



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE DE UN SISTEMA “DUAL-FUEL”
SOBRE LA OPERACIÓN Y EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DIÉSEL USADO
PARA GENERACIÓN EN UN CAMPO PETROLERO

SERGIO PÉREZ SÚA

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Posgrados
Maestría en Ingeniería Mecánica
Bogotá, D. C., Colombia
2015



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE BOGOTÁ

INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DE AJUSTE DE UN SISTEMA “DUAL-FUEL”
SOBRE LA OPERACIÓN Y EL DESEMPEÑO DE UN MOTOR DIÉSEL USADO
PARA GENERACIÓN EN UN CAMPO PETROLERO

SERGIO PÉREZ SÚA

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería

Director:
MSc. Jorge Eduardo Arango

Línea de Investigación:
Energías Renovables y Motores de Combustión Interna

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Posgrados
Maestría en Ingeniería Mecánica
Bogotá, D. C., Colombia

2015

Tesis aprobada por la Facultad de Ingeniería en cumplimiento de los requisitos exigidos para otorgar el título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

MSc Jorge Eduardo Arango
Director de la tesis

Nombre del jurado:

Nombre del jurado:

A mi esposa, mi familia y mi Mateo, por su gran amor y apoyo incondicional, por regalarme su tiempo para poder cumplir esta meta.

“No me puedo resignar a que las cosas sean como son. Yo pienso que los seres humanos a través de su habilidad para pensar, su imaginación, entusiasmo y coraje pueden cambiar el orden de las cosas”

Hubert Perrodo

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Jorge Eduardo Arango docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia, por su constante apoyo, paciencia y orientación durante toda la investigación.

A Perenco Colombia por su incondicional apoyo y financiación de la investigación, por creer en la propuesta y permitir ponerla en práctica.

Al grupo de investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión energética UNAL, por su orientación, permitir compartir con sus integrantes y apoyo en la investigación.

RESUMEN

Se describe el sistema dual-fuel para motores diésel, operando los motores de combustión interna, donde se sustituyó parte del combustible con gas natural u otro combustible gaseoso. El sistema permite un ahorro económico significativo por la diferencia de precio entre el diésel y el gas natural, la disponibilidad de gas en sitio y la disminución en la emisión de gases contaminantes de la atmósfera debido a las bondades que presenta el gas natural frente al diésel. Se presentan los resultados de las pruebas realizadas a motores, y se indica la manera de aprovechar la tecnología dual-fuel en la industria petrolera.

Palabras clave: dual-fuel; motor diésel-gas natural; ahorro diésel; sustitución diésel por gas natural.

ABSTRACT

The dual-fuel system for diesel engines is described, which consists in substituting part of the fuel used by the internal combustion engine with natural gas or another gaseous fuel. This system allows significant savings in costs due to differences in the prices of diesel and natural gas, the on-site availability of gas, and the reduction in polluting gas emissions to the atmosphere attributable to the positive aspects of natural gas versus diesel fuel. The results of tests carried out on the dual-fuel engine are presented, and the best way to use this technology in the oil industry is indicated.

Key words: dual-fuel; natural gas/diesel engine; diesel saving; substituting diesel with natural gas.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	20
HIPÓTESIS.....	21
OBJETIVOS.....	21
Objetivo General.....	21
Objetivos Específicos.....	21
1. IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA “DUAL – FUEL”	
1.1. Motor de combustión interna.....	23
1.2. El sistema dual fuel.....	24
1.3. Principio de funcionamiento del sistema dual-fuel.....	28
1.4. Desventajas del sistema dual-fuel.....	29
1.5. Aplicación del sistema dual-fuel en campos petroleros.....	30
1.6. Implementación del sistema “ <i>dual-fuel</i> ” en un MEC de un campo petrolero	31
1.6.1. Datos del equipo en prueba.....	32
1.6.2. Descripción del gas natural y el diésel a utilizar en la prueba.....	33
1.6.3. Medición de carga eléctrica.....	34
1.6.4. Medición de gases de escape del motor.....	35
1.6.5. Medición de consumo de combustible diésel.....	36

1.6.6. Medición presión y temperatura	37
1.6.6.1. Presión	37
1.6.6.2. Temperatura	38
1.6.7. Medición del consumo de gas natural	38
1.6.8. Sistema dual -fuel a utilizar en la prueba	39
1.6.9. Esquema general de la prueba.....	41
1.6.10. Identificación de línea base de estudio.....	42

2. DETERMINACIÓN DE LOS NIVELES DE SUSTITUCIÓN DE DIÉSEL A DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA

2.1. Preparación para la prueba	43
2.1.1. Video check.....	43
2.1.2. Análisis de aceite	45
2.2. Pruebas con solo diésel.....	47
2.2.1. Consumo combustible/hora.....	47
2.2.2. Presión de aceite del motor	47
2.2.3. Presión de combustible.....	48
2.3. Protocolo de pruebas al equipo	48
2.4. Registro de datos del equipo	49
2.5. Registro de emisiones del equipo	53

3. IDENTIFICACION DE EFECTOS DE LOS AJUSTES DEL SISTEMA DUAL-FUEL SOBRE LAS VARIABLES DE DESEMPEÑO AMBIENTALES Y MECÁNICAS

3.1. Ajustes al sistema “dual-fuel”.....	57
3.2. Variación de la temperatura del gas natural.....	57
3.3. Modificación de la velocidad del motor.....	58
3.4. Modificación de la relación de compresión del motor.....	59
3.5. Cambio del tipo de gas.....	59
3.6. Variación del tiempo de inyección del combustible.....	60
3.7. Modificación de la cantidad de gas natural en la recámara.....	60
3.8. Variación de la carga del motor.....	61
3.9. MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MOTOR.....	62
3.10. RESULTADOS OBTENIDOS CON AJUSTE DE PARAMETROS.....	63
3.10.1. Carga del motor 25% del valor nominal.....	64
3.10.2. Carga del motor 50% del valor nominal.....	66
3.10.3. Carga del motor 75% del valor nominal.....	68
3.10.4. Carga del motor 100% del valor nominal.....	70
3.10.5. Análisis de los resultados de desempeño mecánico del motor.....	72
3.11. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS EMISIONES DE GASES A LA ATMOSFERA DESPUES DEL AJUSTE DE PARAMETROS.....	75
3.11.1. Emisiones de monóxido de carbono.....	77
3.11.2. Emisiones de dióxido de carbono (CO ₂).....	80
3.11.3. Emisiones de Óxidos nitrógeno (NO _x).....	83
3.11.4. Emisiones de Hidrocarburos (HC) en los gases de escape.....	86

4. IDENTIFICAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE EMISIONES DEL MOTOR EN PRUEBA MEDIANTE REDES NEURONALES A PARTIR DE LOS NIVELES DE SUSTITUCIÓN DEL SISTEMA “DUAL-FUEL”	
4.1.Introducción.....	89
4.2.Identificación de sistemas no lineales mediante Redes Neuronales.....	91
4.3.Planteamiento de la red neuronal para simular las emisiones del motor.....	94
4.4.Validación del modelo de la red neuronal.....	99
CONCLUSIONES GENERALES.....	104
BIBLIOGRAFIA.....	105

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Balance térmico del MCI.....	23
Tabla 2: Especificaciones del equipo en prueba.....	32
Tabla 3: Reporte de composición del gas.....	33
Tabla 4: Características del combustible diésel en Colombia.....	34
Tabla 5: Datos técnicos del analizador AEMC 3945-B.....	34
Tabla 6: Características técnicas del analizador de gases de combustión.....	36
Tabla 7: Características técnicas del contador de flujo.....	36
Tabla 8: Características técnicas del manómetro WIKA.....	37
Tabla 9: Características técnicas del termómetro WIKA.....	38
Tabla 10: Características técnicas del rotámetro WIKA.....	39
Tabla 11: Pruebas del equipo en modo diésel.....	49
Tabla 12: Comparación de resultados de prueba pruebas del equipo en modo diésel y dual-fuel.....	50
Tabla 13: Resultados de la sustitución de combustible diésel por gas natural.....	51
Tabla 14: Registro de datos analizador de gases de combustión.....	53
Tabla 15: Registro de datos – carga del equipo 25%.....	64
Tabla 16: Registro de datos – carga del equipo 50%.....	66
Tabla 17: Registro de datos – carga del equipo 75%.....	68
Tabla 18: Registro de datos – carga del equipo 100%.....	70
Tabla 19: Registro de datos de emisiones del equipo (variación carga y presión gas).....	76

Tabla 20: Matriz de datos reales de entrada y salida para entrenamiento de la RNA.....	97
Tabla 21: Datos de entrada y salida usados para validar el modelo.....	99
Tabla 22: Variables de salida obtenidas con el modelo de NNModel.....	100
Tabla 23: Errores relativos del modelo desarrollado en el software NNModel.....	100

LISTA DE GRAFICAS

Figura 1: Esquemático del sistema Dual-Fuel en modo HFO y LFO.....	26
Figura 2: Esquemático del sistema Dual-Fuel.....	26
Figura 3: Manómetro Wika para Medicion de presión gas.....	37
Figura 4: Termómetro Wika para gas.....	38
Figura 5: Rotámetro Wika LZB-4.....	39
Figura 6: Plano del sistema montado sobre el generador C27 Caterpillar.....	40
Figura 7: Componentes del sistema GTI Bi-fuel modelo GGT0065B.....	40
Figura 8: Diagrama del sistema dual –fuel, circuito de gas.....	41
Figura 9: Esquemático del montaje e Instrumentación de las pruebas.....	41
Figura 10: Resultado análisis de aceite motor C27.....	45
Figura 11: Datos técnicos del banco de resistencias Avtron.....	46
Figura 12: Consumo de combustible en modo diésel del generador C27.....	47
Figura 13: presión de aceite del generador C27 en operación.....	47
Figura 14: presión de combustible del generador C27 en operación.....	48
Figura 15: Consumo de combustible diésel de equipo C27 en los distintos modos de operación.....	52
Figura 16: Nivel de sustitución del diésel en el motor a diferentes porcentajes de carga.....	52
Figura 17: Emisiones de gases del generador C27 en modo solo diésel.....	54
Figura 18: Emisiones de gases del generador C27 en modo solo dual-fuel.....	54

Figura 19: Curva de emisiones de los diferentes gases de escape del motor C27 en operación dual fuel.....	55
Figura 20: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor - Carga del equipo 25%.....	65
Figura 21: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor - Carga del equipo 25%.....	65
Figura 22: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor - Carga del equipo 50%.....	67
Figura 23: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor - Carga del equipo 50%.....	67
Figura 24: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor - Carga del equipo 75%.....	69
Figura 25: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor Carga del equipo 75%.....	69
Figura 26: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor - Carga del equipo 100%.....	71
Figura 27: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor Carga del equipo 100%.....	71
Figura 28: Tasa de sustitución de combustible para diferentes régimen de carga del equipo.....	72
Figura 29: Consumo de diésel a diferentes régimen de carga del equipo.....	73
Figura 30: Nivel de sustitución para diferentes niveles de carga y presión de gas.....	74

Figura 31: Emisiones de CO a diferentes % de carga del equipo y presión de gas.....	77
Figura 32: Variación del CO con cambios en el % de carga del equipo.....	78
Figura 33: Emisiones de CO a diferentes % de carga y variación de gas en el motor.....	79
Figura 34: Emisiones de CO2 a diferentes % de carga del equipo y presión de gas.....	80
Figura 35: Variación del CO2 con cambios en el % de carga del equipo.....	81
Figura 36: Emisiones de CO2 a diferentes % de carga y variación de gas en el motor.....	82
Figura 37: Emisiones de NOx a diferentes % de carga del equipo y presión de gas.....	83
Figura 38: Variación del NOx con cambios en el % de carga del equipo.....	84
Figura 39: Emisiones de NOx a diferentes % de carga y variación de gas en el motor.....	85
Figura 40: Emisiones de HC a diferentes % de carga del equipo y presión de gas.....	86
Figura 41: Variación de los HC en gases de escape con cambios en el % de carga del equipo.....	87
Figura 42: Emisiones de HC a diferentes % de carga y variación de gas en el motor.....	88
Figura 43. Identificación de un sistema mediante red neuronal.....	91
Figura 44. Estructura de la red neuronal utilizada como modelo.....	95
Figura 45: Parámetros de entrenamiento de la red neuronal del modelo utilizado.....	95
Figura 46: Características y parámetros de las variables de entrada a la red neuronal.....	97
Figura 47: Dinámica del entrenamiento de la red neuronal.....	98
Figura 48: Matriz de pesos después del entrenamiento de la red neuronal.....	98
Figura 49: Modulo de interrogación del software NNModel.....	99
Figura 50: Validación del modelo de RNA para las variables CO (izquierda) y CO2 (derecha).....	101

Figura 51: Validación del modelo de RNA para las variables NOx (izquierda) y HC (derecha).....	102
Figura 52: Validación del modelo de RNA para el nivel de sustitución de combustible diésel.....	102
Figura 53: Predicción de emisiones CO (izquierda) y CO2 (derecha) en función de la carga del equipo y diferentes presiones de gas natural.....	103
Figura 54: Predicción de emisiones NOx (izquierda) y HC (derecha) en función de la carga del equipo y diferentes presiones de gas natural.....	103
Figura 55: Predicción del modelo para el porcentaje de sustitución de combustible Diésel.....	103

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografía 1: Generador a diésel Caterpillar C27	32
Fotografía 2: Analizador de parámetros eléctricos AEMC.....	35
Fotografía 3: Medidor de gases de escape E4400-C.....	35
Fotografía 4: Planta C27 con el sistema “dual-fuel”	43
Fotografía 5: Imágenes tomadas en el Video Check.....	44
Fotografía 6: Banco de resistencias Avtron.....	46
Fotografía 7: Generador C27 (detalle de la entrada de gas al equipo- mezclador).....	48
Fotografía 8: Detalle del sistema dual-fuel (entrada gas al motor).....	63

ABREVIATURAS

BTU	British Unit Thermal
CR	Relación de compresión
CC	Centímetros cúbicos
CO	Monóxido de carbono
DI	inyección directa
LPM	Litros por minuto
MEC	Motor encendido por compresión
NO	Óxido nitroso
ppm	partes por millón
psia	pie por pulgada cuadrada – valor absoluto
psig	pie por pulgada cuadrada – valor manométrico
Tea	Sistema para quema de excesos de gas en una facilidad petrolera
A	área en metros cuadrados
°C	Grados Celsius
°F	Grados Fahrenheit
ft ³	Pie cubico
HP	Caballo de fuerza
G/h	Galones por Hora
Kg	Kilogramo
m ³	metro cubico

m	masa (kg)
KVA	Kilo volta amperio
KW	Kilovatio
KWh	Kilovatio - hora
Z	Nivel de sustitución (%)

INTRODUCCION

En los campos petroleros el combustible diésel es utilizado en ciertas facilidades de producción de hidrocarburos, principalmente en motores de combustión interna encendidos por compresión (MECs) donde se ve aumentado en gran medida el costo de operación debido al precio de venta, el transporte y almacenaje del combustible; sumado a esto el manejo del combustible diésel en las estaciones de producción es bastante dispendioso y muchas veces las dificultades de transporte hasta las facilidades de producción que tienen una alejada y complicada localización geográfica hacen que no se cuente con un combustible limpio o que en oportunidades haya desabastecimiento del mismo. Todas estas situaciones encarecen, dificultan o restringen las operaciones de producción de hidrocarburos.

La tecnología actual ha permitido avances apreciables en la operación de los MECs bajo el esquema “dual-fuel”, sistema por el cual se sustituye parte del combustible con gas natural u otro combustible gaseoso, permitiendo beneficios económicos y operativos debido a las diferencias de precio o a la disponibilidad en situ. En el caso de la sustitución con gas natural usando la tecnología “dual-fuel”, se puede obtener el beneficio adicional de disminución en la emisión de gases contaminantes a la atmosfera, comparado con solo diésel. En el caso de la operación en campo petrolero, es posible utilizar el gas natural que se quema en la Tea para alimentar los MECs de las facilidades de producción, mejorando la logística, el almacenaje y reduciendo el consumo de diésel, principalmente en campos con poca producción de gas natural o en fase de pruebas de producción.

La implementación del sistema “dual-fuel” depende de diversos factores entre los que se incluyen: Flexibilidad tecnológica del motor, el tipo de carga, el tipo de gas utilizado y las condiciones de operación; por lo tanto es necesario realizar un estudio detallado que permita identificar aspectos relevantes y conseguir un sistema ajustable a la disponibilidad de gas in situ, utilizando de forma apropiada la energía suministrada.

¿Es posible realizar un estudio y pruebas que permitan el ajuste de un sistema “dual-Fuel” en

un MEC usado para generación en un campo petrolero, utilizando el gas de pozo según su disponibilidad?

¿Qué salvaguardas, precauciones, seguridades y restricciones se deben tener en cuenta en el ajuste de un MEC al implementar el sistema “dual-fuel”?

¿Qué cantidad máxima de combustible diésel puede ser remplazado en el motor en prueba de modo que se pueda operar de manera continua utilizando de forma apropiada la energía suministrada?

HIPÓTESIS:

Sí se implementa un sistema “Dual-Fuel” con parámetros ajustables en un MEC utilizando gas de pozo disponible en una facilidad petrolera, ¿es posible obtener ahorros de diésel utilizando de forma apropiada la energía?

OBJETIVO GENERAL Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

OBJETIVO GENERAL:

Realizar el estudio de la influencia de los parámetros de ajuste de un sistema “dual-fuel” sobre la operación y el desempeño de un motor diésel usado para generación en campos petroleros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Implementar un sistema “Dual –Fuel” con parámetros ajustables de motor y de sustitución de gas en un MEC usado para generación en un campo petrolero.

- Determinar los niveles de sustitución de diésel y las condiciones de ajuste del sistema “Dual-Fuel” para un MEC en prueba a diferentes condiciones de carga.
- Identificar los efectos de los ajustes del sistema “Dual-Fuel” sobre las variables de desempeño, ambientales y mecánicas de un MEC en prueba.
- Identificar el comportamiento mecánico y de emisiones del motor en prueba mediante redes neuronales a partir de los niveles de sustitución del sistema “dual-fuel”.

1. IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA “DUAL – FUEL”

1.1. MOTOR DE COMBUSTION INTERNA

Un motor de combustión interna (MCI) es un tipo de máquina térmica que genera energía mecánica a partir de la energía química de un combustible que arde dentro de una cámara de combustión [9], la energía producida en el eje del equipo se puede aprovechar para generar electricidad, mover equipos como bombas y compresores; adicionalmente se puede utilizar la energía en forma de calor que se produce durante la operación del motor para procesos de cogeneración [31].

Al balance resultante entre la cantidad de energía aportada por el combustible y la obtenida en el eje de un MCI se le denomina eficiencia o rendimiento al freno y depende del tipo de motor, las dimensiones de los cilindros, la relación de compresión, la carga, la velocidad de rotación y otros factores [32].

La tabla 1 presenta la distribución energética reportada en 2007 por Sanz et al en los dos tipos principales de MCI, donde se observa que la eficiencia al freno estaba entre el 25 y el 30 % y el calor de salida potencialmente aprovechable estaba entre el 60 y el 65% respecto a la suministrada por el combustible. A pesar de ser maquinas con relativamente baja eficiencia al freno han sido los equipos más utilizados para generar trabajo [36].

Componente del balance térmico	Tipo de Motor (combustible)	
	Diésel (%)	Gasolina (%)
Calor equivalente al trabajo efectivo	30	25
Calor cedido al refrigerante	30	30
Calor en los gases de escape	30	35
Fricción y Radiación	10	10

Tabla 1: Balance térmico del MCI, Sanz S [36], Adaptada

En la actualidad la eficiencia al freno de los MCI ha alcanzado valores del orden del 42% y continua siendo relativamente baja respecto a la energía suministrada pero se viene aprovechando cada vez más el calor residual que es de considerable magnitud, en procesos de cogeneración que optimizan la utilización de la energía suministrada por el combustible, mas no el rendimiento al freno del MCI [36].

El proceso de combustión es la reacción química exotérmica de una sustancia llamada combustible, con un comburente que generalmente es el oxígeno del aire. Para que se desencadene la reacción es necesario que coexistan tres elementos: Combustible (material que arde), comburente (material que hace arder) y un desencadenante (suministra la energía requerida para alcanzar la temperatura de inicio de la combustión) [8]. La combustión genera luminiscencia, calor y gases que dependen de la composición de los elementos que intervienen en la reacción, ellos pueden ser: CO₂, H₂O (como vapor), Hollín, NO_x, CO y otros [8].

Según su método de encendido se tienen los MCI de encendido provocado (MEP), en los cuales se produce la combustión de una mezcla homogénea de aire y combustible mediante el uso de una chispa eléctrica como desencadenante. Comúnmente utilizan gasolina, alcoholes o gas como combustible. También se tienen los MCI de encendido por compresión (MEC), cuya combustión se produce por auto-ignición del combustible al ir formando una mezcla heterogénea en la cámara de combustión en la medida que es inyectado en el aire comprimido [33]. El combustible utilizado en los MEC comúnmente es solo diésel pero es posible comprimir aire mezclado con un gas combustible e inyectar parte del diésel para iniciar la combustión, lo que se conoce como sistema Dual Fuel.

1.2. EL SISTEMA DUAL FUEL

El sistema Dual Fuel consiste en un equipamiento que se le adiciona a un motor diésel de serie (convencional) para permitir la operación simultánea del motor con dos combustibles: Uno líquido y otro gaseoso. El combustible líquido puede ser diésel o biodiésel y el

combustible gaseoso puede ser: Gas natural, gas licuado de petróleo (GLP), biogás u otro.

La utilización de sistemas para operar motores diésel con gas natural simultáneamente y conocidos como *Kit Dual-Fuel*, han sido estudiados por la academia y fabricantes de motores y componentes debido a las bondades que ofrecen en la reducción de costos de operación por la diferencia de precio entre los distintos combustibles [4] [5] y el potencial de reducción de emisiones contaminantes de Oxidos de Nitrogeno (NO_x), material particulado (PM), Monóxido de Carbono (CO) y Dióxido de Carbono (CO₂) [6].

Los menores costos de funcionamiento y el uso de fuentes alternativas de combustible con funcionamiento dual de combustible del motor han atraído a muchos investigadores a aplicar este tipo de tecnología en diferentes áreas. Los primeros experimentos con sistema de combustible dual fueron realizados por Cave en 1929 y Helmore y Sokes en 1930, en las que se indujo hidrógeno como combustible secundario en los motores diésel [7]. Sin embargo, en ese momento, el motor con sistema Dual-Fuel no se utilizó comercialmente debido a su complejidad mecánica y complicaciones debidas a relaciones de compresión relativamente bajas.

Actualmente se pueden encontrar aplicaciones de sistemas duales de combustible en motores usados en diversas aplicaciones desde el sector automotor, aplicaciones marinas, generación eléctrica y motores estacionarios en compresores y bombas. Específicamente para la aplicación en sistemas de generación eléctrica donde los sistemas de control operan de manera particular para mantener la velocidad de rotación del MCI alrededor de un valor de referencia, se han desarrollado dos tecnologías de operación dual:

- **HFO (*High Fuel Operation*):** Es la operación del MCI con una cantidad relativamente alta de diésel y presenta dos modos el cual consiste en la operación del MCI en dos modos de operación, el modo de operación normal en el cual el combustible diésel es controlado para producir el trabajo en el motor y el modo de sustitución en el cual parte del combustible diésel se reemplaza por un valor fijo de gas y se continua

regulando el diésel en la recámara. La principal ventaja técnica de este sistema es que permite la operación del motor con solo diésel, o diésel y gas en distintas proporciones lo cual le da gran flexibilidad al operador del equipo para trabajar el motor según la disponibilidad de gas que se tenga o la cantidad que desee ahorrar de diésel [11].

- LFO (*Low Fuel Operation*): modo de operación en el cual el combustible requerido es controlado por gas y se adiciona una pequeña cantidad de diésel que sirve como piloto para desencadenar la combustión en la cámara.

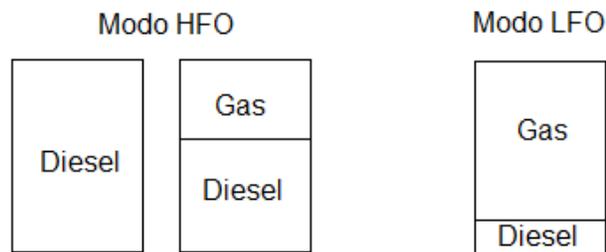


Figura 1: Esquemático del sistema *Dual-Fuel en modo HFO y LFO*

La figura 2 muestra el esquemático de funcionamiento del sistema Dual-Fuel en modo HFO, por un lado entra el gas a través de dispositivos que controlan la presión y por otro lado entra el aire a través del filtro de aire, los dos gases se mezclan y pasan al sistema de admisión del motor:

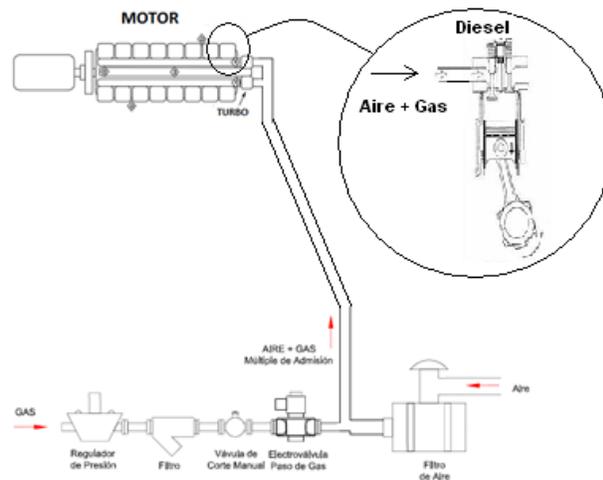


Figura 2: Esquemático del sistema *Dual-Fuel*

Los principales fabricantes de motores como Caterpillar, Man, Cummins, Deutz, Wartsila y otros en asocio con empresas fabricantes de componentes como Altronic ofrecen motores diésel que desde fabrica vienen con el sistema Dual-Fuel instalado o avalan ciertos kits que se pueden adquirir en el mercado y que al instalarlos no hacen que se pierda la garantía del motor.

El sistema presenta las siguientes características:

- La instalación del sistema dual no compromete el desempeño original del motor. Un equipo de 1000kw de potencia, mantendrá 1000kw luego de la instalación, funcionando ya sea con 100% diésel o en modo dual, no hay pérdida de potencia en el motor en los rangos normales de operación del sistema, solo en algunos casos se puede presentar una disminución de potencia y es debido a la composición del gas, sin embargo disminuyendo la cantidad de diésel remplazada por gas se puede recuperar la potencia pérdida [26].
- El motor no presenta inconvenientes por pérdida de estabilidad o velocidad de respuesta ante cambios de carga [26].
- El sistema está diseñado para pasar de modo dual a modo diésel sin inconvenientes durante la transición y puede realizarse el cambio de manera gradual o inmediata [26].
- Los parámetros de calor por radiación, eficiencia, calor de escape y calor liberado al sistema de refrigeración, permanecen prácticamente inalterables respecto a los valores originales suministrados por el fabricante del motor, por lo que los motores en grupos electrógenos utilizados en programas de cogeneración recuperan la misma cantidad de calor funcionando en el modo dual como en el modo 100% diésel [12].
- La reducción de los gases contaminantes como los NOx es considerable, está en el

orden del 60%, al igual que la reducción de las sustancias particuladas emanadas por el escape (se calcula también en un 60% aproximado) [13].

- Se han reportado extensiones en los intervalos de cambio de aceite y en la vida útil de los motores debido fundamentalmente al resultado de la limpia combustión que caracteriza al gas natural [5] [26].

1.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA DUAL-FUEL

El proceso de combustión del motor con el sistema Dual-Fuel en esencia es un sistema híbrido que combina las características de los motores de encendido por chispa y de los motores encendidos por compresión. En un motor convertido a operación dual, se le adiciona a la recámara de combustión una mezcla de aire-combustible gaseoso, la cual es denominada combustible primario, al final de la carrera de compresión se inyecta una cantidad determinada de diésel, este combustible es denominado piloto, el cual debido a las condiciones de alta presión y temperatura al interior del cilindro, se auto-enciende e inicia el proceso de combustión de la mezcla aire-combustible primario [17] [18] [19]. Se puede observar en la *figura 2* como entra una mezcla de aire y gas a la recámara de combustión y finalmente una porción de diésel, todos estos elementos al final de la carrera de compresión desencadenan la combustión y se genera movimiento en el pistón

Las investigaciones realizadas en torno a motores diésel operando simultáneamente con gas han logrado una sustitución del diésel por gas natural hasta del 85% según el tipo de motor y la aplicación [4] [6], por encima de este nivel se ha encontrado que se presentan problemas en inyectores, golpeteo en el motor, vibraciones anormales y alta temperatura [6], sin embargo todo depende del tipo de motor, combustibles, carga del equipo y el lugar de operación entre otros factores, por lo cual se deben realizar pruebas en cada equipo para determinar los límites de operación de cada unidad.

Un motor diésel con el sistema Dual-Fuel no puede operar con 100% gas debido a que la temperatura de ignición del gas natural es relativamente alta (aproximadamente 1300 grados Fahrenheit), esta temperatura no se genera durante la compresión del diésel en el cilindro del motor de modo que pueda encender el gas natural; durante la operación bi-combustible, una cantidad de combustible diésel es requerida para actuar como la fuente de ignición de la mezcla aire-gas [26].

Las investigaciones realizadas por Altronic Inc, uno de los proveedores de kits Dual-Fuel establecen que por cada galón de diésel #2 que se emplace en un motor se requieren aproximadamente 140 SCF (Standard Cubit Feet) de Gas Natural [34].

1.4. DESVANTAJAS DEL SISTEMA DUAL-FUEL

Las investigaciones realizadas han arrojado que los problemas que se pueden presentar con el uso del sistema Dual-Fuel son:

- El principal problema de operación del motor en modo dual de combustible es que a baja carga, la eficiencia del sistema disminuye, es decir la cantidad de diésel que se puede remplazar por gas (Z) es baja en comparación con otros puntos de mayor carga en el equipo, por lo cual el sistema es más eficiente (mayor sustitución de diésel por gas) a medida que se aumenta la potencia exigida al motor [20] [21], definida la tasa de sustitución de combustible diésel como:

$$Z = \left(\frac{\dot{m}_{DI} - \dot{m}_{DD}}{\dot{m}_{DI}} \right) * 100 \quad (1)$$

Z : Nivel de sustitución (%)

\dot{m}_{DI} : Consumo másico de diésel en modo diésel

\dot{m}_{DD} : Consumo másico de diésel en modo dual

- Las emisiones de hidrocarburos no quemados y monóxido de carbono cuando el equipo opera con baja carga pueden ser más altos en comparación con el funcionamiento con solo diésel [20] [21].
- Según el tipo de gas y su composición se pueden presentar problemas con los componentes del motor en contacto con este, los principales problemas se han reportado por gas con H₂S lo cual hace que se requiera disminuir el periodo para *overhaul* del equipo, otro problema reportado ha sido la presencia de condensados en el gas de pozo por lo cual un *scrubber* en el circuito de gas es deseable [5].

Debido a lo anterior siempre es recomendable operar el motor con el sistema Dual-Fuel con carga mayor al 50% del valor nominal, sin que esto excluya que se puede operar con régimen de carga menor sí para el operador no es relevante el tema de cantidad de gas a utilizarse o las emisiones, además de un buen filtro de gas y/o *scrubber* dependiendo de la composición del gas.

1.5. APLICACIÓN DEL SISTEMA *DUAL-FUEL* EN CAMPOS PETROLEROS

El consumo de combustible diésel en los equipos de las facilidades de producción que utilizan este combustible en sus motores de combustión interna afecta en gran medida el costo de la operación debido a su precio, transporte y almacenaje.

El manejo del combustible diésel en las estaciones de producción no es el más adecuado y sumado a las dificultades de transporte que en muchas veces se tiene por la localización geográfica de las facilidades de producción, hacen que no se cuente con un combustible limpio o en oportunidades se sufra de desabastecimiento del mismo lo cual dificulta o

restringe las operaciones de producción de hidrocarburos con su implicación económica.

La implementación del sistema en los motores diésel permite ahorros económicos debido a las diferencias de precio entre el diésel y el gas natural o por la disponibilidad que se tenga de gas; así como una disminución en la emisión de gases contaminantes a la atmosfera debido a las bondades que presenta el gas natural frente al diésel. La tecnología Dual-Fuel le permite a las compañías petroleras aprovechar el gas natural que es quemado en la Tea, para ser utilizado en los motores usados en las facilidades de producción con lo cual se obtienen ahorros económicos, en logística y almacenamiento de combustible principalmente en campos con poca producción de gas natural o en fase de pruebas de producción.

La implementación optima depende de diversos factores entre los que se incluyen: Tipo de motor, la aplicación del equipo, el tipo de gas usado y las condiciones de operación; por lo cual realizar un estudio detallado que permita identificar los aspectos relevantes que involucran toda la correcta implementación del sistema y pruebas para obtener el mejor punto de operación, llevara a buen término y con resultados óptimos para la empresa la inversión realizada y los beneficios que se obtengan de esta tecnología. La aplicación del sistema en el sector de hidrocarburos se puede dar en bombeo, compresores, bombas o generación eléctrica, si se utiliza el gas de pozo siempre es recomendable la utilización de filtros de gas y la instalación de scrubber de modo que se pueda entregar al motor un gas con la mejor calidad posible.

1.6. IMPLEMENTACION DEL SISTEMA “DUAL-FUEL” EN UN MEC DE UN CAMPO PETROLERO

Con el objetivo de evaluar el desempeño mecánico y ambiental del motor diésel con el sistema “dual-fuel” para generación en campos petroleros, inicialmente se seleccionó un grupo electrógeno diésel representativo de las facilidades utilizadas en el sector petrolero y

se diseñó un protocolo de pruebas para identificar la línea base del grupo electrógeno y del motor operando con diésel, de forma que se utilice para identificar los distintos niveles de sustitución y cargas del equipo. Esto con el fin de determinar las acciones para mejorar el nivel de sustitución en el equipo en prueba

1.6.1. Datos del equipo en Prueba

Para identificación física del grupo electrógeno seleccionado se presenta la fotografía 1 y las características técnicas se indican en la tabla 2:

<i>Ítem</i>	<i>Especificación</i>
Modelo	C27Genset
Marca grupo electrógeno	Caterpillar
Motor	Caterpillar C27
Tipo	4 tiempos- Turbocargado,
Cilindros	12 - Relación compresión 16.5:1
Velocidad	1.800 rpm
Potencia	1.105 hp
Tiempo de inyección	25 - 45 B.T.D.C
Tensión generación	480 Voltios
Potencia	906 kVA/ 725 kW
Factor de potencia	0.8

Tabla 2: Especificaciones del equipo en prueba



Fotografía 1: Generador a diésel Caterpillar C27

1.6.2. Descripción del gas natural y el diésel a utilizar en la prueba

- Cromatografía del gas de pozo a utilizar (realizado por Core Laboratories Colombia):



CORE LABORATORIES

COMPANY: PERENCO

Compositional Analysis of Fuel Gas to C12+

Sampling Date	04-Oct-2014
Sampling Location	ESTACION SARDINAS
Cylinder Number	CLMA 259
Sample Description	ENTRADA GENERADORES
Sampling Conditions	109.0 psig @ 94.0°F

Component	Mole %	Weight %
CO ₂ Carbon Dioxide	5.30	10.34
N ₂ Nitrogen	0.52	0.65
C ₁ Methane	75.34	53.60
C ₂ Ethane	9.61	12.81
C ₃ Propane	4.89	9.56
iC ₄ i-Butane	1.14	2.94
nC ₄ n-Butane	1.45	3.75
iC ₅ i-Pentane	0.54	1.74
nC ₅ n-Pentane	0.38	1.20
C ₆ Hexanes	0.33	1.21
C ₇ Heptanes	0.29	1.18
C ₈ Octanes	0.15	0.68
C ₉ Nonanes	0.03	0.16
C ₁₀ Decanes	0.01	0.04
C ₁₁ Undecanes	0.01	0.07
C ₁₂₊ Dodecanes plus	0.01	0.07

Totals : 100.00 100.00

Note: 0.00 means less than 0.005.

Calculated Residue Properties	Mole Weight (g mol ⁻¹)	Density (g cm ⁻³ at 60°F)
C ₇₊ Heptanes plus	97.0	0.7696
C ₈₊ Octanes plus	108.3	0.7873
C ₁₂₊ Dodecanes plus	163.9	0.8024

Calculated Whole Gas Properties		
Gas Gravity	0.7806	(Air=1 @ 14.73 psia & 60°F)
Whole Sample Mole Weight	22.560	g mol ⁻¹
Ideal Gas Density	0.9513	kg m ⁻³ @ 14.65psia, 60°F
Ideal Gross Calorific Value	1216.9	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Ideal Net Calorific Value	1104.2	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Pseudo Critical Press.	681.70	psia
Pseudo Critical Temp.	409.10	Rankine
Gas Compressibility Factor, Z	0.996256	@ 14.65 psia & 60°F
GPM (80% Propane)	2.61	Gal/1000 PC
GPM (100% Propane)	2.88	Gal/1000 PC

Additional Information		
Real Gross Calorific Value	1221.5	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F
Real Net Calorific Value	1108.4	BTU.ft-3 @ 14.65psia, 60°F

Tabla 3: Reporte de composición del gas

- Características del combustible diésel a utilizar (reporte del Instituto Colombiano del Petróleo)

Características	Unidades	Métodos	Valor
Índice de Cetano		ASTM D-4737	56 - 58
Viscosidad a 40 °C	mm ² /s	ASTM D 445	1,9
Lubricidad	Micrómetros	ASTM D 6079	
Azufre	Ppm		30 - 50
DENSIDAD	(Kg/m ³)		825-835
API			38 - 40

Tabla 4: Características del combustible diésel en Colombia (Fuente Ecopetrol)

1.6.3. Medición de carga eléctrica

La potencia entregada por el equipo es medida con un analizador de calidad de energía marca AEMC, modelo 3945-B (fotografía 2), con las características indicadas en la tabla 5 y última calibración efectuada en febrero de 2014:

Medida	Rango	Resolución	Precisión
Voltaje	15 - 480 V	0,1V	0,5% ± 2 cts
Frecuencia	40 - 69 Hz	0,01 Hz	± 0,01 Hz
Corriente	0-1200 A	0,1 A	± (0,5% + 2 cts)
Potencia Real	0 - 9999 kW	4 dígitos	± 1%
Potencia Reactiva	0 - 9999 kVAR	4 dígitos	± 1%
Potencia Aparente	0 - 9999 kVA	4 dígitos	± 1%
factor de potencia	"-1 ,00 a 1,00"	0,001	± 1,5%
Energía eléctrica	0 - 9999 MWh	4 dígitos	± 1%

Tabla 5: Datos técnicos del analizador de calidad de energía AEMC 3945-B



Fotografía 2: Analizador de parámetros eléctricos AEMC

1.6.4. Medición de gases de escape del motor

Se realizan mediciones de gases de escape del motor, se utilizó el analizador de gases de combustión y emisiones, modelo E4400-C, marca E-Instruments con las siguientes características:



Fotografía 3: Medidor de gases de escape E4400-C

Parámetro	Sensor	Rango	Resolución	Precisión
O2	Electroquímico	0 - 25%	0.1%	±0.2% vol
CO	Electroquímico	0 - 8000 ppm	1 ppm	±10 ppm
CO2	Calculado	0 - 99.9%	0.1%	
NO	Electroquímico	0 - 5000 ppm	1 ppm	±5 ppm
NOx	Calculado	0 - 5000 ppm	1 ppm	
CxHy	Pellistor	0 - 5 %	0.01 %	±5 %
Exceso de aire	Calculado	0 - 850 %	1%	
Eficiencia	Calculado	0 - 100 %	0.1%	
Temperatura	Tc K	(- 20 a 1250°C)	0.1°C	

Tabla 6: Características técnicas del analizador de gases de combustión

1.6.5. Medición de consumo de combustible diésel

Para la medición del flujo y consumo de combustible diésel se utiliza contadores marca GW modelo TM-10 que permite medir flujo, volumen y tiempo, se instalaron en la línea de alimentación del motor y la línea de retorno:

Parámetro	Especificación
Presión máxima servicio	300 psi
Precisión	1,50%
Rango flujo	18.9 a 190 LPM
Rango temperatura	-40°C a +121°C

Tabla 7: Características técnicas del contador de flujo

1.6.6. Medición presión y temperatura

La medición de los parámetros de temperatura y presión se realiza con instrumentos marca WIKA con las siguientes características:

1.6.6.1. PRESIÓN

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	233 -34
	Parámetro	Presión
	Ultima Calibración	Julio 2014
Presión máxima servicio	10 psi	
Precisión	0,50%	
Rango presión	"- 20°C a +65°C"	

Tabla 8: Características técnicas del manómetro WIKA



Figura 3: Manómetro Wika para Medición de presión gas

1.6.6.2. TEMPERATURA

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	A50
	Parámetro	Temperatura
	Ultima Calibración	Julio 2013
Temperatura máxima servicio	75 °C	
Precisión	clase 2	
Rango temperatura	"- 20°C to +60°C"	

Tabla 9: Características técnicas del termómetro WIKA



Figura 4: Termómetro Wika para gas

1.6.7. Medición del consumo de gas natural

El consumo de gas natural es medido con un Rotámetro marca WIKA

Equipo	Marca	WIKA
	Modelo	LZB-4
	Parámetro	Flujo
	Ultima Calibración	Julio 2013
Presión máxima servicio	100	psi
Precisión	0,5%	
Rango	100 - 500	ft ³ /h
	500 - 1000	ft ³ /h
	1000 - 5000	ft ³ /h

Tabla 10: Características técnicas del rotámetro WIKA



Figura 5: Rotámetro Wika LZB-4

1.6.8. Sistema dual –fuel a utilizar en la prueba

En el mercado existen diferentes proveedores de Sistemas dual-fuel que se adaptan a las necesidades del cliente y de diversos precios y calidades, para las pruebas fue adquirido un

sistema de Altronic inc el cual es avalado por Caterpillar para ser usado en sus motores y el cual también ofrecen como un kit pre-instalado desde fábrica.

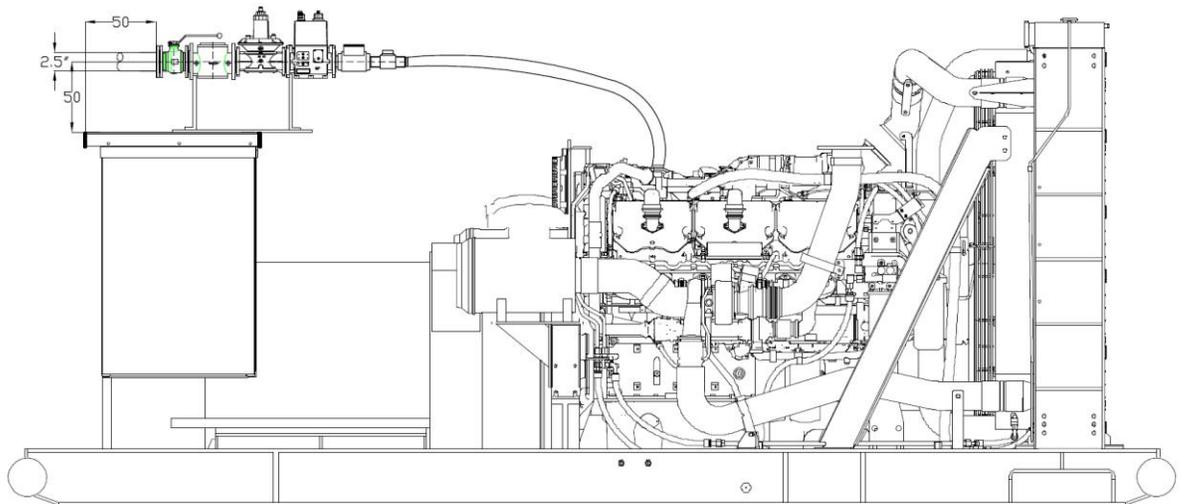


Figura 6: Plano del sistema montado sobre el generador C27 Caterpillar

El sistema escogido es el paquete básico de la línea GTI Bi-fuel, serie 65, modelo GGT0065B, el kit cuenta con su sistema de medición en línea de parámetros del equipo en panel y almacenamiento en PLC.



Figura 7: Componentes del sistema GTI Bi-fuel modelo GGT0065B

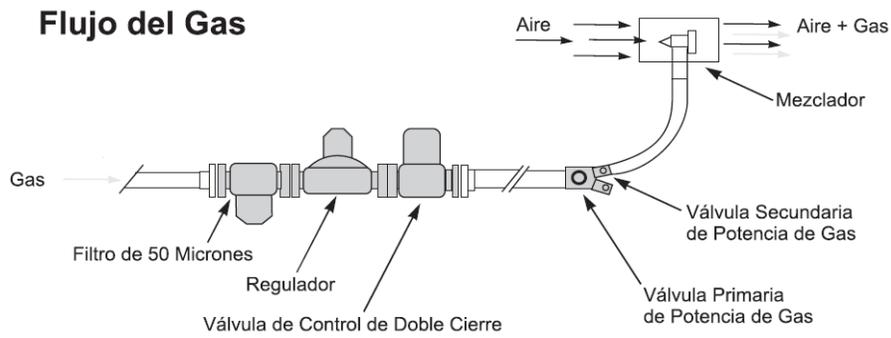


Figura 8: Diagrama del sistema *dual-fuel*, circuito de gas

1.6.9. Sistema dual –fuel a utilizar en la prueba

El generador diésel de la estación de Producción fue adecuado con la Instrumentación requerida para la prueba, las adecuaciones fueron hechas aprovechando las facilidades existentes de alimentación de gas. El esquemático del sistema de la prueba se presenta a continuación

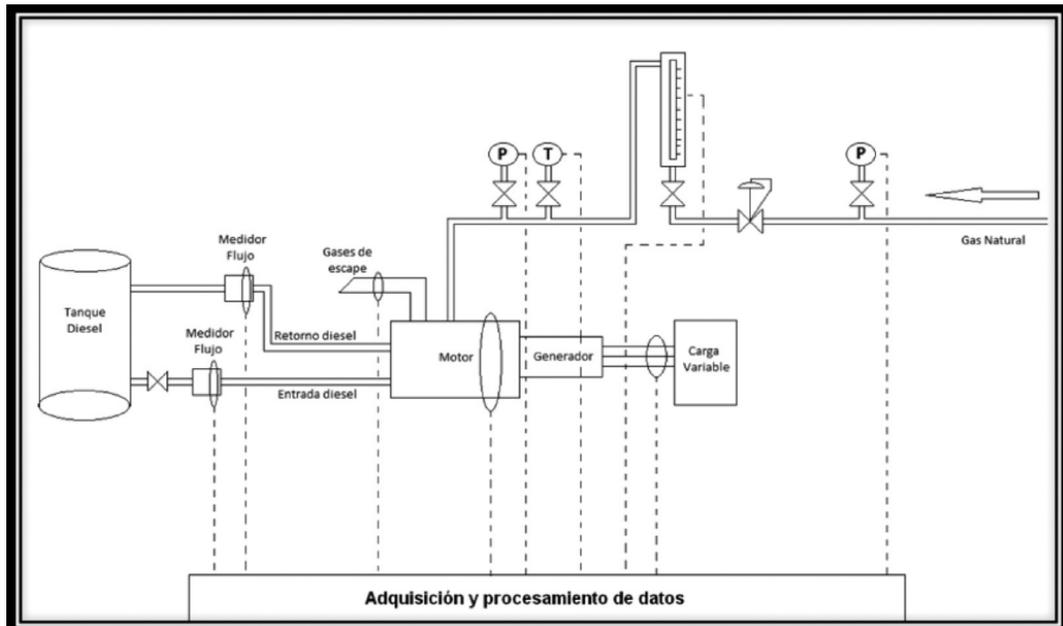


Figura 9: Esquemático del montaje e Instrumentación de las pruebas

El sistema “*dual-fuel*” fue instalado en compañía del personal de Altronic inc, se realizaron los ajustes de fábrica y se verifica el correcto funcionamiento del sistema, se tienen todos los datos tomados de forma digital en el panel del *Generator set* y en el panel del sistema “*dual-fuel*”, los únicos datos que no se almacenan digitales son los de consumo de combustible en los medidores de flujo y de consumo de gas, los datos de presión de gas y temperatura del mismo son análogos y se usan para llevar el consumo a valores de FT/hr estándar (60 °F y 14.73 psi)

1.6.10. Identificación de línea base de estudio

El sistema para su correcto estudio requiere se identifique una línea base de resultados a partir de los cuales realizar análisis y proponer modificaciones para buscar optimizar el modelo y mejorar los resultados, la línea base se ha dividido en 2 secciones:

- Línea base de resultados para el motor operando en modo diésel
- Línea base de resultados para el motor operando en modo “dual – fuel” antes de los ajustes de parámetros.

2. DETERMINACION DE LOS NIVELES DE SUSTITUCION DE DIÉSEL A DIFERENTES CONDICIONES DE CARGA

2.1. PREPARACION PARA LA PRUEBA

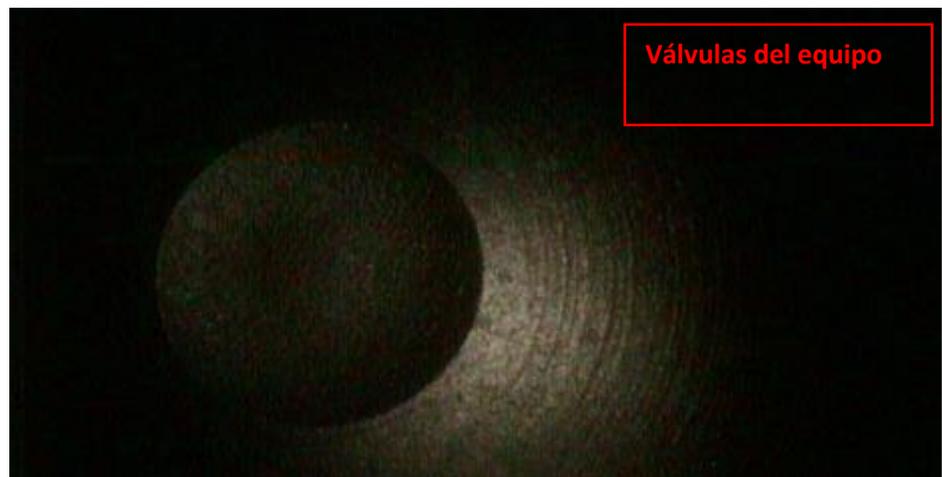
El generador diésel adecuado para la prueba, fue aislado del sistema de generación de la estación y se le realizó un *video check* interno para verificar el correcto estado del equipo



Fotografía 4: Planta C27 con el sistema “*dual-fuel*”

2.1.1. VIDEO CHECK

Las imágenes muestran como el equipo se encuentra en buenas condiciones de trabajo, como novedad algunos rayones en la pared del cilindro 3, con la certeza del estado del equipo, se programa cambio de aceite del equipo y se toma muestra del aceite.



Fotografía 5: Imágenes tomadas en el *Video Check*

2.1.2. ANALISIS DE ACEITE

Los análisis de aceite del motor antes de las pruebas muestran los siguientes resultados

CO003021	
Descripción	SAD C27
Aplicación	Motor
Fabricante	CATERPILLAR
Modelo	C-27
Lubricante Registrado	MOBIL DELVAC MX 15W40
Datos del lubricante	
Ev. de Contamin.	+Precaución
Evaluación Equipo	Normal
Ev. del Aceite	+Alerta
Viscosidad @ 100C	*10.7
Viscosidad SAE	30
Ind. de Refrigerante	NoDetectado
Dil. Comb. (%vol)	+2.59
Oxidación (Ab/cm)	1
Índice PQ	0
Hollín (%p/p)	0.28
TBN (mg KOH/g)	6.8
Agua (%vol)	NoDetectado
Elementos Del Desgaste- ppm (mg/kg)	
Ag (Plata)	0
Al (Aluminio)	0
Cr (Cromo)	0
Cu (Cobre)	19
Fe (Hierro)	35
Mo (Molibdeno)	1
Ni (Níquel)	2
Pb (Plomo)	0
Sn (Estaño)	0
Elementos contaminantes- ppm (mg/kg)	
B (Boro)	0
K (Potasio)	2
Na (Sodio)	4
Si (Silicio)	1
V (Vanadio)	0
Elementos aditivos- ppm (mg/kg)	
Ba (Barium)	0
Ca (Calcio)	2397
Mg (Magnesio)	270
P (Fósforo)	1167
Zn (Zinc)	1328

Figura 10: Resultado análisis de aceite motor C27

El equipo muestra en alerta la viscosidad pero es normal en estos equipos, los periodos de cambio del aceite son de 500 horas y en los valores históricos siempre se ha presentado esta novedad.

Al equipo se le instala un banco de resistencias variable de modo que se puedan realizar todas las pruebas requeridas a distintos niveles de carga, el banco de resistencias que se dispone es un Avtron:



Fotografía 6: Banco de resistencias Avtron

Las características técnicas del equipo son:

Load Capacity Ratings: (3 Phase, 60Hz)
Available Load Step Resolution: 5 KW

Rated KW	Load Capacity KW
500	500 KW @ 480 VAC, 500 KW @ 240 VAC, 375 KW @ 208 VAC
1000	1000 KW @ 480 VAC, 1000 KW @ 240 VAC, 750 KW @ 208 VAC
1250	1250 KW @ 480 VAC, 1250 KW @ 240 VAC, 500 KW @ 208 VAC

NOTE Refer to Operation and Maintenance Manual for safe towing instructions.

Figura 11: Datos técnicos del banco de resistencias Avtron

2.2. PRUEBAS CON SOLO DIÉSEL

Antes de iniciar las pruebas del equipo, se toman parámetros del generador trabajando con solo diésel para verificar el funcionamiento de todo el sistema y la instrumentación

2.2.1. Consumo Combustible/hora

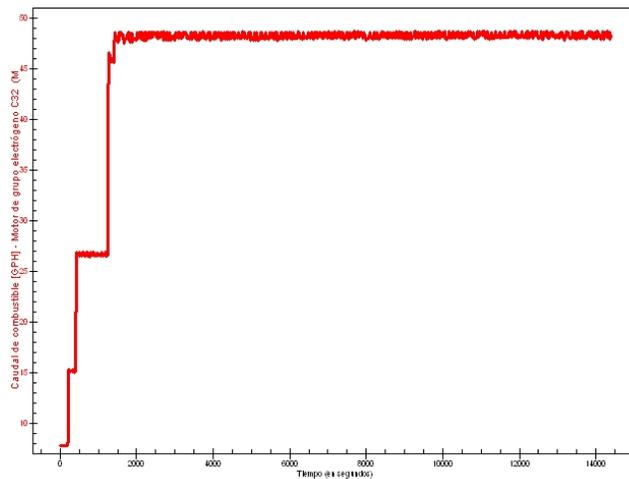


Figura 12: Consumo de combustible en modo diésel del generador C27

2.2.2. Presión de aceite del motor

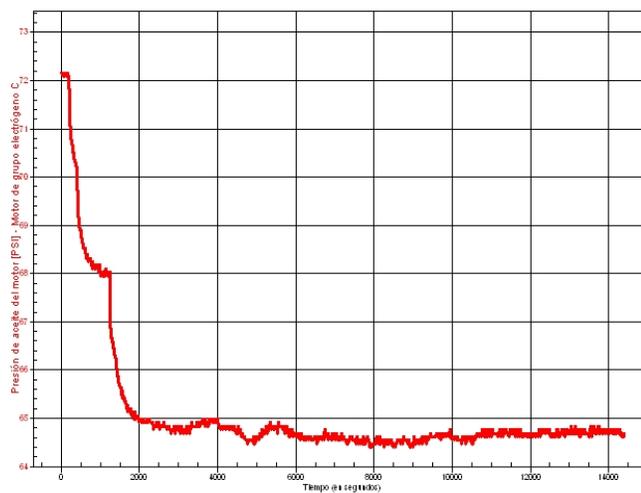


Figura 13: presión de aceite del generador C27 en operación

2.2.3. Presión de combustible

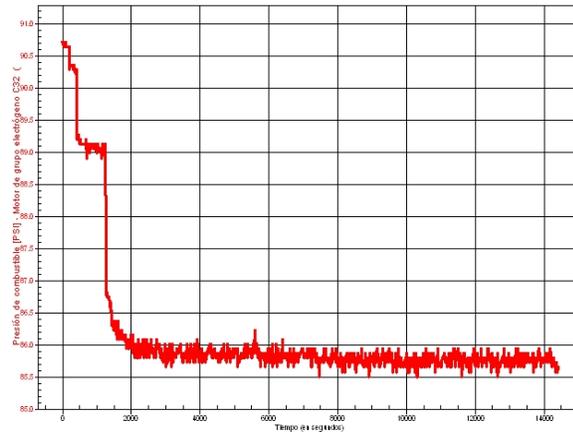


Figura 14: presión de combustible del generador C27 en operación

2.3. PROTOCOLO DE PRUEBAS AL EQUIPO

El equipo fue puesto en prueba utilizando una carga variable de tipo eléctrica, constituida por un banco de resistencias variable que para lograr los niveles requeridos de carga del equipo, los datos se consignan en tablas para ser comparados, todos los datos fueron tomados 3 veces y se consigna el valor promedio medido



Fotografía 7: Generador C27 (detalle de la entrada de gas al equipo- mezclador)

- Se enciende el equipo y se deja 15 minutos en vacío hasta que el equipo tiene parámetros estables de temperatura, presión de gases de escape, consumo de combustible
- Para cada nivel de carga se deja un tiempo de prueba de 1 hora. Las pruebas inician desde baja carga hasta el 100% de la nominal del equipo, posteriormente se disminuye la carga hasta llegar a 0%. Con base en la bibliografía consultada se debe tener especial monitoreo de la temperatura del equipo y la detonación razón por la cual al equipo se le instalaron 2 sensores de detonación, uno en cada bancada.

2.4.REGISTRO DE DATOS DEL EQUIPO

Los datos de operación y registro de datos se consignaron en tablas de modo que se pudieran comparar los datos para asegurarse que ningún valor estuviera fuera de rango del fabricante.

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PLANTAS ELECTRICAS EN BANCO DE CARGA										CSRF06V5 Vigencia:2006-07-18 Pág. 1 de 1		
FECHA DE EVALUACION :		20	4	2015	PRUEBA CON DIESEL A LA C27 DE SAD							
		(DD)	(MM)	(AA)								
Orden de trabajo	Cliente	Tipo de Reparación			Tipo de Contrato		KW Placa	Duracion Prueba		Horometro		
							725	7 horas				
MOTOR						GENERADOR						
Modelo: C 27		Serie_ MJE01218		Arreglo: 280 4140		Modelo: SR4B		Serie AFN 03392		Arreglo: 133 6590		
SECUENCIA DE LA PRUEBA												
CARGA APLICADA (KW)	CARGA %	TIEMPO DE CARGA	GENERADOR				MOTOR					
			VOLTAJE	FRECUENCIA	AMPERAJE	VOLTAJE BATERIA	RPM	PSI ACEITE	TEMP. AGUA °F	TEMP. AMBIENTE °F	TEMP. ESCAPE °F	
0	0	0,1	480	60,2	0	27	1803	70	175	90	385	
180	25	1,0	480	60,2	218	27	1803	68	180	90	402	
380	50	1,0	480	60,2	453	27	1803	68	181	90	540	
560	75	1,0	480	60,2	673	27	1803	65	185	91	624	
723	100	1,0	480	60,2	869	27	1804	64	185	91	780	
720	100	1,0	480	60,2	869	27	1803	64	187	91	780	
560	75	1,0	480	60,2	675	27	1803	68	186	91	625	
380	50	1,0	480	60,2	455	27	1803	68	182	90	542	
180	25	1,0	480	60,2	220	27	1803	68	180	89	403	
TEMPERATURAS EN LOS CILINDROS												
CARGA (%)	CIL 1 °F	CIL 2 °F	CIL 3 °F	CIL 4 °F	CIL 5 °F	CIL 6 °F	CIL 7 °F	CIL 8 °F	CIL 9 °F	CIL 10 °F	CIL 11 °F	CIL 12 °F
50	480	500	640	560	630	520	600	550	515	530	490	460
100	580	590	720	680	770	730	740	720	715	690	600	580

Tabla 11: Pruebas del equipo en modo diésel

Los registros de datos del equipo no presentan novedades en la prueba en solo modo diésel, posteriormente se procede a realizar pruebas en modo dual-fuel con los siguientes resultados los cuales se presentan en modo diésel y dual para poder comparar:

PROTOCOLO DE PRUEBAS DE PLANTAS ELECTRICAS EN BANCO DE CARGA										CSRF06V5			
										Vigencia:2006-07-18			
										Pág. 1 de 1			
FECHA DE EVALUACION :				21		4		2015		PRUEBA CON DIESEL A LA C27 DE SAD			
				(DD)	(MM)	(AA)							
Orden de trabajo		Cliente		Tipo de Reparación		Tipo de Contrato		KW Placa		Duracion Prueba		Horometro	
								725		7 horas			
MOTOR						GENERADOR							
Modelo: C 27		Serie MJE01218		Arreglo: 280 4140		Modelo: SR4B		Serie AFN 03392		Arreglo: 133 6590			
SECUENCIA DE LA PRUEBA													
CARGA APLICADA (KW)		CARGA %	TIEMPO DE CARGA	GENERADOR				MOTOR					
				VOLTAJE	FRECUENCIA	AMPERAJE	VOLTAJE BATERIA	RPM	PSI ACEITE	TEMP. AGUA °F	TEMP. AMBIENTE °F	TEMP. ESCAPE °f	
Solo diesel	0	0	0,1	480	60,2	0	27	1803	70	175	92	385	
Dual	0	0	0,1	480	60,2	0	27	1803	70	175	92	380	
Solo diesel	180	25	1,0	480	60,2	218	27	1803	68	180	92	402	
Dual	180	25	1,0	480	60,2	219	27	1803	68	180	93	391	
Solo diesel	380	50	1,0	480	60,2	453	27	1803	68	181	93	540	
Dual	380	50	1,0	480	60,2	450	27	1803	68	180	93	525	
Solo diesel	560	75	1,0	480	60,2	673	27	1803	65	185	94	624	
Dual	560	75	1,0	480	60,2	675	27	1803	65	184	94	601	
Solo diesel	720	100	1,0	480	60,2	869	27	1803	64	187	94	780	
Dual	720	100	1,0	480	60,2	871	27	1803	64	187	94	760	
Solo diesel	560	75	1,0	480	60,2	675	27	1803	68	186	93	625	
Dual	560	75	1,0	480	60,2	670	27	1803	68	185	93	602	
Solo diesel	380	50	1,0	480	60,2	455	27	1803	68	182	93	542	
Dual	380	50	1,0	480	60,2	458	27	1803	68	182	92	526	
Solo diesel	180	25	1,0	480	60,2	220	27	1803	68	180	92	403	
Dual	180	25	1,0	480	60,2	227	27	1803	68	181	92	394	

Tabla 12: Comparación de resultados de pruebas en modo diésel y dual-fuel

Los datos registrados muestran que la temperatura motor del equipo no se incrementó debido a la utilización del sistema *dual-fuel* lo cual era una de las preocupaciones que se tenían debido a las características de la combustión del gas, lo que se pudo observar aunque en poca proporción es que la temperatura de los gases de escape disminuyo levemente (aproximadamente 20 °F en promedio) para regímenes de carga del 50% y superiores, esta información no había sido documentada o mencionada por ninguno de los autores de los artículos consultados acerca de pruebas con *dual-fuel*.

Para efectos de cálculos y comparativos de esta investigación los valores de sustitución de combustible son calculados a partir de la siguiente fórmula que es la utilizada por los autores de artículos relacionados con el tema:

$$Z = \left(\frac{m_{DI} - m_{DD}}{m_{DI}} \right) * 100 \quad (1)$$

Z: Nivel de sustitución (%)

m_{DI} : Consumo volumétrico de diésel en modo diésel

m_{DD} : Consumo volumétrico de diésel en modo dual

En la siguiente tabla se presentan los resultados de sustitución logrados con el sistema operando en modo automático por el PLC que posee el sistema.

% Carga (kW)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Modo Diésel	Modo Dual-Fuel			Tasa de reemplazo de diésel
	Diésel	Diésel	Gas Natural		Tasa de reemplazo de diésel (%)
	(G/h)	(G/h)	ft3/h	Presión (psi)	
0%	2,1	1,5	35	3	28,5
25%	11,9	10,2	268	3	14,3
50%	21,8	18,5	555	3	15,3
75%	34,1	29,1	761	3	14,7
100%	49,7	42,3	1030	3	14,9
75%	34	29	768	3	14,7
50%	21,9	18,4	568	3	15,9
25%	11,9	10,2	270	3	14,3

Tabla 13: Resultados de la sustitución de combustible diésel por gas natural al equipo en prueba

Los resultados obtenidos mostraron que para los distintos niveles de carga, la sustitución de combustible fue de entre el 14% – 15%, valor inferior al reportado por otros autores en donde se obtuvo tasas de sustitución de entre el 60% – 80% en motores pequeños (40 kW).

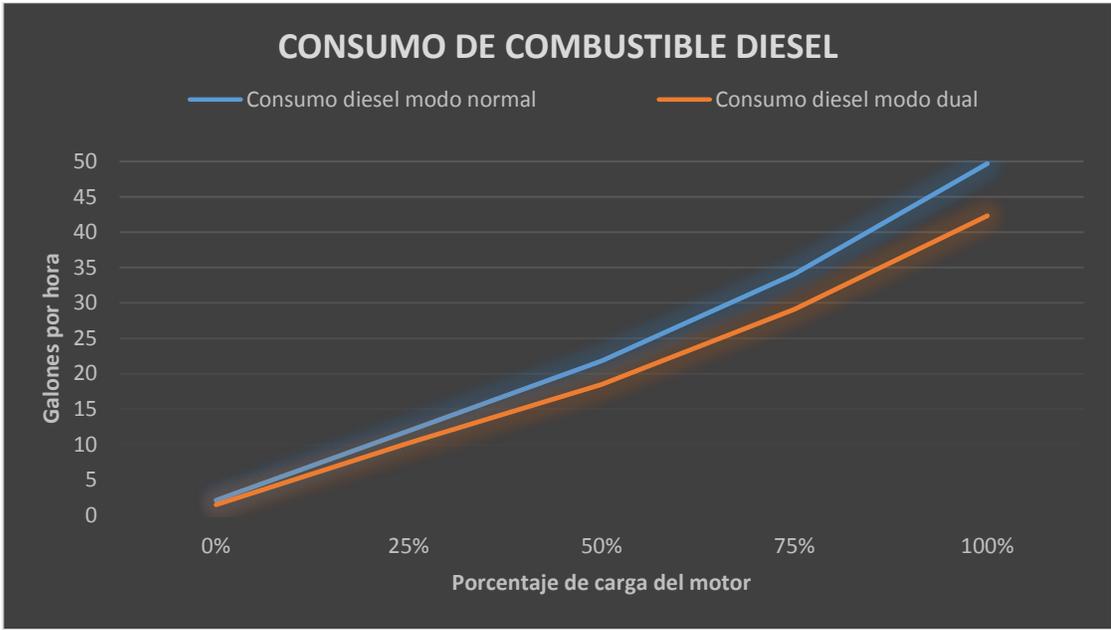


Figura 15: Consumo de combustible diésel de equipo C27 en los distintos modos de operación

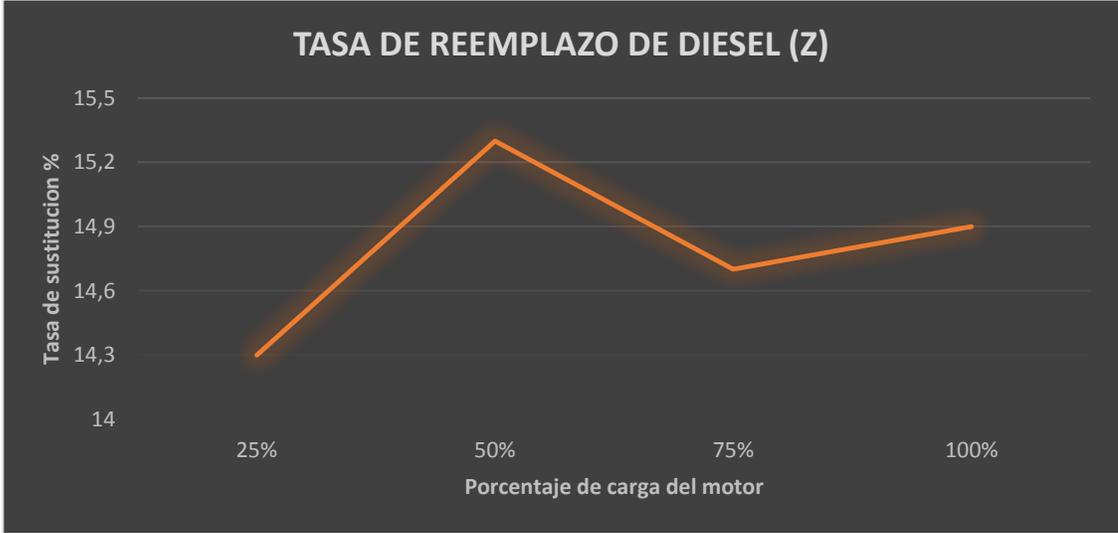


Figura 16: Nivel de sustitución del diésel en el motor a diferentes porcentajes de carga.

2.5. REGISTRO DE EMISIONES DEL EQUIPO

Simultáneamente a las pruebas de desempeño del equipo, se registraron datos de emisiones del equipo para identificar cambios en las composiciones de los gases de escape producto de la combustión en el equipo, la información registrada corresponde a muestras de 1 minuto de toma de gases después de llevar 30 minutos operando a cada régimen de carga del equipo. Lo anterior corresponde con el procedimiento del fabricante del analizador de gases de combustión.

PARAMETRO	CARGA DEL EQUIPO							
	25% carga		50% carga		75% carga		100% carga	
	Diésel	Dual	Diésel	Dual	Diésel	Dual	Diésel	Dual
CO (ppm)	227	520	145	441	112	372	100	344
CO2 (%)	3,9	6,1	4,3	7,9	5	8,9	5,6	9,4
NOx (ppm)	1633	744	1639	739	1501	698	1411	690
HC (ppm)	108	115	74	82	41	49	22	33

Tabla 14: Registro de datos analizador de gases de combustión

Los resultados obtenidos fueron similares a los reportados por la mayoría de los autores de artículos, se observa un incremento mayor al doble en la concentración de CO y CO₂ en los gases de escape del motor, la reducción de NO_x fue mayor a lo esperado (reducción del 50% o mejor) y las concentraciones de HC fueron similares en ambos modos de operación lo cual difirió con lo reportado por otros autores en donde era mayor esta concentración para el modo dual.

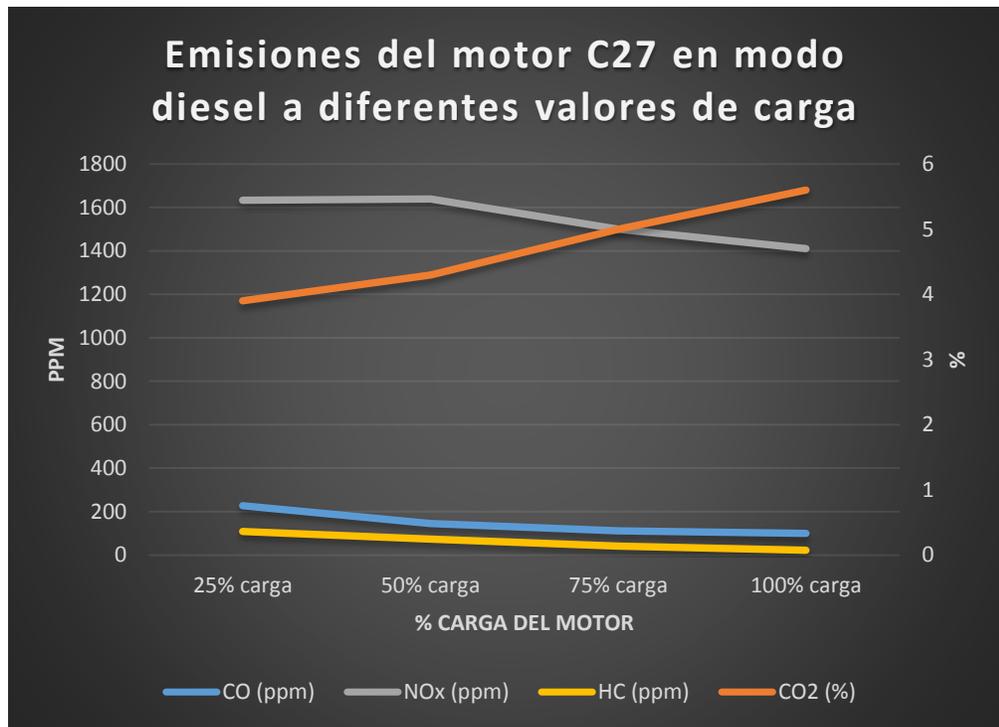


Figura 17: Emisiones de gases del generador C27 en modo solo diésel

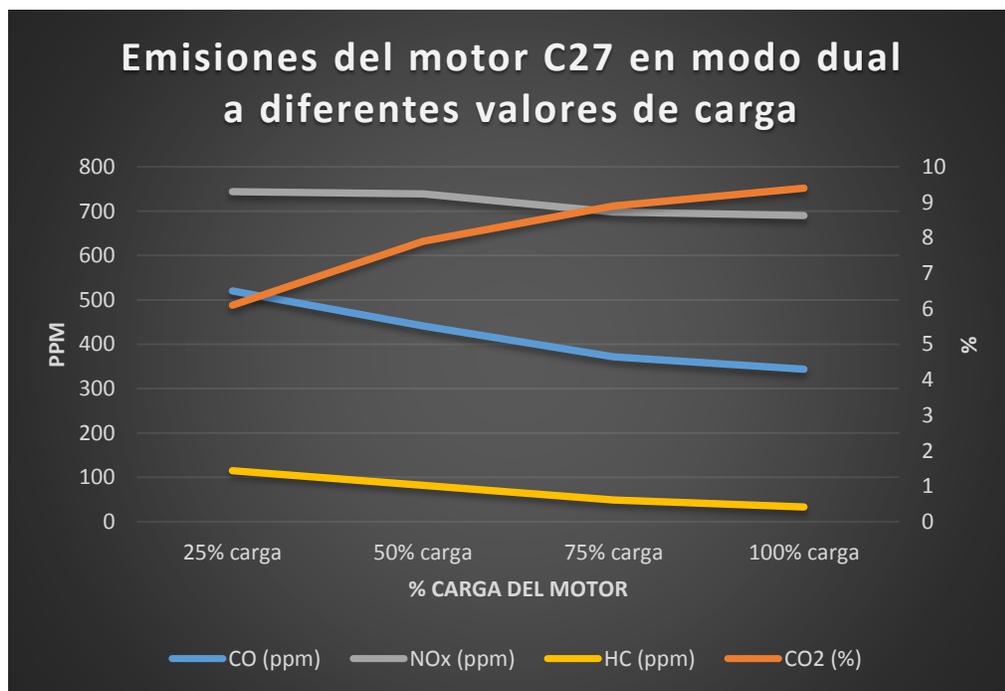


Figura 18: Emisiones de gases del generador C27 en modo solo *dual-fuel*

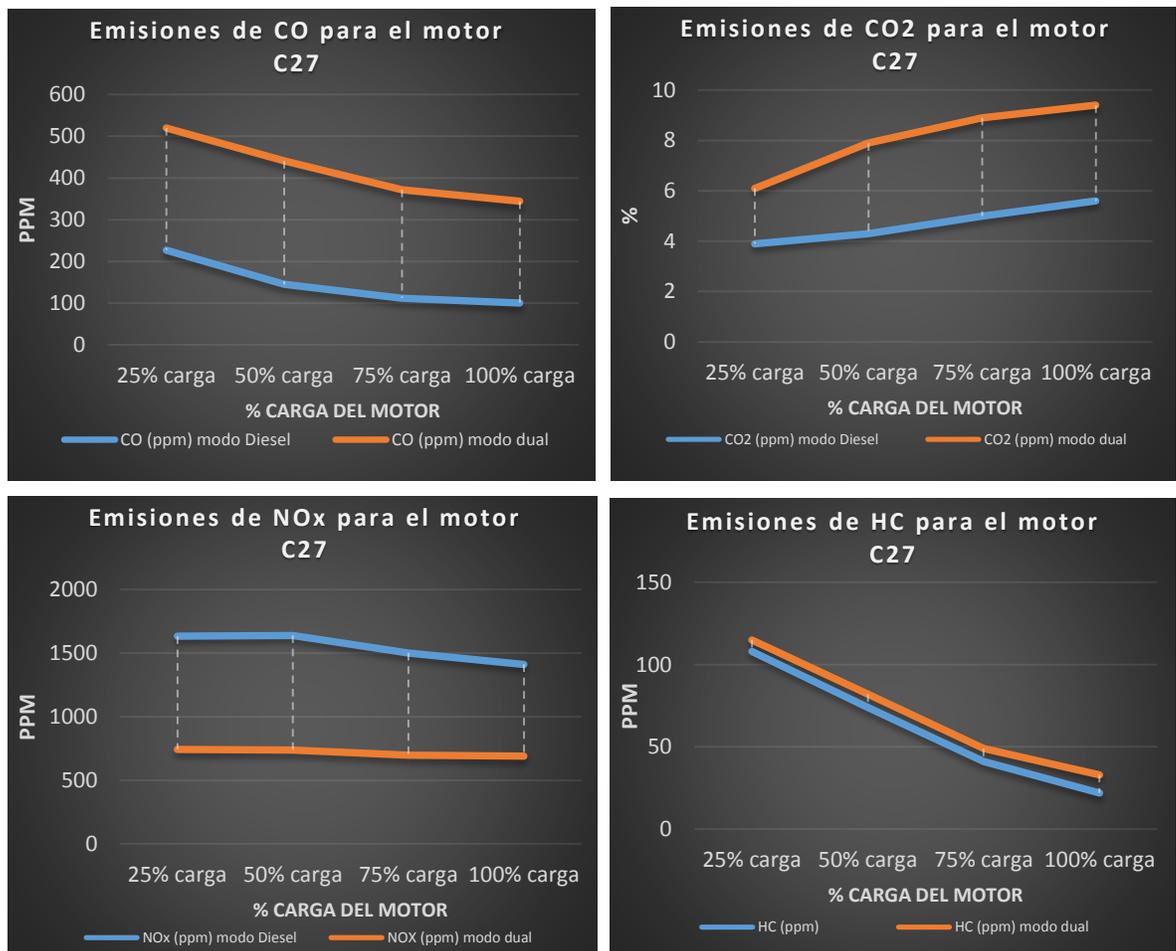


Figura 19: Curva de emisiones de los diferentes gases de escape del motor C27 en operación *dual-fuel*

Según estudios realizados por la Technical University of Kaiserslautern y publicados en SBS, Bosch and Clean Air Power, el potencial de reducción de emisiones en un motor diésel en el cual se ha sustituido el 50% de combustible diésel por gas natural es:

- Reducción de CO: 95%
- Reducción de HC: 66%
- Reducción de PM: 42%
- Reducción de NOx: 35%

Los resultados de ese estudio coinciden en reducción con los obtenidos por Bedoya [4] y Papagiannaki [6], a su vez contradicen los obtenidos por Uma y Kandpalb [27], por lo cual se infiere que la reducción de emisiones depende de factores como el tipo de gas, el tipo de motor y la carga, por lo cual cada experimento arrojará resultados específicos para el tipo de experimento.

Aunque al utilizar gas natural se obtiene reducción de las emisiones de gases a la atmósfera, todo depende del tipo de combustible gaseoso; cuando se utiliza Biogás como combustible primario, se pueden presentar aumentos importantes en las emisiones de ciertos contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos sin quemar (THC) y metano (CH₄) [4] [10]. La composición del gas juega un papel importante en la composición final de los contaminantes arrojados a la atmósfera.

3. IDENTIFICACION DE EFECTOS DE LOS AJUSTES DEL SISTEMA *DUAL-FUEL* SOBRE LAS VARIABLES DE DESEMPEÑO AMBIENTALES Y MECÁNICAS

3.1. Ajustes al sistema “DUAL-FUEL”

La bibliografía existente acerca de pruebas del sistema dual-fuel, documenta 7 posibles ajustes que se pueden realizar a un equipo en prueba para obtener diferentes rendimientos en el motor de combustión y diferentes tasas de reemplazo del diésel por gas natural:

- Variación de la temperatura del gas natural
- Modificación de la velocidad del motor
- Modificación de la relación de compresión del motor
- Cambio del tipo de gas
- Variación del tiempo de inyección del combustible
- Modificación de la cantidad de gas natural en la recámara
- Variación de la carga del motor

3.2. Variación de la temperatura del gas natural

En experimentos realizados en laboratorio, los investigadores han realizado cambios en la temperatura del gas de admisión a la recámara con el fin de evaluar el efecto en el motor

debido al enfriamiento del gas con un intercambiador externo o calentamiento del gas al utilizar la temperatura del *manifold* de escape para enfriar la mezcla que ingresa a la recámara de combustión, los resultados de las investigaciones de Kusaka y otros [37] concluyen:

- Una disminución de la temperatura del gas natural, incrementa la eficiencia térmica del sistema
- Aumento de la temperatura del gas natural deteriora las características de la combustión en la recámara.

Para el equipo en pruebas no es viable realizar cambios en la temperatura del gas natural ya que la estación de producción no cuenta con facilidades que permitan enfriar el gas y los resultados esperados no ameritan una inversión en un intercambiador de calor y un *chiller*.

3.3. Modificación de la velocidad del motor

La variación de la velocidad del motor de combustión ha sido estudiada por autores como Mansour C [38] y Selim [39], sus investigaciones concluyen:

- La eficiencia térmica mejora con el incremento de la velocidad del motor
- La presión máxima de la combustión es mayor en modo dual que con solo diésel para una velocidad constante en el motor.
- El incremento de la presión en la recámara de combustión en modo dual en comparación con solo diésel disminuye a medida que se incrementa la velocidad del motor.

Para el equipo en prueba no es viable realizar cambios en la velocidad del motor debido a que el sistema se utiliza para generar energía eléctrica y un aumento o disminución de la velocidad del motor implicaría un cambio en la frecuencia de la energía eléctrica, lo cual no permitiría el aprovechamiento de la energía en las facilidades de la estación de producción.

3.4. Modificación de la relación de compresión del motor

El efecto producido por la modificación de la relación de compresión fue estudiado por Selim [40] al modificar levemente la recámara de combustión buscando mejorar el desempeño de un motor con sistema dual-fuel, su investigación arrojó:

- A mayores relaciones de compresión se incrementa el golpeteo en el equipo cuando opera en modo dual.
- El aumento de la relación de compresión generalmente aumenta el ruido de la combustión.

3.5. Cambio del tipo de gas

Numerosos autores han estudiado los efectos de determinados tipos de gas en el sistema dual-fuel, se ha usado gas natural con distintas composiciones, hidrogeno y biogás entre otros, los resultados han sido diversos debido a la composición, tipo de motor de la prueba y otros factores, por lo cual concluir al respecto es dispendioso y obedece a características típicas de cada experimento.

Para el equipo en estudio no es posible realizar pruebas con otro tipo de gas ya que se cuenta únicamente con el gas que aportan los pozos del sector.

3.6. Variación del tiempo de inyección del combustible

Investigadores como Nwafor [41], Selim [40], Abd [22] y Krishnan [42] entre otros han estudiado el efecto de modificar el tiempo de inyección, para cada experimento se encontraron resultados diferentes en cuanto al efecto de modificar el tiempo de inyección, sin embargo en todas las investigaciones se reportaron rangos en los cuales al modificar el tiempo de inyección, se obtenían mejoras en la tasa de sustitución de combustible o disminución del golpeteo en el motor.

El equipo en prueba tiene un sistema electrónico que controla el tiempo de inyección (25 - 45 B.T.D.C) se realizaron varias consultas con Caterpillar para que via software se permitirá poder variar el tiempo de modo que se pudiera estudiar el efecto sobre el equipo al trabajar con dual-fuel, sin embargo la respuesta siempre fue negativa argumentando secreto empresarial.

3.7. Modificación de la cantidad de gas natural en la recámara

La cantidad de gas en la recámara puede ser ajustada modificando la presión de entrada del gas en el mezclador con aire, a mayor presión mayor gas en la recámara, es importante encontrar la cantidad óptima de sustitución de gas que se puede ingresar en la recámara para obtener la mayor tasa de sustitución de diésel sin que se afecte la potencia entregada

por el equipo o se afecte la temperatura del equipo, las investigaciones de Nwafor [41], Selim [40], Abd [22], Uma [27], Soliman [24], Papagiannakis [6] y Bedoya [4], han encontrado que al aumentar la cantidad de gas en la recámara presenta los siguientes efectos:

- Aumentando la masa de gas natural se incrementa la tasa de sustitución Z hasta un máximo y después comienza a decrecer Z .
- Al aumentar el gas en la recámara más allá de ciertos valores, se comienza a presentar detonación en el equipo o el equipo no aguanta la carga para un valor constante de carga
- La sustitución Z óptima es diferente a cada porcentaje de carga del equipo, no necesariamente se da a un mismo valor de presión de entrada.

Debido a las condiciones y facilidades de la estación de Produccion este es un parámetro que se puede ajustar en campo, y es uno de los parámetros de ajuste que se estudiaron en esta investigación.

3.8. Variación de la carga del motor

El equipo disponible para el experimento es un generador con motor diésel, por lo cual las variaciones de carga son posibles gracias al empleo de un banco de resistencias variable, de este modo se puede estudiar el efecto de este cambio en el equipo.

Las investigaciones de diversos autores entre los que se destacan Selim [40], Uma [27], Soliman [24], Papagiannakis [6] y Bedoya [4] han estudiado los efectos de la variación de carga en la tasa de sustitución Z , los resultados han sido diversos en el desempeño del motor y los gases de escape, sin embargo han sido concordantes en que existen tasas de sustitución óptimas y en los límites que se tienen en el sistema *dual-fuel*.

3.9. MODIFICACIÓN DE PARÁMETROS DE AJUSTE DEL MOTOR

Los parámetros ajustables para el equipo en prueba son la presión del gas natural antes de la entrada al mezclador y la carga del equipo, con estos parámetros se realizaron pruebas así:

- Se enciende el equipo y se deja 15 minutos en vacío hasta que el equipo tiene parámetros estables de temperatura, presión de gases de escape, consumo de combustible
- Para cada nivel de carga se deja un tiempo de prueba de 1 hora. Las pruebas inician desde baja carga hasta el 100% de la nominal del equipo, posteriormente se disminuye la carga hasta llegar a 0%, los intervalos serán: 25%, 50%, 75% y 100 % de la carga nominal del equipo.
- La presión de gas puede cambiarse desde 0.5 psi hasta 12 psi (valor disponible en línea de gas). Para cada cambio en presión de gas se deja operando el equipo durante 1 hora y se registran datos.

- Para dato medido se repite 3 veces la información así: 20 minutos después del cambio, 40 minutos después del cambio y 60 minutos después del cambio, se toma el promedio de las 3 lecturas y se registra la información.

3.10. RESULTADOS OBTENIDOS CON AJUSTE DE PARAMETROS

El equipo fue puesto en prueba utilizando el banco de resistencias disponible, los cambios de carga se realizaran con este elemento y las variaciones de presión de admisión de Gas serán realizadas sobre el regulador de entrada al equipo.



Fotografía 8: Detalle del sistema *dual-fuel* (entrada gas al motor)

3.10.1. Carga del motor 25% del valor nominal

Con el equipo al 25% de la carga nominal se realizan las variaciones de presión de entrada del gas al mezclador, los resultados obtenidos fueron:

% Carga (kW)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Modo Diésel	Modo Dual-Fuel			Tasa de remplazo de diésel (Z)
	Diésel	Diésel	Gas Natural		
	(G/h)	(G/h)	ft3/h	Presión (psi)	(%)
25%	11,9	10,5	221	1	11,8
		10,4	237	1,5	12,6
		10,4	236	2	12,6
		10,3	255	2,5	13,4
		10,2	268	3	14,3
		10,1	282	3,5	15,1
		9,8	284	4	17,6
		9,4	386	4,5	21,0
		9,5	378	5	20,2
		9,6	365	5,5	19,3
		9,8	331	6	17,6
		9,9	274	6,5	16,8
		10	279	7	16,0

Tabla 15: Registro de datos – carga del equipo 25%

Los resultados muestran que la más alta tasa de sustitución de diésel se presenta con 4.5 psi de presión de entrada de gas al equipo, después de esta presión la tasa de sustitución disminuye.

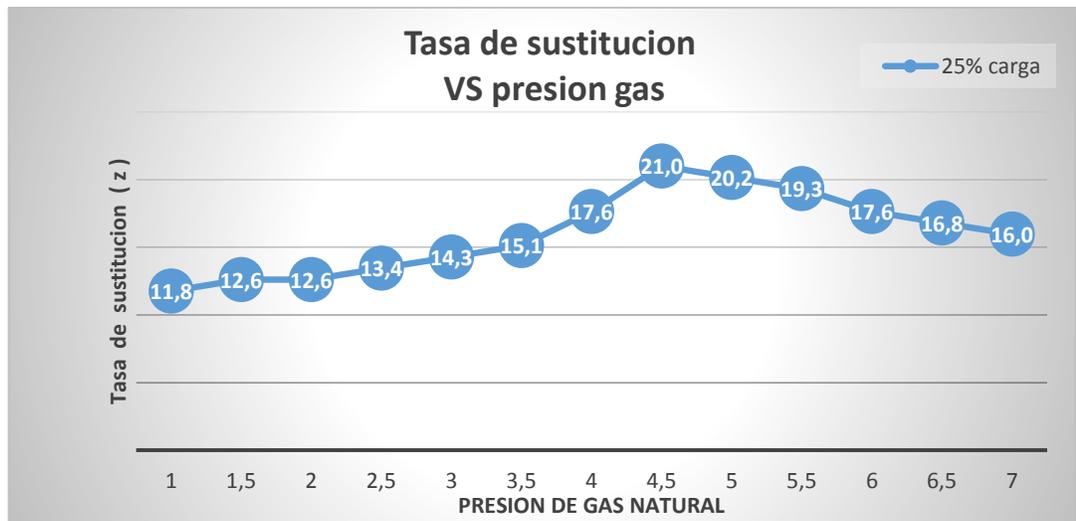


Figura 20: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor
Carga del equipo 25%

La figura 20 muestra gráficamente el cambio en la tasa de reemplazo de diésel con la variación de presión de gas, es resaltable que el sistema alcanza un valor máximo y decrece con mayor presencia de gas en el motor.

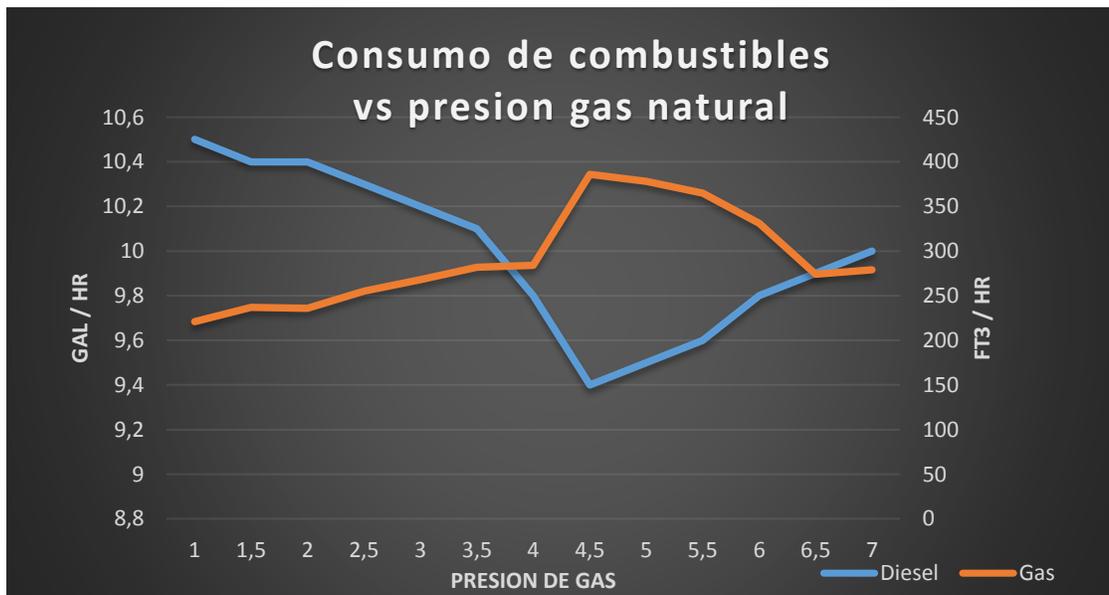


Figura 21: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor
Carga del equipo 25%

3.10.2. Carga del motor 50% del valor nominal

Con el equipo al 50% de la carga nominal se realizan las variaciones de presión de entrada del gas al mezclador, los resultados obtenidos fueron:

% Carga (kW)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Modo Diésel	Modo Dual-Fuel			Tasa de remplazo de diésel (Z)
	Diésel	Diésel	Gas Natural		
	(G/h)	(G/h)	ft3/h	Presión (psi)	(%)
50%	21,8	19,1	454	1	12,4
		19	470	1,5	12,8
		18,9	488	2	13,3
		18,6	504	2,5	14,7
		18,5	555	3	15,1
		18,3	590	3,5	16,1
		18	639	4	17,4
		17,6	698	4,5	19,3
		17,2	774	5	21,1
		17,3	759	5,5	20,6
		17,4	740	6	20,2
		17,5	682	6,5	19,7
					7

Tabla 16: Registro de datos – carga del equipo 50%

La mayor tasa de sustitución de diésel se presenta con 5 psi de presión de entrada de gas al equipo, después de esta presión la tasa de sustitución disminuye tal y como sucedió con las pruebas realizadas con el 25% de carga; la presión máxima con la cual trabajó el equipo fue 6.5 psi, después de este valor el motor oscilaba y presentaba comportamiento inestable.

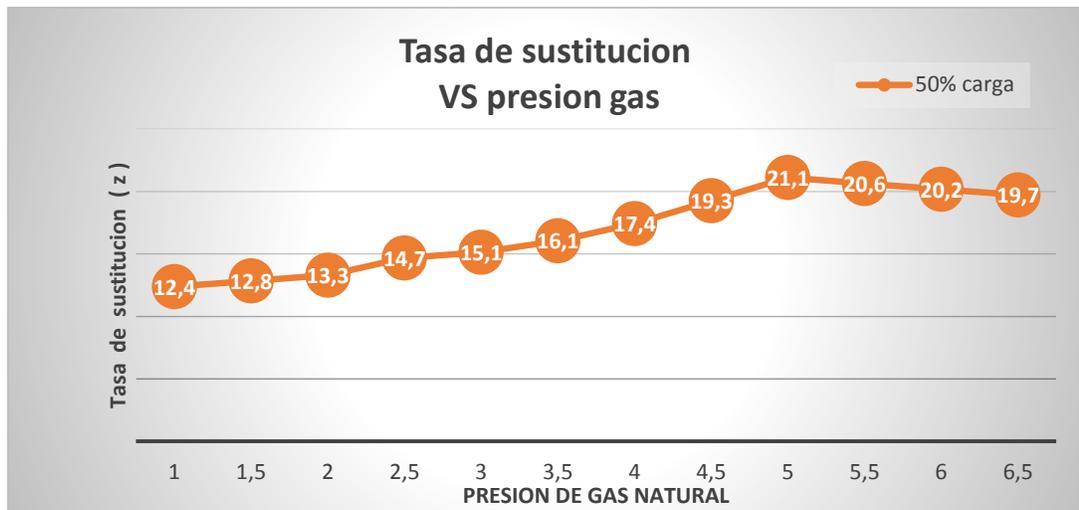


Figura 22: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor
Carga del equipo 50%

Las gráficas 22 y 23 muestran las tasas de sustitución con diferentes niveles de presión de gas y las proporciones de combustibles respectivamente que consume el equipo.

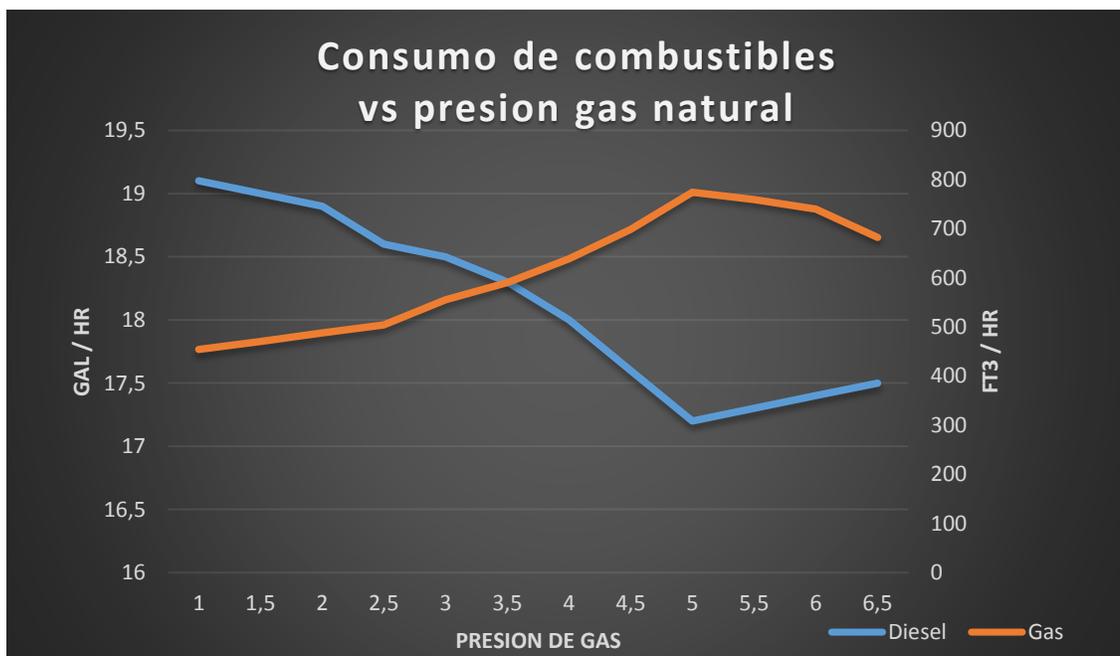


Figura 23: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor
Carga del equipo 50%

3.10.3. Carga del motor 75% del valor nominal

Con el equipo al 75% de la carga nominal se realizan las variaciones de presión de entrada del gas al mezclador, los resultados obtenidos fueron:

% Carga (kW)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Modo Diésel	Modo Dual-Fuel			Tasa de remplazo de diésel (Z)
	Diésel	Diésel	Gas Natural		
	(G/h)	(G/h)	ft3/h	Presión (psi)	(%)
75%	34,1	30,2	593	1	11,4
		30	620	1,5	12,0
		29,9	639	2	12,3
		29,5	652	2,5	13,5
		29,1	761	3	14,7
		28,9	794	3,5	15,2
		28,7	821	4	15,8
		28,6	859	4,5	16,1
		28,3	882	5	17,0
		27,5	938	5,5	19,4
		27	1080	6	20,8
					6,5
			7		

Tabla 17: Registro de datos – carga del equipo 75%

La mayor tasa de sustitución de diésel se presenta con 6 psi de presión de entrada de gas al equipo, después de esta presión el motor oscilaba y presentaba comportamiento inestable, en este escenario la tasa de sustitución mejoraba con el incremento de presión de entrada de gas.

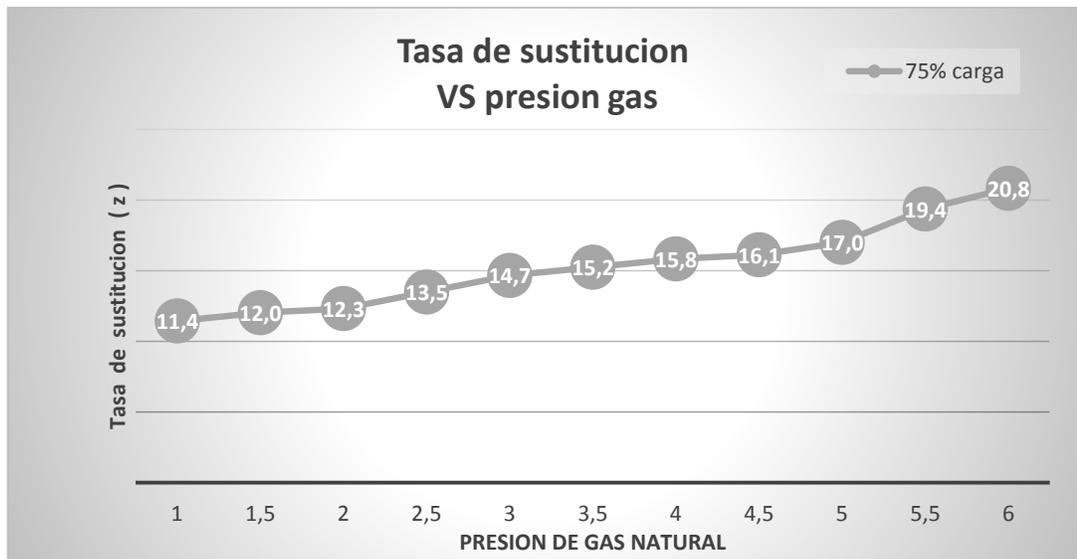


Figura 24: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor
Carga del equipo 75%

Las gráficas 24 y 25 muestran las tasas de sustitución con diferentes niveles de presión de gas y las proporciones de combustibles respectivamente que consume el equipo.

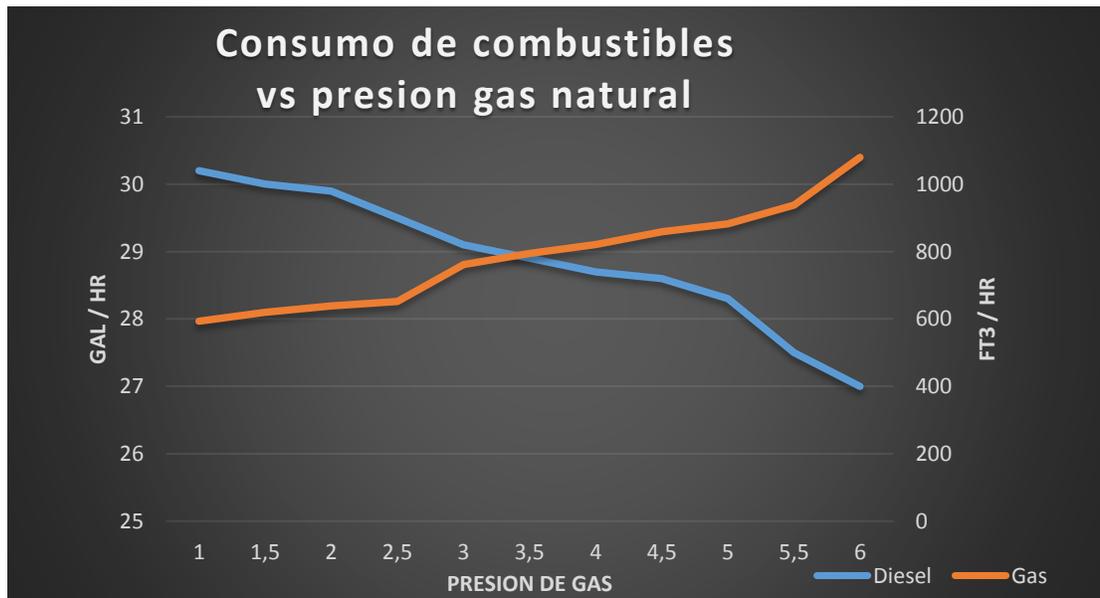


Figura 25: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor
Carga del equipo 75%

3.10.4. Carga del motor 100% del valor nominal

Con el equipo a plena carga nominal se realizan las variaciones de presión de entrada del gas al mezclador, los resultados obtenidos fueron:

% Carga (kW)	CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Modo Diésel	Modo Dual-Fuel			Tasa de remplazo de diésel (Z)
	Diésel	Diésel	Gas Natural		
	(G/h)	(G/h)	ft3/h	Presión (psi)	(%)
100%	49,7	43,8	821	1	11,9
		43,6	863	1,5	12,3
		43,3	891	2	12,9
		42,6	933	2,5	14,3
		42,3	1030	3	14,9
		42,1	1070	3,5	15,3
		41,8	1099	4	15,9
		41,4	1184	4,5	16,7
		40,9	1225	5	17,7
		39,5	1387	5,5	20,5
		39,2	1461	6	21,1
				6,5	MOTOR PRESENTA PROBLEMAS
				7	

Tabla 18: Registro de datos – carga del equipo 100%

La mayor tasa de sustitución de diésel se presenta con 6 psi de presión de entrada de gas al equipo, después de esta presión el motor oscilaba y presentaba comportamiento inestable, en este escenario la tasa de sustitución mejoraba con el incremento de presión de entrada de gas, los resultados obtenidos tienen la misma tendencia que los obtenidos al 75% de carga nominal del equipo.

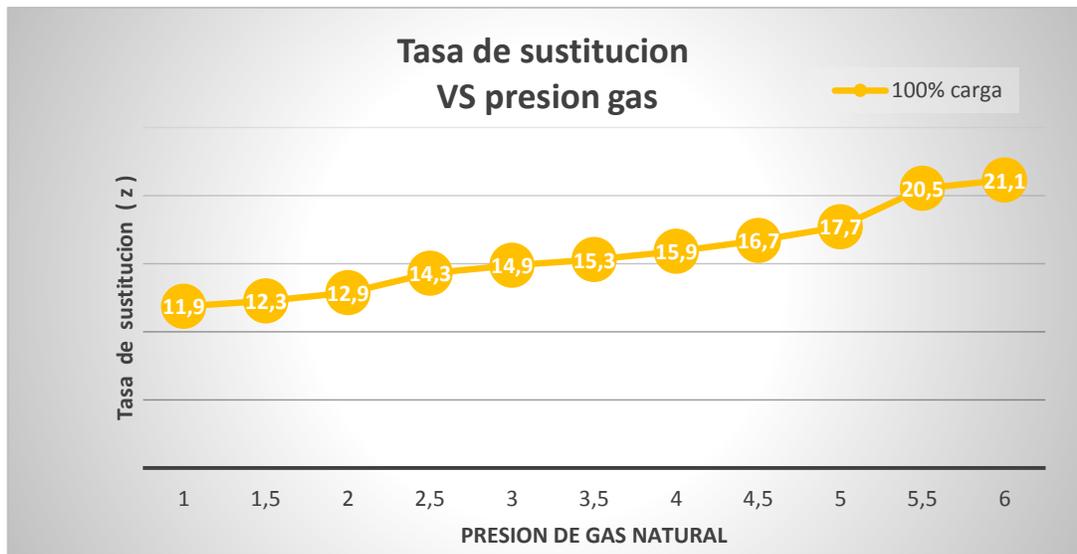


Figura 26: Cambios en la tasa de sustitución para diferentes presiones de gas de entrada al motor
Carga del equipo 100%

Las gráficas muestran las tasas de sustitución con diferentes niveles de presión de gas y las proporciones de combustibles respectivamente que consume el equipo, no se observa un máximo alcanzado de la tasa de sustitución de combustible.

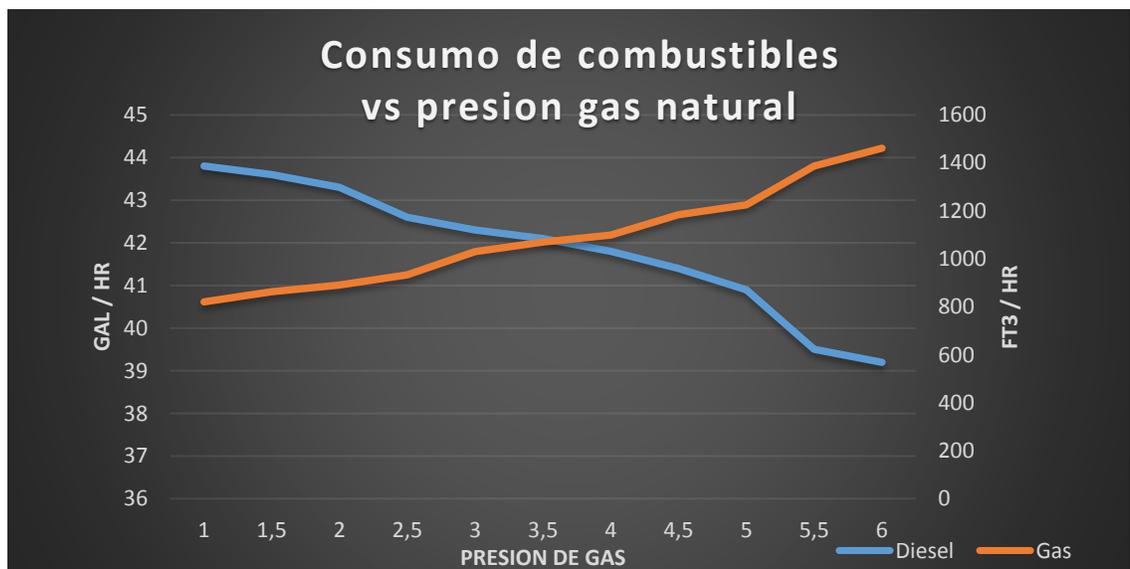


Figura 27: Cambios en el consumo de combustibles para diferentes presiones de gas en la entrada del motor
Carga del equipo 100%

3.10.5. Análisis de los resultados de desempeño mecánico del motor

Las pruebas arrojaron resultados que analizados permiten concluir:

- la máxima tasa de sustitución de combustible diésel por gas natural fue del 21% y esta condición se alcanza a una presión diferente para cada nivel de carga del equipo.
- Para regímenes altos de carga (mayores al 50%) el equipo presentaba oscilación e inestabilidad con altas presiones de gas natural en la admisión a la recámara de combustión.

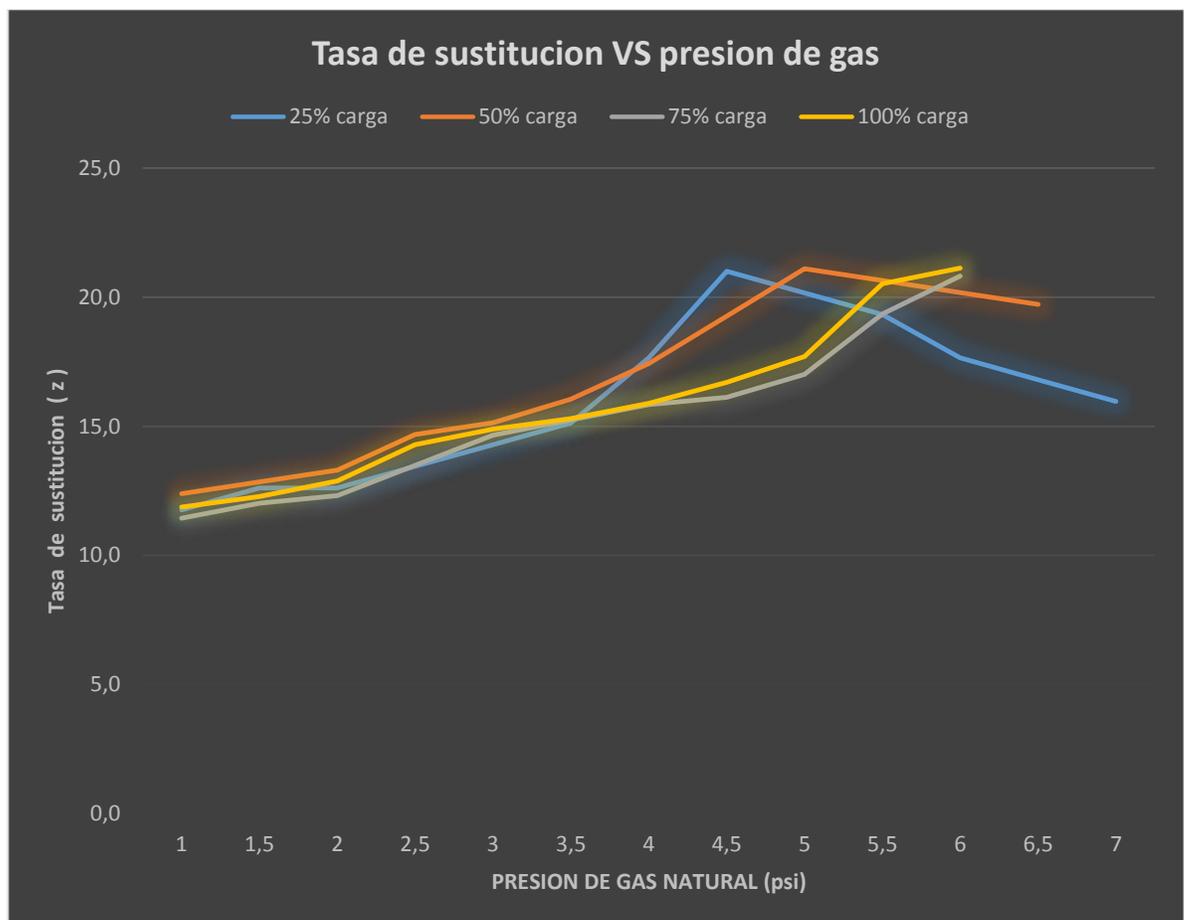


Figura 28: Tasa de sustitución de combustible para diferentes régimen de carga del equipo

En la gráfica 21 se puede observar en qué punto se obtiene la menor cantidad de consumo de combustible diésel.

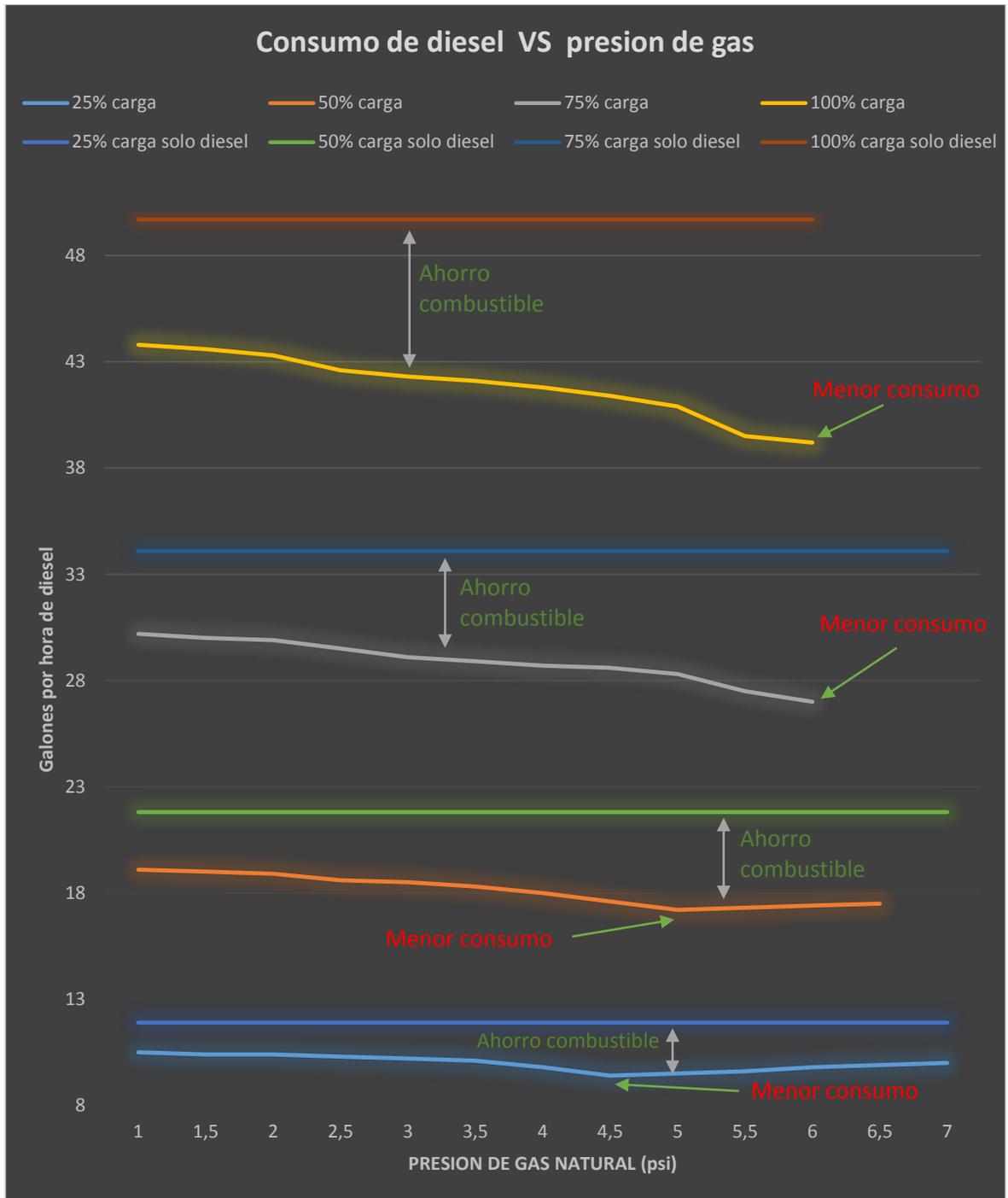


Figura 29: Consumo de diésel a diferentes régimen de carga del equipo

El nivel de sustitución de combustible diésel en el equipo para diferentes niveles de carga y presión de gas mostró un comportamiento no lineal y con zonas en donde se presenta la mayor sustitución de diésel, la figura 30 muestra gráficamente los cambios en el nivel de sustitución el comportamiento

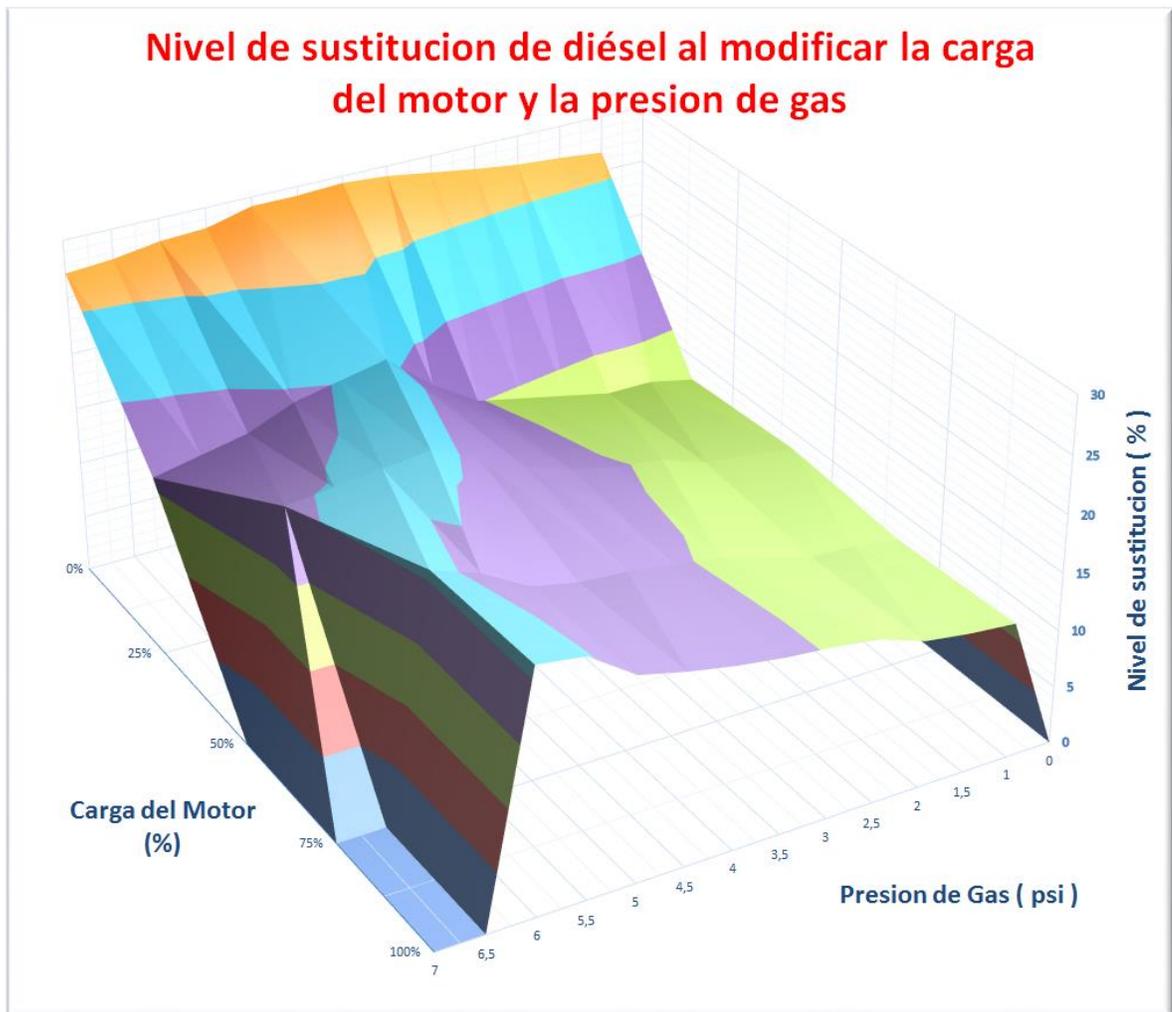


Figura 30: Nivel de sustitución para diferentes niveles de carga y presión de gas

3.11. RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS EMISIONES DE GASES A LA ATMOSFERA DESPUES DEL AJUSTE DE PARAMETROS

Durante las pruebas con ajuste de parámetros de motor se realiza la medición de los gases de escape del motor con los siguientes resultados:

PARAMETRO	Presión de gas	CARGA DEL EQUIPO							
		25% carga		50% carga		75% carga		100% carga	
		Diésel	Dual	Diésel	Dual	Diésel	Dual	Diésel	Dual
CO (ppm)	1	227	289	145	230	112	201	100	240
	1,5		333		312		252		286
	2		485		390		307		299
	2,5		501		410		344		323
	3		520		441		372		344
	3,5		510		441		372		345
	4		510		440		370		344
	4,5		505		436		368		344
	5		520		430		375		342
	5,5		537		445		365		342
	6		539		455		362		341
	6,5		548		490		NA		NA
7	559	NA	NA	NA					
CO2 (%)	1	3,9	5,4	4,3	6,2	5	7,8	5,6	8,9
	1,5		5,8		6,8		7,8		9,1
	2		6,3		7,2		7,9		9,3
	2,5		6		7,5		8,4		9,2
	3		6,1		7,9		8,9		9,4
	3,5		6,3		7,9		9		9,4
	4		6,8		8		9		9,6
	4,5		7		8,1		9,1		9,5
	5		7,1		8		9,1		9,5

	5,5		7,4		8,2		9,1		9,4
	6		7,2		8,3		9,2		9,7
	6,5		7,5		8,3		NA		NA
	7		7,8		NA		NA		NA
NOx (ppm)	1	1633	1018	1639	990	1501	820	1411	792
	1,5		927		934		799		775
	2		866		887		752		748
	2,5		799		805		736		720
	3		744		739		698		690
	3,5		739		724		667		682
	4		735		712		657		667
	4,5		731		693		658		634
	5		726		688		641		599
	5,5		715		670		622		578
	6		711		659		603		540
	6,5		690		644		NA		NA
	7		681		NA		NA		NA
	HC (ppm)		1		108		110		74
1,5		111	80	44		29			
2		112	80	45		30			
2,5		114	81	47		32			
3		115	82	49		33			
3,5		114	80	48		33			
4		112	79	47		32			
4,5		109	78	46		32			
5		110	76	46		34			
5,5		112	78	46		33			
6		115	80	45		32			
6,5		114	82	NA		NA			
7		116	NA	NA		NA			

Tabla 19: Registro de datos de emisiones del equipo (variación carga y presión gas)

La información para una mejor comprensión se desglosa por cada parámetro con su respectivo análisis comparativo

3.11.1. Emisiones de monóxido de carbono

Se realiza medición del monóxido de carbono a las diferentes cargas del motor y presión de gas combustible

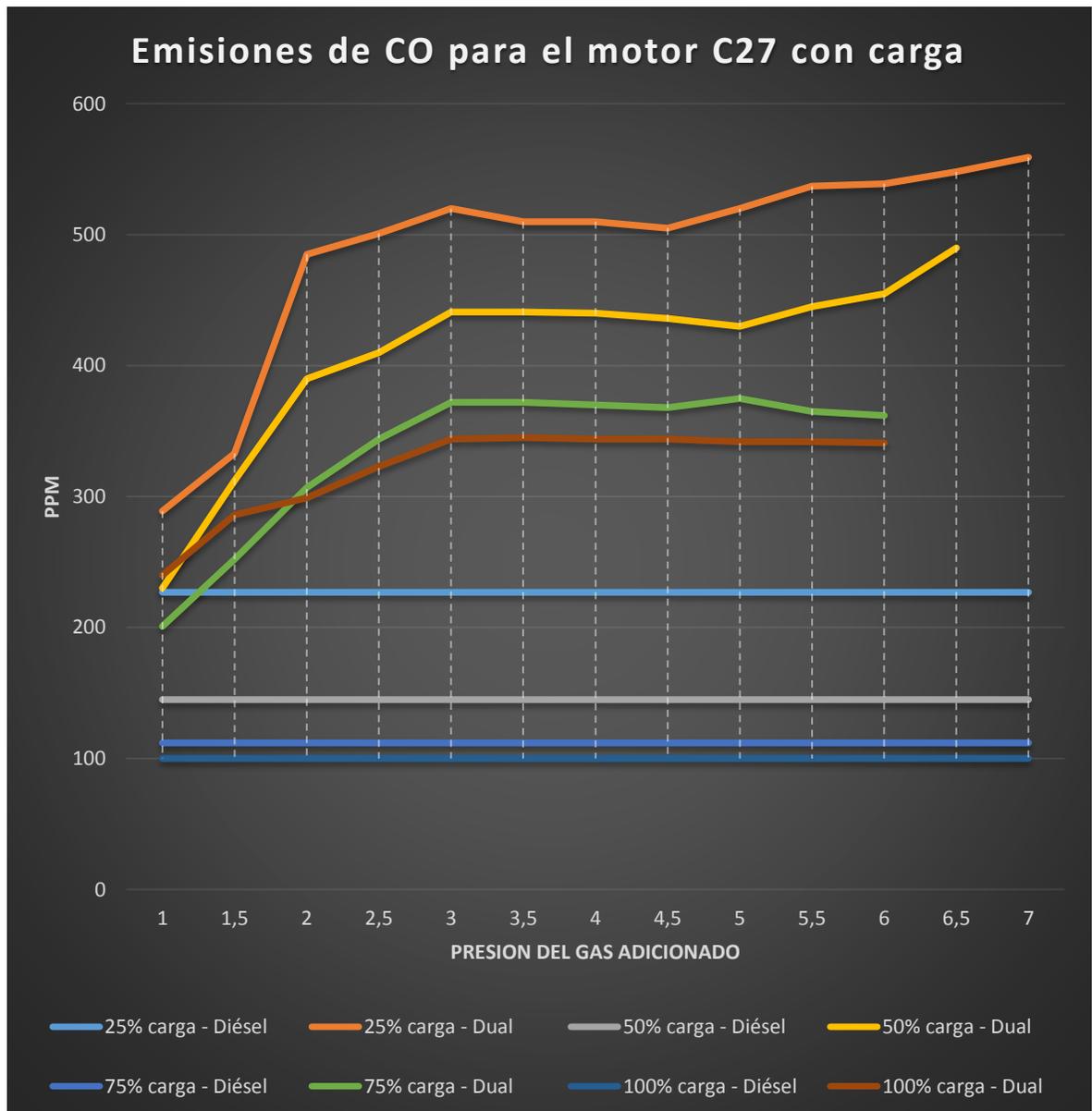


Figura 31: Emisiones de CO a diferentes % de carga del equipo y presión de gas

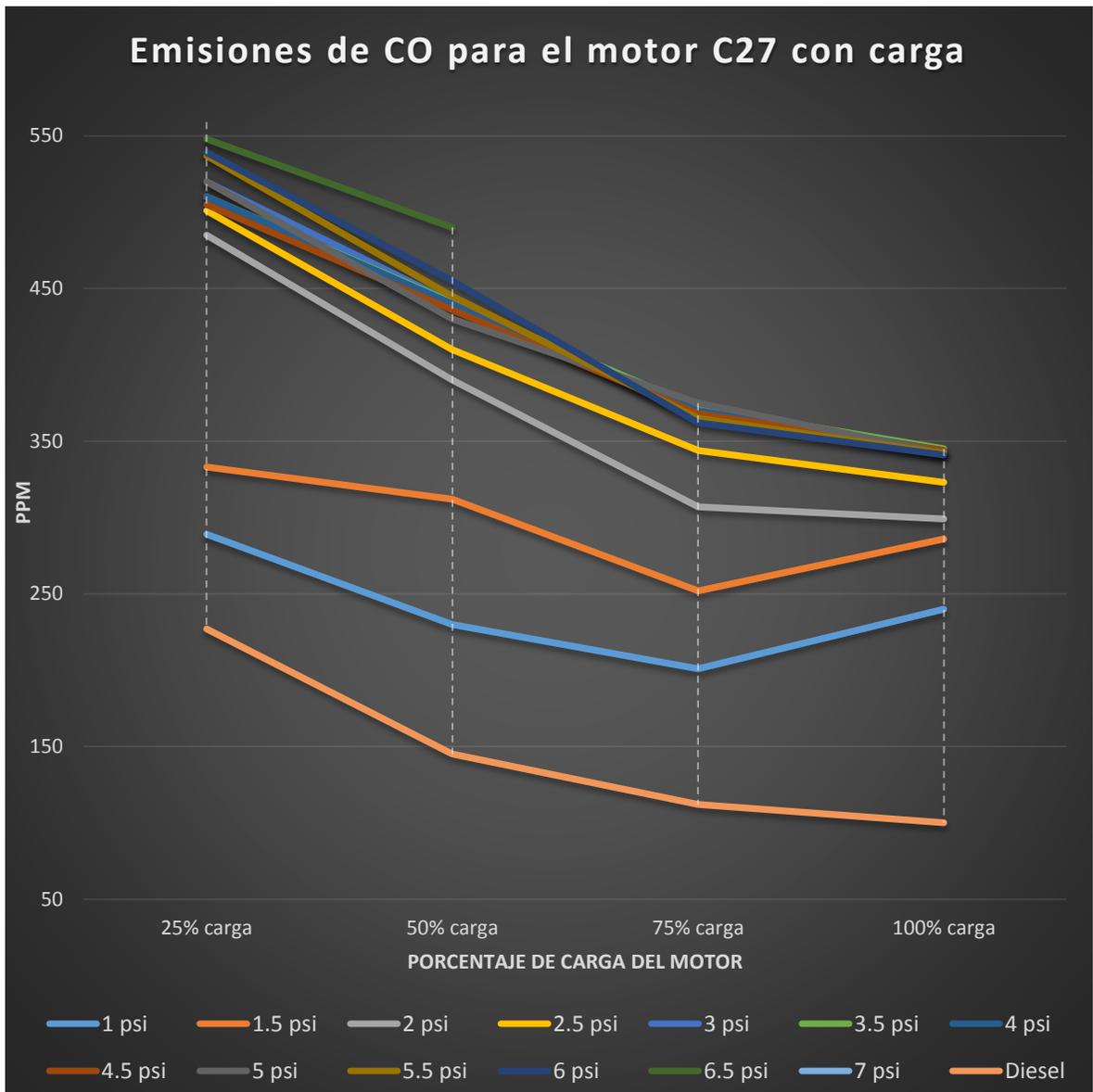


Figura 32: Variación del CO con cambios en el % de carga del equipo

Se puede observar que las emisiones de CO aumentaron en modo Dual-Fuel con respecto a las registradas con solo diésel y a mayor entrada de gas más se incrementaban, sin embargo a partir desde 2 psi hasta 7 psi tendían a incrementar muy poco, adicionalmente los valores decrecieron a medida que se incrementa la carga del motor.

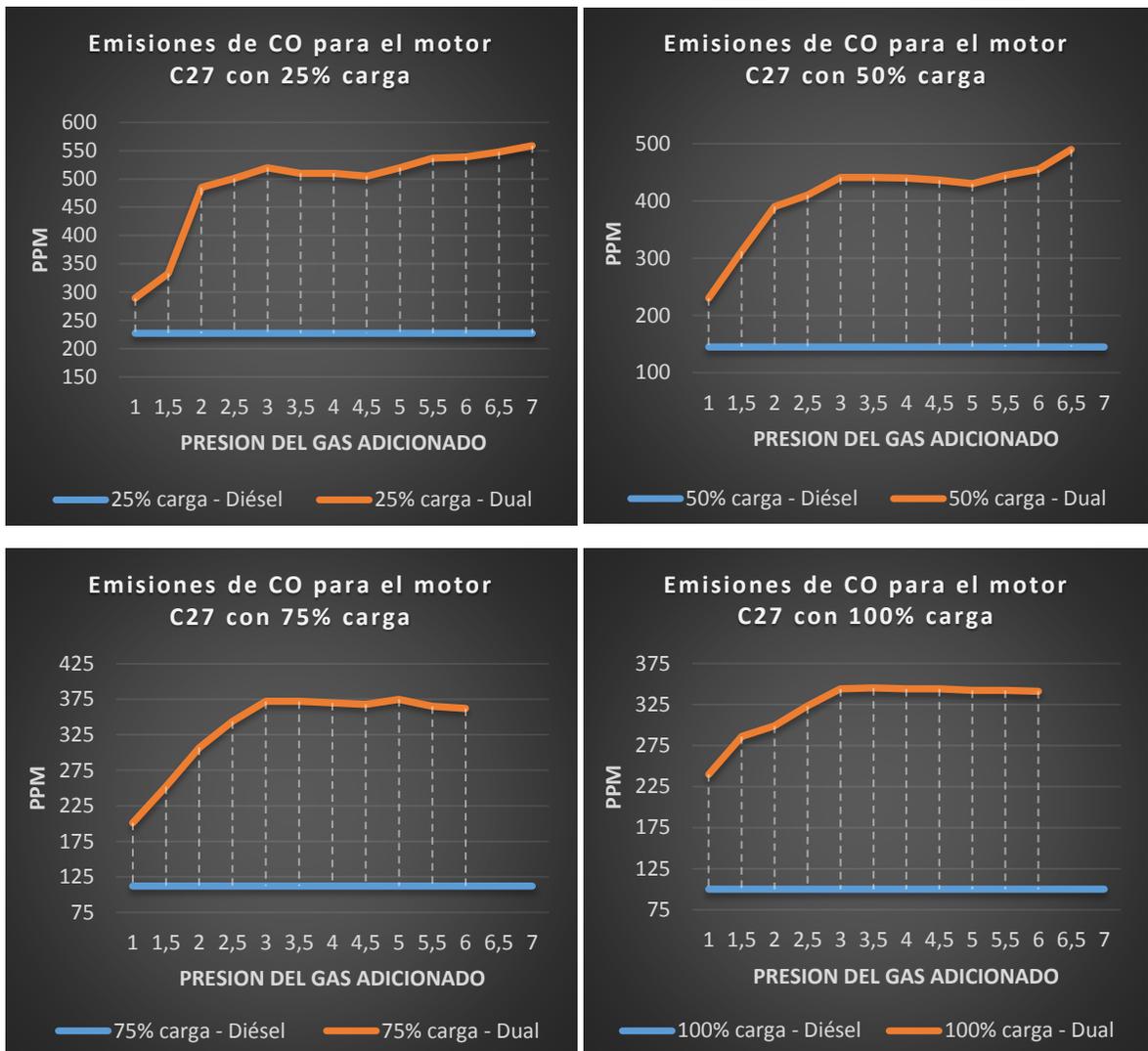


Figura 33: Emisiones de CO a diferentes % de carga y variación de gas en el motor

Para los diferentes regímenes de carga se observa que a mayor entrada de gas al motor, se incrementaban las emisiones de monóxido de carbono (CO) a la atmósfera.

3.11.2. Emisiones de dióxido de carbono (CO2)

Se realiza medición del dióxido de carbono a las diferentes cargas del motor y presión de gas combustible con el instrumento de medición (el valor lo arroja el equipo calculándolo con las variables medidas).

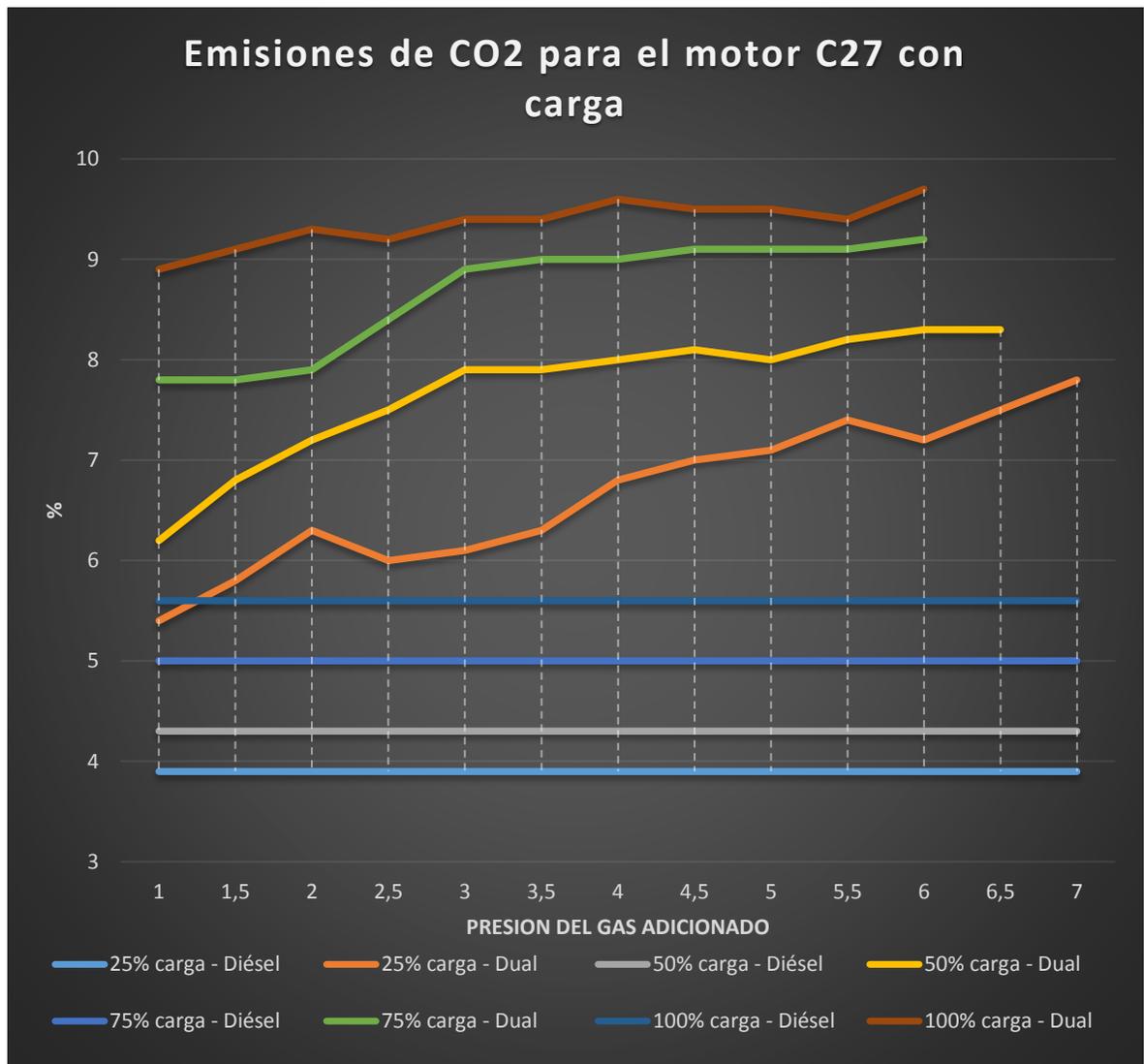


Figura 34: Emisiones de CO2 a diferentes % de carga del equipo y presión de gas

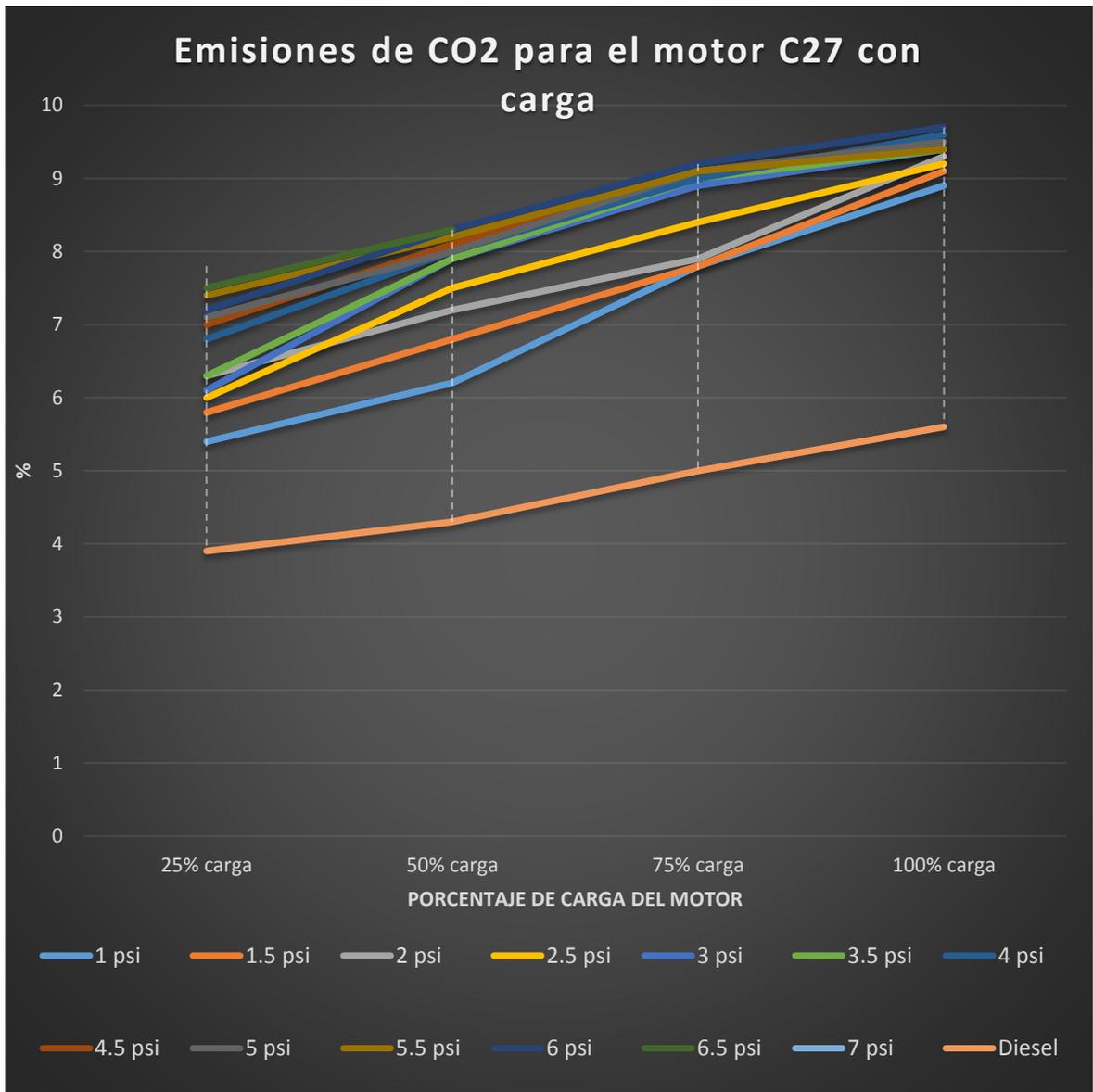


Figura 35: Variación del CO2 con cambios en el % de carga del equipo

De las gráficas anteriores se puede observar que las emisiones de CO2 aumentaron en modo Dual-Fuel con respecto a las registradas con solo diésel y a mayor incremento de gas las emisiones aumentaban levemente con una gran concentración de datos entre el 6% -8%. Como era de esperarse a mayor carga del equipo mayores emisiones de CO2.

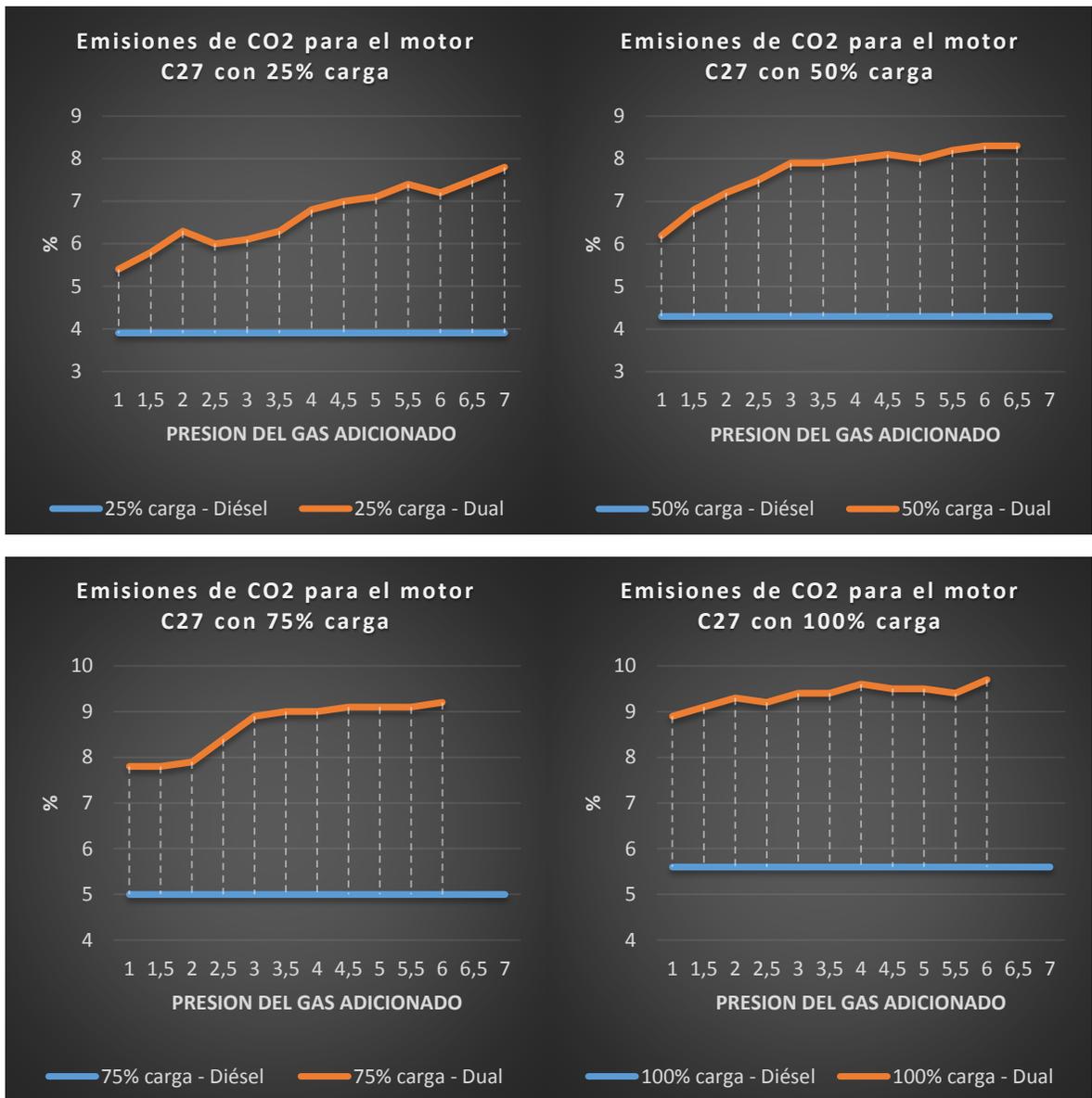


Figura 36: Emisiones de CO2 a diferentes % de carga y variación de gas en el motor

En las anteriores graficas se puede observar el cambio en las emisiones de CO2 para diferentes porcentajes de carga del equipo y de sustitución de diésel por gas.

3.11.3. Emisiones de Óxidos Nitrógeno (NOx)

Se realiza medición de los óxidos de nitrógeno a las diferentes cargas del motor y presión de gas combustible con el instrumento.

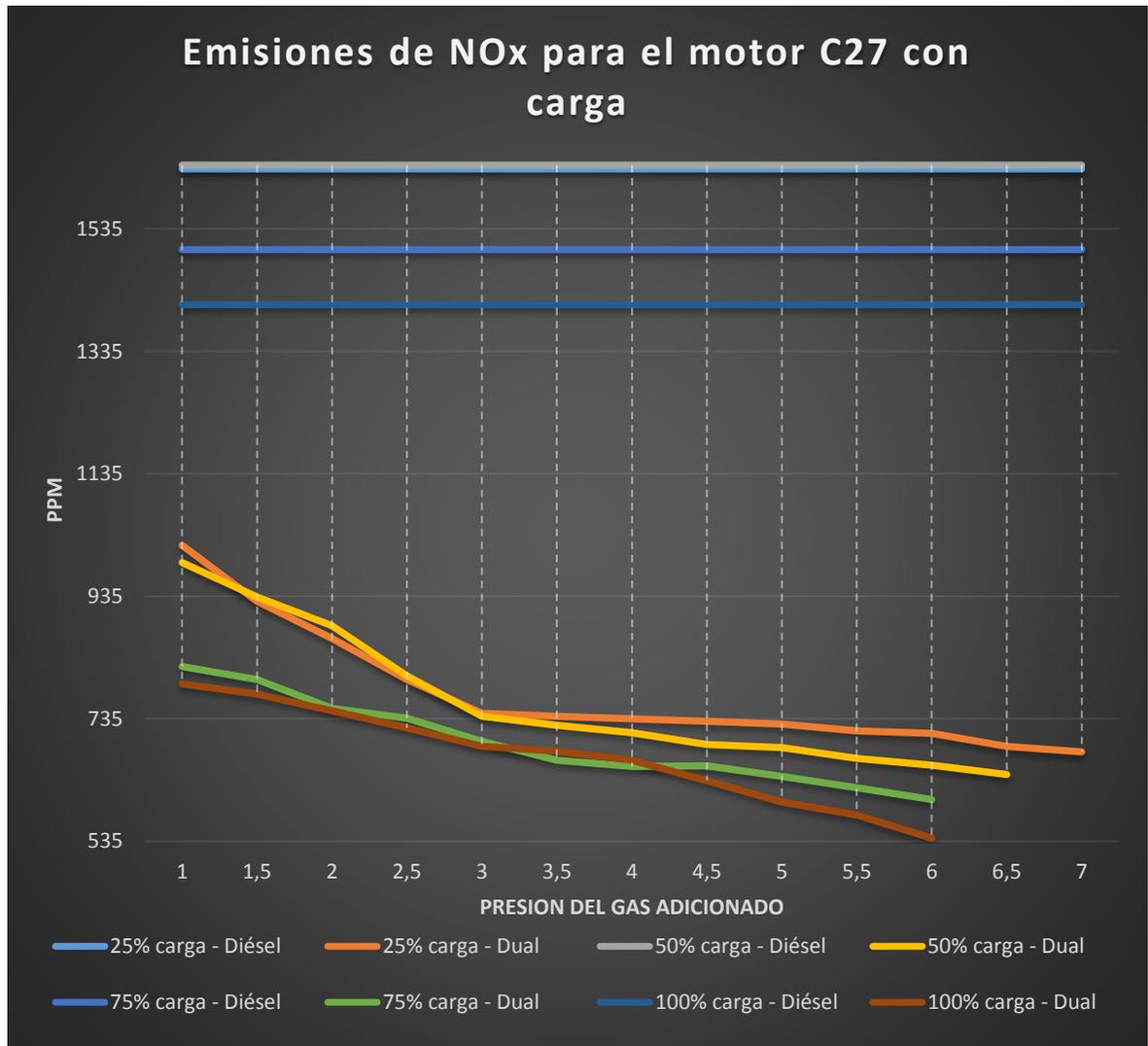


Figura 37: Emisiones de NOx a diferentes % de carga del equipo y presión de gas

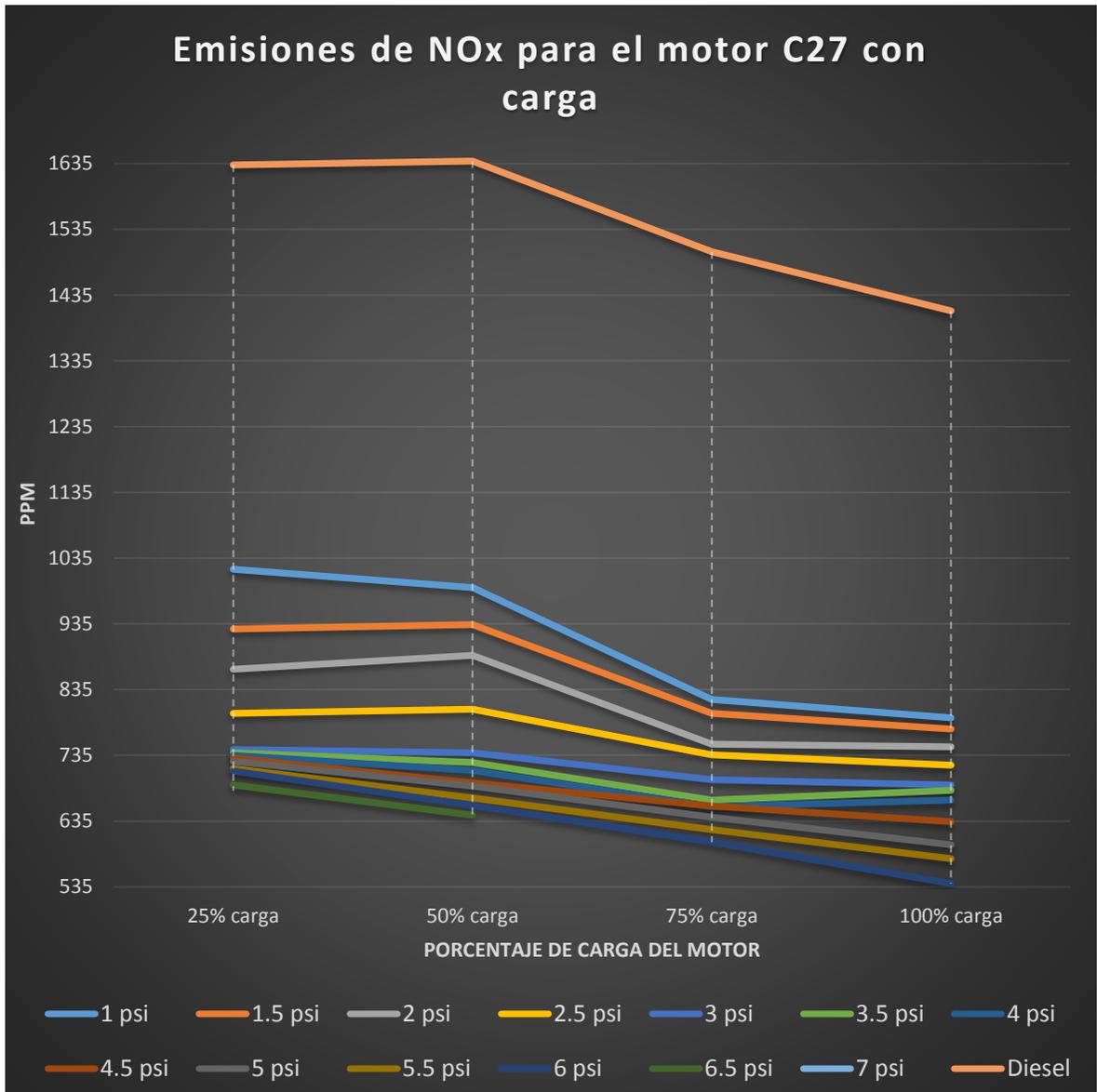


Figura 38: Variación del NOx con cambios en el % de carga del equipo

Se puede observar de las anteriores graficas que la mayor bondad encontrada en las pruebas fue la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno NOx cuando operaba el motor en modo *dual-fuel*, para algunos casos la reducción fue de 3 veces y se incrementaba a medida que mayor diésel era sustituido por gas en el motor..

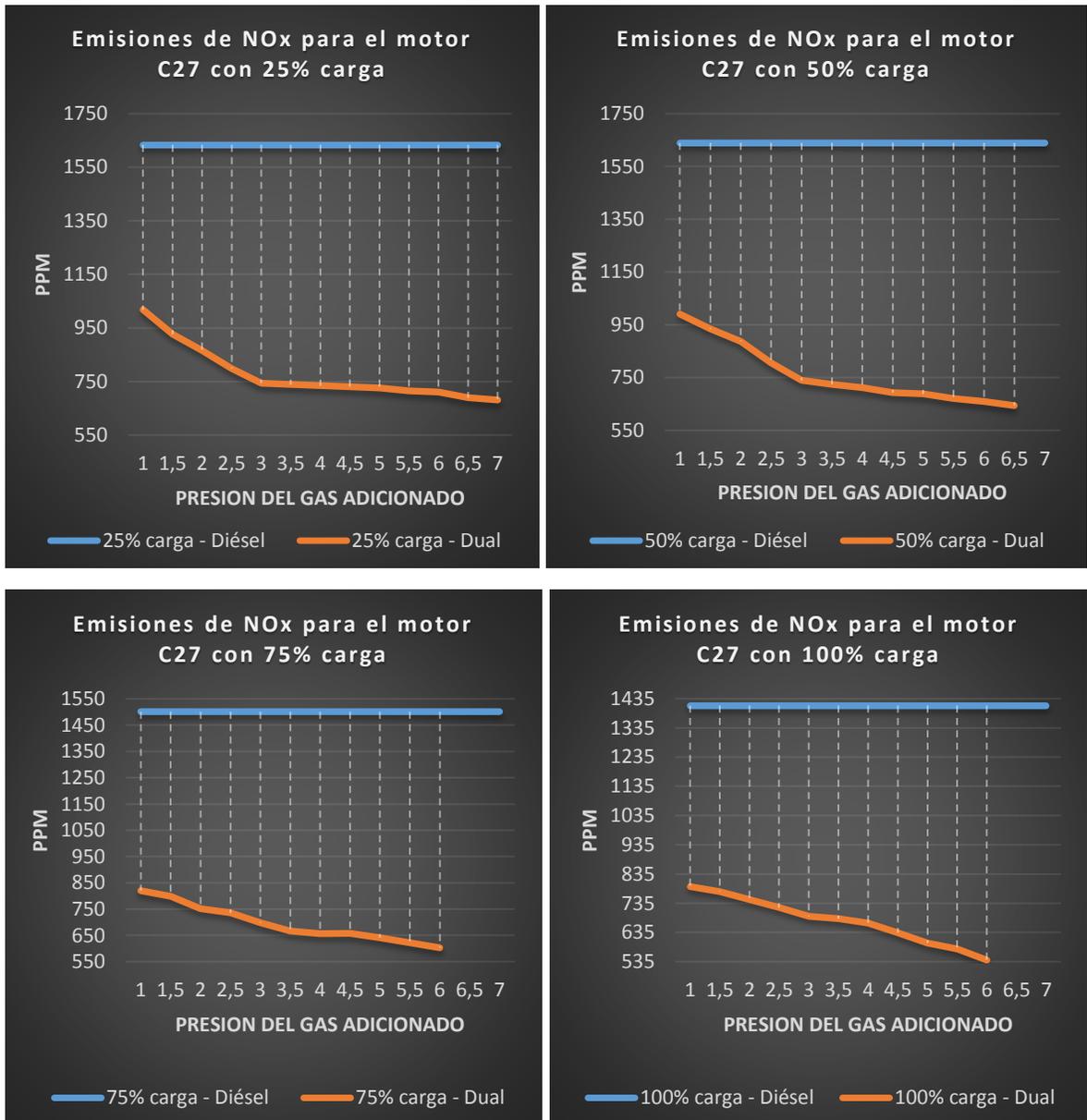


Figura 39: Emisiones de NOx a diferentes % de carga y variación de gas en el motor

La reducción en las emisiones de NOx se observa para todo nivel de sustitución de combustible diésel por gas y se incrementa con el aumento de carga.

3.11.4. Emisiones de Hidrocarburos (HC) en los gases de escape

Se realiza medición de los hidrocarburos presentes en los gases de escape del motor a las diferentes cargas del equipo y diferentes presiones de gas combustible con el instrumento

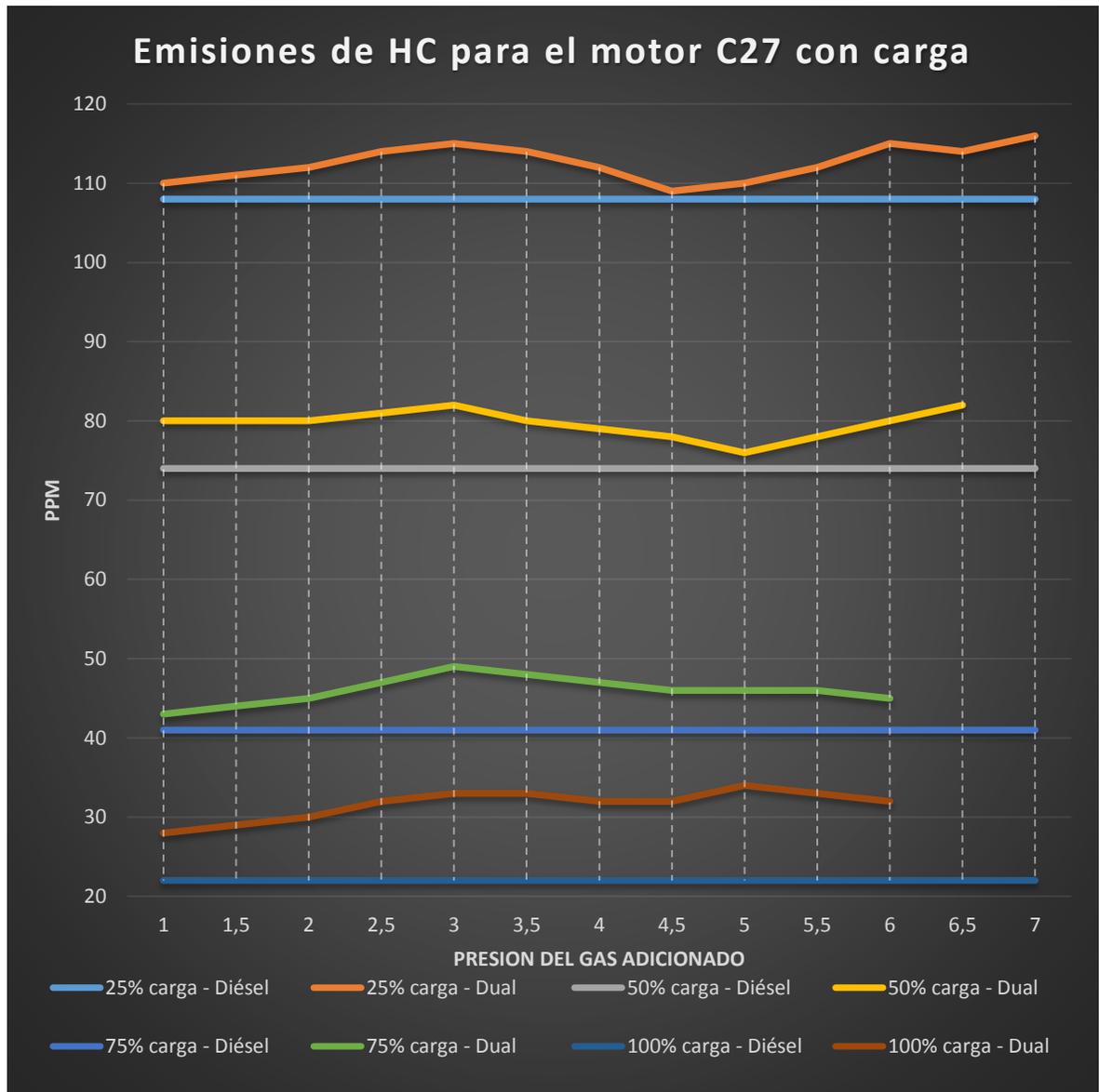


Figura 40: Emisiones de HC a diferentes % de carga del equipo y presión de gas

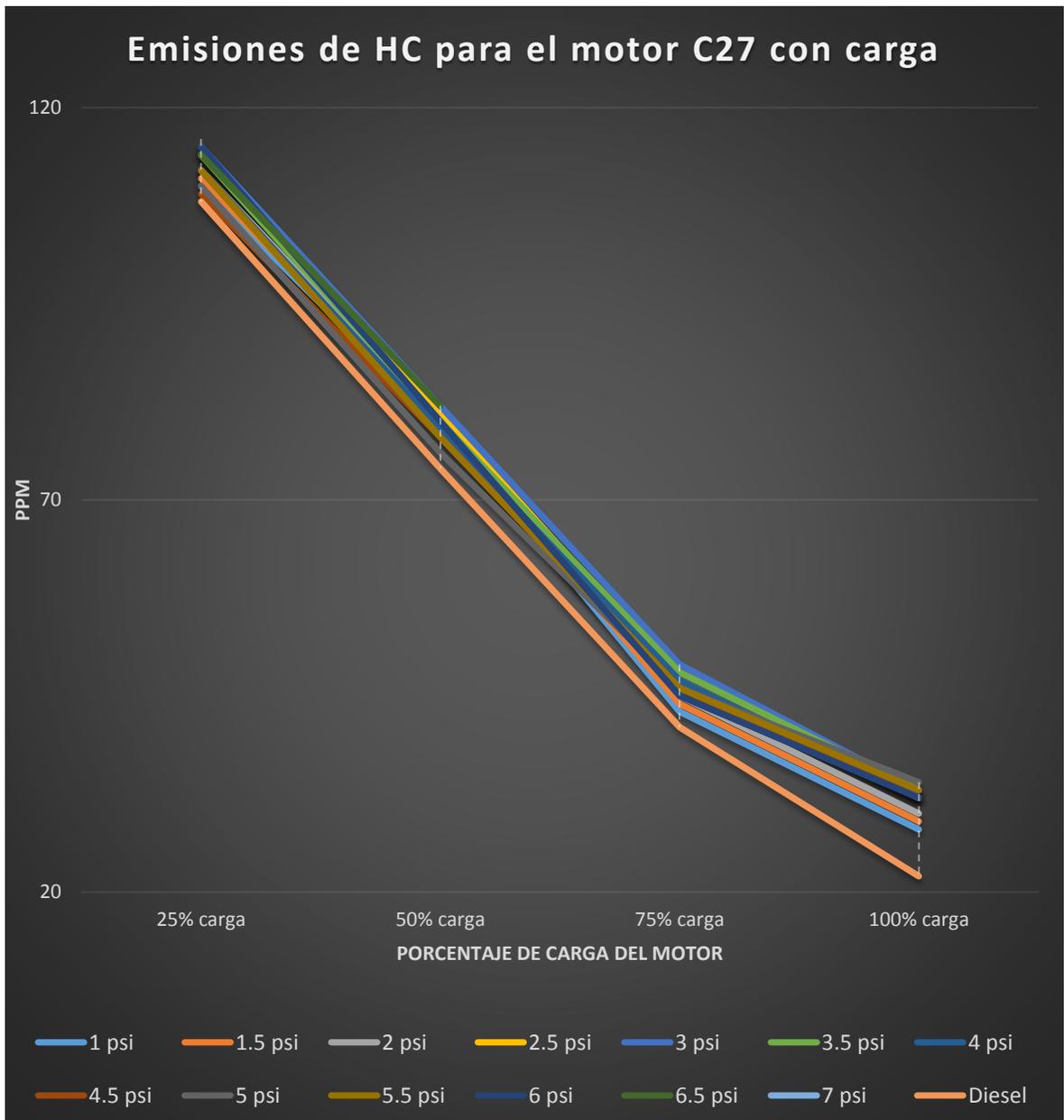


Figura 41: Variación de los HC en gases de escape con cambios en el % de carga del equipo

Se puede observar de las gráficas anteriores que los hidrocarburos presentes en los gases de escape tienden a ser muy similares en modo diésel a modo dual, solo ay un leve incremento del valor de las emisiones en el modo dual de combustible.

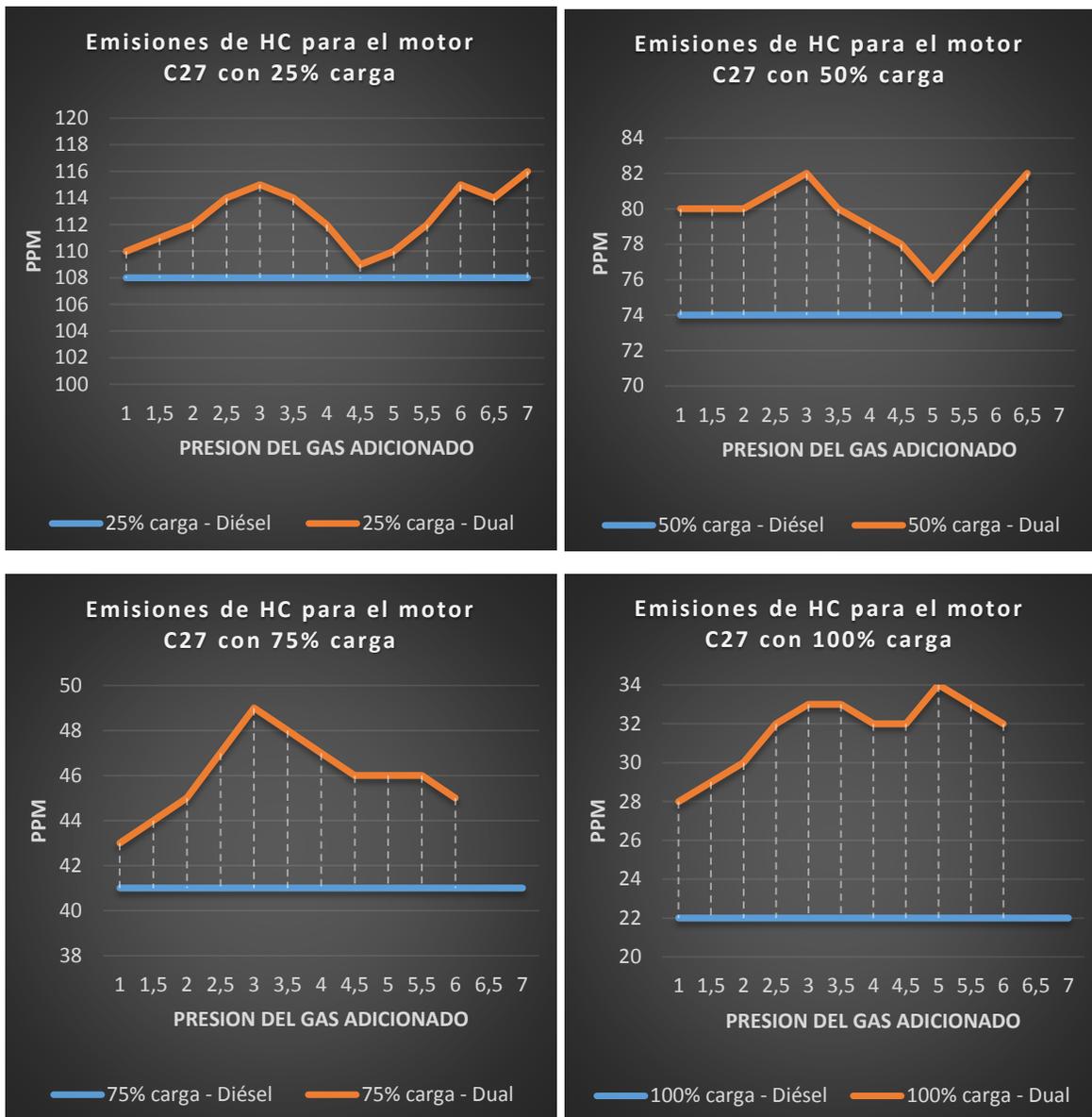


Figura 42: Emisiones de HC a diferentes % de carga y variación de gas en el motor

Las gráficas muestran el comportamiento de las emisiones de HC en los gases de escape para diferentes puntos de operación del motor.

4. IDENTIFICAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO Y DE EMISIONES DEL MOTOR EN PRUEBA MEDIANTE REDES NEURONALES A PARTIR DE LOS NIVELES DE SUSTITUCIÓN DEL SISTEMA “DUAL-FUEL”

El grupo de mecanismos de desarrollo limpio y gestión energética de la Universidad Nacional (MDLYGE) ha publicado estudios para sustitución de combustibles en diferentes procesos y ha planteado modelos para simular estos procesos mediante redes neuronales, debido a los criterios de transversalidad de las diferentes investigaciones que se llevan a cabo en el grupo de investigación, en este proyecto se plantea la simulación de los resultados obtenidos bajo un modelo de redes neuronales que permita predecir las emisiones del motor en prueba y el nivel de sustitución de combustible diésel al operar el equipo en modo “*dual-fuel*”.

4.1. Introducción

Con la ayuda de un modelo se llega a representar una situación tan cotidiana como compleja llegando a una síntesis del problema y por lo tanto a una solución factible y precisa, la utilización de estos modelos pueden proporcionarnos una explicación y proveernos una solución tan optima pues abarca tanto una mirada exacta o como una abstracción de la misma.

En la utilización de cualquier modelo, este se debe detallar minuciosamente para llegar a obtener en el futuro predicciones y estimaciones validas sobre la conducta del sistema en cuanto a lo dinámico y lo estático, al realizar adecuadamente la elaboración de un modelo matemático se deja un lado las imprecisiones que conlleva un lenguaje netamente verbal logrando de esta manera un puente de comunicación más efectiva.

Finalizado todo el proceso de la conceptualización del proceso y del respectivo análisis de dicho modelo matemático se llega a la interpretación y análisis del mismo, lo que resulta en la utilización en un escenario real, simulando las características con el fin de no exponer el proceso mientras se analiza la entrada abrupta de cualquier condición inusual.

Es importante resaltar que todo modelo matemático debe estar apoyado con datos confiables pues al no contar con dichos datos se llega a solución que no se ajusta a la realidad y al propósito final, actualmente se cuenta con técnicas clásicas que no pueden lograr resultados admisibles y tolerables, por lo que cada vez se hace más hincapié en investigar otras técnicas más precisas con el fin de tratar los inconvenientes que se pueden originar con los modelos clásicos, es de esta manera que llegamos a las redes neuronales artificiales, estas se han posicionado en una importante área de la inteligencia artificial y en un instrumento para afrontar problemas dinámicos, como bien se sabe todos los procesos industriales del más sencillo hasta el más complejo incluye un red dinámica para el procesamiento de datos, por lo que resulta bastante beneficioso al implementar este enfoque, dejando a un lado los resultados medianamente aceptables y obtener resultados que más se ajusten con soluciones más satisfactorias.

Este estudio se basa en el comportamiento mecánico y de emisiones del motor en prueba a través de redes neuronales a partir de los niveles de sustitución del sistema Dual – Fuel y está basado en trabajos anteriores publicados por el grupo de investigación MDLYGE de la Universidad Nacional.

A continuación se presenta una introducción acerca de las redes neuronales artificiales para contextualizar el modelamiento realizado a los resultados de la investigación obtenidos mediante los ajustes de parámetros del sistema dual fuel para el motor en prueba.

4.2. Identificación de sistemas no lineales mediante Redes Neuronales

Las redes neuronales artificiales se definen como redes interconectadas en paralelo de elementos sencillos, las cuales interactúan con las variables del entorno es decir se asemeja al sistema nervioso de cualquier ser humano, las redes se consideran como modelos analógicos que asemejan las características y la capacidad de procesamiento de información, ahora bien la identificación se refiere a la elaboración de modelos matemáticos de todos los sistemas dinámicos teniendo en cuenta toda la información que entra en el sistema así como todas aquellas perturbaciones a anomalías del modelo matemático, a continuación se ilustra de manera esquemática la identificación de un sistema [43][44].

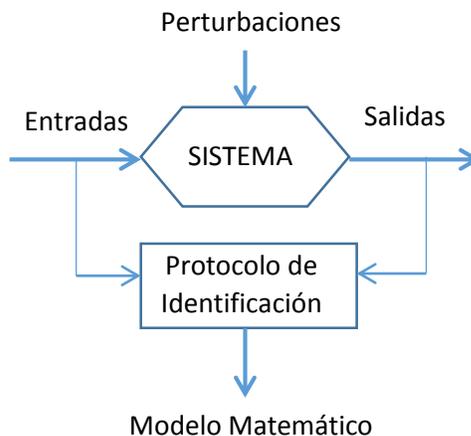


Figura 43. Identificación de un sistema mediante red neuronal

Cuando se habla de la identificación de sistemas no lineales se debe tener en cuenta que es una labor más que compleja pues tiene en cuenta dos criterios los cuales son muy importantes a la hora de abordar el sistema, primero se debe considerar la elección de la estructura de dicho modelo teniendo en cuenta los parámetros que abarcan todo el sistema e igualmente la elección de un algoritmo que evalúe y considere los parámetros anteriormente seleccionados, al transformar un modelo no lineal a uno lineal envuelve acercamientos que en la mayoría de las situaciones no representa adecuada y competentemente el comportamiento preciso del

sistema que no es lineal. Por ello se hace hincapié que para obtener un adecuado y preciso modelo que represente los datos se requiere una elevada inversión que no solo sea suficiente para obtener los datos básicos si no obtener los adecuados, pues se demanda de la obtención de algoritmos más especializados que puedan manejar las estructuras más complejas a utilizar, cabe resaltar que al implementar este método a comparación de otros sistemas de procesamiento de información se hace más flexible acelerando la obtención de resultados, facilitando la cuantificación de toda la información, aunque es vital resaltar que se hace necesario realizar variadas pruebas y seleccionar los datos adecuados.

Los primeros modelos de redes neuronales datan de 1943 por los neurólogos McCulloch y Pitts. Años más tarde, en 1949, Donald Hebb desarrolló sus ideas sobre el aprendizaje neuronal, quedando reflejado en la "regla de Hebb". En 1958, Rosenblatt desarrolló el perceptrón simple, y en 1960, Widrow y Hoff desarrollaron el ADALINE, que fue la primera aplicación industrial real. [44] [45]

Las redes neuronales artificiales tienen muchas ventajas entre las que se destacan:

- Aprendizaje: Tienen la habilidad de aprender mediante una etapa que se llama etapa de aprendizaje. Esta consiste en proporcionar a la Red datos como entrada a su vez que se le indica cuál es la salida esperada.
- Auto organización: Crea su propia representación de la información en su interior, quitándole esta tarea al usuario.
- Tolerancia a fallos: Almacena la información de forma redundante, ésta puede seguir respondiendo de manera aceptable aun si se daña parcialmente.

- Flexibilidad: Puede manejar cambios no importantes en la información de entrada, como señales con ruido u otros cambios en la entrada.
- Tiempo real: La estructura de una Red neuronal es paralela, por lo cual si esto es implementado con computadoras o en dispositivos electrónicos especiales, se pueden obtener respuestas en tiempo real.

Las neuronas se pueden disponer en diferentes capas. Las redes neuronales más sencillas constan de una capa de entrada, una capa de neuronas o capa oculta, y una capa de salida [46]. Una red neuronal se compone de unidades llamadas neuronas. Cada neurona recibe una serie de entradas a través de interconexiones y emite una salida. Esta salida viene dada por tres funciones:

- Una función de propagación (también conocida como función de excitación), que por lo general consiste en el sumatorio de cada entrada multiplicada por el peso de su interconexión (valor neto). Si el peso es positivo, la conexión se denomina excitatoria; si es negativo, se denomina inhibitoria.
- Una función de transferencia, que se aplica al valor devuelto por la función de activación. Se utiliza para acotar la salida de la neurona y generalmente viene dada por la interpretación que queramos darle a dichas salidas. Algunas de las más utilizadas son la función escalón, lineal, sigmoidea y gaussiana.
- La función de activación, en caso de que exista, activa o desactiva la salida de esta neurona.

Tipos de redes neuronales [46]

Los criterios más importantes para clasificar las redes neuronales son:

- Según el tipo de conexiones:
 - Redes de propagación hacia delante (feed-forward), donde las conexiones van en un solo sentido desde la capa de entrada hacia la capa de salida
 - Redes recurrentes, donde las conexiones pueden realizar ciclos.

- Según el tipo de aprendizaje
 - Aprendizaje supervisado. Los datos (o entradas) tienen una respuesta conocida (o salida), con la cual se ajusta o entrena la red neuronal.
 - Aprendizaje no supervisado o auto-organizado. Los datos son solamente entradas. Son redes empleadas fundamentalmente para clasificación y reconocimiento de patrones.

4.3. Planteamiento de la red neuronal para simular las emisiones del motor en prueba con el sistema “dual-fuel”

Tomando como base las investigaciones realizadas por el grupo de investigación MDLYGE para motores con sustitución de combustible, se plantea un modelo de red neuronal con las siguientes características:

- Red tipo “Circular back propagation”
- 4 capas ocultas (se realizaron modelos con más capas pero la disminución del error era relativamente bajo por lo cual se optó por dejar el modelo de 4 capas)
- Conexión de entradas con salidas
- Utilizar el criterio de mejor “R square”
- Finalizar el entrenamiento cuando valor el valor objetivo sea 0.99 del objetivo

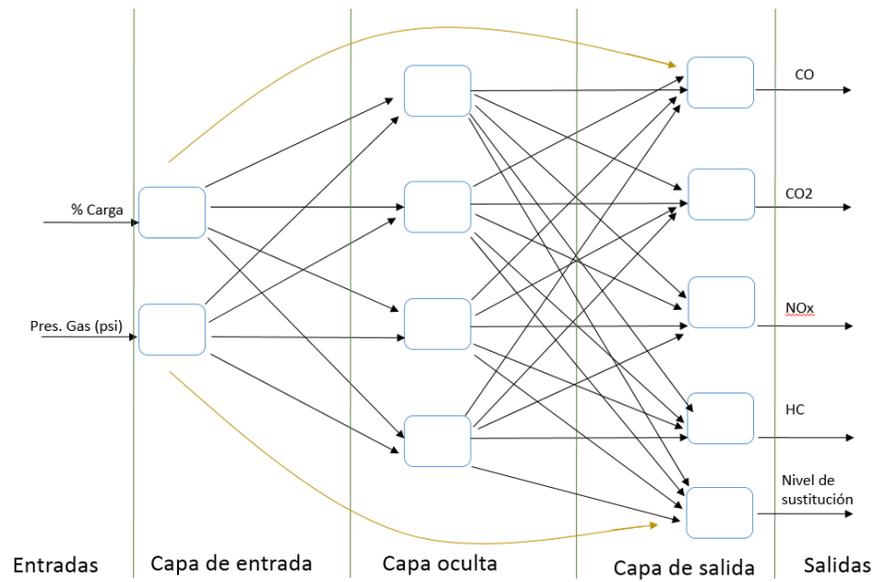


Figura 44. Estructura de la red neuronal utilizada como modelo.

Para la simulación del proceso del proceso se utilizó el software NNModel en el cual se programó la red neuronal planteada, los parámetros de simulación se observan en la figura 45.

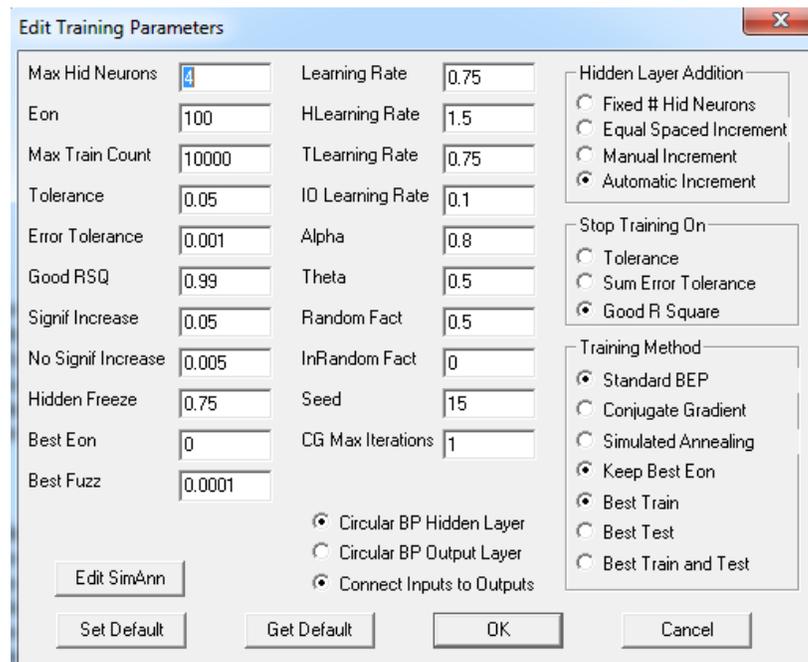


Figura 45: Parámetros de entrenamiento de la red neuronal del modelo utilizado.

Los datos de entrenamiento para la red neuronal son los presentados en la tabla 20, los cuales fueron obtenidos en las pruebas realizadas al motor en prueba.

Presión gas (psi)	Carga motor (%)	CO (ppm)	CO2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)	Nivel de sustitución de diésel (%)
0	25	227	3,9	1633	108	0
0	50	145	4,3	1639	74	0
0	75	112	5	1501	41	0
0	100	100	5,6	1411	22	0
1	25	289	5,4	1018	110	11,8
1	50	230	6,2	990	80	12,4
1	75	201	7,8	820	43	11,4
1	100	240	8,9	792	28	11,9
1,5	25	333	5,8	927	111	12,6
1,5	50	312	6,8	934	80	12,8
1,5	75	252	7,8	799	44	12,0
1,5	100	286	9,1	775	29	12,3
2	25	485	6,3	866	112	12,6
2	50	390	7,2	887	80	13,3
2	75	307	7,9	752	45	12,3
2	100	299	9,3	748	30	12,9
3	25	520	6,1	744	115	14,3
3	50	441	7,9	739	82	15,1
3	75	372	8,9	698	49	14,7
3	100	344	9,4	690	33	14,9
4	25	510	6,8	735	112	17,6
4	50	440	8	712	79	17,4
4	75	370	9	657	47	15,8
4	100	344	9,6	667	32	15,9
5	25	520	7,1	726	110	20,2
5	50	430	8	688	76	21,1
5	75	375	9,1	641	46	17,0
5	100	342	9,5	599	34	17,7
5,5	25	537	7,4	715	112	19,3
5,5	50	445	8,2	670	78	20,6
5,5	75	365	9,1	622	46	19,4
5,5	100	342	9,4	578	33	20,5

6	25	539	7,2	711	115	17,6
6	50	455	8,3	659	80	20,2
6	75	362	9,2	603	45	20,8
6	100	341	9,7	540	32	21,1
6,5	25	548	7,5	690	114	16,8
6,5	50	490	8,3	644	82	19,7
6,5	75					
6,5	100					
7	25	559	7,8	681	116	16,0
7	50					
7	75					
7	100					

Tabla 20: Matriz de datos reales de entrada y salida para entrenamiento de la red neuronal

Los parámetros y características de las variables de entrada y salida a la red son:

Label	TimeS	Format	Units	Min	Max	Clip Lo
PRES_GAS	0	3.1		0.0	7.0	MISSING
CARGA_MO	0	5.1		25.0	100.0	MISSING
CO	0	5.1		100.0	559.0	MISSING
CO2	0	3.1		3.9	9.7	MISSING
NOX	0	6.1		540.0	1639.0	MISSING
HC	0	5.1		22.0	116.0	MISSING
SUSTITUC	0	4.1		0.0	21.1	MISSING

Clip Hi	Usage	Flag	Scale	Offset	Ftype
MISSING	1	0	0.085714	2.333331	0
MISSING	1	0	0.008000	-0.000026	0
MISSING	0	0	0.001307	52.999840	0
MISSING	0	0	0.103448	-1.966669	0
MISSING	0	0	0.000546	-173.667053	0
MISSING	0	0	0.006383	9.333301	0
MISSING	0	0	0.028436	7.033326	0

Figura 46: Características y parámetros de las variables de entrada a la red neuronal.

La dinámica del entrenamiento de la red que arroja el software durante su fase de entrenamiento contempla los 6 factores seleccionados en la parametrización hecha del sistema, la evolución del entrenamiento se puede observar en la figura 47:

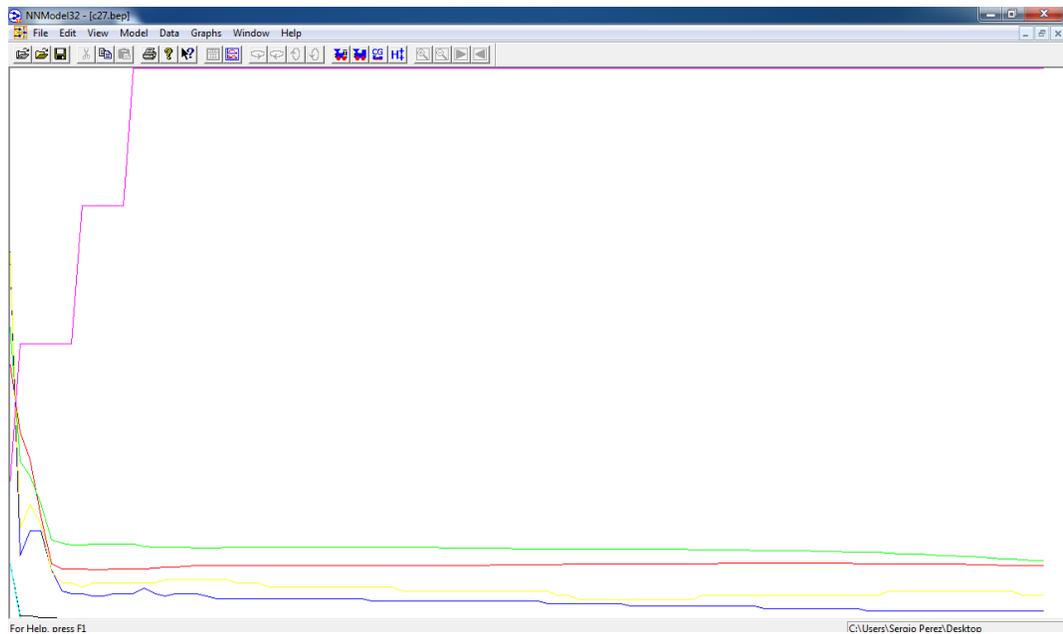


Figura 47: Dinámica del entrenamiento de la red neuronal.

Una vez el software ha finalizado el entrenamiento, se obtiene la siguiente matriz de pesos para la red neuronal.

BEP Model c27.bep [MSE=0.000509]
 # Inputs / Hidden / Outputs: 2 / 4 / 5
 Input Labels: PRES_GAS CARGA_MO
 Output Labels: CO CO2 NOX
 HC SUSTITUC
 Parent is: C27
 Training Matrix: 51
 Test Matrix: 0
 # Max Hidden: 4
 Trained to: 9900
 Max Count: 10000
 Sum Sq Error: 0.000509
 Training Time: 0 00:00:01

Input to hidden layer weights					
	HID001	HID002	HID003	HID004	
PRES_GAS	-3.6150e-001	-2.1355e+001	+2.1654e+000	-1.9581e+001	
CARGA_MO	+6.2516e+000	+1.5862e+000	-6.4744e-001	+1.2431e+000	
Theta	-2.3913e+000	+2.4302e+000	-9.3015e-001	+6.2130e+000	
TLearn	+1.1719e-002	+4.6875e-002	+1.8750e-001	+7.5000e-001	
HLearn	+2.3438e-002	+9.3750e-002	+3.7500e-001	+1.5000e+000	
CircW	+6.4524e-001	-1.6670e+000	-2.7143e+000	-3.7615e+000	
Hidden to output layer weights					
	CO	CO2	NOX	HC	SUSTITUC
HID001	-2.0882e+000	+4.6451e-001	-3.2047e-001	-2.9385e+000	+7.4185e-001
HID002	+1.7274e+000	-6.8360e+000	+8.7253e+000	-1.0714e+000	-9.2855e+000
HID003	-1.4911e+000	-2.5284e+000	-2.9946e-001	-4.0290e-001	+4.2693e+000
HID004	-2.0934e+000	-3.5839e-001	+2.0856e-001	+6.3087e-002	+4.6505e-001
Theta	+1.8633e+000	+1.4251e-001	+4.1562e-002	+2.0727e+000	-2.3071e+000
TLearn	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001
Learn	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001	+7.5000e-001
CircW	+3.4246e-001	+3.8907e-001	+7.7380e-002	-3.6575e-001	+3.9731e-001
Input to output layer weights					
	CO	CO2	NOX	HC	SUSTITUC
PRES_GAS	+3.7213e-001	+7.2939e-001	-1.0388e+000	+2.3663e-001	+2.6922e+000
CARGA_MO	+4.0728e-002	+5.0558e-001	-2.8809e-001	-5.3033e-001	+9.4180e-001

Figura 48: Matriz de pesos después del entrenamiento de la red neuronal.

4.4. Validación del modelo de la red neuronal para el motor en prueba con el sistema “dual-fuel”

Con la red neuronal montada y entrenada, se procede a realizar la validación de la red mediante la predicción de resultados al ingresar variables de entrada que se han obtenido en la fase de pruebas del sistema “dual-fuel” de modo que se puedan comparar las predicciones con datos reales de campo.

Para la validación del sistema se utiliza la función interrogación que posee el software y en donde podemos obtener el resultado que arroja el modelo a las diferentes entradas que se le asignen

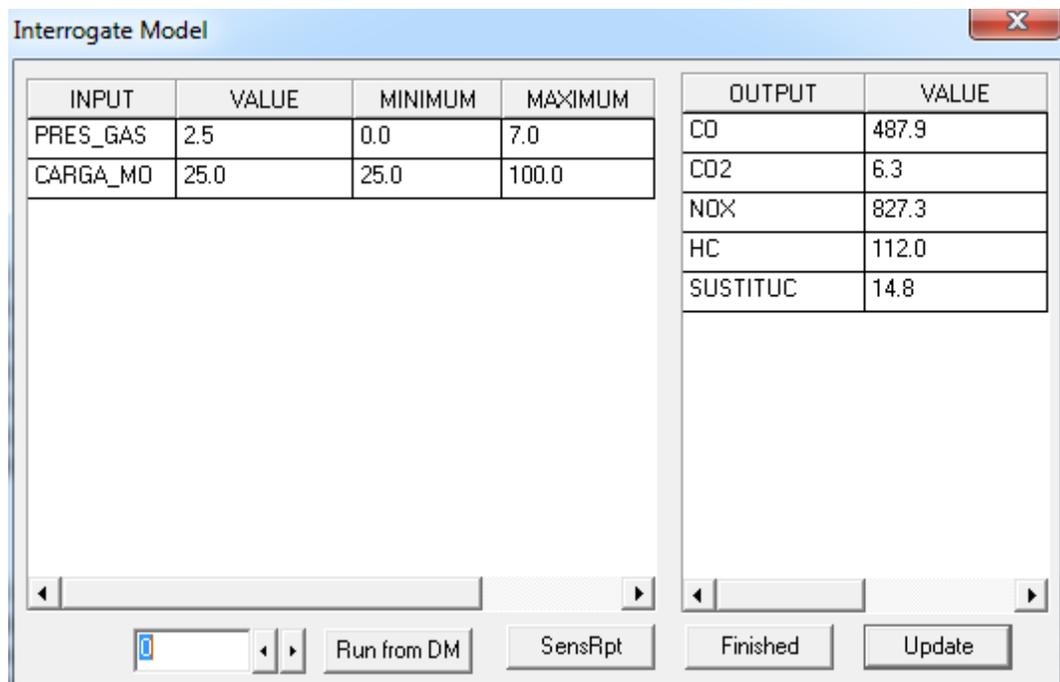


Figura 49: Modulo de interrogación del software NNModel.

Los datos reales obtenidos en las pruebas del motor se pueden observar en la tabla 21 y las predicciones que arroja el modelo para los datos de entrada se encuentran en la tabla 22.

Presion_gas (psi)	Carga motor (%)	CO (ppm)	CO2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)	Nivel de sustitución de diésel (%)
2,5	25	501	6	799	114	13,4
2,5	50	410	7,5	805	81	14,7
2,5	75	344	8,4	736	47	13,5
2,5	100	323	9,2	720	32	14,3
3,5	25	510	6,3	739	114	15,1
3,5	50	441	7,9	724	80	16,1
3,5	75	372	9	667	48	15,2
3,5	100	345	9,4	682	33	15,3
4,5	25	505	7	731	109	21,0
4,5	50	436	8,1	693	78	19,3
4,5	75	368	9,1	658	46	16,1
4,5	100	344	9,5	634	32	16,7

Tabla 21: Datos de entrada y salida usados para validar el modelo

Presion_gas (psi)	Carga motor (%)	CO (ppm)	CO2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)	Nivel de sustitución de diésel (%)
2,5	25	487,9	6,3	827,3	112	14,8
2,5	50	408,5	7,5	774,1	79,6	14,9
2,5	75	336,6	8,6	725,1	45,3	14,7
2,5	100	317,5	9,3	693,8	30,5	14,3
3,5	25	514,2	6,6	780	112,3	16,3
3,5	50	434,4	7,7	728,9	79,8	16,6
3,5	75	355,9	8,8	683,9	45,7	16,4
3,5	100	329,7	9,4	656,1	31,1	16,2
4,5	25	523,4	6,9	743,9	112,5	17,6
4,5	50	443,5	8	694,2	79,9	17,9
4,5	75	364,4	8,9	651	46,1	17,9
4,5	100	337,1	9,5	624,6	31,6	17,8

Tabla 22: Variables de salida obtenidas con el modelo de NNModel.

Con base en los datos obtenidos en las tablas 21 y 22 se procede a calcular los errores relativos cometidos por el modelo en la predicción de resultados. El mayor error del modelo es del (16.2%).

Errores relativos del modelo basado en redes neuronales						
Presion_gas (psi)	Carga motor (%)	CO (ppm)	CO2 (%)	NOx (ppm)	HC (ppm)	Nivel de sustitución de diésel (%)
2,5	25	2,6%	-5,0%	-3,5%	1,8%	-10,1%
2,5	50	0,4%	0,0%	3,8%	1,7%	-1,5%
2,5	75	2,2%	-2,4%	1,5%	3,6%	-9,0%
2,5	100	1,7%	-1,1%	3,6%	4,7%	-0,1%
3,5	25	-0,8%	-4,8%	-5,5%	1,5%	-7,8%
3,5	50	1,5%	2,5%	-0,7%	0,3%	-3,4%
3,5	75	4,3%	2,2%	-2,5%	4,8%	-7,5%
3,5	100	4,4%	0,0%	3,8%	5,8%	-5,9%
4,5	25	-3,6%	1,4%	-1,8%	-3,2%	16,2%
4,5	50	-1,7%	1,2%	-0,2%	-2,4%	7,1%
4,5	75	1,0%	2,2%	1,1%	-0,2%	-11,0%
4,5	100	2,0%	0,0%	1,5%	1,3%	-6,6%

Tabla 23: Errores relativos del modelo desarrollado en el software NNModel.

El modelo tiene un muy comportamiento prediciendo las emisiones de gases productos de la combustión, para este caso el error máximo no superó el 6%, sin embargo para predecir el nivel de sustitución de combustible diésel a los diferentes combinaciones de presión de gas y carga del motor el error del modelo alcanzo el 16%, autores de trabajos similares obtuvieron niveles de error similares [43].

En las siguientes graficas se puede observar el comparativo de los datos medidos y los calculados con el modelo de red neuronal, se puede observar que los errores son bajos para toda la matriz de datos que se le ingresaron al modelo en el caso de emisiones.

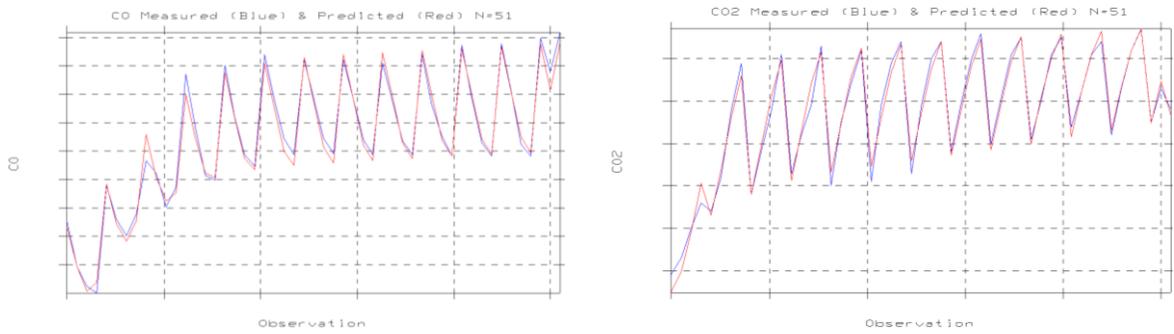


Figura 50: Validación del modelo de RNA para las variables CO (izquierda) y CO2 (derecha)

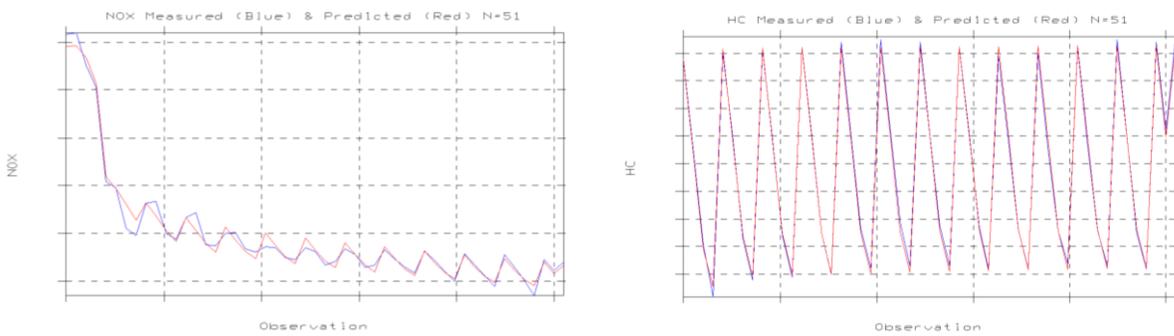


Figura 51: Validación del modelo de RNA para las variables NOx (izquierda) y HC (derecha)

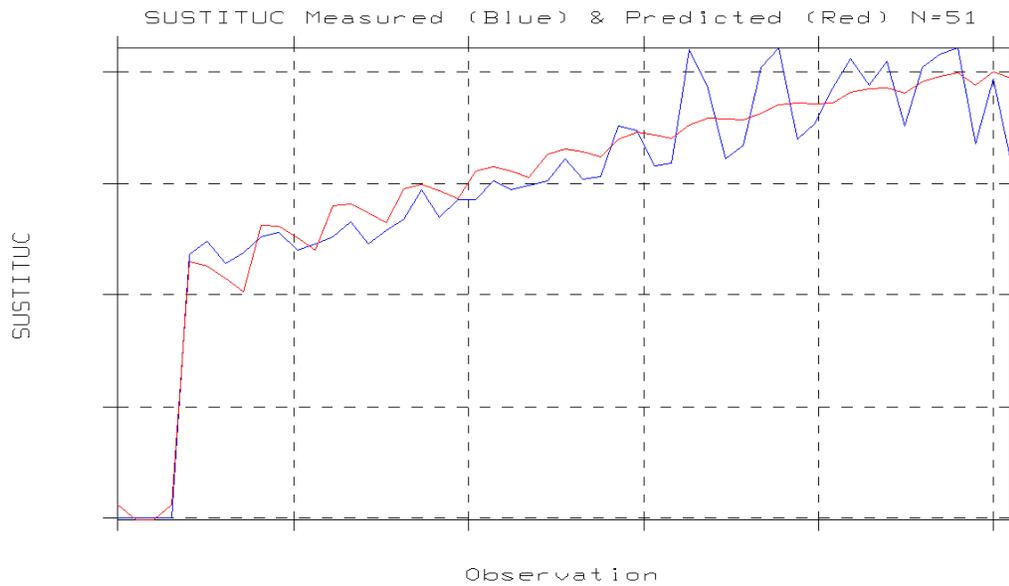


Figura 52: Validación del modelo de RNA para el porcentaje de sustitución de combustible diésel

En las gráficas 53, 54 y 55 se observa las predicciones del modelo para diferentes valores de entrada de presión de gas y carga del motor

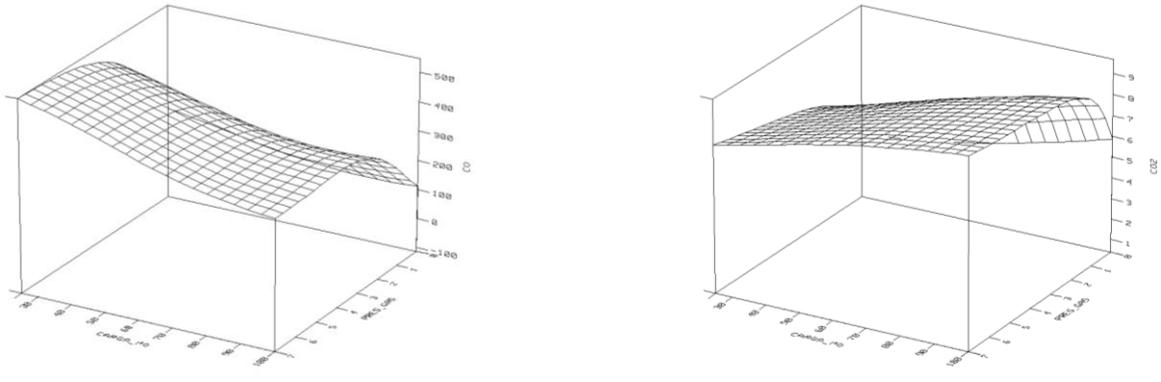


Figura 53: Predicción de emisiones CO (izquierda) y CO2 (derecha) en función de la carga del equipo y diferentes presiones de gas natural en la entrada del motor.

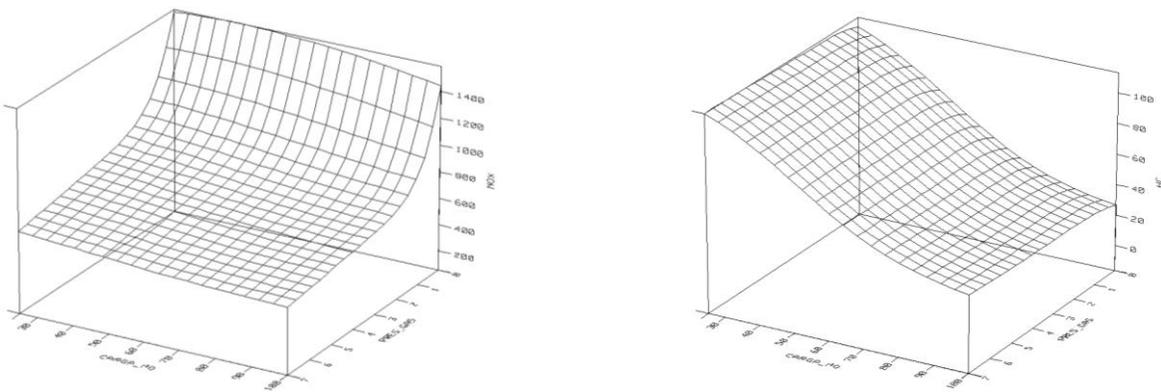


Figura 54: Predicción de emisiones NOx (izquierda) y HC (derecha) en función de la carga del equipo y diferentes presiones de gas natural en la entrada del motor.

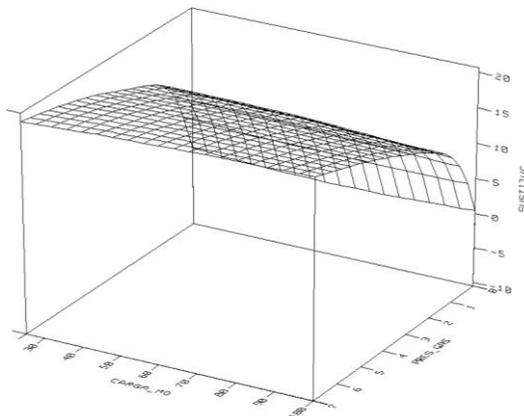


Figura 55: Predicción del modelo para el porcentaje de sustitución de combustible diésel.

CONCLUSIONES GENERALES

Una vez finalizado el presente documento en el cual se plasma el resultado de la investigación realizada para el sistema “dual-fuel” aplicado en un motor diésel de un campo petrolero bajo condiciones reales de trabajo se puede concluir que:

- En una facilidad petrolera es posible sustituir en un motor diésel parte del combustible líquido por gas natural proveniente de los pozos petroleros mediante la utilización de un sistema “*dual-fuel*” que se instale en el motor a combustión, mediante esta conversión se puede aprovechar el gas natural que se tiene y disminuir la cantidad de diésel que se utiliza para operar el equipo.
- Con la utilización del sistema dual fuel en un motor diésel es posible obtener la potencia requerida del equipo sin que se vea afectado su integridad o parámetros de operación.
- Un motor diésel operando en modo dual-fuel con gas natural puede incrementar su tasa de reemplazo de diésel mediante las modificaciones de parámetros de motor o de operación, con la modificación de la presión de entrada del gas se logró para el equipo en prueba un incremento en la tasa de reemplazo del 14.9% al 21.1%.
- Mediante redes neuronales artificiales es posible modelar el comportamiento de las emisiones de gases del motor diésel teniendo como variables de entrada la presión del gas natural y la carga del motor, los resultados del modelo presentan buena exactitud para un sistema que al no ser lineal es complejo de modelar bajo otros tipos de sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Naciones Unidas, PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCION MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMATICO, FCCC/INFORMAL/83, 1998.
- [2] http://es.wikipedia.org/wiki/Protocolo_de_Kioto_sobre_el_cambio_climatico.
- [3] U.S. Environmental Protection Agency, Emission Standards Reference Guide. Code of Federal Regulations (CFR), 2012.
- [4] Bedoya Caro, Iván Darío; Arrieta, y otros. Efecto del Grado de Carga y la Cantidad del Combustible Piloto en el Comportamiento Mecánico Ambiental de un Motor Dual Diésel-Biogás para Generación de Electricidad. Rev. fac. ing. univ. Antioquia [online]. 2007, n.42 [cited 2012-10-25], pp. 79-93.
- [5] Pérez Súa, Sergio. Factibilidad de Implementar un Sistema “Bi-Fuel” para Reducir el Consumo de Combustible Diésel en Los Motores Utilizados en las Facilidades de Producción”. Universidad Industrial de Santander UIS, Escuela de Petróleos, 2011.
- [6] R. G. Papagiannakis. D.T. Hountalas. “Combustion and exhaust emission characteristics of a dual fuel compression ignition engine operated with pilot diesel fuel and natural gas”. Energy Conversion and Management. Vol. 45. 2004. pp. 2971-2987.
- [7] Liu Z. An examination of the combustion characteristics of compression ignition engines fuelled with gaseous fuels. Ph.D. thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Calgary, Canada, 199
- [8] A. Karim Ghazi. “A review of combustion processes in the dual fuel engine -The gas diesel engine”. Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 6. 1980. pp. 277-285.
- [9] Salazar Rosas, Jesus Ricardo. Motor de Combustión Interna, Apuntes clase, México, Abril 2011

- [10] Silva Leal Vladimir, Arango Gómez Jorge Eduardo, Fabio Emiro Sierra Vargas Fabio Emiro. "Exploratory Analysis of Research on Internal Combustion Engines Working with Biogas". Grupo de Investigación en Mecanismos de Desarrollo Limpio y Gestión Energética, Universidad Nacional de Colombia. 2012.
- [11] L. Gettel. G. Perry. "Natural gas conversion system for heavy duty truck engines". SAE Paper 91 911663. 1991. 1663. 1991.
- [12] P. Poonia. A. Ramesh. R. R. Gaur. "Experimental Investigation of the Factors Affecting the Performance of a LPG Diesel Dual Fuel Engine". SAE Paper N.º 1999-01-1123. 1999.
- [13] Brachetti, Jürgen. "Dual-Fuel The best Fuel in the most efficient engine", NGVA Europe position paper, mayo 2010.
- [14] A. Kleinová, I. Vailing, J. Lábaj, J. Mikulec, J. Cvengroš. Vegetable oils and animal fats as alternative fuels for diesel engines with dual fuel operation. *Fuel Processing Technology*, Volume 92, Issue 10, October 2011, Pages 1980-1986
- [15] T. Korakianitis, A.M. Namasivayam, R.J. Crookes, Diesel and rapeseed methyl ester (RME) pilot fuels for hydrogen and natural gas dual-fuel combustion in compression-ignition engines *Fuel*, Volume 90, Issue 7, July 2011, Pages 2384-2395.
- [16] T. Lakshmanan, G. Nagarajan. Experimental investigation on dual fuel operation of acetylene in a DI diesel engine. *Fuel Processing Technology*, Volume 91, Issue 5, May 2010, Pages 496-503.
- [17] Z Liu, G.A Karim. Simulation of combustion processes in gas-fuelled diesel engines. *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 211 (A) (1977), pp. 159-169.
- [18] Karim GA, Zhigang L. A Predictive Model for Knock in Dual Fuel Engines, SAE Paper 921550, 1992.
- [19] Hountalas DT, Papagiannakis RG. Development of a simulation model for direct injection dual fuel diesel--natural gas engines, SAE Trans. 2000-01-0286, 2000

- [20] Karim GA, Burn KS. The combustion of gaseous fuels in a dual fuel engine of the compression ignition type with particular reference to cold intake temperature conditions. SAE 800263, 1980
- [21] Xianhua D, Philip H. Emissions and fuel economy of a prechamber diesel engine with natural gas dual fueling. SAE 860069, 1986
- [22] G. H. Abd Alla. H. A. Soliman. O.A. Badr. M.F. Abd Rabbo. "Effect of pilot fuel quantity on the performance of a dual fuel engine". *Energy Conversion and Management*, Vol. 41. 2000. pp. 559-572.
- [23] Krisada Wannatong, Nirod Akarapanyavit, Somchai Siengsanorh. Combustion and Knock Characteristics of Natural Gas Diesel Dual Fuel Engine. JSAE 20077147, SAE 2007-01-2047
- [24] Soliman HA, Isaid FS. The effect of volatile fuel addition on diesel engine performance and emissions. In: *The 18th International Conference for Mechanical Engineering*, Alexandria University, Alexandria, Egypt, vol. 1. 1993. p. 327±36.
- [25] Thyagarajan V, Babu MKG. A combustion model for a dual fuel direct injection diesel engine, Diagnostics and modelling of combustion in reciprocating engine. In: *Proc. of Comodia Symposium*, Tokyo. 1985. p. 607.
- [26] B.B. Sahoo, N. Sahoo, U.K. Saha. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines—A critical review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1151–1184.
- [27] R.Uma, T.C. Kandpalb, V.V.N. Kishorea. Emission characteristics of an electricity generation system in diesel alone and dual fuel modes. *Biomass and Bioenergy* 27 (2004) 195 – 203
- [28] Parikh PP, Bhawe AG, Kapse DV, Shashikantha. Study of thermal and emission performance of small gasier–dual-fuel engine systems. *Biomass* (19): Elsevier Science Publishers Ltd; 1989.p.75 –97.

- [29] Sridhar G, Paul PJ, MukundaHS. Biomass derived producer gas as a reciprocating engine fuel—an experimental analysis. *Biomass & Bioenergy* 2001;21(1):61–72.
- [30] Arango Humberto Jorge, Calidad de los combustibles en Colombia. *Revista Ingeniería Universidad de los Andes*, ISSN 0121-4993. Mayo de 2009.
- [31] Unidad de Planeación minero energética de Colombia, COGENERACION, Portal web www.upme.gov.co, 2010
- [32] Universidad Nacional de Colombia, Curso virtual de Instalaciones y Maquinas Térmicas, www.virtual.unal.edu.co. 31 Agosto 2009
- [33] Payri F, Desantes J. Motores de combustión interna alternativos. Editorial Universidad politécnica de valencia, 2011
- [34] AltronicInc, GTI-Bifuel, www.gti-altronic.com, brochure of products.
- [35] Lafuente M, Genatios C, Crisis Petrolera y Cambio tecnológico, *Red Voltaire*, Agosto de 2005.
- [36] Sanz S, MOTORES, Editex S.A., ISBN 9788497714792, 2007
- [37] Kusaka J, Okamoto T, Daisho Y, Kihara R, Saito T. Combustion and exhaust gas emission characteristics of a diesel engine dual-fueled with natural gas. *Society of Automotive Engineers of Japan Review* 2000; 21(4):489–96.
- [38] Mansour C, Bounif A, Aris A, Gaillard F. Gas–diesel (dual-fuel) modelling in diesel engine environment. *International Journal of Thermal Science* 2001; 40(4):409–24.
- [39] Selim MYE. Pressure–time characteristics in diesel engine fuelled with natural gas. *Renewable Energy* 2001;22(4):473–89.
- [40] Selim MYE. Sensitivity of dual fuel engine combustion and knocking limits to gaseous fuel composition. *Energy Conversion and Management* 2004;45(3): 411–25.
- [41] Nwafor OMI. Effect of advanced injection timing on the performance of natural gas in diesel engine. *Sadhana* 2000;25(1):11–20.

- [42] Krishnan SR, Srinivasan KK, Singh S, Bell SR, Midkiff KC, Gong W, et al. Strategies for reduced NO_x emissions in pilot-ignited natural gas engines. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 2004;126:665–71.
- [43] Narvaez Favio, Sierra Fabio, Montenegro manuel; Modelo Basado en redes Neuronales para predecir las emisiones en un motor diesel que opera con mezclas de biodiesel de higuera, 2012.
- [44] Gestal Pose Marcos, Introducción a las redes de neuronas artificiales, Universidad da Coruña
- [45] Garrido, S. Identificación, estimación y control de sistemas no lineales mediante RGO. Tesis para optar al título de Doctor, departamento de ingeniería de sistemas y automática, Universidad Carlos III, Madrid, España, 1999.
- [46] Figueres Moreno Miguel, Sistemas inteligentes en ingeniería civil, 2007.