressure [kPa]	ET	442	440	435	478	430
	D Fuel consumption [ltr./hr] CAT Meter	GTI	18.51	28.62	48.15	74.12	94.14
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser	29.9	30.9	33.7	35.1	37.7
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser	30	31	34.7	38.2	44.5
	T JW pump	Laser	81.5	82	82.3	83	82.6
	T Engine in	Laser	23.4	26.4	29.1	32.7	35.6
	T Engine out	Laser	82.7	84	84.6	84.3	85
Emission	O2 [%]	BB	16.4	13.98	12.11	11.18	10.35
	CO [ppm]	BB	1678	2.52	2270	1948	1507
	CO2 [ppm]	BB	2.9%	4.4%	5.6%	6.3%	6.8%
	NO [ppm]	BB	255	522	595	757	914
	NO2 [ppm]	BB	60	73	46	54	57
	Combine NOx		315	595	641	811	971
	SO2 [ppm]		471	378	311	194	128
	Bosch value 1 (avg of 2)	BB	0	0	0	0	0

Gas 50% Diesel 50%

		LOAD STEPS					
		Read	10%	25%	50%	75%	100%
			80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP	228	339	442	480	539
	T cylinder 2	CP	230	344	435	481	543
	T cylinder 3	CP	255	313	408	465	512
	T cylinder 4	CP	239	344	451	499	558
	T cylinder 5	CP	257	367	461	522	561
	T cylinder 6	CP	159	308	440	520	581
	T cylinder 7	CP	280	346	440	514	561
	T cylinder 8	CP	253	328	440	507	562
	T cylinder avg [deg.C]	Calculated	<u>237.625</u>	<u>336.125</u>	<u>439.625</u>	<u>498.5</u>	<u>552.125</u>
	T cylinder minimum	Calculated	159	308	408	465	512
	T cylinder maximum	Calculated	280	367	461	522	581
	T exhaust left	ET	241	357	475	537	598
	T exhaust right	ET	277	371	475	542	592
	T stack [deg.C]	CP	220	295	362	390	420
ET	Engine Load Factor	ET	9	11	18	31	40
	Fuel Position	ET	63	71.3	81	106	127
	Rated Fuel Limit	ET	244	244.3	244.6	244.8	245
	FRC Fuel Limit	ET	300	300	300	300	300
	Injection duration	ET	1110	1260	1440	1410	2230
	Desired Engine Speed	ET	1470	1470	1467	1465	1465
	Actual Engine Speed	ET	1471	1470	1467	1465	1465
	Throttle Pos.	ET	68.4	68.4	68	67.6	67
Load	U1/U2/U3	Average	375.3	374.0	372.0	371.0	369.7
	I1/I2/I3	Average	113	302	590	928	1236
Bank	Cos phi		1	1	1	1	1
	Load		80	200	400	600	800
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI	30	30	31	31	53
Read	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI	36	37	42	46	35
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI	32	32	32	33	27
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI	25	34	25	25	0
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI	3.5	3.8	3	2.8	2.4
	Air Filter Restriction 1	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Air Filter Restriction 2	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Kilowatt Percent	GTI	24	31.3	42.4	23.2	67.4
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI	1.5	4.3	12.4	0	30.8
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI	0.2	0.35	0.27	0.4	0.4
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI	0.21	0.25	0.26	0.32	0.4
	Speed (Not Active)	GTI	24%	28%	33%	35%	36%

Gas 70% Diesel 30%							
Caterpillar vs. GTI Dual Fuel (Bi-fuel) system							
Type	3508B	RPM	1500				
Applic.	Mar. Aux genset	Power	856kW				
Serial #	D7SM00168	Actemp	30gr.C				
OT/2T #	DK2110						
Date	Nov 6/03						
Time	16:00						
Engine hours		Atmospheric pressure [mbar]	1030				
Timing	Electronic	Ambient temperature [deg.C]	25				
Flash-file	Flash-file	Relative humidity [%]	41%				
		LOAD STEPS					
		10%	25%	50%	75%	100%	
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Oil	T Oil before cooler [deg.C]	Laser	90.6	91.2	94.2	93.5	97.2
	T Oil after cooler [deg.C]	Laser	84.7	86	86	86	89.8
	Oil pressure [kPa]	ET	463	459	453	444	438
Air	T boost left	Laser	50.8	68	100	144	185.9
	T boost right	Laser	55.7	74.2	108	156	194.6
	T air manifold [deg.C]	Laser	56.3	54.5	56	58.6	67
	Boost pressure [kPa] (before AC)	BB	10	30	80	155	222
	Manifold pressure [kPa] 1 (after AC)	BB	0	21	70	142	210
	Manifold pressure [kPa] 2	ET	22	44	94	166	232
	Air filter restriction: Left	ET	0.1	0.3	0.5	0.8	0.9
	Air filter restriction: Right	ET	0.1	0.3	0.6	0.9	1.1
Fuel	T fuel in [deg.C]	Laser	31.8	34.4	36	36.4	37.8
	DT fuel out [deg.C]	Laser	49.5	50	50	51	50.8
	D Fuel pressure [kPa]	ET	446	446	443	438	434
	D Fuel consumption [ltr./hr] CAT Meter	GTI	10.45	19	30.42	42.74	56.44
Water	T water aftercooler in [deg.C]	Laser	32	33.4	36.2	38.1	44.4
	T water aftercooler out [deg.C]	Laser	31.7	33.6	37.6	42.6	50.8
	T JW pump	Laser	80.9	81.6	82.3	82.4	82.3
	T Engine in	Laser	30.1	32.1	34.2	37.7	40.6
	T Engine out	Laser	82.8	82.6	84.4	85.6	85.8
Emission	O2 [%]	BB	15.88	13.61	11.86	11.16	10.25
	CO [ppm]	BB	1904	2063	1878	1960	1662
	CO2 [ppm]	BB	2.8%	4.3%	5.4%	5.8%	6.4%
	NO [ppm]	BB	213	461	680	577	690
	NO2 [ppm]	BB	52	66	50	35	48
	Combine NOx		285	527	730	612	738
	SO2 [ppm]		943	687	479	385	228
	Bosch value 1 (avg of 2)	BB	0	0	0	0	0

Gas 70% Diesel 30%

		LOAD STEPS					
		10%	25%	50%	75%	100%	
		Read	80 eKW	200eKW	400eKW	600eKW	800eKW
Exhaust	T cylinder 1	CP	340	347	0	493	544
	T cylinder 2	CP	231	344	443	514	552
	T cylinder 3	CP	250	372	411	466	536
	T cylinder 4	CP	225	331	441	494	562
	T cylinder 5	CP	235	376	463	514	592
	T cylinder 6	CP	159	237	410	487	564
	T cylinder 7	CP	302	389	439	500	566
	T cylinder 8	CP	277	365	417	495	568
	T cylinder avg [deg.C]	Calc	252.375	345.125	378	495.375	560.5
	T cylinder minimum	Calc	159	237	0	466	536
	T cylinder maximum	Calc	340	389	463	514	592
	T exhaust left	ET	261	366	475	549	608
T exhaust right	ET	311	417	489	552	619	
T stack [deg.C]	CP	250	320	321	400	430	
ET	Engine Load Factor	ET	9	9	12	18	25
	Fuel Position	ET	60	65	70.5	78	92
	Rated Fuel Limit	ET	244.6	243.3	243.5	243.5	244.1
	FRC Fuel Limit	ET	300	300	300	300	300
	Injection duration	ET	1100	1130	1240	1390	1612
	Desired Engine Speed	ET	1465	1496	1495	1495	1495
	Actual Engine Speed	ET	1465	1496	1495	1495	1495
	Throttle Pos.	ET	67.6	74	74	74	74
Load	U1/U2/U3	Average	373.7	386.0	383.7	385.0	384.0
	Bank	Average	123	316	593	895	1204
	Cos phi		1	1	1	1	1
	Load		80	200	400	600	800
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI	35	35	35	36	37
Read	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI	36	40	44	51	61
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI	38	36	36	37	38
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI	29	29	29	29	29
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI	3.8	32	2.9	2	1.2
	Air Filter Restriction 1	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Air Filter Restriction 2	GTI	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
	Kilowatt Percent	GTI	24.5	32.4	43.4	55.5	67.7
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI	3.2	6	12.5	23.7	33.1
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI	0.21	0.27	0.3	0.29	0.31
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI	0.2	0.26	0.29	0.27	0.33
	Speed (Not Active)	GTI	36%	41%	46%	50%	55%
NOTES:							
* Engine unstable as RPM was 1466 at 10% L				* High Pressure valve to be adjusted at 100% L			
* Engine RPM was 1495 to 1500 at 25% load				* Turbo running hard; whistle sound			
* Also higher freq.noise at 25% load							
* Engine sounds like gas engine at 75% load but there is stability in combustion.							

Gas 80%% Diesel 20% + Gas 75% @ 100% Load

		LOAD STEPS						
		Read	10%	25%	50%	75%	100%	
			80% eKW	200eKW	400eKW	600eKW	80%0eKW	
Exhaust	T cylinder 1	CP				464	0	
	T cylinder 2	CP				489	0	
	T cylinder 3	CP				463	0	
	T cylinder 4	CP				462	0	
	T cylinder 5	CP				505	0	
	T cylinder 6	CP				475	0	
	T cylinder 7	CP				495	0	
	T cylinder 8	CP				497	0	
	T cylinder avg [deg.C]	Calc				481.25	0	
	T cylinder minimum	Calc				462	0	
	T cylinder maximum	Calc				505	0	
	T exhaust left	ET				540	0	
	T exhaust right	ET				552	0	
	T stack [deg.C]	CP				401	0	
ET	Engine Load Factor	ET				11	0	
	Fuel Position	ET				70	0	
	Rated Fuel Limit	ET				243.9	0	
	FRC Fuel Limit	ET				300	0	
	Injection duration	ET				1228	0	
	Desired Engine Speed	ET				1494	0	
	Actual Engine Speed	ET				1494	0	
	Throttle Pos.	ET				73.6	0	
	Load	U1/U2/U3	Average				385.0	0.0
Bank		I1/I2/I3	Average			899	0	
	Cos phi					1	0	
	Load					600	0	
GTI	Manifold Air Temp 1 (MAT 1)	GTI				37	38	
Read	Manifold Air Temp 2 (MAT 2)	GTI				51	63	
	Exhaust Gas Temp 1 (EGT 1)	GTI				39	40	
	Exhaust Gas Temp 2 (EGT 2)	GTI				31	31	
	Gas Supply Pressure [psig]	GTI				2.2	1.2	
	Air Filter Restriction 1	GTI				0.1	0.1	
	Air Filter Restriction 2	GTI				0.1	0.1	
	Kilowatt Percent	GTI				55.6	67.6	
	Manifold Pressure (MAP) [psig]	GTI				19.4	30.4	
	Engine Vibration 1 (VIB 1) Port, inch/sec	GTI				0.34	0.32	
	Engine Vibration 2 (VIB 2) Stbd, inch/sec	GTI				0.31	0.32	
	Holding Position	GTI				81%	74%	
	NOTES:							
	50 % : misfiring, unstable combustion.							

Appendix 3: Transient response

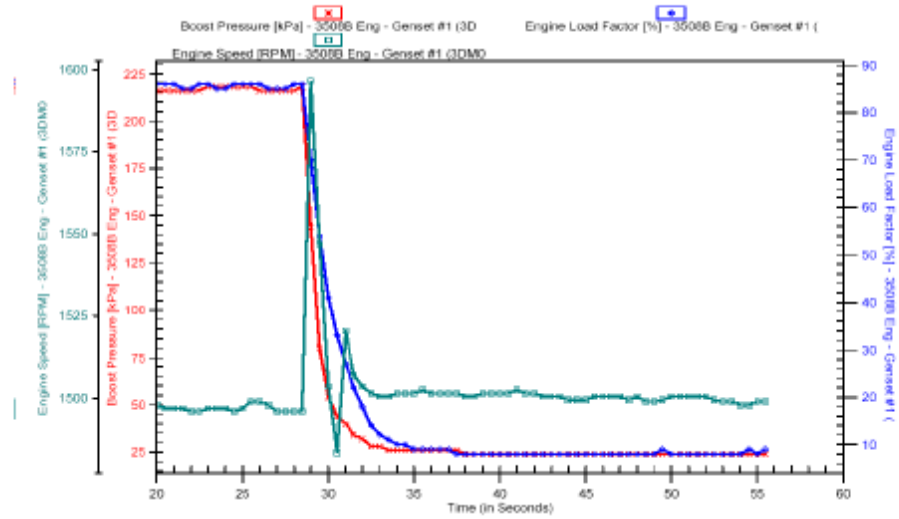


Fig1: 100 % diesel. Transient response 100-0 % load.

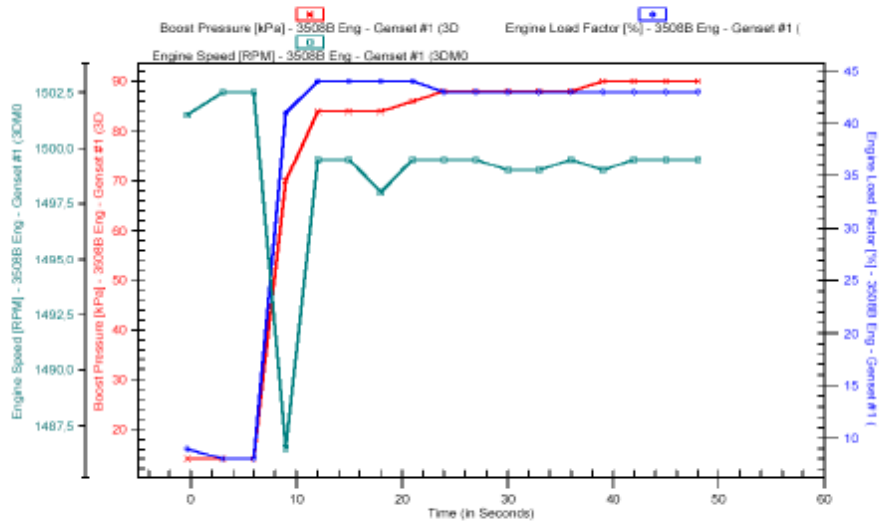


Fig 2: 100 % diesel. Transient response 0-50 % load

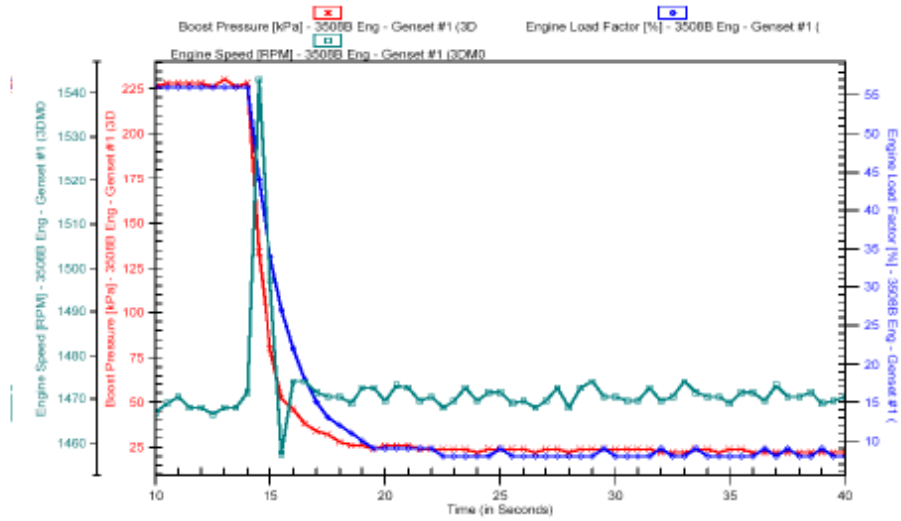


Fig 3: 30 % gas. Transient response 100-0 % load drop

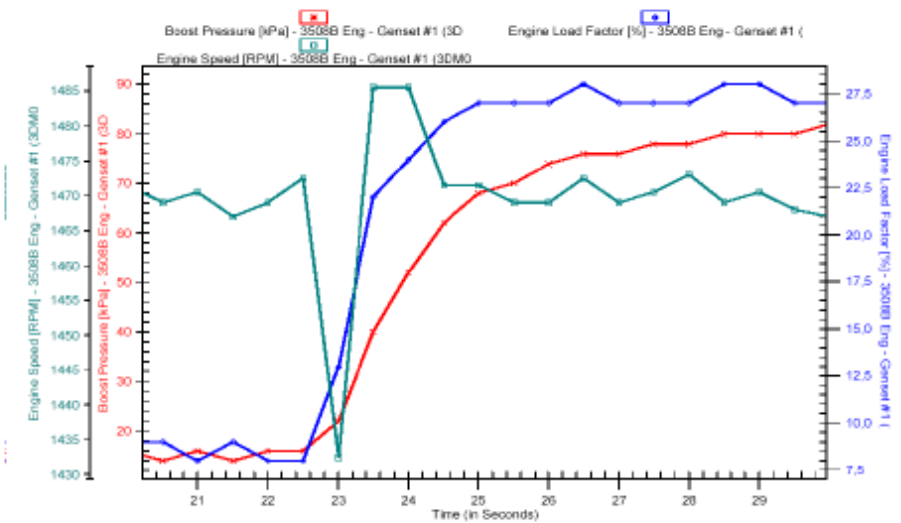


Fig 4: 30 % gas. Transient response 0-50 % load step

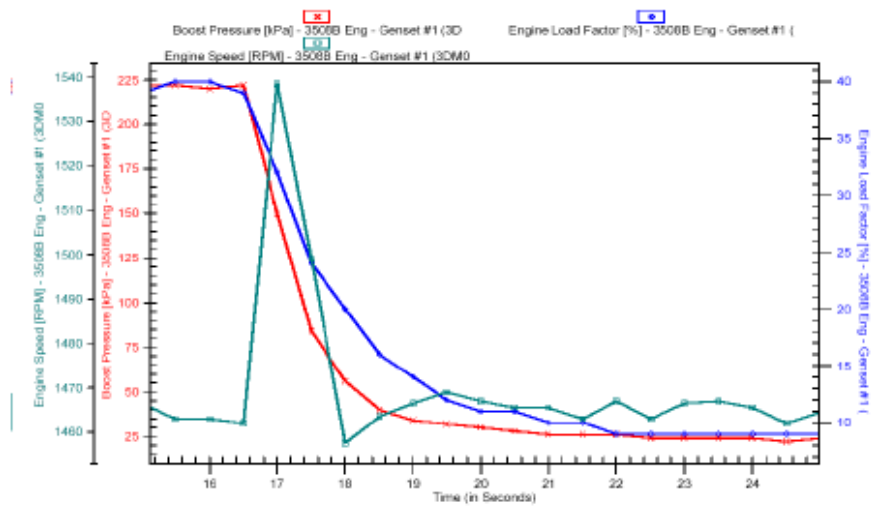


Fig 5: 50 % gas. Transient response 100-0 % load drop

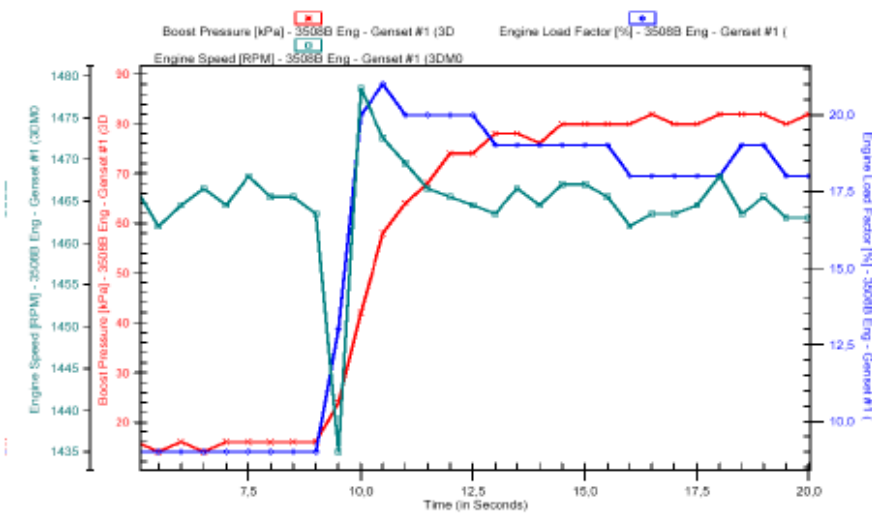


Fig 6: 50 % gas. Transient response 0-50 % load step

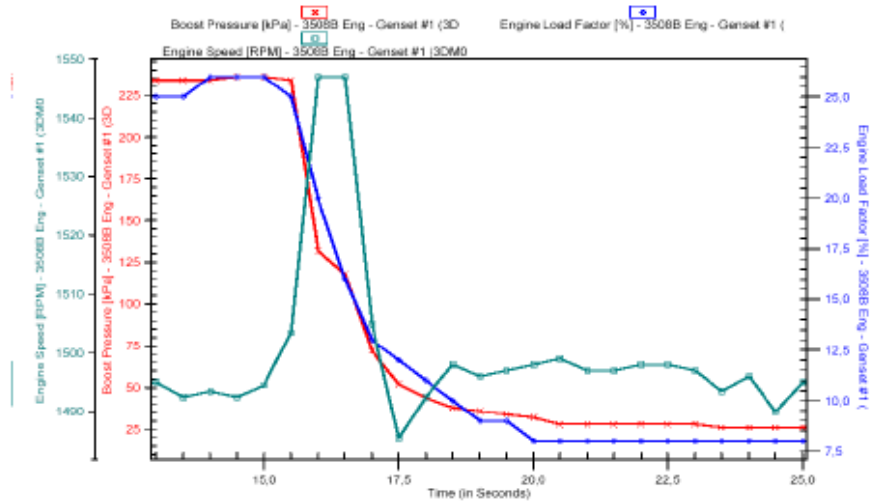


Fig 7: 70 % gas. Transient response 100-0 % load drop

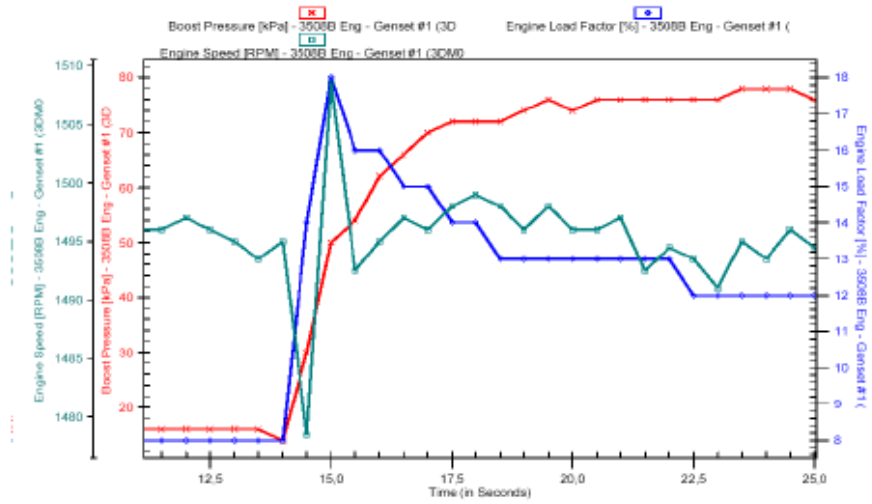


Fig 8: 70 % gas. Transient response 0-50 % load step

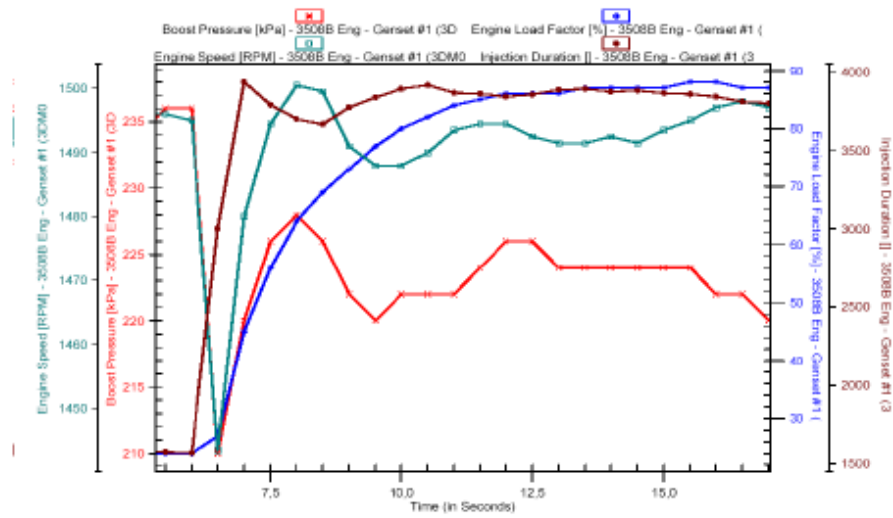


Fig 9: 70 % gas. Gas shut off at 100 % load

Appendix 4: NOx Figures Taken by Caterpillar EAME

Data Captured from Caterpillar

Date Friday November 7th 2003
Location Haugesund, Norway

Timing and fuel rack position at 75% load on the engine.

No manual timing adjustment

NOX	NOx reduction	Load	Gas	Diesel	Load Factor	Engine RPM	Inj Duration	Timing	Fuel Rack	Exh Temp/C		Boost	Fuel Cons
PPM	%	%	%	%				deg	mm	Left	Right	KPA	L/M
882		75	0	100	62	1503		9.98	17.03	506	505	152	151.00
788	10.88%	75	10	90	56	1499	2744	9.57	15.80	518	513	160	134.00
720	18.37%	75	30	70	44	1501	2256	8.50	13.30	529	528	164	105.00
599	32.09%	75	50	50	31	1500	1828	6.40	10.45	539	540	172	72.90
544	38.32%	75	70	30	19	1498	1388	7.30	7.80	542	553	170	43.80
773	12.36%	75	80	20	11	1499	1210	13.10	7.10	526	538	148	30.50

Appendix 4: Continue

Timing adjustment

Manual retarded timing after added on 70 % gas.

Manual Retard deg retard	NOX	NOx reduction	Load	Gas	Diesel	Load Factor	Engine RPM	Inj Duration	Timing	Fuel Rack	Exh Temp/C		Boost	Fuel Cons
	PPM	%	%	%	%				deg	mm	Left	Right	KPA	L/M
0	544	38.32%	75	70	30	19	1498	1388	7.30	7.80	542	553	170	43.80
0.80	508	42.63%	75	70	30	19	1503	1386	6.50	8.01	545	561	178	47.80
1.30	477	45.92%	75	70	30	19	1499	1384	6.00	8.00	546	565	180	48.00
1.80	444	49.66%	75	70	30	19	1500	1384	5.50	8.00	546	570	184	47.70
2.30	410	53.51%	75	70	30	18	1499	1350	5.00	7.98	549	569	188	45.50
2.80	385	56.35%	75	70	30	17	1499	1340	4.50	7.58	552	571	190	45.70
3.30	364	58.73%	75	70	30	17	1499	1342	4.00	7.75	556	574	194	45.80

Manual retarded timing after added on 80 % gas.

Manual Retard deg retard	NOX	NOx reduction	Load	Gas	Diesel	Load Factor	Engine RPM	Inj Duration	Timing	Fuel Rack	Exh Temp/C		Boost	Fuel Cons
	PPM	%	%	%	%				deg	mm	Left	Right	KPA	L/M
1.60	719	18.48%	75	80	20	12	1502	1170	11.50	6.80	528	540	150	31.00
2.60	678	23.13%	75	80	20	12	1500	1176	10.50	6.89	529	545	152	30.50

Appendix 5: Photographs of DNV Emissions Equipment



Figure 8: DNV Emission Sensor Equipment

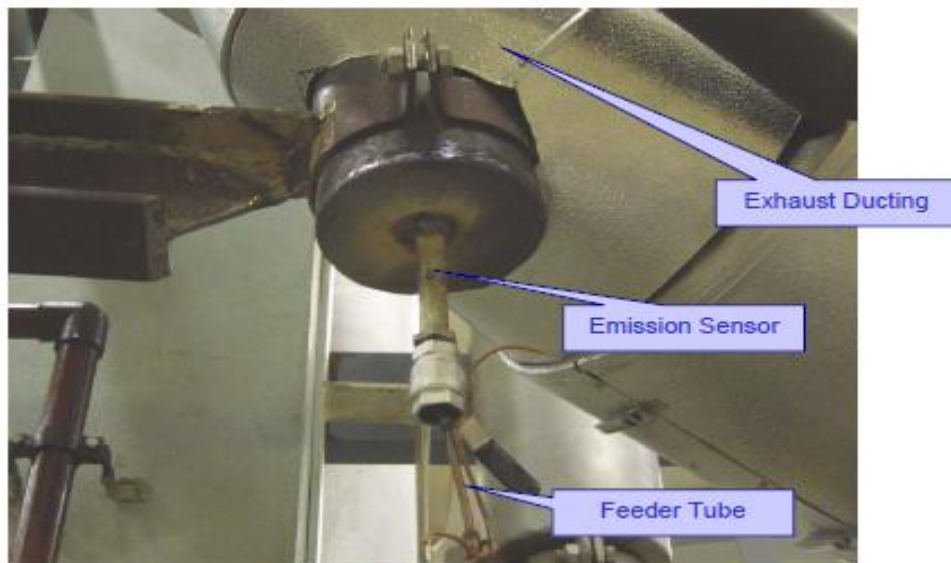


Figure 9: Emission Sensor in Exhaust Flute

Appendix 6: DNV Emissions Report

See separate report.

Appendix 7: Engine Vibration Graphs

