

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“ESTUDIO PARA MINIMIZACIÓN DE EMISIONES GASEOSAS
CONTAMINANTES DE LOS MOTORES ALCO 251 – F DEL
SISTEMA DE OLEODUCTO TRANSECUATORIANO - SOTE”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

AUTORES:

**CHRISTIAN FERNANDO COLLANTES VALAREZO
JUAN CARLOS PACHECO PACHECO**

**DIRECTOR: LUIS CUMBAL, PhD
CODIRECTOR: ING ALEXIS ORTIZ
TUTOR – OLEODUCTO: ING. GALO AYALA**

Sangolquí, 2005 – 09

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El proyecto “ESTUDIO PARA MINIMIZACIÓN DE EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES DE LOS MOTORES ALCO 251 – F DEL SISTEMA DE OLEODUCTO TRANSECUATORIANO - SOTE” fue realizado en su totalidad por CHRISTIAN FERNANDO COLLANTES VALAREZO y JUAN CARLOS PACHECO PACHECO, como requerimiento parcial para la elaboración del título de Ingeniero Mecánico.

Luis Cumbal, PhD
Director

Ing. Alexis Ortiz
Codirector

Sangolquí, 2005 – 09 – 30

LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO

**“ESTUDIO PARA MINIMIZACIÓN DE EMISIONES GASEOSAS
CONTAMINANTES DE LOS MOTORES ALCO 251 – F DEL
SISTEMA DE OLEODUCTO TRANSECUATORIANO - SOTE”**

ELABORADO POR:

CHRISTIAN F. COLLANTES V.

JUAN CARLOS PACHECO P.

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**MAYOR EDGAR PAZMIÑO
DECANO**

Sangolquí, 2005 – 09

DEDICATORIA

A nuestros padres, seres que siempre nos han brindado su apoyo incondicional y confianza, de quienes hemos recibido siempre palabras de aliento, sabios consejos y valiosas enseñanzas.

A nuestros hermanos, por apoyarnos y caminar junto a nosotros para lograr conseguir esta meta.

AGRADECIMIENTO

A Dios, nuestros padres y hermanos por su apoyo incondicional, a nuestras enamoradas por ofrecernos su cariño y comprensión en los momentos importantes de nuestra carrera, a nuestras familias y amigos, por confiar en nosotros.

A la Gerencia de Oleoducto, Superintendencia de Operaciones, al Sr. Ing. Galo Ayala Cueva, Tutor de Tesis y demás personal del SOTE, la Escuela Politécnica del Ejército, y todas las personas que hemos conocido en el desarrollo del proyecto que nos han abierto las puertas y nos han brindado su apoyo y conocimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES.....	
1.1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	
1.1.1.1 Clasificación de los contaminantes.....	
1.1.2 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	
1.1.2.1 Contaminantes de la Combustión.....	
1.1.2.2 Óxidos de Carbono (COx).....	
1.1.2.3 Hidrocarburos o Compuestos Orgánicos Volátiles (COV).....	
1.1.2.4 Óxidos de Nitrógeno (NOx).....	
• Teoría de la Formación de los Óxidos de Nitrógeno.....	
• NOx térmico proveniente de la combustión.....	
• NOx proveniente del combustible.....	
1.1.2.5 Óxidos de Azufre (SOx).....	
1.1.2.6 Material Particulado (MP).....	
1.1.2.7 Efectos.....	
• Efecto Invernadero.....	
• Ozono.....	
• Ozono Cerca del Nivel del Suelo.....	
• Lluvia Ácida.....	
1.2 Definición del problema.....	
1.2.1 Situación actual de los motores ALCO del SOTE.....	
1.2.2 Reglamento Ambiental vigente para las Operaciones Hidrocarburíferas.....	
1.3 Objetivos.....	
1.3.1 Objetivo General.....	
1.3.2 Objetivos Específicos.....	

CAPITULO II

INFORMACIÓN TEÓRICA

2.1 DEFINICIONES DE IMPORTANCIA.....	
2.1.1 SISTEMAS.....	
2.1.1.1 Sistema Cerrado.....	
2.1.1.2 Sistema Abierto.....	
2.1.1.3 Sistema Aislado.....	
2.1.2 PROPIEDAD TERMODINÁMICA.....	
2.1.2.1 Propiedad Extensiva.....	
2.1.2.2 Propiedad Intensiva.....	
2.1.2.3 Propiedades Específicas.....	
2.1.3 ESCALAS DE TEMPERATURA.....	
2.1.4 LEYES DE LA TERMODINÁMICA.....	
2.1.4.1 Primera Ley de la Termodinámica.....	
• Energía interna (U).....	
• Trabajo (W).....	
• Calor (Q).....	
• Calor Específico (C).....	
• Entalpía (H).....	
2.1.4.2 Segunda Ley de la Termodinámica.....	
• Procesos Reversibles e Irreversibles.....	
• Entropía (S).....	
2.1.5 MOTOR DIESEL.....	
• Cámaras de inyección directa.....	
• Cámaras de inyección indirecta.....	
• Sistema de inyección.....	
• Sobrealimentación de un motor Diesel.....	
2.1.5.1 Ciclo Diesel de 4 Tiempos.....	
2.1.5.2 Diagrama P-V.....	
• Entrada de Energía (q_{ent}).....	
• Calor Sustraído ($q_{sustraído}$).....	
• Temperatura Adiabática de Llama.....	
• Volumen Desplazado (VD).....	

• Volumen Desplazado por Minuto (VD/min).....	
• Volumen de la Cámara de Combustión (V _{cc}).....	
2.1.5.3 Balance Térmico.....	
• Trabajo salida neto (W _{sale neto}).....	
• Relación de Corte de Combustible (CC).....	
• Presión Media Efectiva (PMEF).....	
• Presión Media Efectiva al Freno (BMEP).....	
• Presión Media Indicada (IMEP).....	
• Potencia al Freno (BHP).....	
• Potencia Indicada (IHP).....	
• Torque (T).....	
2.1.5.4 Eficiencias.....	
• Eficiencia Térmica (η_t).....	
• Eficiencia Mecánica (η_m).....	
• Eficiencia de la Combustión (η_c).....	
2.2 COMBUSTIÓN.....	
2.2.1 EL COMBUSTIBLE.....	
2.2.1.1 Características de los combustibles líquidos.....	
• Densidad.....	
• Viscosidad.....	
• Inflamabilidad.....	
• Contenido en azufre.....	
• Poder calorífico de los combustibles líquidos.-.....	
2.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN.....	
2.2.2.1 La Combustión Completa.....	
• Aire mínimo o estequiométrico necesario.....	
• Exceso de aire (λ).....	
• Humedad Relativa (H.R.).....	
2.2.2.2 La Combustión Incompleta.....	
• Seudo-combustiones oxidantes.....	
• Seudo-combustiones neutras.....	
• Equilibrio Químico.....	

- Equilibrio en Sistemas con Reacción Química.....

CAPITULO III

MONITOREO DE EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES

3.1	NORMAS VIGENTES.....
3.1.1	ART. 1.- LIMITES PERMISIBLES.....
3.1.2	ART. 6.- PÓRTICOS DE MUESTREO.....
3.1.3	ART. 8.- FORMATOS.....
3.2	EQUIPO UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS DE GASES.....
3.2.1	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO.....
3.3	PRUEBAS DE CAMPO DE EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES.....
3.4	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS..

CAPITULO IV

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA CUANTIFICAR LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

4.1	PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES ALCO 251 –F.....
4.1.1	PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES.....
4.1.2	CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE.....
4.1.3	REACCIÓN DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES ALCO.....
4.2	SOFTWARE PARA CUANTIFICAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN.....
4.2.1	DESARROLLO DEL SOFTWARE.....
4.2.1.1	Programación.....
4.2.2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....
4.2.2.1	Primera Sección: Productos de Reacción de Combustión.....
4.2.2.2	Segunda Sección: Parámetros de Funcionamiento del Motor.....
4.3	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

CAPITULO V

ALTERNATIVAS PARA MINIMIZACIÓN DE LAS EMISIONES

5.1 ALTERNATIVAS EXISTENTES EN EL MERCADO LOCAL.....	
5.1.1 MEDIDAS PRIMARIAS.....	
5.1.1.1 Aditivos para Combustibles.....	
5.1.1.2 Cámaras de Pre-Combustión.....	
5.1.1.3 Combustible.....	
5.1.1.3.1 Biodiesel.....	
5.1.1.3.2 Gas Natural, GNC.....	
5.1.1.3.3 Gas Licuado de Petróleo, GLP.....	
5.1.1.3.4 Etanol.....	
5.1.1.3.5 Hidrógeno.....	
5.1.1.3.6 Combustible Recomendado.....	
5.1.1.4 Inyección de Vapor / Agua.....	
5.1.1.5 Modificación de los Inyectores.....	
5.1.1.6 Optimización de la Combustión - Relación Aire / Combustible.....	
5.1.1.7 Recirculación de Gases de Escape, EGR.....	
5.1.1.8 Retardo de la Inyección.....	
5.1.1.9 Turbo Alimentación en Conjunción con Enfriamiento Posterior.....	
5.1.2 MEDIDAS SECUNDARIAS.....	
5.1.2.1 Controles de Compuestos Orgánicos Volátiles, COVs.....	
5.1.2.1.1 Adsorción.....	
5.1.2.2 Controles de Material Particulado, MP.....	
5.1.2.2.1 Filtros de Tela.....	
5.1.2.3 Controles de Óxidos de Azufre, SOx.....	
5.1.2.3.1 Absorción.....	
5.1.2.4 Controles de Óxidos de Nitrógeno, NOx.....	
5.1.2.4.1 Reducción Catalítica No Selectiva, NSCR.....	
5.1.2.4.2 Lean NOx Trap (Trampas de NOx).....	
5.1.2.4.3 Lean NOx Trap sobre Catalizadores Zeolíticos.....	

5.1.2.4.4 Reducción Catalítica Selectiva, SCR.....	
5.1.2.4.3 Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR.....	
5.1.2.4.4 Plasma No Térmico.....	
5.2 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA.....	
5.2.1 ALTERNATIVA RECOMENDADA.....	

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES.....	
6.2 RECOMENDACIONES.....	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		
1.1	Potencia de los motores ALCO 251-F.....	18
Tabla		
1.2	Límites máximos permitidos para emisiones de generadores eléctricos y motores de combustión interna.....	19
Tabla		
2.1	Relación entre las escalas de temperatura.....	25
Tabla		
3.1	Límites máximos permitidos para emisiones de generadores eléctricos y motores de combustión interna.....	66
Tabla		
3.2	Identificación de instalaciones, Estación de Bombeo No. 1.....	72
Tabla		
3.3	Reporte de resultados, Estación de Bombeo No. 1.....	73
Tabla		
3.4	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 1.....	74
Tabla		
3.5	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 2.....	75
Tabla		
3.6	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 4.....	76
Tabla		
3.7	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 5.....	77
Tabla		
3.8	Reporte de Resultados Codificado,	

	Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 6.....	78
Tabla		
3.9	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 7.....	79
Tabla		
3.10	Identificación de instalaciones, Estación de Bombeo No. 5.....	80
Tabla		
3.11	Reporte de resultados, Estación de Bombeo No. 5	81
Tabla		
3.12	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 1.....	82
Tabla		
3.13	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 2.....	83
Tabla		
3.14	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 4.....	84
Tabla		
3.15	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 5.....	85
Tabla		
3.16	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 6.....	86
Tabla		
3.17	Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 7.....	87
Tabla		
3.18	Reporte de resultados, promedio, Estación de Bombeo No. 1....	88
Tabla		
3.19	Reporte de resultados, promedio, Estación de Bombeo No. 5...	89
Tabla		
3.20	Reporte de resultados – ALCO 1.....	90
Tabla	Reporte de resultados – ALCO 2.....	90

3.21		
Tabla		
3.22	Reporte de resultados – ALCO 4.....	91
Tabla		
3.23	Reporte de resultados – ALCO 5.....	91
Tabla		
3.24	Reporte de resultados – ALCO 6.....	91
Tabla		
3.25	Reporte de resultados – ALCO 7.....	91
Tabla		
3.26	Reporte de resultados – ALCO 1.....	92
Tabla		
3.27	Reporte de resultados – ALCO 2.....	92
Tabla		
3.28	Reporte de resultados – ALCO 4.....	92
Tabla		
3.29	Reporte de resultados – ALCO 5.....	92
Tabla		
3.30	Reporte de resultados – ALCO 6.....	93
Tabla		
3.31	Reporte de resultados – ALCO 7.....	93
Tabla		
4.1	Datos Generales del Motor.....	95
Tabla		
4.2	Composición del Petróleo.....	97
Tabla		
4.3	Caracterización del Crudo Combustible.....	97
Tabla		
4.4	Sintaxis para Funciones de SOLVER.....	103
Tabla		
	Influencia del Biodiesel en la Concentración de Emisiones	126

5.1	Gaseosas.....	
Tabla		
5.2	Ciclo de Funcionamiento de Combustibles.....	134
Tabla		
5.3	Presencia de Azufre en Combustibles.....	135
Tabla	Influencia de las Propiedades del Combustible sobre las	
5.4	Emisiones de NOx y MP.	138
Tabla		
5.5	Propiedades de los Combustibles.....	139
Tabla		
5.6	Medidas Secundarias.....	161
Tabla		
5.7	Condiciones de Emisión de un Motor Diesel y con Mezcla Pobre	185
Tabla		
5.8	Exceso de Óxidos de Nitrógeno.....	199
Tabla		
5.9	Medidas Primarias.....	200
Tabla		
5.10	Medidas Secundarias.....	201
Tabla		
5.11	Comparación entre SCR y SNCR.....	202
Tabla		
5.12	Eficiencia de Remoción de Óxidos de Nitrógeno.....	203
Tabla		
5.13	Tiempo Aproximado de Reemplazo del Catalizador.....	204

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Contaminantes de la	
1.1	combustión.....	3
Figura	Ozono cerca del nivel del	
1.2	suelo.....	14
Figura	Lluvia ácida.	
1.3	15
Figura		
1.4	Oleoducto Transecuatoriano.....	17
Figura	Motor ALCO 251-F (16 cilindros)	
1.5	18
Figura		
2.1	Sistema y Entorno.....	21
Figura		
2.2	Sistemas.....	23

Figura		
2.3	Ciclo Diesel 4 Tiempos.....	37
Figura	Diagrama P-V del Ciclo Diesel Teórico.	
2.4	38
Figura	Balance	
2.5	Térmico.....	41
Figura	Esquema del proceso de	
2.6	combustión.....	47
Figura		
2.7	Relación entre densidades de combustibles y temperatura....	49
Figura	Analizador de	
3.1	Gases.....	67
Figura	Presentación de resultados del	
3.2	equipo.....	69
Figura	Medición de Presión Media	
4.1	Indicada.....	96
Figura		
4.2	Hoja de Cálculo en Microsoft® EXCEL.....	102
Figura	Constantes de	
4.3	Equilibrio.....	105
Figura		
4.4	Cuadro De Diálogo.....	106
Figura	Datos del Combustible.	
4.5	107
Figura	Cuadro de Diálogo para Ingresar Resultados de	
4.6	Monitoreo....	108
Figura	Selección de	
4.7	Unidades.....	108
Figura		
4.8	Selección de Productos de Reacción de Combustión.....	108
Figura	Parámetros de Funcionamiento del	109

4.9	Motor.....	
Figura	Selección de Estación de	
4.10	Bombeo.....	110
Figura		
4.11	Comparación de Resultados con el Analizador de Gases.....	118
Figura	Variación de las Propiedades del Combustible con el	
5.1	incremento del Número de Cetano	
	Natural.....	121
Figura	Efecto de la Adición de Cetano con Aditivos en las	
5.2	Emisiones de	
	NOx.....	123
Figura	Porcentaje de Cambio en la Emisiones con	
5.3	Biodiesel.....	127
Figura	Efecto del porcentaje de mezcla de Biodiesel en las	
5.4	Propiedades	
	Físicas.....	127
Figura	Penetración de la punta de	
5.5	Spray.....	129
Figura	Efecto de la Adición de	
5.6	Agua.....	141
Figura	Emisiones Gaseosas vs Relación Aire –	
5.7	Combustible.....	145
Figura	Porcentaje de EGR en función de la Carga de	
5.8	Trabajo.....	146
Figura	Válvula EGR (Recirculación de gases de	
5.9	escape).....	147
Figura	Válvula EGR	
5.10	Eléctrica.....	148
Figura	EGR de Alta y Baja	
5.11	Presión.....	151
Figura	Relación entre EGR y	
5.12	NOx.....	152

Figura	Esquema del sistema EGR con	
5.13	Venturi.....	154
Figura		
5.14	Distribución de Presión en el Sistema EGR.....	155
Figura	Eje de	
5.15	Levas.....	157
Figura	Diagrama de Momentos de Apertura y Cierre de Válvulas	
5.16	Motor ALCO 251- F.....	158
Figura		
5.17	Esquema de Circulación de Agua.....	161
Figura	Esquema de la sección de corte de un sólido	
5.18	poroso.....	163
Figura	Estructura de la	
5.19	zeolita.....	163
Figura	Porcentaje de ganancia en peso por deposito de carbono	
5.20	durante la descomposición de metano frente a la temperatura	164
Figura	Tipo de Isotherma de Adsorción para Adsorbatos	
5.21	Hipotéticos...	167
Figura	Distribución del tamaño de partícula para una fuente de	
5.22	MP...	169
Figura	Torre Empacada Para Absorción de	
5.23	Gas.....	173
Figura	Rendimiento del Catalizador	
5.24	NSCR.....	174
Figura	Reducciones Contaminantes utilizando un	
5.25	NSCR.....	175
Figura	Mecanismo del Lean	
5.26	NOx.....	176
Figura	Eficiencia de almacenamiento de	
5.27	NOx.....	177
Figura	Esquema Sistema	180

5.28	SCR.....	
Figura		
5.29	Detalle de la absorción con una mezcla de diesel en Pt/Al ₂ O ₃	185
Figura		
5.30	Detalle de la absorción con una mezcla pobre en Pt/Al ₂ O ₃	186
Figura		
5.31	Remoción de NOx vs. Temperatura	188
Figura	Cambio en el Volumen de Catalizador vs.	
5.32	Temperatura.....	189
Figura		
5.33	Efecto de la NSR en la Reducción de NOx.....	195
Figura	Efecto de la Temperatura en la Reducción de	
5.34	NOx.....	197

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico		
4.1	Productos de Combustión vs. Temperatura.....	111
Gráfico		
4.2	Productos de Combustión vs. λ	112
Gráfico		
4.3	NO _x vs. λ y Temperatura de Combustión.....	113
Gráfico		
4.4	CO vs. λ y Temperatura de Combustión.....	114
Gráfico		
4.5	Influencia de la Humedad del Ambiente.....	115
Gráfico		
4.6	Cantidad de Nitrógeno en el Combustible.....	116
Gráfico		
4.7	Eficiencia Térmica vs. λ y Temperatura de Entrada de Aire.....	117
Gráfico		
5.1	Relación de emisiones contaminantes para cada Combustible	134

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1	Tablas de la Constante de Equilibrio.....	xxvi
ANEXO 2	Formatos para presentación de resultados de monitoreos.....	xxvii
ANEXO 3	Datos Técnicos TELEDYNE PEM 9002.....	xxx
ANEXO 4	Monitoreo en Lago Agrio y Papallacta.....	xxxii
ANEXO 5	Comparación con el equipo IMR 1400 – Petroproducción.....	lv
ANEXO 6	Comparación del segundo monitoreo con los datos de la FIGEMPA.....	lvi
ANEXO 7	Medición de Presión Media Indicada.....	lxi
ANEXO 8	Caracterización del crudo combustible.....	lxii
ANEXO 9	Lenguaje estructurado para la programación.....	lxv
ANEXO 10	Eje de Levas.....	lxix
ANEXO 11	Temperatura de funcionamiento del motor.....	lxx
ANEXO 12	Comparación de concentraciones de gases contaminantes con y sin aircooler.....	lxxi

ANEXO 13	Glosario.....	Ixxiv
ANEXO 14	Carta de satisfacción del trabajo realizado por parte de OLEODUCTO – PETROECUADOR.....	Ixxx
ANEXO 15	Fotos.....	Ixxxii

NOMENCLATURA

bhp:	Break Horse Power (Potencia al Freno).
BMEP:	Presión Media Efectiva al Freno.
CO:	Monóxido de Carbono
CO₂:	Dióxido de Carbono.
COV:	Compuesto Orgánico Volátil.
Cp:	Calor específico a presión constante.
Cv:	Calor específico a volumen constante.
DINAPA:	Dirección Nacional de Protección Ambiental.
EGR:	Exhaust Gas Recirculation (Recirculación de gases de escape).
FIGEMPA:	Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador

γ :	Exponente calorimétrico del gas, esta representado por la relación: C_p/C_v .
H.R.:	Humedad relativa.
H:	Entalpía
H₂SO₄:	Ácido Sulfúrico
HAP:	Hydrocarburo Aromático Policíclico.
HC:	Hydrocarburo.
η_m :	Eficiencia Mecánica
hp:	Horse Power (Caballo de Fuerza).
η_t :	Eficiencia Térmica
IHP:	Potencia Indicada.
IMEP:	Presión Media Indicada.
kp:	Constante de equilibrio en función de la temperatura, disociación.
λ :	Exceso de aire.
Lean NOx:	Reducción catalítica selectiva de NOx en exceso de oxígeno usando hidrocarburos como agentes reductores.
mg/dsm³:	Miligramos de contaminante por metro cúbico de gas seco y referido a condiciones estándar de T y P y 11% de O ₂
Mol:	La masa igual a la masa molecular de la sustancia.
MP:	Material Particulado.
msnm:	Metros sobre el nivel del mar.
NO:	Óxido de Nitrógeno.
NO₂:	Dióxido de Nitrógeno.
NOx:	Óxidos de Nitrógeno, suma aritmética de NO y NO ₂ .
NSR:	Normalized Stoichiometric Ratio (Razón Estequiométrica Normalizada)
p.p.m.:	Parte por millón de partes.
PMEF:	Presión Media Efectiva.
PMI:	Punto muerto inferior.
PMS:	Punto muerto superior.
Q:	Calor
qsustraído:	Calor Sustraído.

rpm:	Revoluciones por minuto.
S:	Entropía
SCR:	Selective Catalytic Reduction (Reducción Catalítica Selectiva)
SNCR:	Selective Non-Catalytic Reduction, (Reducción No Catalítica Selectiva).
SO₂:	Dióxido de Azufre.
SO₃:	Trióxido de Azufre.
SOTE:	Sistema de Oleoducto Transecuatoriano.
SOx:	Óxidos de Azufre.
T:	Torque
U:	Energía Interna
W:	Trabajo.

RESUMEN

El proyecto se divide en tres partes fundamentales: el monitoreo de las emisiones gaseosas contaminantes de los motores ALCO 251 – F de sistema de Oleoducto Transecuatoriano - SOTE y su comparación con los límites permisibles según el reglamento ambiental vigente para operaciones hidrocarburíferas, el desarrollo de un software para analizar los productos de combustión y, la selección de una alternativa para la minimización de las emisiones gaseosas contaminantes que se producen en los motores.

Para realizar el monitoreo se utilizó el analizador de gases Teledyne PEM – 9002, propiedad de Oleoducto, las muestras fueron tomadas en los motores de las estaciones de bombeo de Lago Agrio y Papallacta presentando como resultado altas concentraciones en las emisiones de monóxido de carbono, CO y óxidos de nitrógeno, NOx, en comparación con los límites permisibles para operaciones hidrocarburíferas. Mediante un estudio de combustión realizado se encontraron incongruencias en los niveles de monóxido de carbono, CO, monitoreados, los valores eran demasiado elevados, por lo cual se realizó un monitoreo conjunto con la Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiente, FIGEMPA, cuyos resultados permitieron concluir que el analizador PEM – 9002 se encuentra descalibrado en la celda electroquímica de monóxido de carbono, CO, y que los motores ALCO 251-F sobrepasan el límite permisible para las concentraciones de óxido de nitrógeno en un 50 %.

El software desarrollado permite determinar la cantidad de los productos de combustión generados y analizar su comportamiento en función de variables como exceso de aire, temperatura, humedad y combustible, el software se lo elaboró en Microsoft® Office EXCEL, mediante hipervínculos con Microsoft® Visual Basic, además consta de un segundo módulo que permite calcular parámetros de desempeño de los motores para cada estación de bombeo.

En la parte final del proyecto se realiza un estudio de las posibles alternativas para la reducción de emisiones gaseosas contaminantes de los motores ALCO 251-F, se analiza ventajas y desventajas de cada una de las alternativas, además de la factibilidad para la implementación en los motores, considerando las limitaciones técnicas de la instalación, así como la posible reducción de potencia en los motores.

Como resultado del estudio se concluye que la alternativa viable para la minimización de las emisiones de óxidos de nitrógeno, NOx, es un Sistema de Reducción Catalítica Selectiva, SCR.

CAPITULO I

GENERALIDADES

1.1 ANTECEDENTES

La atmósfera ordinariamente puede albergar sustancias contaminantes, generalmente se presentan en forma gaseosa, líquida o sólida. Sin embargo, a partir de determinado nivel de concentración se pueden producir efectos nocivos, sobre los seres vivos y también sobre los materiales.

La relación del hombre con el ambiente, no es nueva, es una relación y una problemática que se estableció desde el comienzo del hombre en el mundo, que continuó en la sucesión de las edades y que continuará por siempre ya que el hombre y el planeta están el uno para el otro relacionados en su existencia al igual que con el resto de los seres vivos que lo habitan.

Aunque existen fuentes contaminantes naturales, ejemplo de las actividades volcánicas o los incendios forestales, que emiten gases y partículas que quedan en suspensión, éstas suelen ser por lo general depuradas por la propia atmósfera. Pero es la contaminación generada por el hombre la que excede la capacidad de la atmósfera para procesarla, dando lugar a una concentración amenazante para la vida.

Quizás, el mayor desafío medioambiental de nuestro tiempo es afrontar el cambio climático, el calentamiento global del planeta causado por las excesivas emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero. La solución del problema pasa por estabilizar las concentraciones de gases a niveles aceptables.

1.1.1 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA._

La contaminación atmosférica se define como la condición atmosférica en la que ciertas sustancias alcanzan concentraciones o niveles lo suficientemente elevados, sobre su nivel ambiental normal como para producir riesgos, daños o molestias a las personas, ecosistemas o bienes.¹

1.1.1.1 Clasificación de los contaminantes._

Los contaminantes que el hombre libera hacia la atmósfera en mayor medida, provienen de la combustión de carburantes fósiles, y podríamos clasificarlos en tres grupos principales:

Actividades industriales, liberan óxidos de nitrógeno, óxidos de de carbono óxidos de azufre, material particulado, entre otros.

Actividades domésticas, como la combustión por sistemas de calefacción: liberan mayormente óxidos de azufre, y de nitrógeno en menor cantidad.

Transportes, como los de combustión interna: liberan óxidos de nitrógeno, óxidos de carbono, y óxidos de azufre en menor cantidad.

Una clasificación generalizada de los contaminantes es la siguiente:

Según la fuente

- Fija.
- Móvil.

Según la forma del agente contaminante

- Formas gaseosas.
- Formas sólidas.
- Formas líquidas.

¹ www.estrucplan.com.ar/Eflugas.htm

1.1.2 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Todos los contaminantes tienen varios campos de acción y pueden actuar directa o indirectamente en contra de los seres vivos. Los productos tóxicos que se generan alteran las cadenas nutritivas y afectan la biodiversidad, desestabilizando cuanto medio tocan.

En la mayor parte del mundo, los gases y demás residuos producidos por los motores de combustión interna pueden agruparse en dos familias, de acuerdo con la legislación sobre el ambiente:

- **Emisiones Reglamentadas._**

Monóxido de carbono (CO), humo, hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx), ruido, óxido de azufre (SO₂) y plomo (Pb).

- **Emisiones No Reglamentadas._**

Substancias que no ejercen acción comprobadamente nociva sobre el medio ambiente. El dióxido de carbono CO₂ no está reglamentado aunque es el responsable del 50 % del calentamiento global.²

1.1.2.1 Contaminantes de la Combustión._

En la Figura 1.1 se muestra un esquema de los productos de la combustión, composición de los gases de escape y distribución de los contaminantes.

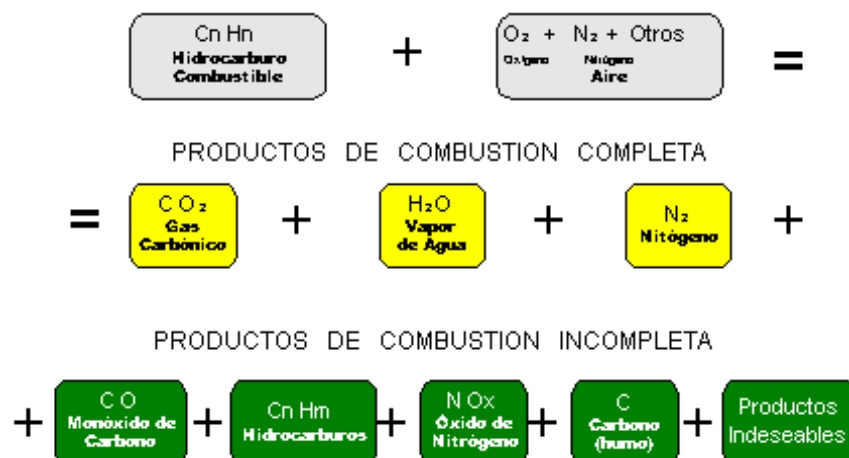


Figura 1.1: Contaminantes de la combustión

² www.rincondelvago.com/efecto-invernadero_1.html

Composición de los gases de escape

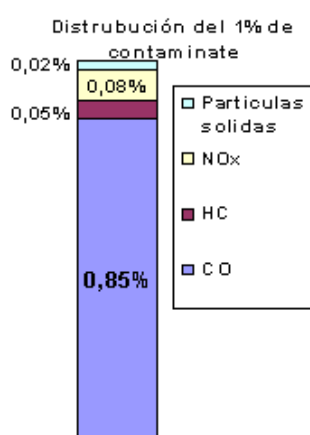
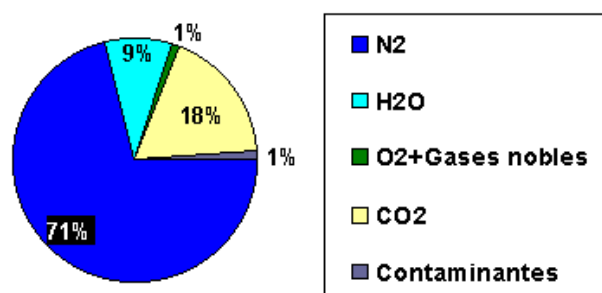


Figura 1.1: Contaminantes de la combustión (Continuación)

Fuente: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2001/santa-fe-sur/motor/comocon.htm>

Los productos de la combustión incluyen dióxido de carbono, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles, compuestos orgánicos semivolátiles y material particulado.

1.1.2.2 Óxidos de Carbono (CO_x).

Entre los óxidos de carbono tenemos al monóxido de carbono (CO) y el dióxido de carbono (CO₂).

- **Monóxido de carbono (CO).** Las emisiones de CO están íntimamente ligadas a los procesos de combustión incompleta, deficiencia de oxígeno

durante la combustión, bajas temperaturas de combustión, cortos tiempos de residencia de los gases en la zona de reacción, o un mal contacto combustible-aire. También es producido durante los incendios forestales.

Es un gas incoloro e inodoro. Es muy estable y en la atmósfera tiene una vida media de dos a cuatro meses. A las concentraciones típicas en el aire ambiental, el CO parece no causar efectos en los materiales y raramente produce daños a las plantas.

Reduce la capacidad de la sangre para transportar oxígeno, debido a que es altamente anestésico, la molécula encargada de repartir oxígeno (hemoglobina) puede repartir oxígeno (lo que es bueno) o CO (lo que es malo). Cuando una persona respira aire que contiene CO, éste desplaza al oxígeno y toma su lugar. La hemoglobina toma el CO y lo reparte en lugar de oxígeno. Esto significa que cuando el CO está presente, la hemoglobina entrega menos oxígeno al cuerpo. El cerebro y el corazón necesitan mucho oxígeno y no funcionan normalmente cuando una persona respira CO.³

- **Dióxido de Carbono (CO₂).** _ proviene de la combustión de los compuestos orgánicos, las cantidades emitidas a la atmósfera son muy importantes influyendo en el calentamiento atmosférico debido a que se produce más CO₂ de los que la naturaleza puede procesar a través de la fotosíntesis de las plantas, el CO₂ no es tóxico en bajas cantidades (se exhala CO₂ cuando se respira).

1.1.2.3 Hidrocarburos o Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)._

Una categoría de sustancias contaminantes de importancia creciente en las últimas décadas es la de los compuestos orgánicos volátiles.

El término anglosajón "VOC" (volatile organic compound), en castellano "COV", recoge miles de especies químicas que son tóxicas para los seres

³ http://www.airinfnow.org/espanol/html/ed_co.html

vivos o bien precursoras de oxidantes fotoquímicos responsables del "smog", que contribuyen al efecto invernadero y/o a la degradación de la capa de ozono estratosférico.

Las principales fuentes de COVs están relacionadas directa o indirectamente con el petróleo y sus derivados.

Se define que cualquier compuesto orgánico es un COV a menos que se determine específicamente que no es un COV.

Entre los contaminantes secundarios producidos, el más importante en términos de efectos adversos para la salud humana y ecosistemas, utilizado para medir la intensidad del "smog fotoquímico" es el ozono. Este smog es una mezcla muy compleja de compuestos de alto poder de oxidación que originan efectos muy nocivos sobre los seres vivos y algunos materiales.

1.1.2.4 Óxidos de Nitrógeno (NOx).__

Las emisiones de óxidos de nitrógeno NOx son producidas casi en su totalidad como consecuencia de los procesos de combustión.

El término NOx generalmente se aplica al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO₂), por su presencia mayoritaria y la facilidad de transformación mutua en presencia del oxígeno del aire. Tanto el nitrógeno molecular del aire como el nitrógeno contenido en los combustibles pueden reaccionar con el oxígeno para formar los óxidos de nitrógeno. El óxido nítrico (NO) es el predominante y aproximadamente el 95 % de las emisiones de los óxidos de nitrógeno de la combustión⁴.

El NO y NO₂ son los compuestos de nitrógeno con efectos más adversos en la calidad del aire. Cuando la luz ultravioleta emitida por la radiación solar reacciona con la mezcla de óxidos de nitrógeno e hidrocarburos, se produce

⁴<http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780>

el ozono, que es el mayor constituyente de lo que comúnmente se conoce como "smog". El NO_x también contribuye a la formación de lluvia ácida y al calentamiento global.

Las emisiones de NO_x suelen ser función directa de la temperatura de combustión, del exceso de aire de combustión y del contenido de nitrógeno en el combustible. Ya analizando la proporción de cada efecto, la temperatura es la que ocasiona mayor impacto.

El NO, también llamado óxido nítrico es un gas incoloro e inodoro, en tanto que el NO₂ es un gas de color rojizo, de olor fuerte y asfixiante parecido al del cloro.

- **Teoría de la Formación de los Óxidos de Nitrógeno.**

Los óxidos de nitrógeno son formados en los procesos de combustión por dos vías:

- La oxidación del nitrógeno del aire a alta temperatura.
- La oxidación de compuestos de nitrógeno contenido en los combustibles.

La producción de NO_x en los motores de combustión interna se debe principalmente a la alta temperatura de operación, expresada en el siguiente mecanismo de reacción, conocido como mecanismo de Zeldovich o de formación térmica:



La dependencia de la temperatura, caracterizada por la alta energía de activación que requiere para llevarse a cabo estas reacciones es el resultado directo del requerimiento para romper los fuertes enlaces de las moléculas de oxígeno y nitrógeno. El rompimiento del triple enlace de las

moléculas de nitrógeno (N N) ocurre debido a la gran cantidad de energía de activación de cerca de 75 Kcal./mol, suministrada por la alta temperatura y que da lugar a la reacción 1.1.

- **NOx térmico proveniente de la combustión._**

La formación de NOx es fuertemente dependiente de la temperatura y sólo se verifica a temperaturas de alrededor de 1500°C o mayores, duplicándose la producción a partir de esta temperatura por cada incremento de 40°C en la temperatura de llama⁵.

El NOx del proceso térmico de la combustión resulta de la fijación de las moléculas de nitrógeno y oxígeno del aire durante la combustión. Su grado de formación es extremadamente sensible a la temperatura y en menor grado a la concentración del oxígeno presente.

La mayor parte del NOx proveniente de los motores de combustión interna se origina en la alta temperatura y presión de combustión.

- **NOx proveniente del combustible._**

El petróleo es una mezcla líquida compleja que contiene una gran cantidad de compuestos. Los compuestos que contienen carbono e hidrógeno son los predominantes y los compuestos que contienen oxígeno, azufre y nitrógeno son menos abundantes. El análisis elemental del petróleo crudo presenta su composición entre los siguientes rangos: 84-87% carbón, 11-14% hidrógeno, 0,2 % nitrógeno y 0-2% azufre.⁶

Considerando que el uso primordial del petróleo involucra la conversión de la energía química en energía calorífica, teóricamente el petróleo que contiene únicamente carbono e hidrógeno más adecuado ya que estos

⁵ www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780

⁶ www.alfinal.com/petroleo/petroleo.shtml

componentes determinan el alto poder calorífico, convirtiéndose en dióxido de carbono y agua, como productos de la combustión.

Por otro lado el petróleo con contenido de azufre y nitrógeno produce dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, como productos de la combustión.

El NOx generado a partir de los compuestos nitrogenados contenidos en los combustibles se denomina "Fuel NOx". El mecanismo para su formación es en cierta forma independiente de la forma en que se encuentra el nitrógeno en el combustible y es más sensible a la estequiometría que a los tratamientos térmicos de la alimentación. Por esta razón, existen estrategias de recirculación de la alimentación o inyección de agua para reducir la emisión de óxidos de nitrógeno.

Su formación está fuertemente afectada por el grado de mezcla del combustible con el aire en general y por la concentración de oxígeno en particular. Sin embargo, la concentración de NOx producido como resultado de la oxidación del combustible es solamente una fracción del nivel que resultaría si ocurriría la oxidación completa de todo el nitrógeno contenido en el combustible.

Consecuentemente, el NOx térmico proveniente de la combustión y el NOx proveniente del combustible están dominadas por las condiciones particulares de la combustión.

1.1.2.5 Óxidos de Azufre (SOx)._

Los óxidos de azufre son causa de la acidificación tanto del suelo como de las aguas.

Los compuestos de azufre son responsables de dos tercios del total de la lluvia ácida y los compuestos de nitrógeno no producen acidificación si los mismos son absorbidos por las plantas.

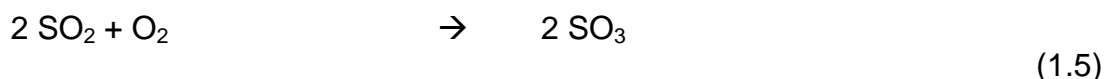
Es bien sabido que las emisiones de SO₂ y SO₃ están enteramente ligadas a la calidad del combustible (contenido de azufre o compuestos azufrados). En la vida práctica, las emisiones de SO₃ son prácticamente mínimas (apenas detectables), razón por la cual se acostumbra solamente a normar las emisiones de SO₂.

La concentración de azufre en el crudo varía de acuerdo a la procedencia del mismo por lo que se pueden dar valores de décimas de uno por ciento a dos o tres por ciento en peso.

El dióxido de azufre (SO₂), es un contaminante primario que se produce en la combustión de carbón y petróleo que contienen azufre:



El SO₂ es el contaminante del aire derivado del azufre más importante; sin embargo, algunos procesos industriales emiten trióxido de azufre, SO₃, el cual se forma también en la atmósfera en pequeñas cantidades debido a la reacción entre el SO₂ y el oxígeno



Algunas macro partículas del aire catalizan esta reacción. A veces, el SO₂ y el SO₃ se mencionan en forma conjunta como óxidos de azufre, SO_x.

El SO₃ reacciona con vapor de agua para producir minúsculas gotas de ácido sulfúrico (H₂SO₄). También reacciona con otras sustancias químicas pequeñas de sulfato.



El H_2SO_4 y las partículas de sulfato caen a la tierra como componentes de la lluvia ácida, que daña los árboles y la vida acuática.

1.1.2.6 Material Particulado (MP)._

Las emisiones de MP dependen, al igual que el CO de la calidad del combustible (contenido de azufre e impurezas sólidas), y del tipo de combustión que tiene lugar (externa o interna).

El material particulado incluye el polvo bien fino, el hollín, el humo y las gotitas, es material sólido ó líquido suspendido en la atmósfera, formadas por reacciones químicas todas estas son producidas cuando se queman combustibles como carbón, madera o petróleo.

Los MP Primarios son partículas sólidas ó humos emitidos directamente como partículas ó gotas condensadas.

Los MP Secundarios son partículas producidas en el aire por reacciones químicas entre gases (SO_2 , NO_x , COV)

De acuerdo a masa y composición se tienden a dividir en dos grupos principales:

- **MP- 10._** incluye partículas de 10 micrómetros en diámetro ó más pequeñas, este se acumula en los pulmones y daña el tejido, disminuye función pulmonar y agrava el asma.
- **MP- 2.5._** incluye partículas de 2.5 micrómetros en diámetro ó más pequeñas, este penetra profundo en los pulmones y produce síntomas respiratorios agudos, bronquitis crónicas y muertes prematuras.

1.1.2.7 Efectos._

- **Efecto Invernadero._**

Los gases invernadero en la atmósfera tales como dióxido de carbono o metano, atrapan moderadamente el calor del sol y tienen la capacidad de dejar pasar a través la radiación infrarroja que incide en la Tierra, impidiendo a su vez que la radiación de igual naturaleza que es reflejada o emitida por la propia Tierra se pierda en el espacio; sin gases invernadero la Tierra sería mucho más fría. Sin embargo, la actividad humana aumenta las concentraciones de gases en la atmósfera, los niveles de gases invernadero han ido aumentando durante décadas y estos crecimientos exageran los niveles naturales de estos gases, causando un aumento de la temperatura global de la Tierra.

El llamado "efecto invernadero" ilustra bien el fenómeno: así como un invernadero, una caja de vidrio, deja entrar la radiación solar pero no deja salir el aire caliente, nuestra atmósfera actúa de manera similar.

El vidrio, en este caso es el CO₂, que rompe la relación de balance entre la radiación solar que recibimos y el calor que devolvemos al espacio. De este modo al aumentar el volumen de CO₂ en la atmósfera la temperatura también sube. Por otro lado la disminución de las capas polares aumentará el nivel de los mares, disminuyendo también la radiación que refleja el hielo de los polos.

Los gases invernadero en niveles anormales pueden causar un aumento de la temperatura global del planeta.

El metano se produce en forma natural por la descomposición de sustancias orgánicas en ambientes pobres en oxígeno. También se produce en la explotación de combustibles fósiles, y en la quema de biomasa.

La mayor proporción es neutralizada por los radicales OH, relacionados principalmente con la presencia de vapor de agua en la atmósfera. Sin embargo, la destrucción de los radicales OH por el continuo aumento en las emisiones de CO₂, que también reacciona con ellos, puede estar disminuyendo la neutralización del metano en la atmósfera, contribuyendo a alargar su vida útil como agente del cambio climático.

Aproximadamente un 90% de las emisiones de metano son neutralizadas por este proceso. El volumen de metano es considerablemente inferior al de CO₂, su efecto se magnifica debido a que la contribución de cada molécula de metano al efecto invernadero es aproximadamente 25 veces superior a la de cada molécula de CO₂.⁷

- **Ozono._**

La capa de ozono consiste en una barrera formada por este gas, que se encuentra prácticamente en un 95% en la estratosfera (entre los 8 y 50 kilómetros)⁸. La presencia del ozono en una columna atmosférica es realmente pequeña; si todo el ozono de la atmósfera estuviera repartido uniformemente sobre la superficie del mar, tan sólo formaría una capa de tres milímetros. A pesar de esta pequeña cantidad, es suficiente para interceptar la radiación solar transformándola posteriormente en calor, dando origen a la llamada capa cálida, escudo natural que protege al hombre, animales y plantas, de un exceso de radiación de onda corta o ultravioleta.

La radiación ultravioleta rompe con gran facilidad la molécula de oxígeno (O₂) cuando un fotón incide sobre ella dejando libres dos átomos, que al ser inestables tienen un poder altamente reactivo. Así, al no poder permanecer en solitario, los átomos de oxígeno tienden a combinarse inmediatamente con las moléculas de su mismo elemento, muy abundante en la estratosfera. El resultado es una molécula de ozono.

⁷ pdf.rincondelvago.com/files/0/2/4/00014024.pdf

⁸ www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoteoria.htm



Los culpables de la destrucción de la capa de ozono son las emisiones de CFC (compuestos químicos formados por cloro, flúor y carbono), halones, óxidos de nitrógeno y otros compuestos utilizados a escala industrial.

- **Ozono Cerca del Nivel del Suelo.**

Lo que llamamos "smog" consiste principalmente en ozono cerca del nivel del suelo. El ozono puede ser bueno o malo para su salud, depende de dónde esté ubicado. El ozono en la estratosfera, sobre la Tierra, protege la salud humana y el ambiente de la radiación dañina del sol. Cerca de la superficie de la Tierra, el ozono cerca del nivel del suelo se forma de las emisiones de contaminantes provenientes de las industrias, de los vehículos de motor y también de fuentes naturales como se ve en la Figura 1.2.

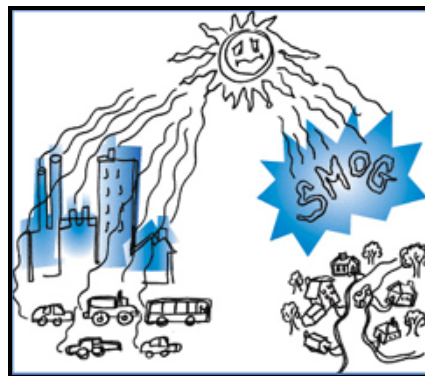


Figura 1.2: Ozono cerca del nivel del suelo

Fuente: <http://www.epa.gov/air/espanol/peg/key01.html>

El ozono cerca del nivel del suelo puede causar problemas en la salud humana y dañar bosques y cosechas agrícolas. La exposición repetida al ozono puede hacer que las personas sean más susceptibles a infecciones respiratorias e inflamación de los pulmones, y puede agravar enfermedades respiratorias existentes, tales como el asma.

Los dos tipos de sustancias químicas que son los ingredientes principales para la formación de ozono cerca del nivel del suelo se llaman compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx).

- **Lluvia Ácida.**_

La sedimentación ácida o lluvia ácida, es causada por emisiones de dióxido de azufre (SO₂) y de óxidos de nitrógeno (NOx). Una vez que se liberan en la atmósfera, pueden convertirse químicamente en contaminantes secundarios como el ácido nítrico y el ácido sulfúrico, los cuales se disuelven fácilmente en el agua. Las gotitas de agua ácida resultantes pueden ser transportadas a grandes distancias por los vientos, y regresan a la Tierra como lluvia ácida, nieve o niebla, como se puede observar en la Figura 1.3

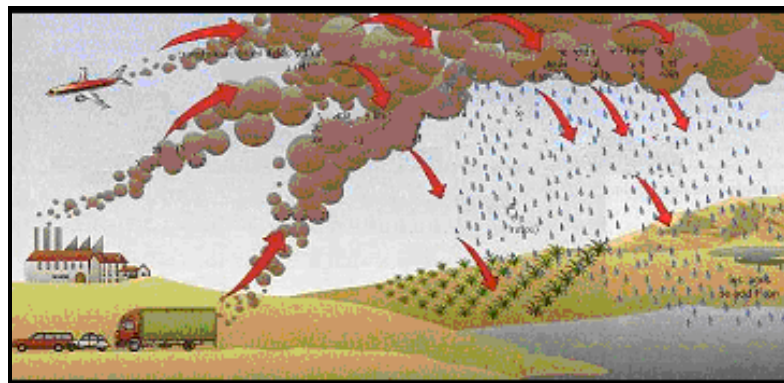


Figura 1.3: Lluvia ácida

Fuente:

<http://www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/340DepAc.htm>

La lluvia normal es ligeramente ácida, por llevar ácido carbónico que se forma cuando el dióxido de carbono del aire se disuelve en el agua que cae. Su pH suele estar entre 5 y 6. Pero en las zonas con la atmósfera contaminada por estas sustancias acidificantes, la lluvia tiene valores de pH de hasta 4 o 3 y, en algunas zonas en que la niebla es ácida, el pH puede llegar a ser de 2, 3, es decir similar al del zumo de limón o al del vinagre⁹.

⁹ www.eco2site.com/informes/atmosf.asp

La lluvia ácida presenta un pH menor (más ácido) que la lluvia normal o limpia.

Una disolución se puede clasificar como:

- Ácida pH < 7
- Neutra pH = 7
- Alcalina pH > 7

Algunas de las reacciones que dan origen a la lluvia ácida, entre ellas la ecuación: (1.6)



La lluvia ácida se forma generalmente en las nubes altas donde el SO_2 y los NO_x reaccionan con el agua y el oxígeno, formando una solución diluida de ácido sulfúrico y ácido nítrico. La radiación solar aumenta la velocidad de esta reacción.

1.2 Definición del problema

1.2.1 Situación actual de los motores ALCO del SOTE

El Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, SOTE, consta de seis estaciones de bombeo de crudo: Lago Agrio, Lumbaqui, El Salado, Baeza, Papallacta y Quinindé y cuatro reductoras de presión: San Juan, Chiriboga, La Palma y Santo Domingo, como se indica en la Figura 1.4.

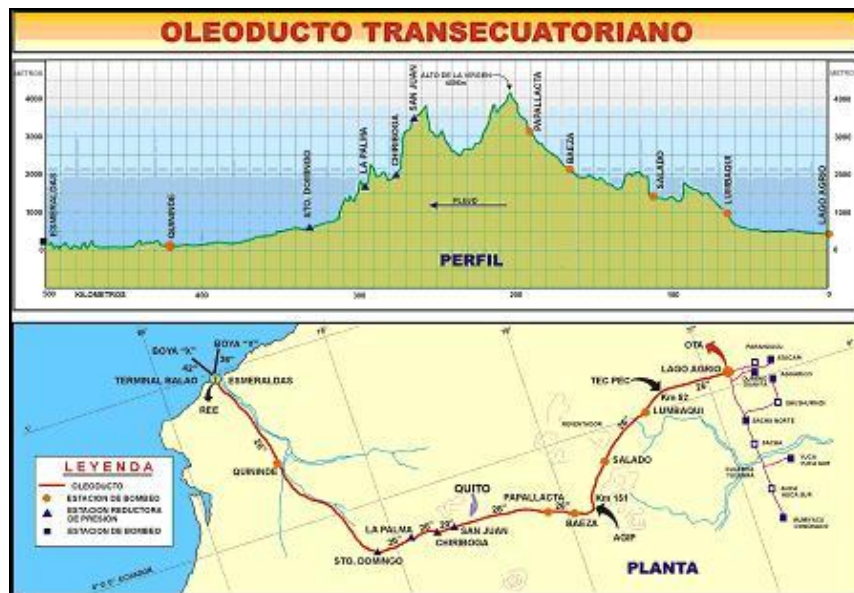


Figura 1.4: Oleoducto Transecuatoriano

Fuente: Sistema De Oleoducto Transecuatoriano, Manual de Operaciones.

Las estaciones de bombeo están equipadas con siete motores ALCO modelo 251– F, cada una, a excepción de la Estación Quinindé que cuenta con tres motores CATERPILLAR 3612 de 4280 hp @ 1000 rpm.

En la Tabla 1.1 se indica la potencia de los motores ALCO 251-F en cada estación de bombeo.

Tabla 1.1: Potencia de los motores ALCO 251-F

Estación de Bombeo	No. de Cilindros	Potencia Nominal [BHP] @ 1050 RPM
Lago Agrio	16	2500
Lumbaqui	16	2500
El Salado	12	1850
Baeza	18	2900
Papallacta	18	2900

Los motores ALCO modelo 251 – F (Figura 1.5), actualmente funcionan con crudo combustible de 32 y 28 °API, de viscosidades 18 y 22 cSt respectivamente a temperatura ambiente, debido a los altos precios que representa trabajar con diesel.

Existe un monitoreo de las emisiones a la atmósfera realizado a los motores ALCO 251 -F en el mes de febrero del 2004 por la FIGEMPA (Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador) y que determina que existe un promedio de 3100 mg/m³ de NOx lo cual sobrepasa los límites máximos permisibles para emisiones a la atmósfera provenientes de fuentes fijas para actividades hidrocarburíferas.



Figura 1.5: Motor ALCO 251-F (16 cilindros)

1.2.2 Reglamento Ambiental vigente para las operaciones Hidrocarburíferas

El Reglamento Ambiental vigente para las operaciones Hidrocarburíferas en el Registro Oficial No.153 emitida el viernes 22 de agosto de 2003, en el acuerdo ministerial No. 71 fija los “Límites máximos permisibles para emisiones a la atmósfera provenientes de fuente fijas para actividades hidrocarburíferas” que se presentan a continuación:

Tabla 1.2: Límites máximos permitidos para emisiones de generadores eléctricos y motores de combustión interna

Contaminante (mg/dsm ³)****	Tipo de combustible que se utiliza		
	GLP o GAS	DIESEL	BUNKER o CRUDO
Material Particulado (MP)	100	150	150
Óxidos de Carbono (CO)	1500* 500**	1500* 500**	1500* 500**
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	300	1900	1900
Óxidos de Azufre(SO ₂)	30	580	1900*** 2500***
HAPs	0,1	0,1	0,1
COVs	5	10	10

* Para generadores con capacidad menor a 750 kW.

** Generadores capacidad mayor a 750 kW.

*** Para crudos o bunker con un contenido de azufre de <2,2% S: 1900 mg/dsm³; para crudos o bunker con Un contenido de azufre de > 2,2 % S: 2500 mg/dsm³

**** Miligramos por metro cúbico estándar

Fuente: Reglamento Ambiental Vigente para las Operaciones Hidrocarburíferas

“Los niveles de emisión no pueden ser uniformes para todas las actividades, dado que las características de cada proceso, tipo o calidad de combustible

utilizado, capacidad de la fuente y tasa de utilización de la fuente, difieren notablemente, así como también los costes de depuración necesarios y soportables. Los límites deben ser más estrictos para fuentes de combustión externa que utilizan gas, seguido de las unidades que procesan diesel y posteriormente crudo o búnker. Los motores deben ser regulados a través de normativa más permisible.”¹⁰

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General._

- Realizar un estudio para minimizar los niveles de los gases contaminantes emitidos a la atmósfera de los motores ALCO 251-F.

1.3.2 Objetivos Específicos._

- Monitorear las emisiones gaseosas contaminantes a la atmósfera de los motores ALCO 251-F del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, SOTE.
- Comparar los resultados del monitoreo con los límites permisibles publicados en el reglamento ambiental vigente para operaciones hidrocarburíferas.
- Elaborar un software para cuantificar la eficiencia del proceso de combustión, para en función de sus resultados tomar correctivos sobre la marcha.
- Estudiar alternativas técnicas para minimizar los niveles de gases contaminantes emitidos a la atmósfera.
- Seleccionar la alternativa más viable.

CAPITULO II

¹⁰ Informe Técnico de la “Revisión de Parámetros de Control Para Emisiones a la Atmósfera”, documento elaborado por: Ing. Quím., Ph.D. Ian Narvárez Troncoso, para el Ministerio de Energía y Minas.

INFORMACIÓN TEÓRICA

2.1 DEFINICIONES DE IMPORTANCIA

2.1.1 SISTEMAS

Un sistema puede ser cualquier objeto, cualquier cantidad de materia, cualquier región del espacio, etc., seleccionado para estudiarlo y aislarlo (mentalmente) de todo lo demás, lo cual se convierte entonces en el entorno del sistema.

El sistema y su entorno forman el universo como se muestra en la Figura 2.1:

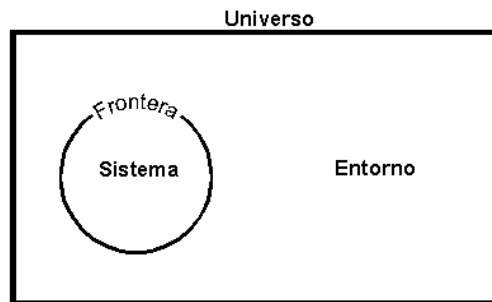


Figura 2.1: Sistema y Entorno

Fuente: www.biopsychology.org/apuntes/termodin/termodin.htm

La envoltura imaginaria que encierra un sistema y lo separa de sus inmediaciones (entorno) se llama frontera del sistema y puede pensarse que tiene propiedades especiales que sirven para:

- a) Aislar el sistema de su entorno.
- b) Permitir la interacción de un modo específico entre el sistema y su ambiente.

Llamamos sistema, o medio interior, la porción del espacio limitado por una superficie real o ficticia, donde se sitúa la materia estudiada. El resto del universo es el medio exterior. La distinción entre sistema y entorno es arbitraria: el sistema es lo que el observador ha escogido para estudiar.

2.1.1.1 Sistema Cerrado

Es un sistema cuya materia permanece constante y solamente intercambia energía con el medio o sus alrededores.

En este tipo de sistemas el volumen puede aumentar o disminuir como el caso de un arreglo cilindro – pistón, o podría permanecer constante como el caso de un recipiente rígido cerrado, pero siempre y cuando se cumpla la condición que la masa se mantenga fija y no exista ningún cruce de masa por las fronteras del sistema.

La ecuación de energía para sistemas cerrados se la puede expresar de la siguiente manera:

$$Q_{\text{ent}} - W_{\text{sale}} = E_{T1} - E_{T2} \quad (2.1)$$

donde E_T es la energía total del sistema en un estado determinado y es la suma de sus energías interna , cinética y potencial.

2.1.1.2 Sistema Abierto

Es un sistema que puede intercambiar tanto energía como materia y se lo denomina también volumen de control.

Hay que tomar en cuenta que cada partícula de masa que entra al sistema, introduce al mismo, su energía interna, más la energía cinética asociada con su velocidad y su energía potencial gravitacional.

El principio de conservación de la masa para un sistema abierto señala que:

$$\text{masa inicial} + \text{masa que entra} = \text{masa final} + \text{masa que sale} \quad (2.2)$$

La ecuación de energía para sistemas abiertos puede obtenerse modificando la ecuación de energía para sistemas cerrados, expresándola de la siguiente manera:

$$Q_{\text{ent}} - W_{\text{sale}} = E_{\text{sale}} - E_{\text{ent}} + E_2 - E_1 \quad (2.3)$$

W_{sale} incluye todas las formas de trabajo mecánico de eje, así como el trabajo hecho por o sobre la sustancia del sistema en las aberturas físicas.

2.1.1.3 Sistema Aislado

Es un sistema en que ni materia ni energía, cruzan sus fronteras.

En la Figura 2.2 se muestran los diferentes tipos de sistemas:

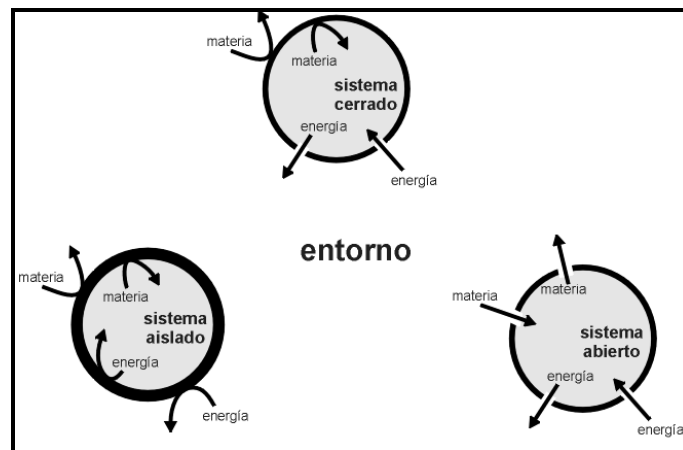


Figura 2.2: Sistemas

Fuente: www.biopsychology.org/apuntes/termodin/termodin.htm

2.1.2 PROPIEDAD TERMODINÁMICA

El estado termodinámico de una sustancia se describe especificando las propiedades termodinámicas de las sustancias en dicho estado (presión, temperatura, volumen, masa). Para un estado dado de la misma, cada una de las propiedades termodinámicas tiene un y sólo un valor. Una propiedad termodinámica implica que dicha propiedad es la misma en todos los puntos del sistema. Esta situación en la cual el valor de una propiedad tiene un significado preciso para un sistema completo se denomina "Equilibrio Termodinámico". Por ejemplo si se dice que la temperatura de un sistema es 20 °C, se quiere decir que la temperatura en cada punto por todo el sistema completo es de 20 °C.

2.1.2.1 Propiedad Extensiva

Depende de la cantidad de masa de la sustancia presente en el sistema, por ejemplo el volumen total, el peso y la masa de un sistema.

2.1.2.2 Propiedad Intensiva

Son independientes de la masa de la sustancia presente en el sistema. Si una sustancia es uniforme y homogénea, el valor de la propiedad intensiva será el mismo en cada punto de la sustancia. Todas las propiedades específicas están definidas como propiedades por unidad de masa y por tanto son intensivas, por ejemplo volumen específico (volumen por unidad de masa), la presión (fuerza / área), la densidad (masa/volumen) que es el recíproco de volumen específico y la temperatura.

2.1.2.3 Propiedades Específicas

Es la relación entre una propiedad extensiva y la masa del mismo, por ejemplo: densidad, volumen específico, la energía, la entalpía.

2.1.3 ESCALAS DE TEMPERATURA

La temperatura es una manifestación de la energía cinética promedio de las moléculas de una sustancia, y es una medida que indica que tan frío o tan caliente

En la Tabla 2.1, a continuación, se expresa la relación entre las distintas escalas de temperatura.

Tabla 2.1 Relación entre las escalas de temperatura

Escala de Temperatura	Ebullición del agua	Congelación del agua	Cero Absoluto
Celsius [°C]	100	0	- 273
Kelvin [°K]	373	273	0
Fahrenheit [°F]	212	32	- 460
Rankine [°R]	672	492	0

Fuente: Ayala Cueva, Galo Ing. "Combustión y Combustibles para Motores Industriales" ,2004

2.1.4 LEYES DE LA TERMODINÁMICA

2.1.4.1 Primera Ley de la Termodinámica._

La primera ley de la termodinámica afirma que la energía total de cualquier sistema aislado se conserva e identifica el calor como una forma de energía.

Esta ley es conocida como "Ley de conservación de la energía".

Para un sistema cerrado, de masa constante, la primera ley de la termodinámica se expresa matemáticamente por medio de:

$$\Delta E_T = Q - W \quad (2.4)$$

donde ΔE_T es el cambio total de energía del sistema, Q es el calor agregado al sistema y W el trabajo realizado por el sistema.

La primera ley de la termodinámica sólo proporciona la expresión cuantitativa del principio de conservación de la energía. En palabras, expresa que el cambio total de energía de un sistema cerrado es igual al calor transferido al sistema, menos el trabajo efectuado por el sistema.

La energía total se descompone en una suma de términos que se llaman las diferentes formas de la energía.

En general la energía total, E_T , de un sistema puede descomponerse en energía cinética, E_c , energía potencial, E_p , y energía interna, U , es decir:

$$E_T = E_c + E_p + U \quad (2.5)$$

donde:

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.6)$$

E_p depende de los campos externos a los que está sometido el sistema y viene dada por una función de la posición.

U considera la energía de las partículas que constituyen el sistema y sus interacciones a corta distancia.

En realidad, esta descomposición permite distinguir entre las formas de energía “mecánica” (E_c y E_p) y una forma de energía “termodinámica” (U).

El cambio de energía total del sistema puede descomponerse en:

$$\Delta E_T = \Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U \quad (2.7)$$

donde:

ΔE_c y ΔE_p representan el cambio de su energía externa, cinética y potencial respectivamente, y ΔU representa el cambio de su energía interna, dada por la energía cinética y potencial de las moléculas, átomos y partículas subatómicas que constituyen el sistema.

Si se expande ΔE_T en la expresión de la primera ley, se obtiene la ecuación:

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = Q - W \quad (2.5)$$

En el caso frecuente donde las energías potencial y cinética (energía externa) del sistema no cambian, esta ecuación se convierte en:

$$\Delta U = Q - W \quad (2.6)$$

- **Energía interna (U).**_

La energía interna de un sistema, tiene la forma de energía cinética y potencial de las moléculas, átomos y partículas subatómicas que constituyen el sistema, es decir:

$$U = E_{c \text{ int}} + E_{p \text{ int}} \quad (2.7)$$

En general la energía interna es la energía asociada con el movimiento de átomos y moléculas que conforman la materia y con la posición relativa de unas respecto a otras.

Teniendo en cuenta el hecho de que la materia en un sistema se encuentra en permanente movimiento, la energía interna integra las formas microscópicas resultantes del movimiento molecular en el sistema y las separa de la velocidad, posición o campo gravitacional del sistema como grupo.

- **Trabajo (W).**_

El trabajo en termodinámica siempre representa un intercambio de energía entre un sistema y su entorno.

Cuando un sistema sufre una transformación, este puede provocar cambios en su entorno. Si tales cambios implican el desplazamiento (variación) de las fuerzas que ejerce el entorno sobre el sistema, o más precisamente sobre la frontera entre el sistema y el entorno, entonces ha habido producción de trabajo.

El trabajo tiene dimensiones de energía y representa un intercambio de energía entre el sistema y su entorno.

El trabajo mecánico ocurre cuando una fuerza que actúa sobre el sistema lo mueve a través de una distancia. Tal como en mecánica este trabajo se define por la integral:

$$W = \int F \delta l \quad (2.8)$$

donde F es la componente de la fuerza que actúa en la dirección del desplazamiento δl .

No es necesario que la fuerza F en realidad provoque el desplazamiento δl ; sin embargo, debe ser una fuerza externa.

La convención de signos usual establece que el valor de W es negativo cuando el trabajo se hace sobre el sistema y positivo cuando es hecho por éste.

- **Calor (Q).**_

El calor, al igual que el trabajo, se considera en termodinámica como energía en tránsito a través de la frontera que separa a un sistema de su entorno. Sin embargo, a diferencia del trabajo, la transferencia de calor se origina por una diferencia de temperatura entre el sistema y su entorno. No se considera el calor que se almacena en un sistema.

Cuando se le agrega energía en forma de calor a un sistema se almacena como energía cinética y potencial de las partículas microscópicas que lo integran. Las unidades de calor son las de trabajo y energía.

La convención de signos utilizada para una cantidad de calor Q es opuesta a la que se utiliza para el trabajo. El calor añadido a un sistema se da con un número positivo, en tanto que el calor extraído de un sistema se da con un número negativo.

Cuando una sustancia incrementa su temperatura de T_A a T_B , el calor absorbido se obtiene multiplicando la masa (o el número de moles n) por el calor específico c y por la diferencia de temperatura $T_B - T_A$.

$$Q = nc (T_B - T_A) \quad (2.9)$$

Cuando no hay intercambio de energía (en forma de calor) entre dos sistemas, decimos que están en equilibrio térmico. Las moléculas individuales pueden intercambiar energía, pero en promedio, la misma cantidad de energía fluye en ambas direcciones, no habiendo intercambio neto. Para que dos sistemas estén en equilibrio térmico deben de estar a la misma temperatura.

- **Calor Específico (C).**_

De acuerdo con la termodinámica se tiene que los 2 calores específicos importantes son: C_v y C_p llamados calores específicos a volumen y presión constante respectivamente.

El calor específico a volumen constante se define como el cambio de energía molecular interna, u , por unidad de masa por grado de temperatura, cuando los estados finales corresponden al equilibrio del mismo volumen., como unidad derivada para el sistema internacional es:

$$C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left[\frac{kJ}{kg K} \right] \quad (2.10)$$

El calor específico a presión constante se define como el cambio en la entalpía para una unidad de masa (o un mol), entre dos estados de equilibrio a la misma presión, por grado de cambio en la temperatura, como unidad derivada para el sistema internacional es:

$$C_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \left[\frac{kJ}{kg K} \right]$$

(2.11)

Mientras el exponente calorimétrico del gas esta representado por γ (gamma) y es la relación:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (2.12)$$

Los valores de C_p y C_v para el aire en condiciones estándar son:

$$C_p = 0.240 \text{ [BTU/lb}^\circ\text{R]} \quad (2.13)$$

$$C_v = 0.171 \text{ [BTU/lb}^\circ\text{R]} \quad (2.14)$$

- **Entalpía (H).**

La entalpía es una propiedad que en su forma más simple se define como la cantidad total de energía que contiene una sustancia que fluye (debido a todas sus propiedades termodinámicas), esto es la suma de la energía interna y la energía de flujo expresada de la siguiente manera:

$$H = U + P V \quad (2.15)$$

Cuando se toma por unidad de masa de la sustancia, se llama Entalpía Específica (h), expresada en [kJ/kg] y al igual que la energía interna, es una propiedad de la sustancia, lo que significa que tendrá un único valor en cada estado, se lo expresa de la siguiente manera:

$$h = u + P v \quad (2.16)$$

En vista de que la energía interna u y el producto $P.v$ tienen unidades de energía, h también tiene unidades de energía. Por otra parte, como u , P y v son todas propiedades del sistema, h también lo debe ser.

2.1.4.2 Segunda Ley de la Termodinámica._

La segunda ley nos habla de las restricciones que existen al utilizar la energía en diferentes [procesos](#). Esta no es una consecuencia de la primera, sino una ley independiente.

En otros términos se diría lo siguiente: “No existe un proceso cuyo único resultado sea la absorción de calor de una fuente y la conversión íntegra de este calor en trabajo”. Siendo este el principio de Kelvin-Planck.

No es posible convertir completamente calor en trabajo, pero sí trabajo en calor. Así pues, mientras, según la primera ley, calor y trabajo son formas equivalentes de intercambio de energía, la segunda ley varía radicalmente su equivalencia, ya que el trabajo puede pasar íntegramente a calor pero el calor no puede transformarse íntegramente en trabajo.

Desde el punto de vista de la primera ley de la termodinámica, los dos procesos (trabajo y calor) son equivalentes. El calor puede transformarse en trabajo, o el trabajo en calor. Esta equivalencia se pierde si consideramos la segunda ley. El trabajo es una forma más “coherente” de energía. Siempre podemos transformarlo en calor, pero la inversa no siempre es posible.

- **Procesos Reversibles e Irreversibles._**

Una transformación es reversible si se realiza mediante una sucesión de estados de equilibrio del sistema con su entorno y es posible devolver al sistema y su entorno al estado inicial por el mismo camino. Reversibilidad y equilibrio son, por tanto, equivalentes. Si una transformación no cumple estas condiciones se llama irreversible. En la realidad, las transformaciones reversibles no existen.

En los procesos irreversibles aumenta la entropía del sistema. Y viceversa, si un sistema experimenta un aumento de entropía tras un proceso, éste es irreversible.

- **Entropía (S).**_

La entropía es una medida del orden (o desorden) de un sistema o de la falta de grados de restricción; la manera de utilizarla es medirla en nuestro sistema inicial, es decir, antes de remover alguna restricción, y volverla a medir al final del proceso que sufrió el sistema.

Hay que tener claro que el desorden viene dado por el número de estados en los que un sistema puede estar. Un sistema estará más desordenado que otro cuando el número de estados diferentes en los que podemos encontrar al primero es mayor que los del segundo.

La entropía es la propiedad que permanece constante en algunas transformaciones y que aumenta en otras, sin disminuir jamás.

La entropía permanece constante en un proceso adiabático reversible. Esto quiere decir el proceso sin intercambio de calor al exterior y reversible (ideal).

Aquellas transformaciones en las cuales la entropía aumenta, se denominan “procesos irreversibles”.

La segunda ley de la termodinámica se aplica solamente a sistemas aislados, es decir, a sistemas en los cuales las transformaciones implicadas quedan todas incluidas en ellos.

En sistemas abiertos la energía puede pasar de un sistema a otro y entonces mientras uno la pierde, el otro la gana, pero el balance total es igual a cero, lo mismo acontece con la entropía: si un sistema gana en entropía, su alrededor (que es otro sistema) la pierde, pero el balance total es nulo. Vale decir, al sistema más su alrededor se le considera como un sistema aislado. Éste es el caso, sin embargo, de los procesos reversibles, los cuales son procesos ideales (ya que no existen en la naturaleza).

En los sistemas reales (procesos irreversibles), el balance final de entropía es siempre positivo. Además, es muy importante señalar que la entropía aumenta en un sistema aislado hasta alcanzar un máximo, que es su estado de equilibrio (porque espontáneamente permanece en él).

2.1.5 MOTOR DIESEL._

El motor Diesel funciona por el principio del autoencendido o autoignición, en el que la mezcla aire-combustible arde por la gran temperatura alcanzada en la cámara de compresión, por lo que no es necesaria la chispa como en los motores de explosión.

En cuanto el combustible frío contacta con el aire que se encuentra a gran temperatura, comienza a elevarse su temperatura, formándose vapor alrededor de cada una de las gotas.

El aire circundante se enfría y toma calor de la masa de aire comprimido, transmitiéndolo nuevamente a la gota de combustible que vuelve a calentarse hasta alcanzar su temperatura de inflamación. Cuando esto ocurre, comienza la combustión y el calor producido se pasa a toda la masa de aire y combustible restante, produciéndose su inflamación.

El tiempo que transcurre entre la entrada de las primeras gotas y el inicio de la combustión se llama retardo a la inflamación, el cual representa el tiempo de giro del cigüeñal que transcurre entre el comienzo de la inyección y la inflamación del combustible.

Durante este periodo se está inyectando combustible de forma continua. Este fenómeno produce un picado particular, parecido a la detonación en los motores de gasolina, que aumenta a medida que lo hace el retardo a la inflamación.

Para reducir este fenómeno es necesario que la combustión se inicie con el menor intervalo de tiempo respecto a la inyección, una buena pulverización, con relaciones de compresión elevadas y cámaras de alta turbulencia.

Existen dos tipos de cámaras:

- Cámaras de inyección directa.
- Cámaras de inyección indirecta.

- **Cámaras de inyección directa.**

La inyección se realiza directamente en el cilindro, con alojamientos especiales en la cabeza del pistón que varían en su forma, para actuar como cámara de turbulencia y ayudar a la vaporización del combustible.

El grado de turbulencia bajo hace que las relaciones de compresión sean muy elevadas, del orden de 15:1 a 20:1, con lo que se consiguen grandes presiones y temperaturas y que hacen necesaria también una gran presión de la inyección.

- **Cámaras de inyección indirecta.**

En esta disposición la combustión se desarrolla en dos cámaras, una de ellas la de turbulencia que normalmente es esférica, y que desemboca en la principal, que está constituida por el espacio comprendido entre el pistón y la culata.

La cámara de turbulencia representa los dos tercios del volumen total de la cámara de combustión. En estas cámaras la presión de inyección es menos elevada, ya que la turbulencia creada en la precámara ayuda a la pulverización del combustible.

Esto se traduce en un funcionamiento del motor más suave y con menos sufrimiento para los distintos órganos que lo forman, ya que el paso de la combustión de una cámara a otra hace que la fuerza sobre el pistón se aplique de una forma más progresiva.

- **Sistema de inyección.**

Para realizar la combustión es necesario inyectar una determinada cantidad de combustible finamente pulverizado en la cámara de combustión, en la cual se encuentra el aire comprimido y caliente. Dicha misión está encomendada a los inyectores, que reciben el combustible de la bomba de inyección.

El combustible debe ser inyectado en la cámara de combustión en forma bien definida, pues el correcto funcionamiento de un motor Diesel depende en gran parte de una inyección correcta. Las condiciones esenciales son:

- Suministrar a cada cilindro y en cada ciclo la cantidad de combustible justa, adecuándola a las condiciones de marcha del motor.
- Iniciar la inyección en el momento preciso, de forma que la combustión se realice de forma correcta y por completo.
- Pulverizar el combustible, de forma que se reparta en minúsculas gotas para facilitar su inflamación.
- Dar a esas gotas la suficiente capacidad de penetración en la cámara donde se encuentra el aire comprimido.
- Difundir de manera uniforme las partículas de combustible en el aire de la cámara de combustión.

- **Sobrealimentación de un motor Diesel.**

El sistema más utilizado para realizar su sobrealimentación es el que utiliza un turbocompresor, ya que es un sistema sencillo, fiable y que mejora las cualidades de funcionamiento del motor además de sus prestaciones.

El turbocompresor se compone esencialmente por una turbina y un compresor, montados en el mismo eje. La turbina recibe el movimiento de los gases de escape, que se encuentran a elevada temperatura, y que la ponen en rotación. Al mismo tiempo la rueda del compresor comprime el aire que va a ser introducido en la admisión y posteriormente en los cilindros.

La cantidad y la presión del aire que entra es proporcional a la velocidad de rotación.

El turbocompresor presenta en su funcionamiento grandes ventajas, de entre las cuales destacan:

- Incremento notable de la potencia y el par motor, que puede llegar a un 35% más que el mismo motor en versión atmosférica.
- Son motores generalmente más silenciosos, aunque a veces se percibe un silbido, procedente del turbo, en las aceleraciones.
- Su rendimiento volumétrico es mayor, con lo que las combustiones son más completas, dando como resultado un consumo mucho más bajo a igualdad de potencia.
- La combustión es mucho más eficaz y limpia, con lo que se reducen los gases contaminantes.

En algunos motores, se intercalan intercambiadores de calor entre el turbo y el colector de admisión, con el fin de reducir la temperatura del aire de admisión.

Dichos intercambiadores pueden ser del tipo aire/aire, si el aire se refrigera por la circulación de otro aire, o aire/agua, si se refrigera mediante el paso de un líquido.

2.1.5.1 Ciclo Diesel de 4 Tiempos._

Este se le conoce como ciclo de encendido por compresión y se realiza a presión constante.

El funcionamiento de este motor durante su ciclo es el siguiente, Figura 2.3:

1er Tiempo: Admisión

Aire puro entra en el cilindro por el movimiento del pistón desde el punto muerto superior (PMS) hacia el punto muerto inferior (PMI).

La válvula de admisión permanece abierta y la de escape cerrada.

2do Tiempo: Compresión

El pistón se mueve desde el PMI hacia el PMS, el aire es comprimido y éste alcanza una temperatura y presión muy elevadas.

3er Tiempo: Carrera de trabajo

Antes de que el pistón complete el recorrido hasta el PMS se inyecta el combustible en el cilindro, y éste se enciende inmediatamente por causa de la alta temperatura.

Esta combustión fuerza al pistón hacia abajo al aumentar la presión dentro del cilindro.

4to Tiempo: Carrera de escape

Los gases de combustión son expulsados al desplazarse el pistón hacia el PMS nuevamente, a través de la válvula de escape que está ahora abierta. Nuevamente se inicia el ciclo de admisión.

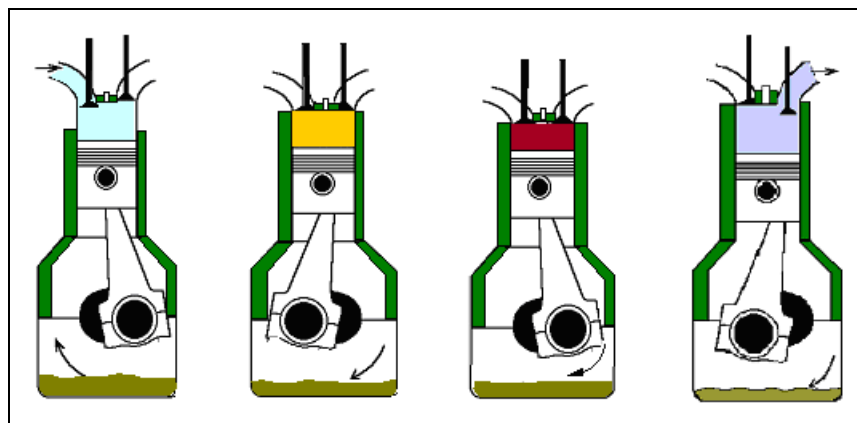


Figura 2.3: Ciclo Diesel 4 Tiempos

Fuente: http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/mot-ott.htm

2.1.5.2 Diagrama P-V._

Representando en un sistema de ejes coordenados P-V (Presión –Volumen) el funcionamiento teórico de estos motores queda determinado por el diagrama de la Figura 2.4:

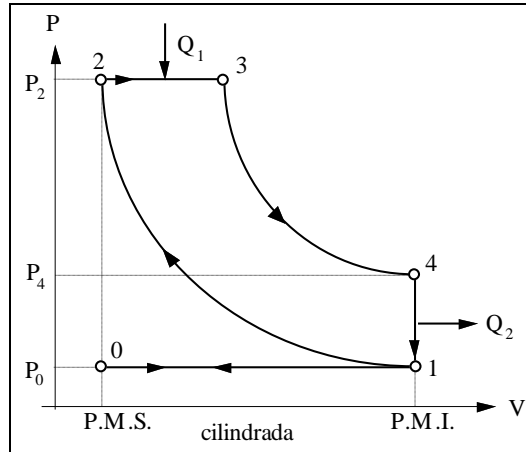


Figura 2.4: Diagrama P-V del Ciclo Diesel Teórico.

Fuente: http://tamarugo.cec.uchile.cl/~roroman/cap_10/mot-ott.htm

0-1.- Admisión (Isóbara).__

Durante la admisión se supone que el cilindro se llena totalmente de aire que circula sin rozamiento por los conductos de admisión, por lo que se puede considerar que la presión se mantiene constante e igual a la presión atmosférica. Es por lo que esta carrera puede ser representada por una transformación isóbara.

1-2.- Compresión (Adiabática).__

Durante esta carrera el aire es comprimido hasta ocupar el volumen correspondiente a la cámara de combustión. Se supone que por hacerse muy rápidamente no hay que considerar pérdidas de calor, por lo que esta transformación puede considerarse adiabática.

2-3.- Admisión de calor a presión constante (Isóbara).__

Durante el tiempo que dura la inyección, el pistón inicia su descenso, pero la presión del interior del cilindro se supone que se mantiene constante, transformación isóbara, debido a que el combustible que entra se quema progresivamente a medida que entra en el cilindro, compensando el aumento de volumen que genera el desplazamiento del pistón. Esto se conoce como retraso de combustión.

3-4.- Expansión (Adiabática)._

Terminada la inyección se produce una expansión, la cual, como la compresión se supone que se realiza sin intercambio de calor con el medio exterior, se considera una transformación adiabática. La presión interna desciende a medida que el cilindro aumenta de volumen.

4-1.- Rechazo de calor a volumen constante (Isócora)._

Es considerada la primera fase de escape, se abre la válvula de escape y los gases quemados salen tan rápidamente al exterior, que el pistón no se mueve, por lo que se puede considerar que la transformación que experimentan es una isócora. La presión en el cilindro baja hasta la presión atmosférica y una cantidad de calor no transformado en trabajo es cedido a la atmósfera.

1-0.- Fase de escape (Isóbara)._

Es la segunda fase del escape, los gases residuales que quedan en el interior del cilindro son expulsados al exterior por el pistón durante su recorrido hasta el PMS. Al llegar a él se cierra la válvula de escape y se abre la de admisión para iniciar un nuevo ciclo. Como se supone que no hay pérdida de carga debida al rozamiento de los gases quemados al circular por los conductos de escape, la transformación puede ser considerada como isóbara.

- **Entrada de Energía (q_{ent}).**_

$$q_{ent} = \text{HHV} / \text{Razón de masa de aire a masa de combustible [BTU/lb aire]} \quad (2.17)$$

$$q_{ent} = Q_1 = c_p (T_3 - T_2) \text{ [BTU/lb aire]} \quad (2.18)$$

donde:

T₂ = Temperatura al final de la compresión.

T₃ = Temperatura al final de la expansión.

- **Calor Sustraído (q_{sustraído}).**_

Cantidad de calor no transformado en trabajo, cedido a la atmósfera

$$q_{sustraído} = Q_2 = c_v (T_4 - T_1) \text{ [BTU/lb aire]} \quad (2.19)$$

donde:

T₁ = Temperatura al inicio de la compresión.

T₄ = Temperatura al inicio de la expansión.

- **Temperatura Adiabática de Llama.**_

Es la temperatura que podría alcanzar una llama si no hubiera pérdida de calor con el entorno.

- **Volumen Desplazado (VD).**_

$$VD = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L}{4} * n \quad (2.20)$$

$$\frac{VD}{n} = V_2 - V_1 \quad (2.21)$$

donde:

D = Diámetro del cilindro.

L = Carrera del pistón.

N = Número de cilindros del motor.

V₁ = Volumen de la cámara de combustión.

V₂ = Volumen total admitido.

- **Volumen Desplazado por Minuto (VD/min).**_

$$VD/\text{min} = VD \cdot \left(\frac{N}{2}\right) \quad (2.22)$$

donde:

N = revoluciones por minuto

- **Volumen de la Cámara de Combustión (V_{cc}).**_

$$V_{cc} = \frac{VD}{(Rc - 1) \cdot n} \quad (2.23)$$

$$V_{cc} = V_2 \quad (2.24)$$

donde:

Rc = Relación de compresión del motor

2.1.5.3 Balance Térmico.

Solo una pequeña parte de la energía calorífica del combustible quemado en un motor se transforma en energía mecánica, el resto se dispersa de diversas formas como se muestra en la Figura 2.5

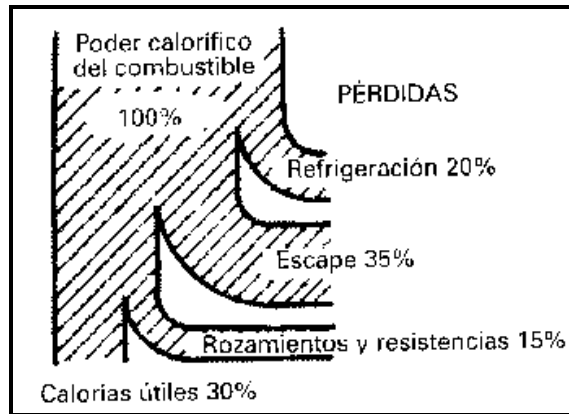


Figura 2.5: Balance Térmico

Fuente: ALONSO, J.M. Técnicas del Automóvil, Motores. 2000. Pág.60

- **Trabajo salida neto (Wsale neto).**_

Salida neta de trabajo por ciclo

$$W_{\text{sale neto}} = \eta_t \cdot q_{\text{ent}} \quad [\text{BTU/lb}] \quad (2.25)$$

- **Relación de Corte de Combustible (CC).**_

Relación del volumen después de la combustión al volumen antes de la combustión. Es una medida del tiempo durante la cual es inyectado el combustible.

Relación de Corte de Combustible Alta → Mayor combustible inyectado y mayor potencia, menor eficiencia.

$$CC = \frac{V_3}{V_2} = \frac{T_3}{T_2} \quad (2.26)$$

donde:

$$V_3 = V_2.$$

- **Presión Media Efectiva (PMEF).**_

Presión constante, si es ejercida sobre el pistón durante un paso de potencia, producirá el mismo trabajo neto que el ciclo real.

$$PMEF = \frac{wsaleneto}{V1 - V2} [psi] \quad (2.27)$$

- **Presión Media Efectiva al Freno (BMEP).**_

Presión asociada a la potencia al freno

$$BMEP = \frac{792000 * Pf}{VD * N} [psi] \quad (2.28)$$

- **Presión Media Indicada (IMEP).**-

Es la medida en los cabezotes del motor, esta asociada con el valor de la potencia indicada.

- **Potencia al Freno (BHP).**-

Es la medida de potencia generada por el torque, se la conoce también como potencia efectiva, se la mide utilizando un dispositivo frenante aplicado al eje del motor, se opone al par motor, permitiendo medir su valor. En varios de los casos esta, viene indicada por el fabricante.

- **Potencia Indicada (IHP).**_

La potencia indicada es la que realmente se desarrolla en el cilindro por el proceso de la combustión, Una de la formas de determinarla es a través de la presión media indicada en el ciclo.

$$IHP = \frac{imep.L.A.\left(\frac{N}{2}\right)}{33000} \quad (2.29)$$

donde:

A = Área del cilindro

- **Torque (T).**_

Es la fuerza de la explosión aplicada a la biela, y transmitida por esta al codo del cigüeñal para hacerle girar, produce un esfuerzo de rotación que

se conoce con el nombre de Torque, así pues el torque es un esfuerzo de giro. Esta definido por:

$$T = F * R \quad (2.30)$$

$$T = \frac{5252 * BHP}{N} \quad [lb.pie] \quad (2.31)$$

donde:

F = Fuerza
R = Radio de Giro
BHP = Potencia al freno

2.1.5.4 Eficiencias._

- **Eficiencia Térmica (η_t).**_

Una medida del desempeño en cualquier ciclo de potencia es su eficiencia térmica.

En los motores de ciclo Diesel el calor introducido, por ser una transformación a presión constante, se puede calcular mediante la variación de entalpía del fluido operante considerado como gas perfecto, por lo que:

$$Q_1 = C_p (T_3 - T_2) \quad (2.32)$$

Es interesante recordar que en una transformación a presión constante el calor puesto en juego se calcula mediante la variación de la entalpía del fluido activo, mientras que en el caso de una transformación a volumen constante se calcula mediante la variación de la energía interna del fluido.

Como la sustracción del calor Q_2 se realiza a volumen constante, se puede expresar que:

$$Q_2 = C_v (T_4 - T_1) \quad (2.33)$$

El rendimiento térmico ideal del ciclo Diesel teórico se lo expresa de la siguiente manera:

$$\eta_t = \frac{\text{calor suministrado} - \text{calor sustraído}}{\text{calor suministrado}} \quad (2.34)$$

$$\eta_{t \text{ Diesel}} = \frac{W_{\text{neto}}}{Q_{\text{en}}} \quad (2.35)$$

$$\eta_t = 1 - Rc^{1-\gamma} \left[\frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(CC^\gamma - 1)}{(CC - 1)} \right] \quad (2.36)$$

donde:

γ = Exponente calorimétrico del gas

- **Eficiencia Mecánica (η_m).**—

Es la relación existente entre el trabajo efectivo medido en el eje motor y el trabajo indicado.

$$\eta_m = \frac{W_e}{W_i} \quad (2.37)$$

Este rendimiento tiene en cuenta el trabajo absorbido por los rozamientos de los órganos en movimiento del motor (pistones, bielas, cigüeñal, etc.) y de los equipos auxiliares del motor (bomba de agua, generador, etc.) así como el trabajo absorbido en el bombeo (admisión y escape).

En los motores actuales, el total de las pérdidas por frotamientos se evalúa en un 15%, lo que implica un rendimiento mecánico del 85%.

En términos de potencia podemos expresar el rendimiento mecánico como la relación entre la potencia efectiva y la indicada:

$$\eta_m = \frac{\text{Potencia al freno}}{\text{Potencia indicada}} = \frac{Pf}{IHP} \quad (2.38)$$

- **Eficiencia de la Combustión (η_c).**—

La primera ley para los procesos de combustión establece que el principio de conservación de energía aplicado en un proceso de flujo estacionario pueden despreciarse las variaciones de las energías cinética y potencial de las corrientes fluidas; en muchos procesos de combustión no hay trabajo¹¹, entonces se tiene que $W=0$; entonces se tiene que:

$$Q \text{ salida} = H \text{ productos} - H \text{ reactantes}$$

$$Q = \sum_{prod} N_i h_i - \sum_{react} N_i h_i$$

$$Q = \sum_{prod} N_i (\Delta h_{f,77}^0 + h_T - h_{77})_i - \sum_{react} N_i (\Delta h_{f,77}^0 + h_T - h_{77})_i \quad (2.39)$$

Donde:

$\Delta h_{f,77}^0$ = Entalpía de formación a temperatura y presión estándar
 $h_T - h_{77}$ = Variación de la entalpía sensible

El proceso de combustión puede no llegar a su término, de manera que no toda la energía química se convierte en energía térmica. La temperatura de los productos de combustión no será tan elevada como es de esperar en el caso ideal. Se introduce la llamada eficiencia de combustión la cual indica la fracción útil de la energía ideal a liberar por el combustible.

La eficiencia de combustión es la relación existente entre el calor de salida y el poder calórico del combustible.

$$\eta_c = \frac{q \text{ salida}}{\text{Poder calórico}} \quad (2.40)$$

¹¹ WARK. Termodinámica, Analisis de la Primera Ley. Pág.590

2.2 COMBUSTIÓN

Se puede definir la combustión como la combinación rápida del oxígeno del aire con los distintos elementos que constituyen el combustible, originándose un desprendimiento de calor. En la Figura 2.6 se muestra un esquema del proceso de combustión:

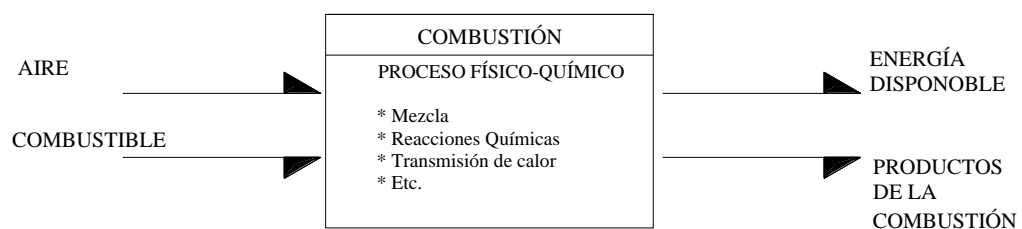


Figura 2.6: Esquema del proceso de combustión

Fuente: www.fi.uba.ar/materias/6730/Tomo1Intro.pdf

El aire es una mezcla fundamentalmente de oxígeno y nitrógeno con pequeñas cantidades de otros gases tales como anhídrido carbónico, argón, vapor de agua. Su composición varía ligeramente con la humedad y con la altura. No obstante, para simplificar el estudio de la combustión, se considera un aire con la siguiente composición en volumen:

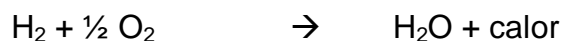
21 % de oxígeno

79 % de nitrógeno

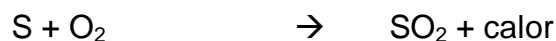
La combustión de un combustible líquido puede considerarse como el conjunto de los siguientes procesos:



(2.41)



(2.42)



(2.43)

2.2.1 EL COMBUSTIBLE

Los combustibles tienen una composición elemental en la que entran fundamentalmente: carbono, hidrógeno y azufre como elementos verdaderamente combustibles, acompañados de otros elementos tales como el nitrógeno, oxígeno y trazas de otros (vanadio, níquel, sodio, etc....).

2.2.1.1 Características de los combustibles líquidos._

Propiedades físico químicas de los combustibles líquidos.

- **Densidad._**

La densidad se define por el cociente entre la masa de un cierto volumen de combustible líquido y dicho volumen una temperatura determinada.

Salvo que se especifique lo contrario, cuando se habla de la densidad de un combustible líquido deberá entenderse que se refiere a la que presenta el producto a 15°C y a la presión atmosférica (760 mm Hg).

La densidad es función de la temperatura y presión del líquido.

La densidad de un combustible líquido, a 15°C, puede relacionarse con otras características, mediante fórmulas de equivalencia que conducen a resultados lo suficientemente aproximados desde el punto de vista práctico.

En la Figura 2.7 se observa la relación existente entre las densidades de varios combustibles y la temperatura a que se encuentran.

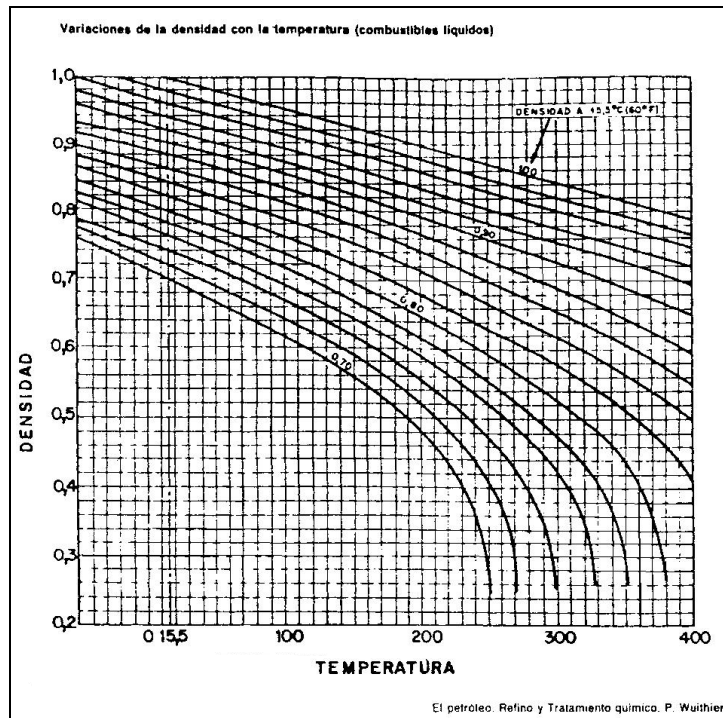


Figura 2.7: Relación existente entre las densidades de varios combustibles y la temperatura.

Fuente: El Petróleo Refino y Tratamiento Químico. P. Wuthier

- **Viscosidad.**

La viscosidad es la medida física de la resistencia que opone un líquido a fluir cuando se le aplica una fuerza exterior. Por ejemplo, la presión producida por una bomba o por el líquido contenido en un camión o vagón cisterna que se descarguen por gravedad.

Sin duda alguna, la viscosidad es una de las características más importantes de un combustible en lo que se refiere a su almacenamiento, traslado y utilización.

La viscosidad se mide en unidades físicas o prácticas.

Entre las primeras se encuentran:

- viscosidad absoluta o dinámica
- viscosidad cinemática

Cuyas unidades, en el sistema CGS, son, respectivamente, el poise y el stoke. En la práctica, tanto el poise como el stoke, resultan unidades demasiado grandes; por este motivo se emplean, con mayor frecuencia, sus submúltiplos, el centipoise y el centistoke (cst), que, como sus nombres indican, equivalen a la centésima parte del valor de las primeras.

$$\text{centipoise} = \text{poise}/100 = 0.001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \quad (2.42)$$

$$\text{centistoke} = \text{stoke}/100 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2.43)$$

La viscosidad cinemática se obtiene dividiendo la dinámica por la densidad del combustible.

La viscosidad dinámica se representa, generalmente, por la letra del alfabeto griego μ (mu), en tanto que para la cinemática se utiliza comúnmente la ν (ny).

La viscosidad de un combustible líquido varía inversamente con su temperatura y resulta poco sensible, por otra parte, a oscilaciones moderadas en la presión, cuyos efectos pueden despreciarse en la mayoría de los problemas prácticos.

- **Inflamabilidad.**

El punto de inflamación o inflamabilidad de un combustible líquido da una indicación sobre el valor de la temperatura a la cual el producto, ensayado según una cierta norma, emite suficientes vapores para que pueda inflamarse la mezcla aire-gases provocada por el calentamiento del fluido.

Se admite generalmente que los distintos combustibles líquidos pueden manipularse, sin grave riesgo de explosión o incendio, siempre y cuando permanezcan a temperaturas inferiores a las correspondientes a sus puntos de inflamación.

Desde el punto de vista de seguridad del almacenamiento puede considerarse que, tanto el gas-oil como los diversos tipos de fuel oil, son productos poco

peligrosos, ya que sus puntos de inflamación son del orden de 65-70°C, muy superiores a los de almacenamiento.

- **Contenido en azufre.**_

La determinación del contenido en azufre de una muestra es importante debido a que los compuestos sulfurados son malolientes y corrosivos.

Durante la combustión, se desprende en forma de SO₂, que por oxidación e hidratación da ácido sulfúrico, que es un contaminante peligroso y además un compuesto fuertemente corrosivo.

- **Poder calorífico de los combustibles líquidos.**-

La mayoría de los combustibles comerciales, disponibles para motores de combustión interna, contienen hidrógeno como constituyente y por tanto se propicia la formación de agua cuando el hidrógeno es quemado.

Los productos de combustión son enfriados a su temperatura original, el vapor de agua se condensa, y el calor total liberado es conocido como calor grueso o poder calórico superior (HHV) y se mide en BTU/lb de combustible líquido, o BTU/pie cúbico de combustible gaseoso.

Existen formulas empíricas para determinar el poder calórico de varios combustibles, para el crudo (petróleo)¹² es:

$$\text{HHV} = 17645 + 54 (\text{° API}) \quad [\text{BTU/lb}] \quad (2.44)$$

2.2.2 TIPOS DE COMBUSTIÓN.

Se pueden distinguir los siguientes tipos de combustión:

- **Completa o Perfecta.**_ cuando las reacciones anteriormente indicadas están totalmente desplazadas hacia la derecha, con independencia del exceso de aire empleado.

¹² Stinson Karl W. ME, "Diesel Engineering Handbook", 12th edition, Pag. 44.

- **Estequiométrica.** es aquella combustión completa que se ha realizado sin exceso de aire.

La cantidad de aire requerida en este tipo de combustión se denomina aire teórico o estequiométrico. Constituye un dato de suma importancia.

Las combustiones estequiométricas sólo son posible realizarlas en laboratorio, ya que no basta suministrar la relación exacta combustible-aire, sino que es preciso además que la mezcla sea total y homogénea, ya que en caso contrario, en unas zonas la combustión será con exceso de aire, mientras en otras será con defecto de aire.

- **Incompleta o Imperfecta.** es aquella en la que los gases de combustión contienen compuestos parcialmente oxidados tales como hidrógeno, monóxido de carbono, partículas de carbón, entre otras. Estas combustiones pueden efectuarse con exceso o defecto de aire.

2.2.2.1 La Combustión Completa.

- **Aire mínimo o estequiométrico necesario.**

Sea un combustible líquido que tenga una composición por kg de combustible de:

C kg de Carbono
 H₂ kg de Hidrógeno
 S kg de Azufre

En las condiciones normales, el volumen ocupado por un gas ideal es 22.4

$$\frac{m^3 O_2}{Kmol O_2}$$

Una mol de una sustancia se define como la masa igual a la masa molecular M de la sustancia. La masa molecular del O_2 es 32, un kilogramo–mol de O_2 tiene una masa de 32 Kg.¹³

En un Kg. de combustible se tiene en total C Kg. de carbono, lo cual, expresado en Kilomoles corresponde a una cantidad igual a:

$$\frac{C}{12} = N = \text{Kmol} \quad (2.45)$$

donde 12 es el peso atómico del carbono.

Para la combustión de C kg de Carbono se necesitan, según la reacción (2.39):

$$\frac{22.4}{12} xC = 1.87 C \text{ Nm}^3 \text{ de } O_2 \quad (2.46)$$

Según la reacción (2.40), para la combustión de H_2 kg de hidrógeno se necesitan:

$$\frac{11.2}{2} xH_2 = 5.6 H_2 \text{ Nm}^3 \text{ de } O_2 \quad (2.47)$$

Finalmente, para la combustión de S kg de azufre se necesitan, según (2.41).

$$\frac{22.4}{32} xS = 0.7 S \text{ Nm}^3 \text{ de } O_2 \quad (2.48)$$

Por consiguiente para la combustión de 1 kg de combustible, el oxígeno mínimo necesario o estequiométrico sería la suma del necesario para la combustión del carbono, hidrógeno y azufre, es decir:

$$O_{2m} = 1.87 C + 5.6 H_2 + 0.7 S \text{ [Nm}^3\text{] de oxígeno}$$

¹³ Ayala Cueva, Galo Ing. "Combustión y Combustibles para Motores Industriales", 2004

(2.49)

Como la composición en volumen del aire es, como se ha indicado anteriormente, del 21 % de oxígeno y 79 % de nitrógeno, se tiene que el aire mínimo A_m necesario será:

$$A_m = \frac{100}{21} O_{2m} = 4.76 O_{2m} \quad (2.50)$$

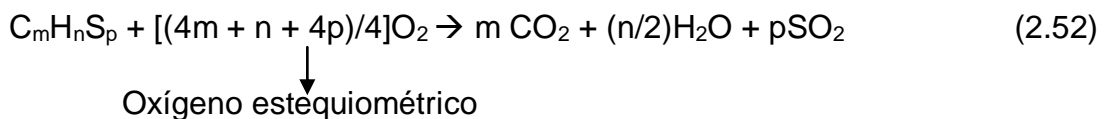
Por tanto el aire estequiométrico por kg de combustible será:

$$A_m = 8.90 C + 26.67 H_2 + 3.33 S \quad [\text{Nm}^3] \quad (2.51)$$

Este volumen está referido a condiciones normales (0°C y 760 mm Hg. de presión).

El peso del aire mínimo estequiométrico se calcula de la siguiente manera

Sea un combustible líquido que tenga una composición $C_m H_n S_p$ se balancea la ecuación para obtener el oxígeno necesario.



Cada componente del combustible pesará:

$$\begin{array}{lll} m & * & PM_C \quad \rightarrow \quad [\text{Kg}] \text{ de C} \\ n & * & PM_H \quad \rightarrow \quad [\text{Kg}] \text{ de H} \\ p & * & PM_S \quad \rightarrow \quad [\text{Kg}] \text{ de S} \end{array}$$

El oxígeno pesará:

$$[(4m + n + 4p)/4] * PM_{O_2} \quad \rightarrow \quad [\text{Kg}] \text{ de } O_2 \quad (2.53)$$

Entonces cada kilogramo de combustible necesita:

$$\frac{\text{Kg de } O_2}{(\text{Kg de } C + \text{Kg de } H + \text{Kg de } S) * 0.23} \text{ Kg de Aire} \quad (2.54)$$

↓

1 Kg de aire contiene 0.23 Kg de O_2 .

- **Exceso de aire (λ).**

En realidad es prácticamente imposible obtener una mezcla homogénea y total del combustible con el comburente, sobre todo teniendo en cuenta el corto tiempo en que esta mezcla debe realizarse. Esto obliga a emplear una cantidad real de aire comburente mayor de la estrictamente necesaria o aire mínimo de combustión.

La relación entre el aire realmente utilizado y el aire mínimo necesario se denomina índice de exceso de aire, factor o coeficiente de exceso de aire, y se designa normalmente por λ .

$$\lambda = \frac{A_{real}}{A_m} \quad (2.55)$$

Al valor $\lambda - 1 = A_{real} - A_m / A_m$ se le denomina *exceso de aire* y suele expresarse en %, es decir:

$$m = \% \text{ exceso de aire} = (\lambda - 1) \times 100 \quad (2.56)$$

O se puede decir que:

$$\lambda = [(m / 100) + 1] \quad (2.57)$$

- **Humedad Relativa (H.R.)._**

La humedad relativa (H.R.) se define como el porcentaje (%) de vapor de agua que tiene una masa de aire en un momento determinado. Se expresa en tanto por cien¹⁴.

2.2.2.2 La Combustión Incompleta._

Cuando una combustión es incompleta, en los gases de combustión existen sustancias que no se han quemado, tales como carbono (C), hidrógeno (H₂) y monóxido de carbono (CO) procedente del carbono del combustible.

Una parte, *a*, del carbono del combustible se convierte en CO₂ y el resto, (1 - *a*), en CO.

- **Seudo-combustiones oxidantes._**

Se denomina seudo-combustión oxidante aquella cuyos gases contienen todos los constituyentes de una combustión con exceso de aire y además partículas de carbono sin quemar.

Este tipo de combustión tiene lugar cuando estas partículas no tienen tiempo de quemarse y es debida fundamentalmente a las siguientes causas:

- La elevada carga térmica del hogar, es decir la relación entre la potencia calorífica y el volumen del hogar, ya que existe poco tiempo de permanencia.
- La escasa turbulencia, existiendo por tanto una mala mezcla aire-combustible, lo que en muchos quemadores viene producido por trabajar con poco aire, bien sea con un excedo de aire pequeño, bien por estar funcionando el quemador a una fracción muy pequeña de su potencia nominal. Para un combustible determinado se puede determinar

¹⁴ www.edu.aytolacoruna.es/aula/geografia/atmosfera_y_clima/humedad/expresaHA.htm

experimentalmente un valor óptimo de la turbulencia, por debajo del cual aumenta rápidamente la producción de inquemados sólidos.

- La falta de uniformidad de la pulverización en los combustibles líquidos, ya que cuanto mayor sea el número de gotas de gran tamaño, tanto más fácil es que se produzcan inquemados, puesto que una gota de gran diámetro necesita un tiempo mayor de permanencia para quemarse por completo.
- El enfriamiento de la llama, lo que puede ocurrir cuando la mezcla aire-combustible incide sobre superficies relativamente frías como el frente de la cámara de combustión, o las paredes de un tubo de llama, y también cuando se trabaja con un gran exceso de aire.
- El alto porcentaje de carbono en los combustibles.

Dado que un volumen de CO_2 formado consume un volumen de O_2 , el volumen total de gases no varía, ya que el CO_2 no formado viene compensado por el O_2 que no se consume.

El oxígeno de los humos procede pues del exceso de aire empleado y del que no ha reaccionado, por lo que el índice de exceso de aire puede aumentar si no se tiene en cuenta la parte de carbono sin quemar.

- **Seudo-combustiones neutras.**

Este tipo de combustiones son en realidad un caso particular de las pseudo-oxidantes, y se caracterizan por:

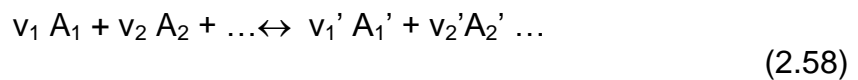
- Un contenido prácticamente nulo de CO en los humos secos.
- La no existencia de oxígeno en los humos.

- **Equilibrio Químico.**

Las temperaturas de combustión son, a menudo, lo suficientemente altas para que la disociación de las moléculas de los productos se deba tomar en cuenta.

Por disociación entendemos el rompimiento de las moléculas en sus constituyentes básicos. Por ejemplo, a altas temperaturas, las moléculas de agua, al menos hasta una cierta extensión, se disociarán en hidrógeno y oxígeno; el dióxido de carbono se disociará en monóxido de carbono y oxígeno, y aun el hidrógeno molecular se disociará en hidrógeno atómico. Está claro que la disociación afectará la composición de los productos de la combustión.

En otras palabras todas las reacciones químicas son reversibles químicamente. Es más las transformaciones químicas siempre transcurren en ambos sentidos, pero no siempre, ni mucho menos, con la misma velocidad. Si la reacción:



en un instante dado marcha de izquierda a derecha, esto solo significa que en la unidad de tiempo se forman más productos de la reacción: A_1' , A_2' ... que sustancias iniciales A_1 , A_2 ...

Precisamente por ésto en la ecuación de la reacción, en vez de signo de igualdad, se escribe el signo (\leftrightarrow). Con el tiempo, a medida que van aumentando las cantidades de sustancias A_1' , A_2' ... y disminuyendo las cantidades de sustancias A_1 , A_2 ... la velocidad total de reacción disminuye, y al fin y al cabo se llegará al estado de equilibrio dinámico y exteriormente parecerá que no se efectúa ninguna reacción. Este estado se llama equilibrio químico.

Para ser capaces de determinar las composiciones de los productos con disociación, es necesario tener un criterio para el equilibrio químico. Un criterio tal para el equilibrio en una mezcla a una presión y una temperatura dadas es proporcionado por la propiedad termodinámica llamada función de Gibbs. La función de Gibbs está definida por:

$$G = H - TS \quad (2.59)$$

donde:

G = Función de Gibbs

H = Entalpía

T = Temperatura

S = Entropía

De la ecuación (2.16):

$$G = U + pV - TS \quad (2.60)$$

$$\delta G = \delta U + p\delta V + V\delta p - T\delta S - S\delta T \quad (2.61)$$

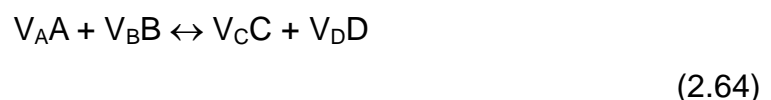
Si un sistema pasa de un estado de equilibrio a otro estado de equilibrio, a las mismas condiciones de presión y temperatura, la función de Gibbs permanece constante; entonces:

$$\delta G = \delta U + p\delta V + V\delta p - T\delta S - S\delta T = V\delta p - S\delta T \quad (2.62)$$

Para un sistema que ha alcanzado la presión y la temperatura de equilibrio, $\delta p = \delta T = 0$, de modo que nuestro criterio para equilibrio químico es:

$$dG = 0 \quad (2.63)$$

Para aplicar este criterio, consideremos un caso general en el cual las especies A, B, C y D, están en equilibrio químico a una temperatura, T, y presión, p, y a a moles de A, b moles de B, c moles de C y d moles de D. En este sistema, las reacciones están ocurriendo de acuerdo con:



Si la reacción descrita por la ecuación (2.64) ocurre en una extensión infinitesimal a la derecha (o a la izquierda), entonces nuestro criterio de equilibrio requiere que $dG = 0$.

En otras palabras, para cada reacción infinitesimal,

$$(V_C g'_C + V_D g'_D - V_A g'_A - V_B g'_B) d\varepsilon = 0 \quad (2.65)$$

donde $d\varepsilon$, es una medida de la extensión de la reacción; tal que v_A representa, por ejemplo, el cambio infinitesimal en el número de moles de A como resultado de la reacción en equilibrio; y g'_A denota la función de Gibbs por mol del constituyente A. Un valor positivo de $d\varepsilon$ indica que la reacción en la ecuación (2.64), procede hacia la derecha; un valor negativo que procede hacia la izquierda. Como $d\varepsilon$ puede tener valores tanto positivos como negativos, el término en paréntesis en la ecuación (2.65) debe ser cero:

$$V_C g'_C + V_D g'_D - V_A g'_A - V_B g'_B = 0 \quad (2.66)$$

Para evaluar la función de Gibbs, sea $g' = g'_{ref} + (g' - g'_{ref})$, donde g'_{ref} = función de Gibbs por mol a la temperatura T , y 1 atmósfera de presión. Para un constituyente dado, el término $g' - g'_{ref}$ representa la diferencia en la función de Gibbs por mol para aquél constituyente a la temperatura T , entre 1 atmósfera de presión y la presión parcial de ese constituyente en la mezcla. Para evaluar esta diferencia, se uso la ecuación (2.62):

$$dG = V dp - S dT = V dp \quad (2.67)$$

para una temperatura dada T ($dT = 0$). Ahora supondremos que todos los constituyentes se comportan como gases ideales, de modo que $pV = NRuT$.

Por lo tanto,

$$dg' = V \frac{dp}{N} = R_u T \frac{dp}{p} \quad (2.68)$$

Integrando entre 1 atmósfera y una presión parcial de p atmósferas, obtenemos

$$\int dg' = R_u T \int_{p=1atm}^{p=p_{atm}} \frac{dp}{p} \quad (2.69)$$

o $g' - g'_{ref} = R_u T \ln p$, donde p está expresada en atmósferas. Aplicando este resultado a cada uno de los constituyentes en la ecuación (2.64), obtenemos

$$V_C g'_C = V_C g'_{C(ref)} + V_C R_u T \ln p_C \quad (2.70)$$

$$V_D g'_D = V_D g'_{D(ref)} + V_D R_u T \ln p_D \quad (2.71)$$

$$V_A g'_A = V_A g'_{A(ref)} + V_A R_u T \ln p_A \quad (2.72)$$

$$V_B g'_B = V_B g'_{B(ref)} + V_B R_u T \ln p_B \quad (2.73)$$

donde p_A , por ejemplo, representa la presión parcial de A en atmósferas. Combinando con el criterio de equilibrio (2.66) resulta:

$$V_C g'_{C(ref)} + V_D g'_{D(ref)} - V_A g'_{A(ref)} - V_B g'_{B(ref)} = R_u T \ln \frac{p_A^{V_A} p_B^{V_B}}{p_C^{V_C} p_D^{V_D}} \quad (2.74)$$

Los términos del lado izquierdo de la ecuación (2.74) representan los valores de la función de Gibbs a 1 atmósfera y temperatura T . Por su definición, la función de Gibbs es una propiedad termodinámica, de modo que los valores del lado izquierdo pueden determinarse en función de la temperatura. Por conveniencia, la ecuación (2.74) puede reacomodarse como sigue:

$$\frac{V_C g'_{C(ref)} + V_D g'_{D(ref)} - V_A g'_{A(ref)} - V_B g'_{B(ref)}}{R_u T} = \ln K_p \quad (2.75)$$

- **Equilibrio en Sistemas con Reacción Química.**

Se examinará la reacción química general cuando los elementos o compuestos A y B reaccionan para formar los elementos o compuestos C y D. Se limitara el análisis a reacciones homogéneas en fase gaseosa. La ecuación de la reacción general es la (2.58).

La rapidez con que el número de moles de A, se consume por su reacción con B, en cualquier tiempo es función de A y de B, en otras palabras, cuando falta A o B no existe reacción. Denotando [A] la concentración de A en unidades arbitrarias, la rapidez del consumo de A, mol/s, se escribe:

$$\left(\frac{d[A]}{dt}\right)^+ = -k_1[A]^{v_A}[B]^{v_B} \quad (2.76)$$

Donde k_1 es una constante de proporcionalidad, llamada constante de rapidez o reacción, la cual describe la rapidez de una reacción en particular. Los coeficientes estequiométricos aparecen como exponentes por que la rapidez de reacción depende de cuantas moléculas de B requieren para reaccionar con las moléculas de A.

El valor de k_1 depende no solo de la reacción particular, si no también de las unidades elegidas para expresar la concentración. El signo negativo que aparece en la ecuación (2.76) se debe a que la concentración de A disminuye.

En la ecuación descrita por la ecuación (2.58), los productos C y D a su vez reaccionan para formar A y B, entonces la siguiente seria la rapidez con que se forma A mediante la reacción inversa:

$$\left(\frac{d[A]}{dt}\right)^- = -k_2[C]^{v_C}[D]^{v_D} \quad (2.77)$$

Cuando se alcanza el equilibrio, la suma de la rapidez de consumo $(d[A]/dt)^+$ y la de formación $(d[A]/dt)^-$ de A debe ser cero. Sumando las ecuaciones (2.76) y (2.77) resulta:

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[C]^{v_C} [D]^{v_D}}{[A]^{v_A} [B]^{v_B}} \quad (2.78)$$

Donde K es una nueva constante llamada constante de equilibrio.

Con frecuencia k_1 y k_2 , no se conocen en una reacción dada y K debe encontrarse por medios diferentes a la ecuación (2.78) como el uso de la información sobre el equilibrio.

Entonces ahora resulta definir la función (2.66) en forma ligeramente diferente, aunque bastante próxima, que se denotara $\Delta G^\circ(T)$, lo cual representa el cambio de la función de gibbs que tiene lugar a una temperatura dada, para una reacción que avanza hasta su culminación.

$$\overline{\Delta G^\circ}(T) = (v_C \overline{g_C^\circ} + v_D \overline{g_D^\circ} - v_A \overline{g_A^\circ} - v_B \overline{g_B^\circ})_T \quad (2.79)$$

Donde $\overline{g_i^\circ}$ son las funciones molares de Gibbs para los componentes en su estado puro, a la presión y a la temperatura estándar de la reacción; esto implica que $\overline{\Delta G^\circ}(T)$ se aplica a una reacción donde los reactivos estaban inicialmente separados pero que, al unirse, tiene lugar una reacción que avanza hasta su culminación y, entonces, los productos son separados.

Al sustituir las ecuaciones (2.75) y (2.79) en la ecuación (2.66) resulta.

$$dG_{T,P} = \left[\overline{\Delta G^\circ}(T) + \overline{RT} \ln \frac{a_C^{v_C} a_D^{v_D}}{a_A^{v_A} a_B^{v_B}} \right] d\varepsilon \quad (2.80)$$

Dado que $dG_{T,P} = 0$ en el equilibrio, la ecuación queda.

$$\ln \frac{a_C^{v_C} a_D^{v_D}}{a_A^{v_A} a_B^{v_B}} = \frac{-\Delta \overline{G}^o(T)}{RT} = \ln K_p \quad (2.81)$$

$$K_p = \exp \left[\frac{-\Delta \overline{G}^o(T)}{RT} \right] \quad (2.82)$$

K_p es función de la temperatura solamente, se pueden encontrar los valores tabulados de K_p de acuerdo a la reacción. Anexo 1

Debe recordarse que todos los cálculos hechos para determinar la composición de los productos de la combustión, suponen que los productos están en equilibrio termodinámico. El tiempo requerido para que los productos alcancen el equilibrio es una función de la tasa de las reacciones químicas que están ocurriendo. Es suficiente hacer notar que, los momentos en que los gases están expuestos a altas temperaturas son lo suficientemente cortos como para que ocurran desviaciones significativas de las concentraciones de equilibrio.

CAPITULO III

MONITOREO DE EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES

3.1 NORMAS VIGENTES

De conformidad con lo establecido en la Constitución Política de la República del Ecuador a los ministerios de estado les corresponde: Expedir las normas, acuerdos y resoluciones que requiere la gestión ministerial, por lo tanto, el Ministerio de Energía y Minas puede fijar los límites permisibles en las actividades hidrocarburíferas para disminuir los efectos que producen los diferentes tipos de emisiones a la atmósfera.

La Dirección Nacional de Protección Ambiental cuenta con el estudio técnico de “Revisión de parámetros de control para emisiones a la atmósfera”, que permite fijar los límites permisibles para emisiones a la atmósfera del sector hidrocarburífero, fundamentado en datos reales de la industria y comparaciones técnicamente sustentadas.

El Reglamento Ambiental vigente para las operaciones Hidrocarburíferas en el Registro Oficial No.153 emitida el viernes 22 de agosto de 2003, en el acuerdo ministerial No. 71,

Acuerda:

“Fijar los límites máximos permisibles para emisiones a la atmósfera provenientes de fuente fijas para actividades hidrocarburíferas”

3.1.1 ART. 1.- LIMITES PERMISIBLES.-

Se fijan los valores máximos permisibles de emisiones a la atmósfera para los diferentes tipos de fuentes de combustión, en función de los tipos de combustible utilizado, conforme la siguiente tabla:

Tabla 3.1: Límites máximos permitidos para emisiones de generadores eléctricos y motores de combustión interna

Contaminante (mg/dsm ³)	Tipo de combustible que se utiliza		
	GLP o GAS	DIESEL	BUNKER o CRUDO
Material Particulado (MP)	100	150	150
Óxidos de Carbono (CO)	1500* 500**	1500* 500**	1500* 500**
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	300	1900	1900
Óxidos de Azufre(SO ₂)	30	580	1900*** 2500***
HAPs	0,1	0,1	0,1
COVs	5	10	10

* Para generadores con capacidad menor a 750 kW.

** Generadores capacidad mayor a 750 kW.

*** Para crudos o bunker con un contenido de azufre de <2,2% S: 1900 mg/dsm³; para crudos o bunker con un contenido de azufre de > 2,2 % S: 2500 mg/dsm³

Fuente: Reglamento Ambiental Vigente para Operaciones Hidrocarburíferas

NOx._ Suma aritmética de NO y NO₂

mg/dsm³._ Expresado como miligramos de contaminante por metro cúbico de gas seco y referido a condiciones estándar de T y P y 11% de O₂

3.1.2 ART. 6.- PÓRTICOS DE MUESTREO.-

Para la localización de los pórticos o puertos de muestreo se deberá escoger un tramo recto de chimenea donde el flujo de gas sea laminar y no ciclónico. El pórtico debe ser una unión de 3 pulgadas de diámetro rosca NTP, directamente soldada a la chimenea. Para el caso de chimeneas con diámetros menores que 30 cm, se instalarán dos pórticos, de preferencia de 1 pulgada de diámetro, instalados uno a continuación de otro y separados al menos 2 diámetros entre sí.

3.1.3 ART. 8.- FORMATOS.-

Los reportes de monitoreo periódico deben presentarse en forma impresa y en formato digital a la Dirección Nacional de Protección Ambiental del Ministerio de Energía y Minas para facilitar la sistematización de la información requerida, como se muestran en el Anexo 2

3.2 EQUIPO UTILIZADO PARA EL ANÁLISIS DE GASES

El equipo que se utilizó para el monitoreo ambiental es el TELEDYNE'S PORTABLE EMISSIONS MONITOR Modelo PEM-9002, Serie No. 229467, de propiedad de Gerencia de Oleoducto – Petroecuador, Figura 3.1.



Figura 3.1: Analizador de Gases

Fuente: Manual de usuario TELEDYNE PEM-9002

El equipo permite realizar la medición de los siguientes parámetros:

T. Gas	Temperatura del gas	°F o °C
T. Room	Temperatura ambiente	°F o °C
O ₂	Contenido de oxígeno	% en volumen
CO	Monóxido de carbono	ppm ¹⁵ - mg/m ³
NO	Óxido de nitrógeno	ppm - mg/m ³
SO ₂	Dióxido de azufre	ppm - mg/m ³
Draft	Presión	pulg de H ₂ O

Y además calcula valores de:

CO ₂	Dióxido de carbono	%en volumen
CO 0%	Óxido de carbono, sin diluir	ppm

¹⁵ ppm: partes por millón de partes, 10000 ppm = 1 %

Effi.	Eficiencia de la combustión	%
Ex. air	Exceso de aire, λ	
Losses	Pérdidas	%
NOx	Óxidos de nitrógeno	ppm - mg/m ³
T. Diff	Diferencia de temperatura (T Gas – T Ambiente)	°F o °C

Cálculo del valor de CO₂:

$$CO_2 = CO_2 \text{ max} * \left(1 - \frac{O_2}{20.9}\right) \text{ en \% volumen} \quad (3.1)$$

CO₂max: Valor máximo de CO₂ en % volumen (específico del combustible).

O₂: Contenido de oxígeno medido en % volumen.

20.9: Contenido de oxígeno en el aire en % volumen.

Cálculo de pérdidas:

$$qA = (T.Gas - T.Aire) * \left(\frac{A2}{21 - O_2} + B\right) \text{ en \%} \quad (3.2)$$

T. Gas y T.Aire: En °F o °C

A2, B: Factores específicos del combustible.

Los factores específicos para el crudo combustible son los siguientes¹⁶:

CO₂ Máx. =16.5

A2 = 0.6

B = 0.005

Cálculo de exceso de aire (Lambda):

$$\lambda = \frac{CO_2 \text{ max}}{CO_2} = \frac{20.9}{20.9 - O_2} \quad (3.3)$$

Cálculo de la eficiencia de combustión (Eta):

$$Eta = 100 - qA \text{ en \%} \quad (3.4)$$

Cálculo de CO 0% (sin diluir): dado

¹⁶ Proporcionado por los distribuidores del equipo. TEC-TOTAL Cía. Ltda.

$$\text{CO } 0\% = \text{CO} * \lambda \text{ en ppm} \quad (3.5)$$

Los datos técnicos del equipo se muestran en el Anexo 3

3.2.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO

Antes de iniciar el monitoreo, el equipo al encenderse, realiza en forma automática una auto calibración, para posteriormente seleccionar el tipo de combustible de la fuente, en el caso de los motores ALCO 251 F se escoge la opción “CO2max choosbl” dentro del menú de selección de combustible del analizador, que nos permite ingresar los factores específicos del crudo combustible antes mencionados, para poder realizar el monitoreo correctamente.

El equipo presenta los resultados como se muestra en la Figura 3.2 :

Estación No.5 – Papallacta Muestra No.1 ALCO 7

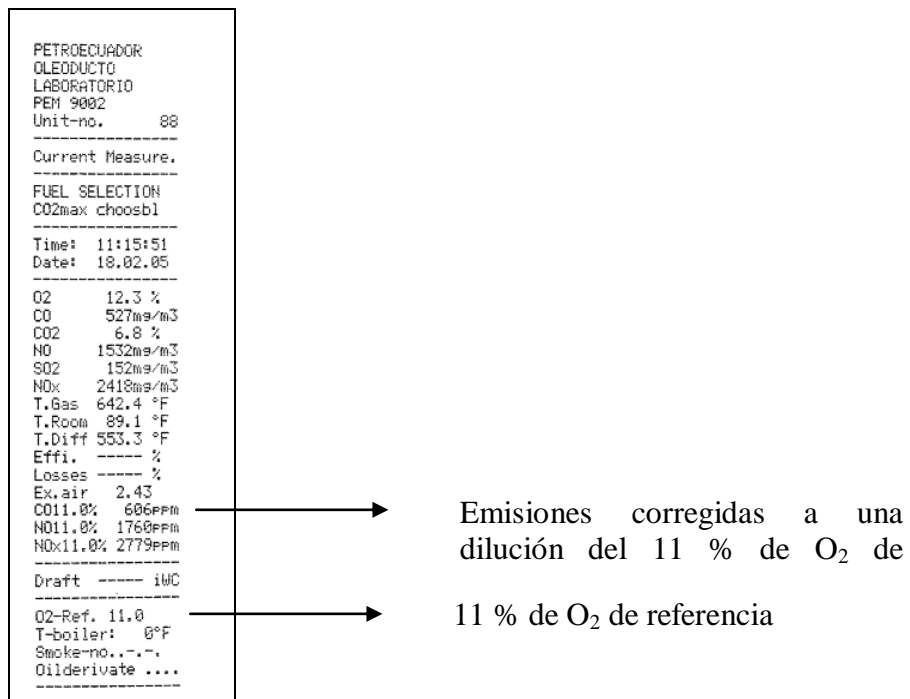


Figura 3.2: Presentación de resultados del equipo

Fuente: Equipo TELEDYNE PEM-9002

El equipo puede presentar los resultados expresados en ppm y en cualquier porcentaje de oxígeno de referencia según las necesidades del usuario, por

lo tanto a continuación se presenta el algoritmo para corregir los resultados del analizador de gases con los requeridos por el Reglamento Ambiental Vigente para Operaciones Hidrocarburíferas, esto es expresado en miligramos de contaminante por metro cúbico de gas seco y referido a condiciones estándar de T y P y 11% de O₂.

Si los resultados se presentan en ppm hay que transformarlos a mg/m³ de la siguiente manera:

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{P * ppm * PM}{R * T}$$

donde:

P = Presión atmosférica a condiciones estándares = 1 [atm]

ppm = Partes por millón de partes.

PM= Peso molecular del contaminante [g/mol]

R = Constante universal de los gases = 0.082 [atm L/ mol °K]

T = Temperatura en condiciones estándares = 298.15 [°K]

entonces la ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$\frac{mg}{m^3} = \frac{ppm * PM}{24.45}$$

(3.6)

A continuación hay que corregir la concentración en $\frac{mg}{m^3}$ referido a las condiciones estándar antes mencionadas, P, T y 11% O₂.

La corrección de la concentración del contaminante gaseoso a una dilución constante del 11% de O₂¹⁷ se lo realiza mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{20,9 - 11}{20,9 - \% O_2 \text{ medido en la chimenea}} = \frac{9,9}{20,9 - \% O_2 \text{ medido en la chimenea}}$$

¹⁷ Porcentaje de oxígeno que no reacciona en la combustión.

(3.7)

Por consiguiente la concentración del gas contaminante en condiciones estándar es:

$$C = \frac{mg}{m^3} * \frac{P * T_m}{T * P_m} * f$$

(3.8)

donde:

C = Concentración del gas contaminante en condiciones estándar.

P = Presión atmosférica a condiciones estándares = 1 [atm]

T = Temperatura en condiciones estándares = 298.15 [°K]

P_m = Presión atmosférica medida en el sitio de monitoreo [atm].

T_m = Temperatura medida en el sitio de muestreo [°K].

f = Corrección de la concentración del contaminante gaseoso a una dilución constante del 11% de O₂.

P Lago Agrio (296 msnm) = 0.9707 [atm]

P Papallacta (3007.98 msnm) = 0.702 [atm]

3.3 PRUEBAS DE CAMPO DE EMISIONES GASEOSAS CONTAMINANTES

Las pruebas de campo se realizaron en seis de las siete unidades ALCO 251 F debido a que una de ellas se encontraba en mantenimiento. En las siguientes estaciones:

- **Estación de bombeo No. 1 Lago Agrio, motores de 16 cilindros con potencia de 2500 BHP a 1050 rpm.**
- **Estación de bombeo No. 5 Papallacta, motores de 18 cilindros con potencia de 2900 BHP a 1050 rpm.**

Los resultados se presentan según las normas vigentes para emisiones a la atmósfera provenientes de fuente fijas para actividades hidrocarburíferas.

Tablas 3.2 hasta 3.17, Anexo 4

Estación de Bombeo No. 1 - Lago Agrio
Identificación de instalaciones sujetas a monitoreo de emisiones gaseosas a la atmósfera.

Tabla 3.2: Identificación de instalaciones, Estación de Bombeo No. 1

Nombre de la empresa:	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Bloque No.:	Estación Lago Agrio No. 1
Punto de emisión:	Motores ALCO 251-F
Coordenadas (UTM):	18/291030 E* 0009182 N*
Coordenadas geográficas :	00°04'59" N* 76°32'39" O*
Descripción:	
Tipo de instalación (fuente de emisión):	Motores ALCO para bombeo de crudo
Tipo de combustible usado:	Crudo Combustible
Consumo de combustible:	2.5 B.P.H. por motor
Capacidad de la fuente:	2500 a 1050 rpm
Tiempo de funcionamiento de la fuente:	24 horas
Materiales a incinerar:	Ninguno
Altura de la fuente de emisión:	7 metros*
Volumen promedio de emisión:	3084.5 m³/ hora¹⁸
Dirección principal del viento:	---
Velocidad promedio del viento:	---

¹⁸ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Tabla 3.3: Reporte de resultados, Estación de Bombeo No. 1

Nombre de la Empresa:	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador						
Periodo / año:	Primer período año 2005						
Punto de Muestreo / Código Muestra	Fecha	MP (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	COV (mg/m ³)	HAP (mg/m ³)
ALCO No. 1 M1	14.02.05	---	<3	4275	1013	---	---
ALCO No. 1 M2	14.02.05	---	<3	4352	1011	---	---
ALCO No. 2 M1	14.02.05	---	<3	3326	870	---	---
ALCO No. 2 M2	14.02.05	---	<3	3587	916	---	---
ALCO No. 2 M3	20.06.05	---	<3	2912	647	---	---
ALCO No. 2 M4	20.06.05	---	<3	3013	711	---	---
ALCO No. 4 M1	14.02.05	---	<3	2837	739	---	---
ALCO No. 4 M2	14.02.05	---	<3	3254	790	---	---
ALCO No. 4 M3	20.06.05	---	<3	4681	936	---	---
ALCO No. 4 M4	20.06.05	---	<3	4615	942	---	---
ALCO No. 5 M1	14.02.05	---	<3	3061	823	---	---
ALCO No. 5 M2	20.06.05	---	<3	3644	683	---	---
ALCO No. 5 M3	20.06.05	---	<3	3745	743	---	---
ALCO No. 6 M1	14.02.05	---	<3	3468	842	---	---
ALCO No. 6 M2	14.02.05	---	<3	4002	909	---	---
ALCO No. 6 M3	20.06.05	---	<3	3507	689	---	---
ALCO No. 6 M4	20.06.05	---	<3	3565	716	---	---
ALCO No. 7 M1	14.02.05	---	<3	4065	997	---	---
ALCO No. 7 M2	14.02.05	---	<3	4500	1006	---	---

ALCO No. 7 M3	20.06.05	---	<3	4377	934	---	---
ALCO No. 7 M4	20.06.05	---	<3	4586	966	---	---
PROMEDIO	---	---	<3	3780	852	---	---

M1: Muestra 1

M2: Muestra 2

M3: Muestra 3

M4: Muestra 4

Reporte de Monitoreo de Emisiones

MOTOR ALCO 1:

**Tabla 3.4: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 1**

Reporte No.	1		
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador		
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 1		
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna		
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2500 BHP		
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	1918 BHP		
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible		
Horas de funcionamiento/ día	24		
Horómetro u horas totales de operación	14480		
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *		
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *		
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *		
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico
Volumen de muestreo		dsm ³	
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro

Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 ¹⁹	mm		
Temperatura chimenea	308,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	17 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,95	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	754	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1905,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	57.5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 *		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 2:

**Tabla 3.5: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 2**

Reporte No.	1		
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador		
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 2		
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna		
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/h	2500 BHP		
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	1926 BHP		
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible		
Horas de funcionamiento/ día	24		
Horómetro u horas totales de operación	11851		
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *		
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *		
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *		
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico
Volumen de muestreo		dsm ³	
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro

¹⁹ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	308,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 ²⁰	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	14	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	645	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1524	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	46	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 *		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 4:

**Tabla 3.6: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 4**

Reporte No.	1
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 4
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2500 BHP
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	1686 BHP
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible
Horas de funcionamiento/ día	24
Horómetro u horas totales de operación	16052
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 *
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2

²⁰ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	318,11	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 ²¹	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	13,05	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	555	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1335,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	40	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 *		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 5:

**Tabla 3.7: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 5**

Reporte No.	1
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 5
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2500 BHP
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	1895 BHP
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible
Horas de funcionamiento/ día	24
Horómetro u horas totales de operación	15344
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *

²¹ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *			
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 *			
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2			
Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	307,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 ²²	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,6	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	631	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1388	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	41	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 *		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 6:

**Tabla 3.8: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 6**

Reporte No.	1
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 6
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2500 BHP
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2053 BHP
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible

²² Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Horas de funcionamiento/ día	24			
Horómetro u horas totales de operación	2548			
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *			
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *			
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *			
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 *			
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2			
Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	314,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 ²³	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	13	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	626,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1658,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	49,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 *		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 7:

**Tabla 3.9: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 1 - Motor ALCO 7**

Reporte No.	1
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 7
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna

²³ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2500 BHP			
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	1645 BHP			
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible			
Horas de funcionamiento/ día	24			
Horómetro u horas totales de operación	5720			
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *			
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *			
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *			
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	2 v			
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2			
Velocidad promedio de los gases	6,0 *	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 ²⁴	mm		
Temperatura chimenea	301,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	733	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP		mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimetrico	+/- 2
O ₂	13,6	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	746	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	< 3	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1907,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	57,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.			Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	14/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

Estación de Bombeo No. 5 – Papallacta

²⁴ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Identificación de instalaciones sujetas a monitoreo de emisiones gaseosas a la atmósfera.

Tabla 3.10: Identificación de instalaciones, Estación de Bombeo No. 5

Nombre de la empresa:	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Bloque No.:	Estación Papallacta No. 5
Punto de emisión:	Motores ALCO 251-F
Coordenadas (UTM):	17/819922 E * 9958302 N *
Coordenadas geográficas :	00°22'36" S * 78°07'35" O *
Descripción:	
Tipo de instalación (fuente de emisión):	Motores ALCO para bombeo de crudo
Tipo de combustible usado:	Crudo Combustible
Consumo de combustible:	2.5 B.P.H. por motor
Capacidad de la fuente:	2900 a 1050 rpm
Tiempo de funcionamiento de la fuente:	24 horas
Materiales a incinerar:	Ninguno
Altura de la fuente de emisión:	7 metros *
Volumen promedio de emisión:	2376.9 m³/ hora ²⁵
Dirección principal del viento:	---
Velocidad promedio del viento:	---

²⁵ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Tabla 3.11: Reporte de resultados, Estación de Bombeo No. 5

Nombre de la Empresa:	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador						
Periodo / año:	Primer período año 2005						
Punto de Muestreo / Código Muestra	Fecha	MP (mg/m ³)	SO ₂ (mg/m ³)	NO _x (mg/m ³)	CO (mg/m ³)	COV (mg/m ³)	HAP (mg/m ³)
ALCO No. 1 M1	18.02.05	---	<3	3296	719	---	---
ALCO No. 1 M2	18.02.05	---	150	2812	616	---	---
ALCO No. 1 M3	18.06.05	---	<3	3047	682	---	---
ALCO No. 1 M4	18.06.05	---	<3	3079	787	---	---
ALCO No. 2 M1	18.02.05	---	<3	2652	678	---	---
ALCO No. 2 M2	18.02.05	---	328	2327	613	---	---
ALCO No. 2 M3	18.06.05	---	167	2611	719	---	---
ALCO No. 2 M4	18.06.05	---	206	2590	722	---	---
ALCO No. 4 M1	18.02.05	---	<3	3324	818	---	---
ALCO No. 4 M2	18.02.05	---	94	2929	698	---	---
ALCO No. 4 M3	18.06.05	---	102	3140	766	---	---
ALCO No. 4 M4	18.06.05	---	146	3211	830	---	---
ALCO No. 5 M1	18.02.05	---	0	3024	764	---	---
ALCO No. 5 M2	18.02.05	---	101	2807	635	---	---
ALCO No. 5 M3	18.06.05	---	<3	3474	793	---	---
ALCO No. 5 M4	18.06.05	---	<3	3501	840	---	---
ALCO No. 6 M1	18.02.05	---	176	2781	713	---	---
ALCO No. 6 M2	18.02.05	---	196	2502	593	---	---
ALCO No. 6 M3	18.06.05	---	158	3151	785	---	---
ALCO No. 6 M4	18.06.05	---	185	3045	763	---	---
ALCO No. 7 M1	18.02.05	---	175	2779	606	---	---
ALCO No. 7 M2	18.02.05	---	62	2622	521	---	---
PROMEDIO	---	---	102	2941	712	---	---

M1: Muestra 1

M2: Muestra 2

M3: Muestra 3

Reporte de Monitoreo de Emisiones

MOTOR ALCO 1:

**Tabla 3.12: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 1**

Reporte No.	1			
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador			
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 1			
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna			
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP			
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2699 BHP			
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible			
Horas de funcionamiento/ día	24			
Horómetro u horas totales de operación	5335			
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *			
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,4 *			
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *			
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *			
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2			
Velocidad promedio de los gases	5,1*	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	352,61	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	521	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,1	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	497,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	26	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1409	ppmv	Método Celda	+/-

			Electroquímica	5
NO ₂	42,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 ²⁶		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	18/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 2:

Tabla 3.13: Reporte de Resultados Codificado, Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 2

Reporte No.	1			
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador			
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 2			
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna			
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP			
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2647 BHP			
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible			
Horas de funcionamiento/ día	24			
Horómetro u horas totales de operación	11351			
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *			
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,43 *			
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *			
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *			
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2			
Velocidad promedio de los gases	5,1 *	m/s	Método Tubo Pitot	
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	355,8	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	521	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,15	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	524	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5

²⁶ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

SO ₂	63.5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1177	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	35,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 ²⁷		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	18/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 4:

**Tabla 3.14: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 4**

Reporte No.	1		
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador		
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 4		
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna		
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP		
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2787 BHP		
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible		
Horas de funcionamiento/ día	24		
Horómetro u horas totales de operación	10291		
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *		
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,4 *		
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *		
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	5,1 *	m/s	Método Tubo Pitot
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico
Volumen de muestreo		dsm ³	
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm	
Temperatura chimenea	367	°C	Método Termocupla
Presión barométrica	521	mmHg	
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg	

²⁷ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	11,95	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	593	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	16,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1472	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	44,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 ²⁸		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	18/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 5:

**Tabla 3.15: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 5**

Reporte No.	1		
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador		
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 5		
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna		
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP		
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2549 BHP		
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible		
Horas de funcionamiento/ día	24		
Horómetro u horas totales de operación	2938		
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *		
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,4 *		
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *		
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	5,3 *	m/s	Método Tubo Pitot
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico
Volumen de muestreo		dsm ³	
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm	

²⁸ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Temperatura chimenea	337,11	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	521	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,5	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	553	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	15,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1408	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	42	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 ²⁹		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	18/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 6:

**Tabla 3.16: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 6**

Reporte No.	1		
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador		
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 6		
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna		
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP		
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2656 BHP		
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible		
Horas de funcionamiento/ día	24		
Horómetro u horas totales de operación	10944		
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *		
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,4 *		
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *		
Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	5,4 *	m/s	Método Tubo Pitot

²⁹ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico	
Volumen de muestreo		dsm ³		
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro	
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 *	mm		
Temperatura chimenea	345,11	°C	Método Termocupla	
Presión barométrica	521	mmHg		
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg		
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg		
MP	16 *	mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico	+/- 2
O ₂	12,5	%vol	Método Celda Electroquímica	+/- 0.2
CO	514	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
SO ₂	56	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO	1064	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
NO ₂	31,5	ppmv	Método Celda Electroquímica	+/- 5
N.H.	2 ³⁰		Método Colorimétrico	+/- 1
COVs		ppmv		
HAPs		mg/dsm ³		
Fecha de muestreo	18/02/2005			
Razón social del laboratorio responsable				
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco			

MOTOR ALCO 7:

**Tabla 3.17: Reporte de Resultados Codificado,
Estación de Bombeo No. 5 - Motor ALCO 7**

Reporte No.	1
Razón social del sujeto de control	Gerencia de Oleoducto - Petroecuador
Código de la fuente de combustión	Motor ALCO 7
Tipo de fuente de combustión	Motor de Combustión Interna
Capacidad teórica, kW; BHP o gal. Combustible/ h	2900 BHP
Carga durante el monitoreo, kW; BHP o gal. Combustible / h	2760 BHP
Tipo de combustible utilizado	Crudo combustible
Horas de funcionamiento/ día	24
Horómetro u horas totales de operación	16621
Altura geométrica de la chimenea, m	7 *
Diámetro de chimenea a la altura de pórtico, m	0,4 *
Distancia (número de diámetros) entre la anterior perturbación y el puerto de muestreo	3 *

³⁰ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

Distancia (número de diámetros) entre el puerto de muestreo y la siguiente perturbación	3 *		
Número de puntos muestreados dentro de la chimenea	2		
Velocidad promedio de los gases	5,4 *	m/s	Método Tubo Pitot
Humedad del gas	0,5 *	%	Método Electroquímico
Volumen de muestreo		dsm ³	
Tiempo de muestreo por medición	5	min	Método Cronómetro
Diámetro interior de la boquilla de succión	0,5 ³¹	mm	
Temperatura chimenea	342,11	°C	Método Termocupla
Presión barométrica	521	mmHg	
Presión estática media al anterior de la chimenea		mmHg	
Presión dinámica media al anterior de la chimenea		mmHg	
MP		mg/dsm ³	Método Isocinético/ Gravimétrico
			+/- 2
O ₂	12,45	%vol	Método Celda Electroquímica
			+/- 0.2
CO	450	ppmv	Método Celda Electroquímica
			+/- 5
SO ₂	32	ppmv	Método Celda Electroquímica
			+/- 5
NO	1093,5	ppmv	Método Celda Electroquímica
			+/- 5
NO ₂	32,5	ppmv	Método Celda Electroquímica
			+/- 5
N.H.			Método Colorimétrico
			+/- 1
COVs		ppmv	
HAPs		mg/dsm ³	
Fecha de muestreo	18/02/2005		
Razón social del laboratorio responsable			
Firma de responsabilidad	Christian Collantes - Juan Carlos Pacheco		

El equipo presenta y permite calcular los siguientes valores:

Estación de Bombeo No. 1 – Lago Agrio

Tabla 3.18: Reporte de resultados, promedio, Estación de Bombeo No. 1

Punto de Muestreo / Código Muestra	CO ₂	O ₂	T AMB.	T GAS	Exceso de Aire [λ]	Pérdidas	Eficiencia [Eta]
	(%)	(%)	(F)	(F)		[qa]	

³¹ Datos tomados del informe presentado por la FIGEMPA - 31/10/2004

ALCO No. 1 M1	6.1	13.2	105.6	589.3	2.71	41.6	58.4
ALCO No. 1 M2	6.5	12.7	113.4	585.7	2.55	38.4	61.6
ALCO No. 2 M1	5.7	13.7	110.7	585.7	2.9	43.3	56.7
ALCO No. 2 M2	5.3	14.3	96.6	589.3	3.17	48.6	51.4
ALCO No. 2 M3	6.3	13	89.2	607.2	2.65	43.5	56.5
ALCO No. 2 M4	6.4	12.8	88.8	607.2	2.58	42.6	57.4
ALCO No. 4 M1	6.6	12.6	108	596.5	2.52	39.3	60.7
ALCO No. 4 M2	5.9	13.5	105.3	612.7	2.82	45.2	54.8
ALCO No. 4 M3	5.7	13.7	88.7	607.3	2.9	47.3	52.7
ALCO No. 4 M4	5.7	13.7	88.3	605.5	2.9	47.2	52.8
ALCO No. 5 M1	6.6	12.6	111.7	600.1	2.52	39.3	60.7
ALCO No. 5 M2	5.7	13.7	89.1	576.7	2.9	44.5	55.5
ALCO No. 5 M3	5.7	13.8	88.3	576.7	2.94	45.1	54.9
ALCO No. 6 M1	6.8	12.4	100.6	600.1	2.46	39.3	60.7
ALCO No. 6 M2	5.8	13.6	107.6	605.5	2.86	44.9	55.1
ALCO No. 6 M3	5.9	13.5	84.6	591.1	2.82	45.1	54.9
ALCO No. 6 M4	6	13.4	86.7	592.9	2.79	44.5	55.5
ALCO No. 7 M1	6.2	13.1	99.3	576.7	2.68	40.6	59.4
ALCO No. 7 M2	5.4	14.1	93	573.1	3.07	46.1	53.9
ALCO No. 7 M3	5.6	13.9	85.5	603.7	2.99	48.5	51.5
ALCO No. 7 M4	5.7	13.8	85.8	605.5	2.94	48.0	52.0
Promedio	6.0	13.4	96.5	594.7	2.79	43.9	56.1

M1: Muestra 1

M2: Muestra 2

M3: Muestra 3

M4: Muestra 4

Estación de Bombeo No. 5 – Papallacta

**Tabla 3.19: Reporte de resultados, promedio,
Estación de Bombeo No. 5**

Punto de Muestreo / Código Muestra	CO2	O2	T AMB.	T GAS	Exceso de Aire	Pérdidas	Eficiencia
	(%)	(%)	(F)	(F)	[λ]	[qa] (%)	[Eta] (%)
ALCO No. 1 M1	6.6	12.6	69.1	658.6	2.52	47.41	52.59
ALCO No. 1 M2	7.4	11.6	87.3	674.8	2.25	42.79	57.21
ALCO No. 1 M3	6.8	12.4	75.6	680.9	2.46	47.68	52.32
ALCO No. 1 M4	6.9	12.2	73.6	682.7	2.4	47.01	52.99
ALCO No. 2 M1	6.5	12.7	71.1	667.6	2.55	48.49	51.51
ALCO No. 2 M2	7.4	11.6	92.8	677.3	2.25	42.57	57.43
ALCO No. 2 M3	7.3	11.7	80.6	709.7	2.27	46.25	53.75
ALCO No. 2 M4	7.4	11.6	80.2	711.5	2.25	45.98	54.02
ALCO No. 4 M1	6.8	12.3	80.4	689.9	2.43	47.52	52.48
ALCO No. 4 M2	7.4	11.6	90	695.3	2.25	44.08	55.92
ALCO No. 4 M3	6.9	12.2	87.4	709.7	2.4	48.03	51.97
ALCO No. 4 M4	7	12.1	84.6	709.7	2.38	47.77	52.23
ALCO No. 5 M1	6.4	12.8	78.6	636.1	2.58	45.81	54.19
ALCO No. 5 M2	6.9	12.2	92.3	641.5	2.4	42.39	57.61
ALCO No. 5 M3	5.9	13.5	78.3	610.9	2.82	47.40	52.60
ALCO No. 5 M4	5.9	13.5	81.5	612.7	2.82	47.28	52.72
ALCO No. 6 M1	6.7	12.5	91.8	651.4	2.49	44.54	55.46
ALCO No. 6 M2	6.7	12.5	93.2	655	2.49	44.71	55.29
ALCO No. 6 M3	6.2	13.1	81.1	665.8	2.68	49.67	50.33
ALCO No. 6 M4	6	13.3	86.7	664	2.75	50.18	49.82
ALCO No. 7 M1	6.8	12.3	89.1	642.4	2.43	43.14	56.86
ALCO No. 7 M2	6.6	12.6	84	653.2	2.53	45.78	54.22
Promedio	6.75	12.40	83.15	668.21	2.47	46.20	53.80

- M1: Muestra 1
- M2: Muestra 2
- M3: Muestra 3
- M4: Muestra 4

3.4 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En Gerencia de Oleoducto en la estación de bombeo No. 1 - Lago Agrio existe un monitoreo previo de las emisiones a la atmósfera realizado en el mes de febrero del 2004 por la FIGEMPA (Facultad de Ingeniería en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental de la Universidad Central del Ecuador) cuyos resultados se presentan junto con los obtenidos en el monitoreo actual en las siguientes tablas:

Estación de Bombeo No. 1 – Lago Agrio

Tabla 3.20: Reporte de resultados – ALCO 1

ALCO 1

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	17	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	205	1012	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	4386	4313	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	< 3	< 3	1900	SI

Tabla 3.21: Reporte de resultados – ALCO 2

ALCO 2

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	279	786	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3100	3209	1900	NO

Óxido de Azufre (SO ₂)	12	< 3	1900	SI
------------------------------------	----	-----	------	----

Tabla 3.22: Reporte de resultados – ALCO 4

ALCO 4

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	187	851	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3050	3846	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	< 3	< 3	1900	SI

Tabla 3.23: Reporte de resultados – ALCO 5

ALCO 5

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	207	749	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3021	3483	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	10	< 3	1900	SI

Tabla 3.24: Reporte de resultados – ALCO 6

ALCO 6

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	150	788	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3496	3635	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	< 3	< 3	1900	SI

Tabla 3.25: Reporte de resultados – ALCO 7

ALCO 7

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	---	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	---	975	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	---	4382	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	---	< 3	1900	SI

Estación de Bombeo No. 5 – Papallacta**Tabla 3.26: Reporte de resultados – ALCO 1****ALCO 1**

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	293	701	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3166	3059	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	119	75	1900	SI

Tabla 3.27: Reporte de resultados – ALCO 2**ALCO 2**

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	290	683	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	2847	2545	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	259	164	1900	SI

Tabla 3.28: Reporte de resultados – ALCO 4**ALCO 4**

Contaminante	FIGEMPA	MONITOREO	Límites	Cumple
--------------	---------	-----------	---------	--------

(mg/dsm ³)		TELEDYNE	Permisibles	Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	272	778	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3136	3151	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	387	47	1900	SI

Tabla 3.29: Reporte de resultados – ALCO 5

ALCO 5

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	202	758	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3165	3202	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	270	44	1900	SI

Tabla 3.30: Reporte de resultados – ALCO 6

ALCO 6

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	213	714	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	2873	2870	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	442	157	1900	SI

Tabla 3.31: Reporte de resultados – ALCO 7

ALCO 7

Contaminante (mg/dsm ³)	FIGEMPA	MONITOREO TELEDYNE	Límites Permisibles	Cumple Norma
Material Particulado (MP)	16	---	150	SI
Óxido de carbono (CO)	274	563	500	NO
Óxidos de Nitrógeno (NOx)	3132	2700	1900	NO
Óxido de Azufre (SO ₂)	411	118	1900	SI

Como se observa en las tablas anteriores los resultados del monitoreo tienen valores diferentes de Monóxido de Carbono (CO), por lo que se procedió a realizar un monitoreo comparativo entre el equipo Analizador de Gases PEM 9002, propiedad de Petroecuador, y el Analizador IMR 1400 propiedad de Petroproducción y los resultados que se obtuvieron son similares a los de la FIGEMPA, Anexo 5

Se realizó un nuevo monitoreo conjunto de comprobación con el equipo de la FIGEMPA en las estaciones de Lago Agrio y Papallacta, y se exigió la presentación del certificado de calibración, los resultados son similares al primer monitoreo, como se puede observar en el Anexo 6.

De acuerdo con el monitoreo realizado se llega a la conclusión que el equipo Analizador de Gases PEM 9002, propiedad de Petroecuador, se encuentra descalibrado y necesita el reemplazo o calibración de la celda electroquímica de monóxido de carbono (CO).

CAPITULO IV

DESARROLLO DE UN SOFTWARE PARA CUANTIFICAR LA EFICIENCIA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

4.1 PROCESO DE COMBUSTIÓN EN MOTORES ALCO 251 – F

4.1.1 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES

Los motores ALCO modelo 251 – F que funcionan en las estaciones de bombeo del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, SOTE, son motores en “V” de 12, 16 y 18 cilindros con la potencia nominal indicada en la Tabla 1.2.

Son motores de 4 tiempos, con turbina sobrealimentadora, con cámara de combustión abierta y un sistema de inyección de carburante. El regulador de

control de estos motores es de tipo electro-hidráulico, la base del motor es de acero. Una bomba de engranes suministra la presión para la lubricación de todas las piezas y para la refrigeración se utiliza agua con circulación forzada, por medio de una bomba centrífuga accionada por el motor, en la Tabla 4.1 se puede observar algunos datos generales de los motores ALCO.

Tabla 4.1: Datos Generales del Motor

Diámetro y Recorrido	228.6 x 266.7 mm	228.6 x 266.7 mm	228.6 x 266.7 mm	228.6 x 266.7 mm
No. de Cilindros	8	12	16	18
Desplazamiento en litros	87.5	131.25	175	196.85
Coeficiente de Compresión				
Cabeza Cóncava	---	12.5 a 1	12.5 a 1	---
Cabeza Plana	11.5 a 1	---	11.5 a 1	11.5 a 1
No. de Válvulas por Cilindro				
Admisión	2	2	2	2
Escape	2	2	2	2
No. de cojinetes principales	5	7	9	10

Fuente: Manual de Mantenimiento Motores "ALCO"

Presión Media Indicada, (IMEP). Es la presión medida en el cabezote del motor, para poder determinarla se utilizó un compresómetro como se muestra en la Figura 4.1 y Anexo 7

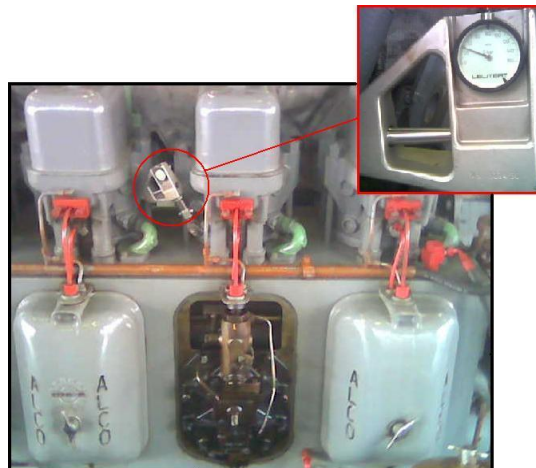


Figura 4.1: Medición de Presión Media Indicada

La medición muestra que la presión media indicada en los motores ALCO es igual a 28 [bar] sin combustible, 58 [bar] con combustible en ralentí y 110 [bar] con carga.

IMEP= 406 [psig] → 420.7 [psia] → Sin Combustible
 IMEP= 841 [psig] → 855.7 [psia] → Con Combustible en Ralentí
 IMEP=1595 [psig] → 1609.7 [psia] → Con Carga.

4.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE

Los motores ALCO son diseñados para funcionar con combustible diesel pero en la actualidad funcionan con crudo combustible de 32 y 28 °API, de viscosidades 18 y 22 cSt, respectivamente, a temperatura ambiente.

Al combustible se lo somete a un proceso de centrifugación para eliminar los residuos de agua y sedimentos, posteriormente es calentado y luego se alimenta al sistema de inyección de combustible en los motores.

El petróleo es una sustancia aceitosa de color oscuro a la que, por sus compuestos de hidrógeno y carbono, se le denomina hidrocarburo.

La composición elemental del petróleo normalmente está comprendida dentro de los siguientes intervalos, como se observa en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2: Composición del Petróleo

Elementos	Peso
Carbón	84 – 87 %
Hidrógeno	11 – 14 %
Azufre	0 – 2 %
Nitrógeno	0.2 %

Fuente: <http://www.pignc-isp.com/forums/oilgas/messages/721.html>

Para la caracterización del combustible, se tomó una muestra de crudo combustible, después del proceso de centrifugación y calentamiento, se la

analizó en el Laboratorio de Lubricantes de Oleoducto - Petroecuador y los resultados que se obtuvieron, son mostrados en la Tabla 4.3 y el Anexo 8.

Tabla 4.3: Caracterización del Crudo Combustible

Ensayo	Muestra
Gravedad API @ 60°F	31.4
Gravedad Especifica @ 60°F	0.8686
Agua, % Vol.	0.025
Sedimentos, % Vol.	0.014
B.S.W., % Vol. (Agua + Sedimentos)	0.039
Punto de Escurrimiento	<-15
Residuo de carbón, % Peso	4.73
Azufre, % Peso	0.61
Viscosidad	
Viscosidad @ 80°F, cSt	11.59
Viscosidad @ 100°F, cSt	8.44
Viscosidad @ 120°F, cSt	6.40
Viscosidad @ 140°F, cSt	5.02

Mediante una relación matemática basada en análisis estadísticos, se determina el contenido de carbón presente en una muestra de petróleo de la siguiente manera:

$$\text{Porcentaje de carbón peso} = 76.99 + (10.19 \times \text{gravedad específica}) - (0.76 \times \text{contenido de azufre})^{32} \quad (4.1)$$

$$\text{Porcentaje de hidrógeno} = 26 - 15 \times \text{gravedad específica @ 60 °F} \quad (4.2)$$

por lo tanto:

$$\text{azufre [% peso]} = 0.61 \quad (4.3)$$

$$\text{carbón [% peso]} = 76.99 + (10.19 \times 0.8686) - (0.76 \times 0.61)$$

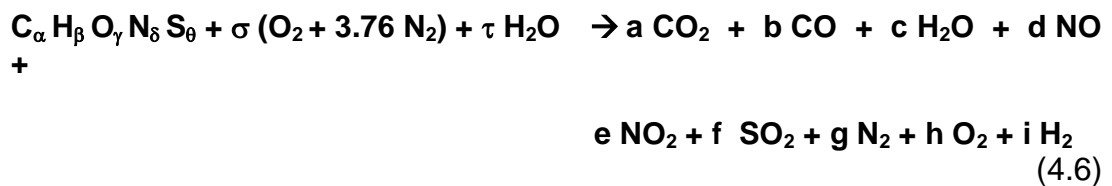
³² Ayala Cueva, Galo Ing. “Combustión y Combustibles para Motores Industriales”, 2004
 “Emissions of Greenhouse Gases in U.S.A”, noviembre 1994

$$\text{carbón [\% peso]} = 85.377 \quad (4.4)$$

$$\begin{aligned} \text{hidrógeno [\% peso]} &= 26 - 15 \times 0.8686 \\ \text{hidrógeno [\% peso]} &= 12.971 \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.1.3 REACCIÓN DE COMBUSTIÓN EN LOS MOTORES ALCO

La reacción de combustión para los motores ALCO se la representa de la siguiente manera:



donde:

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \theta, \sigma, \tau \rightarrow$ Representan las moles de los reactantes, y
 $a, b, c, d, e, f, g, h, i \rightarrow$ Representan las moles de los productos.

Para solucionar este tipo de reacciones, como se indicó en el Capítulo II, es necesario incluir la *dísociación* de los compuestos, la que toma en cuenta el rompimiento de las moléculas en sus constituyentes básicos, producto de las altas temperaturas de combustión.³³

Y se establecen los siguientes balances de masa relaciones a partir de la reacción de combustión (4.6):

$$C: \alpha = a + b \quad (4.7)$$

$$H: \beta + 2\tau = 2c + 2i \quad (4.8)$$

$$O: \gamma + 2\sigma + \tau = 2a + b + c + d + 2e + 2f + 2h \quad (4.9)$$

³³ HABERMAN, Termodinámica con Transferencia de Calor

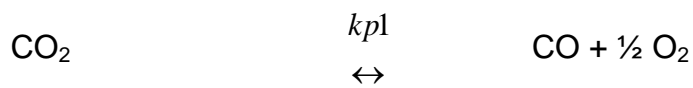
$$N: \delta + 7.52\sigma = d + e + 2g$$

(4.10)

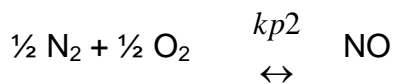
$$S: \theta = f$$

(4.11)

Es necesario añadir cuatro ecuaciones para poder solucionar el problema. Ya que se tiene nueve incógnitas y por lo tanto se necesita nueve ecuaciones, las ecuaciones adicionales se las obtiene a través de las constantes de equilibrio K_p con las siguientes reacciones:



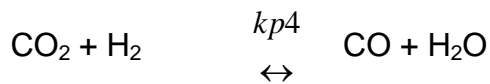
(4.12)



(4.13)



(4.14)



(4.15)

De la reacción (4.12) se obtiene:

$$kp_1 = \frac{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{O}_2}^{1/2}}{p_{\text{CO}_2}}$$

$$kp_1 = \frac{\left(\frac{b}{a+b+c+d+e+f+g+h+i} \right) \cdot pe^* \left(\frac{h}{a+b+c+d+e+f+g+h+i} \right)^{1/2} \cdot \sqrt{pe}}{\left(\frac{a}{a+b+c+d+e+f+g+h+i} \right) \cdot pe}$$

$$kp_1 = \frac{b\sqrt{h.pe}}{a\sqrt{a+b+c+d+e+f+g+h+i}} \quad (4.16)$$

De la reacción (4.13) se obtiene:

$$kp_2 = \frac{pNO}{pN_2^{1/2} * pO_2^{1/2}}$$

$$kp_2 = \frac{\left(\frac{d}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe}{\left(\frac{g}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right)^{1/2} \cdot \sqrt{pe} * \left(\frac{h}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right)^{1/2} \cdot \sqrt{pe}}$$

$$kp_2 = \frac{d}{\sqrt{g.h}} \quad (4.17)$$

De la reacción (4.14) se obtiene:

$$kp_3 = \frac{pNO_2}{pO_2 * pN_2^{1/2}}$$

$$kp_3 = \frac{\left(\frac{e}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe}{\left(\frac{h}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe * \left(\frac{g}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right)^{1/2} \cdot \sqrt{pe}}$$

$$kp_3 = \frac{e\sqrt{a+b+c+d+e+f+g+h+i}}{h\sqrt{g.pe}} \quad (4.18)$$

De la reacción (4.15) se obtiene:

$$kp_4 = \frac{pCO * pH_2O}{pCO_2 * pH_2}$$

$$kp_4 = \frac{\left(\frac{b}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe * \left(\frac{c}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe}{\left(\frac{a}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe * \left(\frac{i}{a+b+c+d+e+f+g+h+i}\right).pe}$$

$$kp_4 = \frac{b.c}{a.i} \quad (4.19)$$

Donde kp es la constante de equilibrio en función de la temperatura, Anexo 1

De esta manera se obtiene un sistema de 9 ecuaciones con 9 incógnitas como se presenta a continuación, (ecuaciones 4.7 a 4.11 y 4.16.a 4.19):

$$\alpha = a + b$$

$$\beta + 2\tau = 2c + 2i$$

$$\gamma + 2\sigma + \tau = 2a + b + c + d + 2e + 2f + 2h$$

$$\delta + 7.52\sigma = d + e + 2g$$

$$\theta = f$$

$$kp_1 = \frac{b\sqrt{h.pe}}{a\sqrt{a+b+c+d+e+f+g+h+i}}$$

$$kp_2 = \frac{d}{\sqrt{g.h}}$$

$$kp_3 = \frac{e\sqrt{a+b+c+d+e+f+g+h+i}}{h\sqrt{g.pe}}$$

$$kp_4 = \frac{b.c}{a.i}$$

(4.20)

4.2 SOFTWARE PARA CUANTIFICAR LA EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN

4.2.1 DESARROLLO DEL SOFTWARE

El software se lo elaboró en Microsoft® Visual Basic y se presenta en Microsoft® Office EXCEL, este consta de 2 secciones:

- Primera Sección:

Presenta los productos de la reacción de combustión para los motores ALCO 251-F en función del tipo de combustible, cantidad de aire, presión y temperatura de funcionamiento, para poder comparar estos resultados con los del monitoreo de emisiones gaseosas contaminantes³⁴.

- Segunda Sección:

Calcula parámetros de funcionamiento del motor en función de las características técnicas del mismo.

4.2.1.1 Programación

En la primera sección se necesita resolver el sistema de ecuaciones planteado (4.20), para esto se utiliza la función *Solver* dentro de un módulo de Microsoft® Visual Basic, que permite realizar iteraciones para resolver sistemas de ecuaciones homogéneas. Para usar esta función, se debe establecer una referencia al complemento Solver dentro del mismo módulo.

Es preciso crear una hoja de cálculo en Microsoft® EXCEL con las incógnitas y las ecuaciones necesarias como se muestra en la Figura 4.2.

³⁴ Capitulo III

	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO
3							
4		Sistema de Ecuaciones					
5		$C_a H_b O_c N_d S_e + \alpha (O_2 + 3.76 N_2) + \tau H_2O \longrightarrow a CO_2 + b CO + c H_2O + d NO + e NO_2$					
6		$+ f SO_2 + g N_2 + h O_2 + i H_2$					
7		a =					
8		b =					
9		c =					
10		d =					
11		e =					
12		f =					
13		g =					
14		h =					
15		i =					
16							
17		ec1 :		$\alpha = a + b$			
18		ec2 :		$\beta + 2\tau = 2c + 2i$			
19		ec3 :		$\gamma + 2\sigma + \tau = 2a + b + c + d + 2e + 2f + 2h$			
20		ec4 :		$\delta + 7.52 \sigma = d + e + 2g$			
21		ec5 :		$\theta = f$			
22		ec6 :		$kp_1 = \frac{b \sqrt{h \cdot p \cdot e}}{a \sqrt{a + b + c + d + e + f + g + h + i}}$			
23							
24							
25		ec7 :		$kp_2 = \frac{d}{\sqrt{g \cdot h}}$			
26							
27							
28		ec8 :		$kp_3 = \frac{e \sqrt{a + b + c + d + e + f + g + h + i}}{h \sqrt{g \cdot p \cdot e}}$			
29							
30							
31		ec9 :		$kp_4 = \frac{b \cdot c}{a \cdot i}$			
32							
33							
34		SUMA :					
35							

Figura 4.2 Hoja de Cálculo en Microsoft® EXCEL

La función *Solver* resuelve el sistema de ecuaciones en función de una sola celda denominada “Celda Objetivo”, esta celda debe depender de todas las ecuaciones del sistema, una forma sencilla para esto es sumar todas las ecuaciones, en la Figura 4.2 se puede observar en la celda “BK34”.

Es necesario ingresar un valor inicial para cada una de las incógnitas, para que a partir de este se hagan las interacciones deseadas, la función *Solver* dependiendo del valor inicial y de las restricciones proporcionadas (Sistema de Ecuaciones 4.20), entrega diferentes resultados, para encontrar el valor inicial correcto se utilizó las funciones *If* y *For* mediante las siguientes sintaxis:

- **If condición Then**
 [declaraciones]
Else
 [declaraciones]
End If

- **For** *contador = inicio To fin [Step intervalos]*
[declaraciones]
Exit For
[declaraciones]
Next *[contador]*

Además de la función *Solver* que requiere de una sintaxis especial para poder programar dentro de Microsoft® Visual Basic, como se muestra en la Tabla 4.4, a continuación:

Tabla 4.4: Sintaxis para Funciones de SOLVER

Función	Sintaxis
Activar Hoja de Cálculo	<i>Worksheets("Nombre de Hoja de Cálculo").Activate</i>
Declarar Variables	<i>Dim Nombre de Variable As Tipo de Variable</i>
Restablecer Función Solver	<i>SolverReset</i>
Establecer la precisión	<i>SolverOptions Precision:= Precisión</i>
Llamar a la función Solver	<i>SolverOK</i>

Tabla 4.4: Sintaxis para Funciones de SOLVER (Continuación)

Especificar Parámetros de Solver:							
Hacer referencia a una celda que corresponde a la "celda objetivo".	<i>SetCell</i>						
Opciones de valor de la celda objetivo.	MaxMinVal: <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>MaxMin Val</th> <th>Especifica</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>Maximizar</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>Minimizar</td> </tr> </tbody> </table>	MaxMin Val	Especifica	1	Maximizar	2	Minimizar
MaxMin Val	Especifica						
1	Maximizar						
2	Minimizar						

		3	Coincidencia con un valor específico								
Celda o rango de celdas que se cambiarán con el fin de obtener el resultado deseado en la celda objetivo.	ByChange										
Agregar restricciones	SolverAdd										
Especificar Restricciones:											
Hacer referencia a una celda o a un rango de celdas que constituye el lado izquierdo de una restricción.	CellRef										
Establecer relación aritmética entre los lados izquierdo y derecho de la restricción.	Relation: <table border="1" data-bbox="833 943 1342 1133"> <thead> <tr> <th>Relación</th> <th>Relación Aritmética</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td><=</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>=</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>>=</td> </tr> </tbody> </table>			Relación	Relación Aritmética	1	<=	2	=	3	>=
Relación	Relación Aritmética										
1	<=										
2	=										
3	>=										
Hacer referencia a el lado derecho de la restricción.	FormulaText										
Iniciar ejecución de Solver para buscar soluciones	SolverSolve										

Las variables de las ecuaciones 4.7 a la 4.11 necesitan ser igualadas a los coeficientes α , β , γ , δ , θ , σ , τ , que son proporcionadas por el usuario al momento de ingresar la composición del combustible, como se puede observar en la Figura 4.4 más adelante.

Mientras que las variables de las ecuaciones 4.16 a la 4.19 necesitan ser igualadas a las constantes de equilibrio K_{p1} , K_{p2} , K_{p3} , K_{p4} . que están en

función de la temperatura, esto se lo realizó a través de una tabla que encuentra estas constantes requeridas para el sistema ingresando la temperatura, la tabla realiza una interpolación si el valor de temperatura no coincide con el dato proporcionado en tablas, Figura 4.3.

Microsoft Excel													
	AV	AW	AX	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH
1													
2													
3	Constantes de Equilibrio (ln kp) para Diferentes Reacciones												
4													
5													
6	T [°C]	ln kp 1	ln kp 2	log kp 3	ln kp 4	T [°C]	1	2	Log Kp 3		4		
7	382	-50,9472	-18,09843	-5,89177	-4,09896	25	CO ₂ ↔ CO + ½ O ₂	½ N ₂ + ½ O ₂ ↔ NO	O ₂ + ½ N ₂ ↔ NO ₂	CO ₂ + H ₂ ↔ CO + H ₂ O			
8		0	0	0	0	500	-103,768	-34,933	327	-6,111	-11,554		
9		0	0	0	0	1000	-33,532	-12,548	427	-5,714	-1,641		
10		0	0	0	0	1500	-16,259	-7,021	527	-5,417	0,496		
11		0	0	0	0	2000	-8,787	-4,61	627	-5,185	1,301		
12		0	0	0	0	2500	-4,639	-3,259	727	-5	1,693		
13		0	0	0	0	3000	-2,015	-2,398	827	-4,848	1,909		
14		0	0	0	0	3500	-0,206	-1,802	927	-4,721	2,039		
15		0	0	0	0	4000	1,109	-1,367	1027	-4,612	2,117		
16		0	0	0	0	4500	2,108	-1,038	1127	-4,519	2,165		
17		0	0	0	0	5000	2,892	-0,78	1227	-4,438	2,193		
18		0	0	0	0	5500	3,518	-0,574	1327	-4,367	2,206		
19		0	0	0	0	6000	4,034	-0,404	1427	-4,304	2,21		
20							4,485	-0,272	1527	-4,248	2,21		
21		kp 1	kp 2	0	kp 4				1627	-4,198			
22		7,48E-23	1,38E-08	0	0,01659				1727	-4,152			
23				0					1827	-4,111			
24				0					1927	-4,074			
25				0					2027	-4,04			
26				0					2127	-4,008			
27				0					2227	-3,979			
28				0					2327	-3,953			
29				0					2427	-3,928			
30				0					2527	-3,905			
31				0					2627	-3,884			
32				0					2727	-3,864			
33				0					2827	-3,846			
34				0					2927	-3,828			
35				0					3027	-3,812			
36				0					3127	-3,797			
37				0					3227	-3,783			
38				0					3327	-3,77			
39				0					3427	-3,757			
40				0					3527	-3,746			
41				0					3627	-3,734			
42				0					3727	-3,724			
43				0					0	-6,802			
44				kp 3					T [°C]				
45				1,28E-06									

Figura 4.3 Constantes de Equilibrio

En el Anexo 9 se presenta el lenguaje estructurado utilizado para la programación.

4.2.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.2.2.1 Primera Sección: Productos de Reacción de Combustión

El ingreso de datos y los productos de la combustión se presentan mediante un cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 4.4 a continuación:

REACCIÓN DE COMBUSTIÓN

Caracterización Crudo Combustible SOTE
 Ingresar % en Peso
 Ingresar # moles

Exceso de Aire = [%]
Humedad del Aire = [%]
T° de Combustión = [°F]
Presión Total de la Mezcla = [psia]

C: 85.38 % peso ↔ 0.071 moles
H: 12.97 % peso ↔ 0.13 moles
O: 0 % peso ↔ 0 moles
N: 0 % peso ↔ 0 moles
S: 0.61 % peso ↔ 2E-04 moles

Combustible					Aire	Humedad	
C	H	O	N	S	+ 0.103766 (O ₂ + 3.76 N ₂)	+ 0 H ₂ O	→
0.07115	0.1297	0	0	0.00019			

1 CO₂ + 1 CO + 1 H₂O + 1 NO + 1 NO₂ + 1 SO₂ + 1 N₂ + 1 O₂ + 1 H₂

Eficiencia de Combustión, η_c : → 0 %

Figura 4.4: Cuadro de Diálogo

En la hoja de cálculo se ingresan valores de:

- Exceso de Aire, [%]
- Humedad del Aire, [%]
- Temperatura de Combustión, [°C] o [°F]
- Presión Total de la Mezcla, [atm] o [psi] (Presión Media Indicada)

además del número de moles de los elementos del combustible, para esto se puede seleccionar entre tres opciones como se muestra en la Figura 4.5, la primera opción es la Caracterización del Crudo Combustible que se utiliza en el SOTE, que se obtuvo a partir del ensayo de laboratorio (Tabla 4.3 y Anexo 8) y las ecuaciones (4.3, 4.4, 4.5), la segunda se usa para ingresar el porcentaje en peso y la tercera para ingresar el número de moles.

Caracterización Crudo Combustible SOTE
 Ingresar % en Peso
 Ingresar # moles

Caracterización Crudo Combustible SOTE

C: 85.38 % peso ↔ 0.071 moles
H: 12.97 % peso ↔ 0.13 moles
O: 0 % peso ↔ 0 moles
N: 0 % peso ↔ 0 moles
S: 0.61 % peso ↔ 2E-04 moles

Ingresar % en Peso

C: % peso ↔ 0 moles
H: % peso ↔ 0 moles
O: % peso ↔ 0 moles
N: % peso ↔ 0 moles
S: % peso ↔ 0 moles

Ingresar # moles

C: 0 % peso ↔ moles
H: 0 % peso ↔ moles
O: 0 % peso ↔ moles
N: 0 % peso ↔ moles
S: 0 % peso ↔ moles

Figura 4.5: Datos del Combustible

Una vez ingresados los datos se hace clic en el botón para poder resolver la reacción de combustión.

El software permite comparar estos resultados con los obtenidos en el monitoreo realizado previamente con el analizador de gases haciendo clic en el botón , si se desea ingresar nuevos resultados de otro monitoreo realizado se hace clic en el botón y se despliega el siguiente cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 4.6.

Resultados del Analizador de Gases

Ingresar valores de:

O ₂	<input type="text"/>	[%]
CO ₂	<input type="text"/>	[%]
CO	<input type="text"/>	[mg/m3] - diluido al 11% de O2 (Informe) ▼
NO	<input type="text"/>	[ppm] - diluido al 11% de O2 ▼
NO ₂	<input type="text"/>	[ppm] - diluido al 11% de O2 ▼
SO ₂	<input type="text"/>	[mg/m3] - sin diluir (Analizador) ▼

Figura 4.6: Cuadro de Diálogo para Ingresar Resultados de Monitoreo

Las unidades de CO, NO, NO₂ y SO₂ pueden estar en diferentes unidades dependiendo del equipo utilizado, Figura 4.7, como se explicó en el Capítulo III.

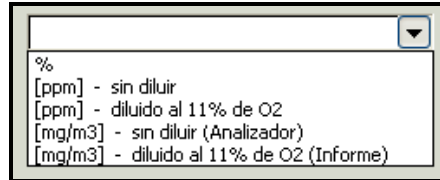


Figura 4.7: Selección de Unidades

El programa permite realizar análisis de otro tipo de reacciones para fines didácticos haciendo clic en el botón **Seleccionar Productos Deseados** y se despliega otro cuadro de diálogo como se muestra en la Figura 4.8.

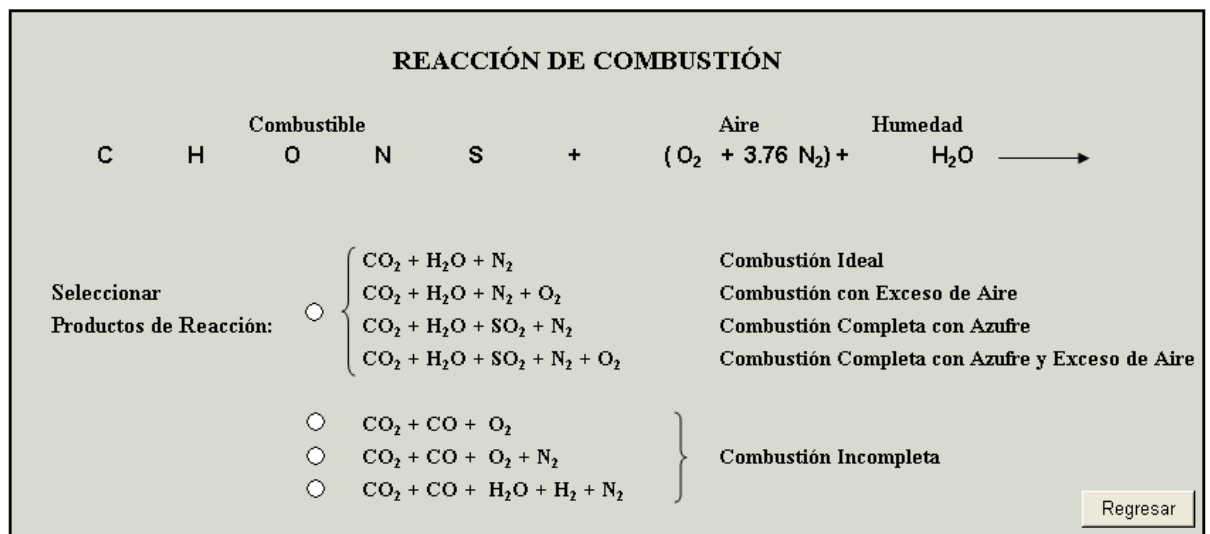


Figura 4.8 Selección de Productos de Reacción de Combustión

4.2.2.2 Segunda Sección: Parámetros de Funcionamiento del Motor.

Para ingresar a la segunda parte del programa es necesario hacer clic en el botón **Más Cálculos** y se despliega un nuevo cuadro de diálogo que

contiene una sección para el ingreso de datos y otra con los resultados, como se muestra en la Figura 4.9, los datos que se ingresan son:

- Número de cilindros, n
- Potencia Nominal, P_f , [bhp]
- Diámetro Pistón, D , [mm]
- Carrera Pistón, L , [mm]
- Relación de Compresión, rc .
- Velocidad, N , [rpm]
- T° al Inicio de Compresión, T_1 , [$^\circ F$]
- P al Inicio de Compresión, P_1 , [psi] o [atm]
- Presión Media Indicada, IMPE, [psi]
- Grado API o Poder Calórico del Combustible.

DATOS DEL MOTOR

Ingresar Datos o Seleccionar Estación de Bombeo: ESTACIÓN →

<p>Número de cilindros, n: <input type="text"/></p> <p>Potencia Nominal, P_f: <input type="text"/> [bhp]</p> <p>Diámetro Pistón, D: <input type="text"/> [mm]</p> <p>Carrera Pistón, L: <input type="text"/> [mm]</p> <p>Relación de Compresión, rc: <input type="text"/> a 1</p> <p>Velocidad, N: <input type="text"/> [rpm]</p> <p>T° de entrada de Aire, T_1: <input type="text"/> [$^\circ R$]</p> <p>P de entrada de Aire, P_1: <input type="text"/> [psi] <input type="text"/></p> <p>Presión Media Indicada, IMPE: <input type="text"/> [psi]</p>	<p>COMBUSTIBLE:</p> <p>Dato que desee ingresar: <input type="text"/> Grado API <input type="text"/></p> <p>Grado API: <input type="text"/></p> <p>Poder Calórico, HHV: <input type="text"/></p> <p>AIRE: <input type="button" value="Cambiar valores de Cp y Cv"/> <input type="button" value="Restaurar Valores"/></p> <p>Cp: 0.240 [BTU/lb$^\circ R$]</p> <p>Cv: 0.171 [BTU/lb$^\circ R$]</p> <p>γ: 1.404</p>
--	---

CUADRO DE RESULTADOS

1 Kg. de Combustible Necesita:	Kg. de Aire	Volumen Desplazado, VD:		
λ :		Volumen Desplazado por min, VD/min:		[c.c.]
Entrada de Energía, q_{ent} :	[BTU/lb aire]	Volumen Desplazado por min, VD/min:		[c.c./min]
Trabajo salida neto, $W_{sale.neto}$:	[BTU/lb]	Relación de Corte de Combustible, CC:		[cfm]
Torque, T :	[lb pie]	Presión Media Efectiva, PMEF:		[psi]
Potencia Indicada, IHP:	[ihp]	Presión Media Efectiva al Freno, BMEP:		[psi]
Eficiencia Térmica, η_t :	→ [%]	Eficiencia Mecánica, η_m :	→	[%]

Figura 4.9 Parámetros de Funcionamiento del Motor

o permite escoger cualquier estación de bombeo para que los datos de los motores se ingresen automáticamente, Figura 4.10.

ESTACIÓN → Lago Agrio

- Lago Agrio
- Lumbaqui
- El Salado
- Baeza
- Papallacta

Número de cilindros, n:	16
Potencia Nominal, Pf:	2500 [bhp]
Diámetro Pistón, D:	228.6 [mm]
Carrera Pistón, L:	266.7 [mm]
Relación de Compresión, rc:	11.5 a 1
Velocidad, N:	1050 [rpm]
T ° al Inicio de Compresión, TI:	753 [°R]
P al Inicio de Compresión, PI:	20 [psia]
Presión Media Indicada, IMPE:	855.7 [psia]

Figura 4.10: Selección de Estación de Bombeo

4.3 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para el análisis de los resultados que el software nos entrega se varían los diferentes parámetros de funcionamiento del motor como son:

- Exceso de aire,
- Humedad,
- Temperatura de combustión,
- Presión y
- Combustible.

Se gráfica las concentraciones de los productos de combustión a determinadas condiciones de funcionamiento.

Condiciones Reales de Funcionamiento

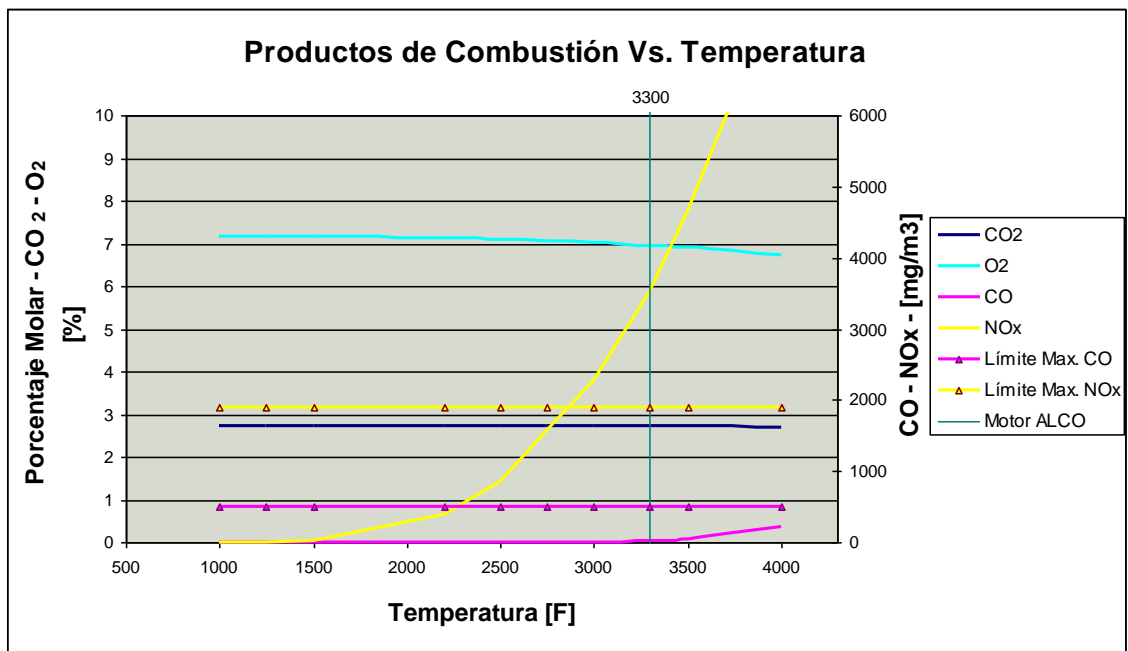
Exceso de Aire → 180 [%]
 Humedad → 54 [%]

Presión → 1610 [psia]

Productos de Combustión f (Δ Temp. de Combustión)

Δ T [F]	CO ₂ [%]	CO [mg/m ³]	NO [mg/m ³]	NO ₂ [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [%]
1000	2.724	2.1196	0.8253	2.6652	3.4905	7.161
1500	2.724	2.9229	17.771	8.9478	26.719	7.155
2500	2.724	0.1786	810.96	29.717	840.68	7.104
2750	2.724	1.3314	1541.1	35.53	1576.6	7.062
3000	2.724	4.2134	2229.3	41.337	2270.6	7.023
3300	2.722	16.782	3460.2	48.062	3508.3	6.955
3500	2.719	42.136	4626.3	52.139	4678.4	6.893
4000	2.695	224.45	7829.9	61.743	7891.6	6.744

Gráfico 4.1



En el Gráfico 4.1 se observa que las concentraciones de óxidos de nitrógeno, NO_x, se incrementan con el aumento de la Temperatura de Combustión. Para determinar la temperatura de funcionamiento en los motores ALCO 251-F se realizó una comparación con los resultados del monitoreo y se determinó que es aproximadamente 3300 °F .

Variación de la relación:
$$\frac{\left(\text{Aire}/\text{Combustible}\right)_{\text{Real}}}{\left(\text{Aire}/\text{Combustible}\right)_{\text{Estequiométrico}}} = \lambda \quad \text{bajo las}$$

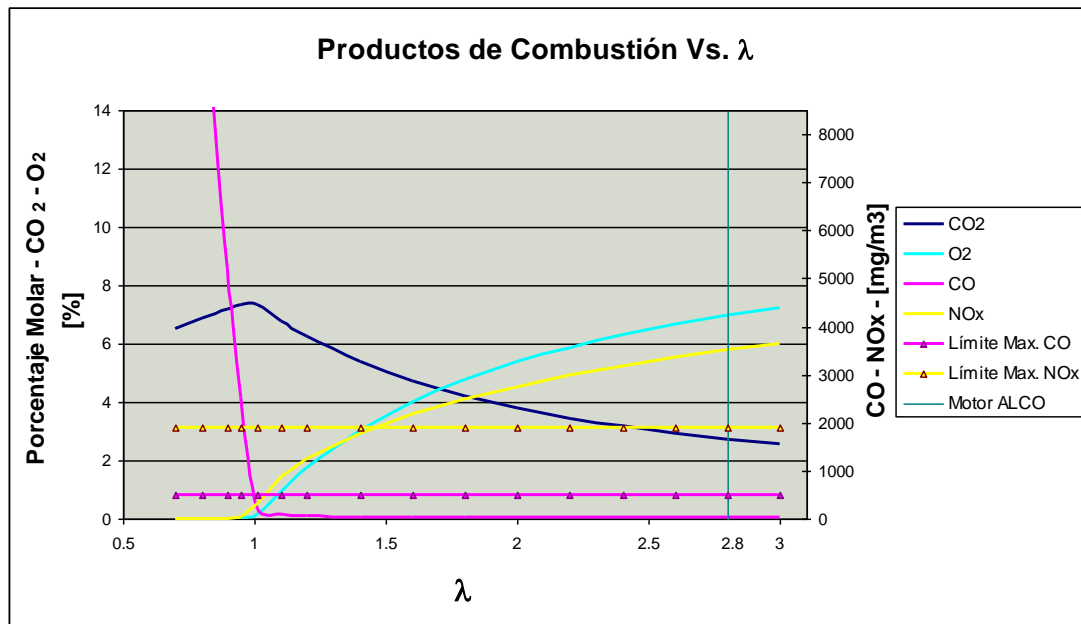
condiciones reales de operación:

Humedad → 54 [%]
 Temperatura → 3300 [°F]
 Presión → 1610 [psia]

Productos de Combustión f (λ)

λ	CO ₂ [%]	CO [mg/m ³]	NO [mg/m ³]	NO ₂ [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [%]
0.7	6.53	19068	3.1296	6E-05	3.1296	1E-05
0.9	7.2	5213.6	12.9	0.001	12.901	2E-04
1.01	7.346	221.44	316.15	0.603	316.75	0.131
1.6	4.719	31.673	2152.2	22.641	2174.9	3.989
1.8	4.205	27.082	2462.2	28.268	2490.5	4.751
2	3.792	23.892	2721.9	33.204	2755.1	5.364
2.2	3.453	21.497	2944.3	37.567	2981.9	5.868
2.4	3.169	19.609	3138	41.451	3179.4	6.29
2.6	2.929	18.07	3308.5	44.929	3353.5	6.647
2.8	2.722	16.782	3460.2	48.062	3508.3	6.955
3	2.543	15.684	3596.1	50.899	3647	7.222

Gráfico 4.2



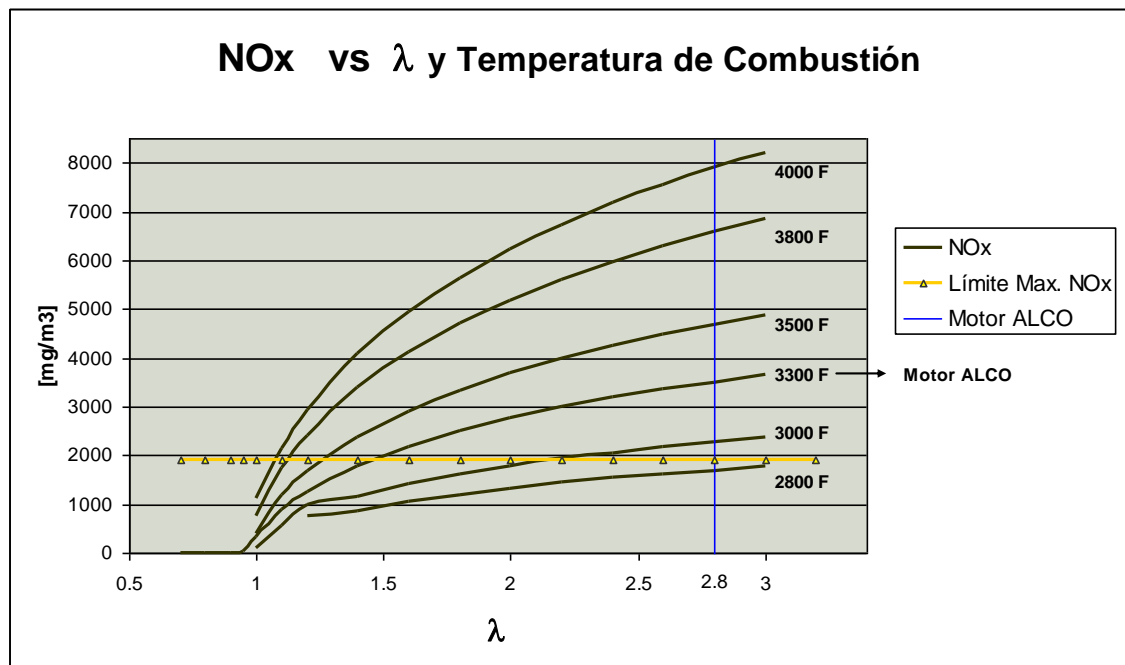
Con la relación $\lambda = 2.8$ (180 % de exceso de aire) y a temperatura = 3300 [°F] en los motores ALCO las concentraciones de NO_x sobrepasan el límite permisible.

Óxidos de Nitrógeno en función de λ y Temperatura de Combustión

λ	NO _x	NO _x	NO _x	NO _x	NO _x	NO _x
---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

	[mg/m ³] @ 2800 [F]	[mg/m ³] @ 3000 [F]	[mg/m ³] @ 3300 [F]	[mg/m ³] @ 3500 [F]	[mg/m ³] @ 3800 [F]	[mg/m ³] @ 4000 [F]
1		86.742	316.748	379.110	766.702	1117.140
1.2	743.384	996.796	1258.364	1686.525	2407.835	2932.269
1.4	858.814	1151.404	1783.852	2385.705	3379.991	4079.599
1.6	1047.986	1404.607	2174.887	2906.365	4107.860	4944.658
1.8	1200.981	1609.233	2490.515	3326.385	4695.365	5644.009
2	1329.436	1780.927	2755.068	3678.194	5187.260	6229.739
2.2	1439.723	1928.264	2981.887	3979.624	5608.444	6731.222
2.4	1535.880	2056.670	3179.414	4241.971	5974.764	7167.273
2.6	1620.692	2169.887	3353.462	4473.010	6297.151	7550.912
2.8	1696.188	2270.639	3508.258	4678.396	6583.561	7891.630
3	1763.905	2360.985	3646.995	4862.396	6839.999	8196.598

Gráfico 4.3

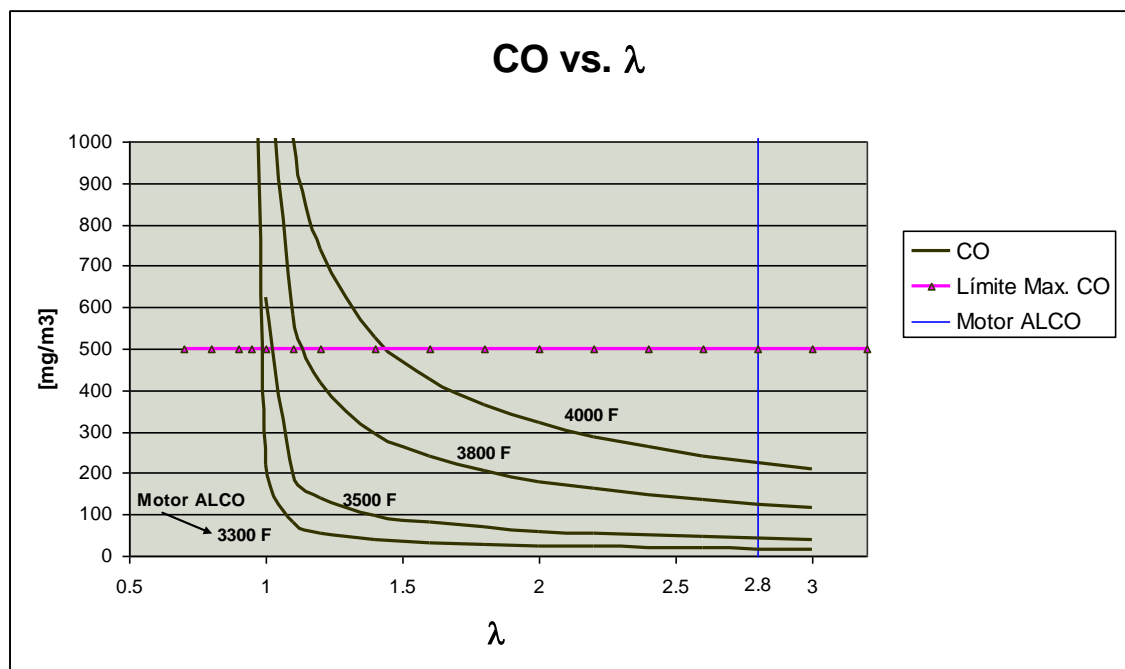


En el Gráfico 4.3 se observa que con una relación $\lambda = 2.8$ (Motor ALCO), la temperatura máxima de combustión debería ser 2800 [°F] para que cumpla con los límites permitidos.

Monóxido de Carbono en función de λ y Temperatura de Combustión

λ	CO [mg/m ³] @ 3300 [F]	CO [mg/m ³] @ 3500 [F]	CO [mg/m ³] @ 3800 [F]	CO [mg/m ³] @ 4000 [F]
1	221.44	624.765	1313.469	1937.774
1.1	79.627	199.529	583.107	1009.922
1.2	56.039	141.061	419.759	741.349
1.4	39.233	98.789	295.563	526.114
1.6	31.673	79.709	238.603	425.434
1.8	27.082	68.119	203.862	363.661
2	23.892	60.065	179.690	320.573
2.2	21.497	54.023	161.550	288.198
2.4	19.609	49.262	147.256	262.671
2.6	18.07	45.381	135.603	241.855
2.8	16.782	42.136	125.864	224.454
3	15.684	39.370	117.567	209.630

Gráfico 4.4



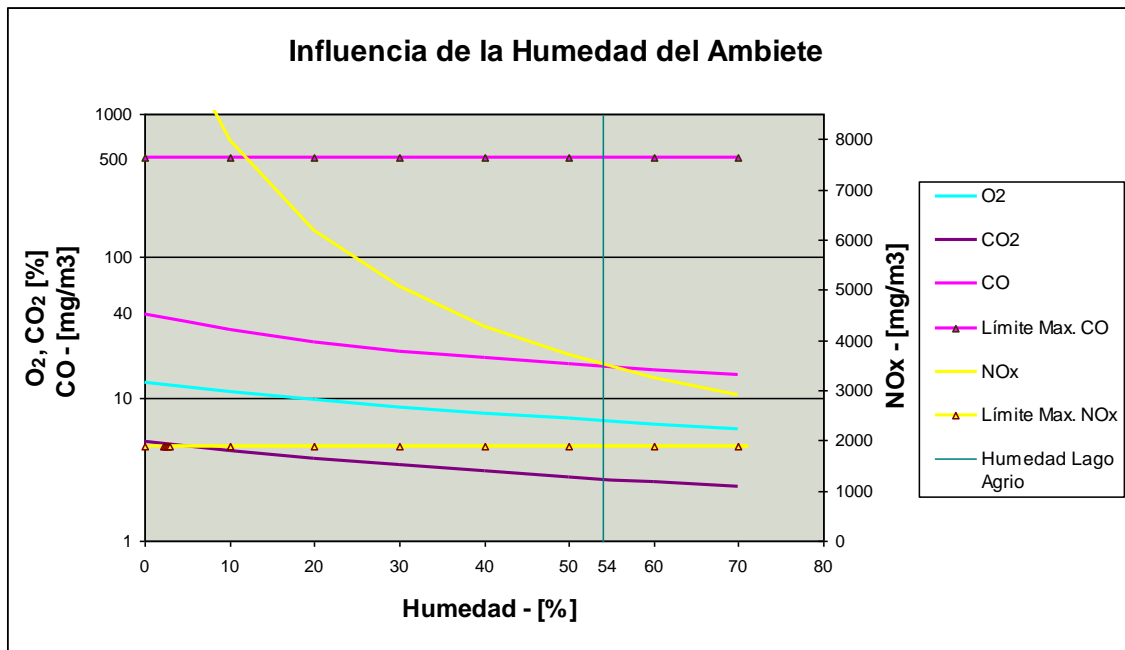
La influencia de la temperatura de combustión para las concentraciones de monóxido de carbono es muy pequeña comparada con la preponderancia que tiene con los óxidos de nitrógeno.

Humedad del Ambiente

Exceso de aire → 180 [%]
 Temperatura → 3300 [°F]
 Presión → 1610 [psia]

Humedad [%]	CO ₂ [%]	CO [mg/m ³]	NO [mg/m ³]	NO ₂ [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [%]
0	5.024	39.379	11018	207.81	11226	12.82
10	4.344	30.144	7844.3	137.58	7981.8	11.09
20	3.826	24.932	6090.1	100.25	6190.4	9.769
30	3.418	21.552	4977.3	77.454	5054.7	8.729
40	3.089	19.165	4208.4	62.262	4270.6	7.89
50	2.818	17.379	3645.3	51.514	3696.9	7.199
60	2.59	15.984	3215.3	43.567	3258.8	6.619
70	2.397	14.861	2876	37.49	2913.5	6.125

Gráfico 4.5



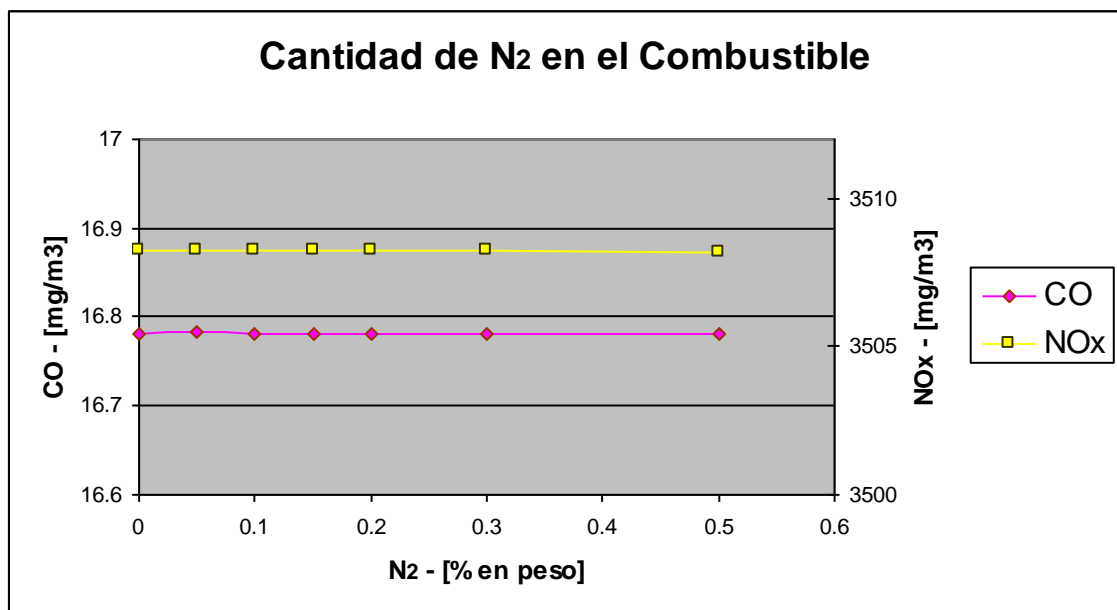
En el Gráfico 4.5 se observa que el aumento de la humedad del ambiente disminuye las concentraciones de los gases de escape, influyendo más en los óxidos de nitrógeno, NO_x, pero un incremento de humedad en la combustión puede afectar al funcionamiento y al mantenimiento del motor como se explica en el Capítulo V.

Cantidad de Nitrógeno en la Composición del Combustible

Exceso de aire → 180 [%]
 Humedad → 54 [%]
 Temperatura → 3300 [°F]
 Presión → 1610 [psia]

N ₂ [% en peso]	CO ₂ [%]	CO [mg/m ³]	NO [mg/m ³]	NO ₂ [mg/m ³]	NO _x [mg/m ³]	O ₂ [%]
0	2.722	16.782	3460.195	48.062	3508.258	6.955
0.05	2.722	16.783	3460.192	48.062	3508.255	6.955
0.1	2.722	16.782	3460.184	48.062	3508.246	6.955
0.15	2.722	16.782	3460.177	48.062	3508.238	6.955
0.2	2.722	16.782	3460.169	48.061	3508.230	6.955
0.3	2.722	16.782	3460.153	48.061	3508.214	6.955
0.5	2.722	16.781	3460.121	48.060	3508.181	6.954

Gráfico 4.6

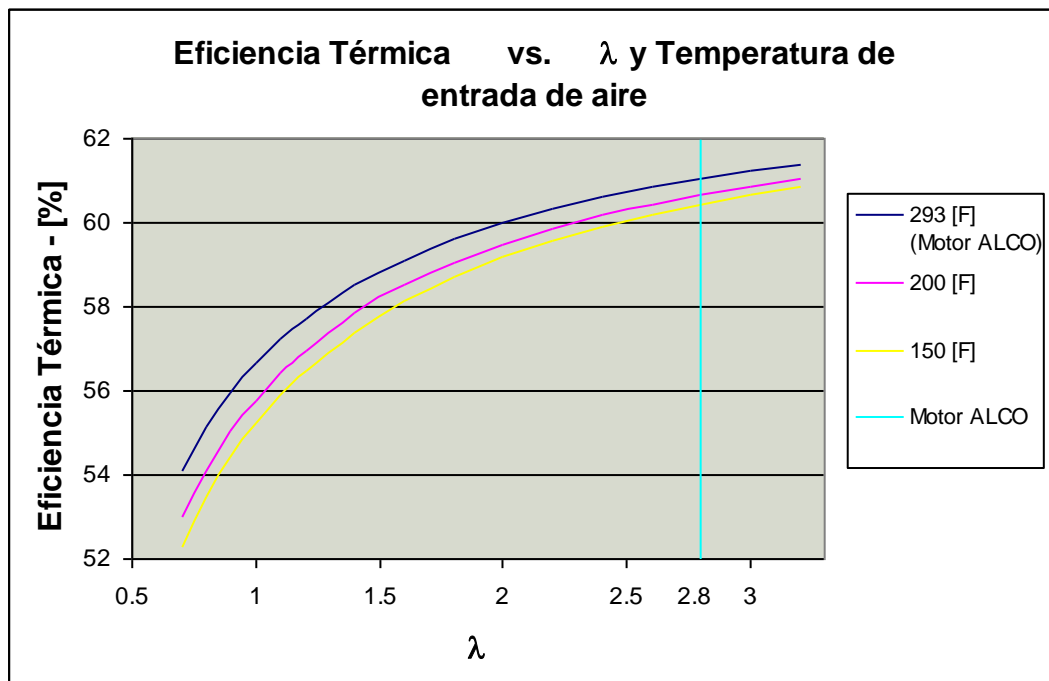


En el Gráfico 4.6 se estudió la influencia del contenido de nitrógeno en el combustible para la formación de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y se determinó que debido al bajo porcentaje en peso de nitrógeno que tiene la composición de petróleo (Tabla 4.2), no influye para la formación de estos óxidos.

Eficiencia Térmica en función de λ y de la Temperatura de Entrada de Aire

λ	η térmica [%]	η térmica [%]	η térmica [%]
	@ 293 [F]	@ 200 [F]	@ 150 [F]
0.7	54.101	52.983	52.264
0.8	55.133	54.115	53.458
0.9	55.964	55.03	54.428
1	56.65	55.782	55.226
1.2	57.717	56.959	56.474
1.4	58.505	57.836	57.404
1.6	59.119	58.516	58.121
1.8	59.601	59.055	58.696
2	59.999	59.495	59.17
2.2	60.331	59.868	59.56
2.4	60.606	60.179	59.897
2.6	60.847	60.446	60.179
2.8	61.054	60.674	60.428
3	61.237	60.878	60.649
3.2	61.396	61.06	60.841

Gráfico 4.7



A medida que baja la temperatura de entrada de aire la eficiencia térmica también lo hace pero en muy bajo porcentaje.

El software compara los resultados con las mediciones obtenidas con el analizador de gases como se muestra en la Figura 4.11

Contaminante	Software	Analizador	Error [%]
CO [mg/m ³]	16.782	205	91.81
NO _x [mg/m ³]	3508.258	3780	7.19
SO ₂ [mg/m ³]	135.643		
CO ₂ [%]	2.722	6	54.63
O ₂ [%]	6.955	13.4	48.10

Figura 4.11 Comparación de Resultados con el Analizador de Gases

Los errores obtenidos son altos debido a que el software es ideal y no simula condiciones reales ocurridas dentro del cilindro, por ejemplo, sellado de válvulas, estado de anillos, estado de los inyectores, así como puntos incandescentes debido a la carbonilla depositada en la cámara de combustión.

La comparación del dióxido de azufre no se incluyó ya que el error que se genera es demasiado grande debido a que el software considera que todo el azufre del combustible reacciona para formar dióxido de azufre, SO₂, cuando en realidad el azufre también forma trióxido de azufre, SO₃. Estos óxidos de azufre reaccionan con el agua existente en la cámara de combustión formando ácido sulfúrico, H₂SO₄, lo cual incrementa el error obtenido en la comparación de resultados.

CAPITULO V

ALTERNATIVAS PARA MINIMIZACIÓN DE LAS EMISIONES

5.1 ALTERNATIVAS EXISTENTES EN EL MERCADO LOCAL

Las técnicas desarrolladas para controlar las emisiones de los contaminantes gaseosos se pueden clasificar en dos grandes grupos que pueden ser en algunos casos complementarias:

- a) Prevención en la generación del contaminante, aquellas consistentes en modificaciones en la combustión, “medidas primarias”.
- b) Eliminación del contaminante ya generado por el proceso, “medidas secundarias”.

Medidas Primarias.- Evitar la formación del contaminante es la opción que parecería más simple. Sin embargo, no siempre es técnicamente posible. Las técnicas de modificación en la combustión utilizadas incluyen:

- Aditivos para Combustibles.
- Cámaras de Pre-Combustión.
- Combustible.
- Inyección de Vapor / Agua.
- Modificación de los Inyectores.
- Optimización de la Combustión - Relación Aire / Combustible.
- Recirculación de Gases de Escape.
- Retardo de la Inyección.
- Turbo Alimentación en Conjunción con Enfriamiento Posterior.

Medidas Secundarias.- Los contaminantes presentes en los gases de salida de cualquier tipo de fuente fija de emisión, pueden ser eliminados por una serie de métodos que pueden estar basados en:

- Absorción
- Adsorción
- Condensación
- Filtrado
- Incineración Térmica
- Plasma No Térmico
- Reducción Catalítica Selectiva
- Reducción No Catalítica Selectiva
- Sedimentación Gravitacional
- Separación Centrífuga

5.1.1 MEDIDAS PRIMARIAS

5.1.1.1 Aditivos para Combustibles._

Los aditivos para combustibles pueden ser usados para mejorar la calidad de los combustibles obteniendo beneficios como:

- Mejora del rendimiento del motor, mejorando la combustión,
- Reducción de los costos de mantenimiento, y
- Contribuir a reducir las emisiones del motor.

Varios tipos genéricos de aditivos de combustible diesel pueden tener un efecto importante sobre las emisiones. Estos incluyen: ³⁵

- Realzadores de cetano,
 - Inhibidores de humo, y
 - Aditivos detergentes.
- Los realzadores de cetano se usan para aumentar las cualidades de autoignición del combustible diesel. Estos componentes se adicionan para

³⁵ www.cleanairnet.org/lac/1471/articles-58251_pdf.pdf

reducir el impacto adverso de los combustibles con altos aromáticos sobre el arranque en frío y el ruido de la combustión. Los estudios no han detectado efectos significativos de los aditivos mejoradores de cetano sobre los NOx o los particulados.¹

La adición de cetano es definida como el incremento del número total de cetano a través del uso de pequeñas cantidades (1 vol% o menos) de compuestos diseñados específicamente y solamente para provocar éste resultado.

El número de cetano puede ser incrementado por dos vías: naturalmente y con el uso de aditivos. Naturalmente, involucra la modificación de varias propiedades físicas del combustible, por medio del cambio de concentración de los componentes. Como resultado varias propiedades cambian al mismo tiempo como se muestra en la Figura 5.1.

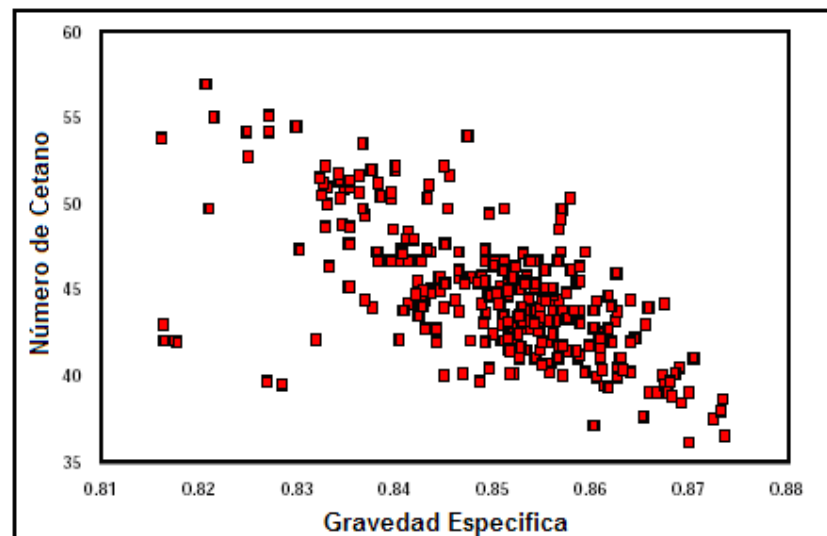


Figura 5.1: Variación de las Propiedades del Combustible con el incremento del Número de Cetano Natural

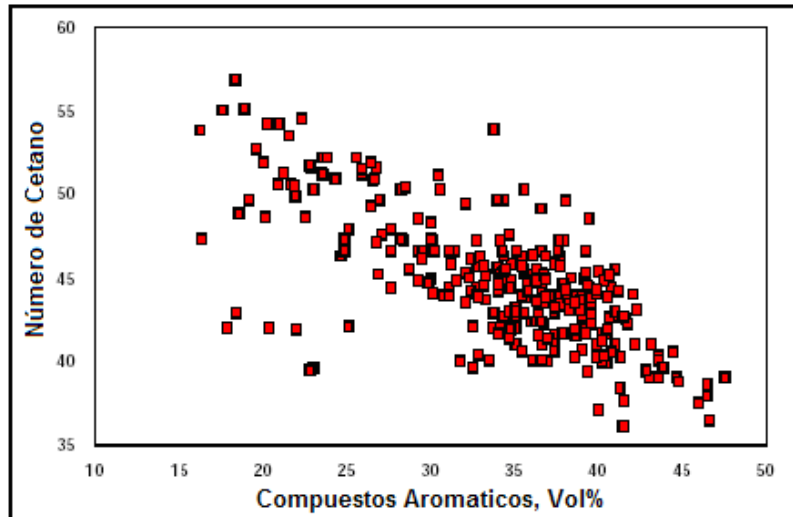


Figura 5.1: Variación de las Propiedades del Combustible con el incremento del Número de Cetano Natural (Continuación)

Fuente: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2003, The Effect of Cetane Number Increase Due to Additives on NOx Emissions from Heavy-Duty Highway Engines, www.epa.gov/otaq/models/analysis/r03002.pdf

Cualquier diferencia en los cambios producidos en NOx, entre el cetano adicionado y el cetano natural puede ser relacionada con los aromáticos y los efectos de la gravedad específica, propiedades que son inherentes al cetano natural. Esto es, el incremento del cetano natural está acompañado de una típica reducción de los aromáticos y la gravedad específica, podría ser que se produzcan mayores beneficios en la reducción de NOx con el incremento de cetano.

El uso de aditivos disminuye con los aumentos del cetano natural. Si el cetano natural de un caso particular es 40 y usando aditivos se lo eleva, este tiene un substancial beneficio, mayor que si el número de cetano natural fuera 50, como se muestra en la Figura 5.2.

Con el incremento del número de cetano por medio de aditivos se obtendría una reducción de las concentraciones de las emisiones de óxidos de nitrógeno, NOx, menor al 2%, ya que el crudo combustible utilizado en los motores ALCO tiene un número de cetano de 55.5.

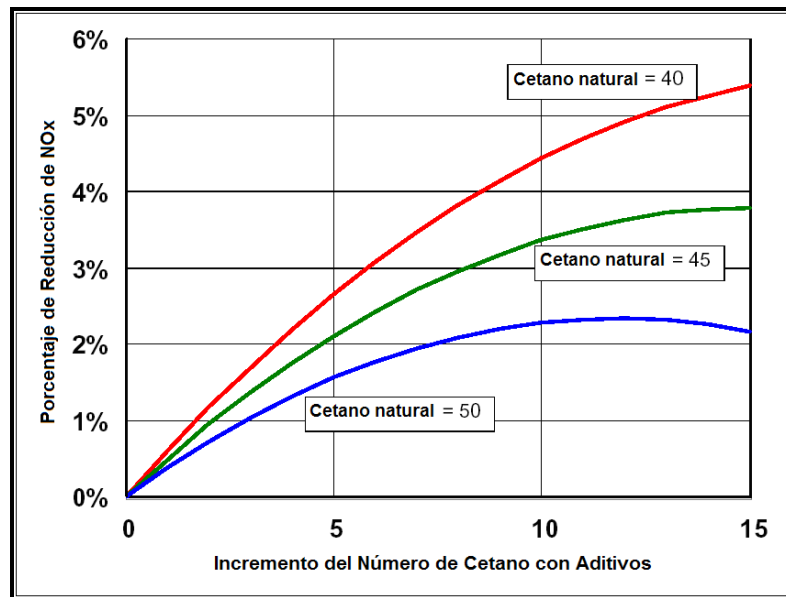


Figura 5.2: Efecto de la Adición de Cetano con Aditivos en las Emisiones de NOx

Fuente: Assessment and Standards Division Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency, 2003, The Effect of Cetane Number Increase Due to Additives on NOx Emissions from Heavy-Duty Highway Engines, www.epa.gov/otaq/models/analysis/r03002.pdf

- Los aditivos inhibidores de humo son componentes orgánicos de calcio, bario, o (a veces) magnesio. Adicionados al combustible diesel, estos componentes inhiben la formación de hollín durante el proceso de combustión, y, por ende, reducen en gran forma las emisiones del humo visible. El efecto total de reducir el hollín y de aumentar las emisiones de sulfato de metal pueden ser o un incremento o una baja en la masa de particulado total, dependiendo del nivel de emisiones de hollín al principio y la cantidad de aditivo usado.
- Aditivos detergentes, ayudan a prevenir y remover los depósitos de coke sobre las puntas del inyector de combustible y otros lugares vulnerables. Al mantener de ese modo la nueva inyección de combustible y las características de mezcla, estos depósitos pueden ayudar a bajar las emisiones de MP y HC en motores usados. Un estudio estimó que el aumento en las emisiones de MP, debido a los problemas de inyectores de combustibles de motores en uso, es más del 50% que los de motores

nuevos³⁶. Una fracción significativa de este exceso es incuestionablemente debida a los depósitos en los inyectores de combustible.

5.1.1.2 Cámaras de Pre-Combustión.

El uso de cámaras de precombustión retarda el tiempo de inyección, explicado en el numeral 5.1.1.8, ya que existe un retardo entre la ignición de la mezcla aire-combustible en la cámara de precombustión y el paso de los gases de combustión a la cámara principal de combustión. La cantidad de emisiones de NOx de un motor con precombustión es típicamente un poco más de la mitad que de los motores de inyección directa.

Otras ventajas del sistema de precámara son:

- Presiones de inyección bajas, los inyectores no requieren atomizar finamente el combustible.
- Las presiones en la cámara principal son relativamente bajas, debido a que el impacto inicial de la presión, queda amortiguado principalmente en la precámara.
- Menor emisión de gases contaminantes que las de cámara de inyección directa.

Las desventajas del sistema de precámara son:

- Pérdidas de calor, debido a la gran área de la superficie de las dos cámaras y la alta velocidad inducida a través del conducto.
- Pérdidas de bombeo, provenientes de la acción estranguladora de la precámara.
- El proceso de combustión tiene una duración mayor, lo que implica que parte de energía se libera en el proceso de expansión.

La cámara de combustión de motores ALCO 251-F es de inyección directa, para poder realizar una modificación a un sistema con pre-cámara es necesario rediseñar todo el motor por lo que esta solución no es factible

³⁶ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55074.html

técnicamente, sin embargo se han realizado innovaciones dentro de la cámara de inyección directa como el cambio de las cabezas de los pistones y en el diseño de los cabezotes para una mejor refrigeración y lograr repotenciar el motor.

5.1.1.3 Combustible._

Cualquier líquido o gas que contenga hidrógeno y carbono, al mezclarse con el oxígeno en una combustión, puede producir calor, con lo cual es susceptible de sustituir al crudo³⁷.

Para que se produzca una combustión de calidad, se debe conseguir que la mezcla sea lo mas homogénea posible, es decir, la unión de las moléculas del fluido (gas o líquido) con el oxígeno debe ser lo mas íntima o repartida posible. El combustible gaseoso es capaz de mezclarse mucho más fácilmente con el oxígeno, mientras que el líquido tiene que ser pulverizado para conseguir las partículas más pequeñas que sea posible, y dosificarlo convenientemente para que su mezcla con el O₂ resulte idónea.

Los combustibles tradicionales provienen del petróleo, un recurso no renovable. Litro de petróleo que se quema, litro de petróleo que desaparece para siempre, pero los productos de esa combustión son enviados a la atmósfera y no son para nada beneficiosos, atentan contra la salud y la vida.

La selección de combustible depende de:

- Si puede o no puede ajustarse al ciclo de trabajo.
- Si requiere modificaciones en el sistema de combustión.
- Si los ductos son adecuados.
- El efecto que tendrá sobre el mantenimiento.

Existen varios combustibles alternativos para disminuir algunas de las emisiones gaseosas contaminantes, pero en su mayoría no son aplicables

³⁷ www.km77.com/tecnica/alternativas/alcohol/texto.asp

para los motores que funcionan en un ciclo diesel como es el caso de los motores ALCO 251-F.

5.1.1.3.1 Biodiesel

Se produce a partir de aceites vegetales de diferentes orígenes, como soya, maní y otros aceites vegetales. El biodiesel puede usarse en su forma pura (100% biodiesel) o mezclado en cualquier proporción con diesel regular para su uso en motores de ignición a compresión. Sin embargo, el biodiesel tiene menor contenido de energía, lo que implica un mayor requerimiento de combustible, cerca de 15% sobre la base del peso³⁸.

El uso del Biodiesel reduce las emisiones gaseosas pero incrementa la concentración de los óxidos de nitrógeno, Tabla 5.1 y Figura 5.3, debido a la mayor cantidad de oxígeno contenido en el biodiesel facilitando una mejor combustión e incrementando la temperatura y tiempo de residencia debido al menor retraso en la ignición del biodiesel.

Tabla 5.1 Influencia del Biodiesel en la Concentración de Emisiones Gaseosas

Emisión Gaseosa	Reducc ión [%]	Increme nto [%]
Anhídrido Carbónico, CO ₂	80	---
Monóxido de Carbono, CO	40	---
Material Particulado	40	---
Dióxido de Azufre, SO ₂	99.9	---
Hidrocarburos, HC	55	---
Óxidos de Nitrógeno, NOx	---	12

³⁸ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17757.html

Fuentes:

Chang Sik Lee, Sung Wook Park, and Sang Il Kwon, 2005, An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels.

www.eco-sitio.com.ar/biodiesel.htm

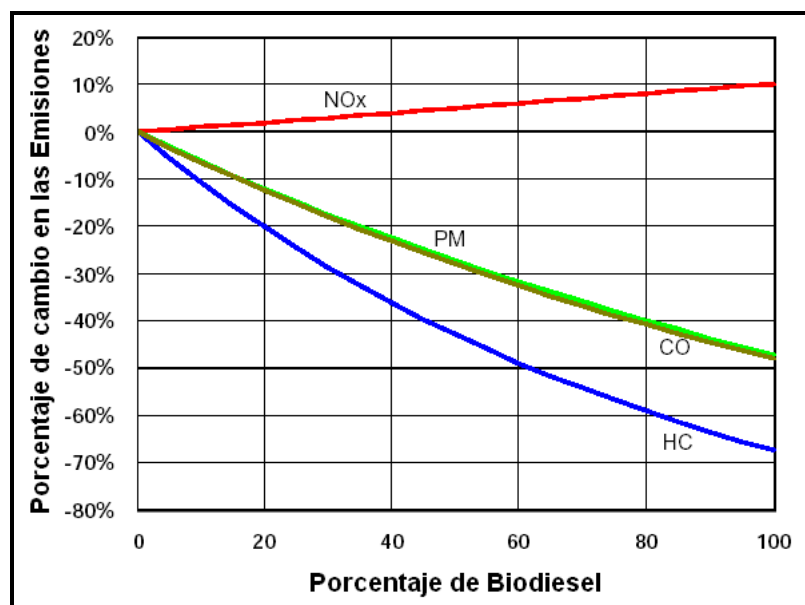


Figura 5.3: Porcentaje de Cambio en la Emisiones con Biodiesel

Fuente: U.S. Environmental Protection Agency, 2002, A Comprehensive Analysis of Biodiesel Impacts on Exhaust Emissions

Las características de atomización y tipo de penetración del biodiesel cumplen un papel importante en el desempeño del motor y las emisiones que genera. El biodiesel en comparación con el diesel convencional tiene una mayor tensión superficial por lo tanto es mas difícil atomizarlo, en la Figura 5.4 se muestra que el número de cetano, tensión superficial y viscosidad cinemática aumentan a medida que aumenta el porcentaje de mezcla del biodiesel.

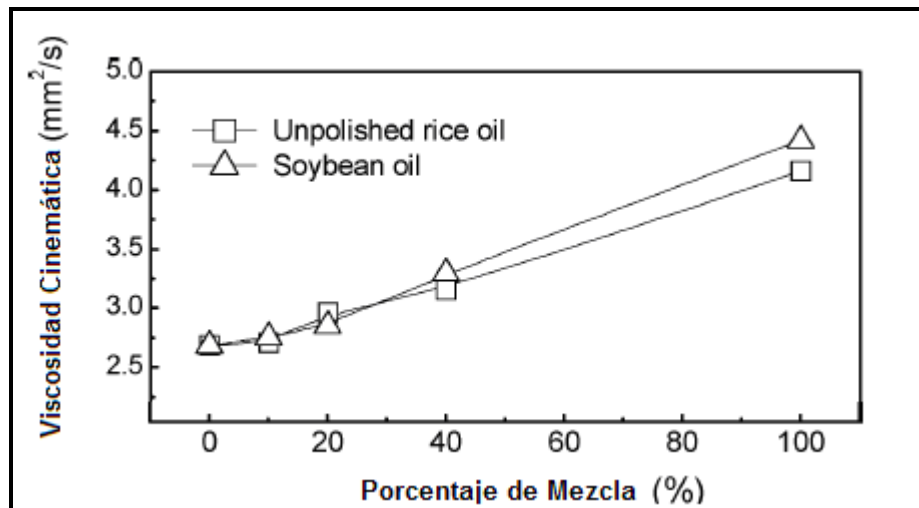


Figura 5.4: Efecto del porcentaje de mezcla de Biodiesel en las Propiedades Físicas

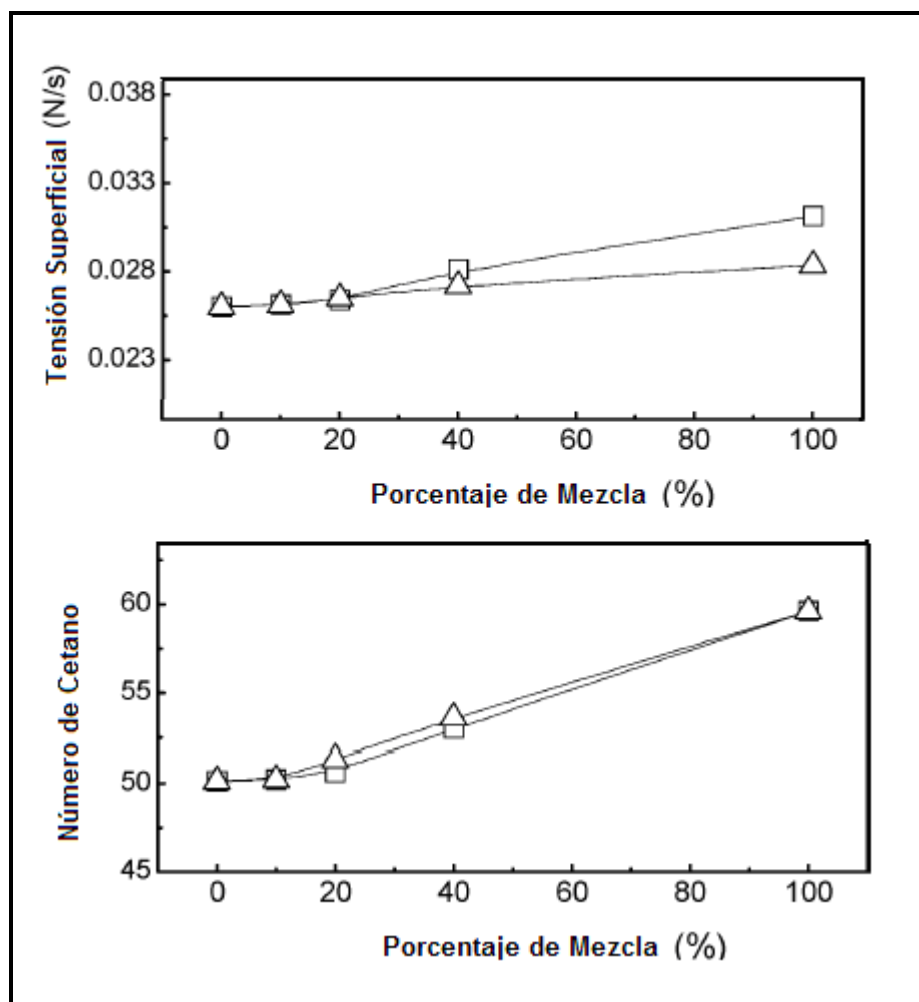


Figura 5.4: Efecto del porcentaje de mezcla de Biodiesel en las Propiedades Físicas (Continuación)

Fuente: Chang Sik Lee, Sung Wook Park, and Sang Il Kwon, 2005, An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels

Sin embargo, la variación de estas propiedades no afectan la penetración de la punta del spray, Figura 5.5, por lo tanto el biodiesel es el único combustible alternativo, que sin necesitar modificaciones, funciona en cualquier motor diesel convencional, no obstante su poder solvente lo hace incompatible con una serie de plásticos y elementos derivados del caucho natural, y obliga a sustituir mangueras en el motor.

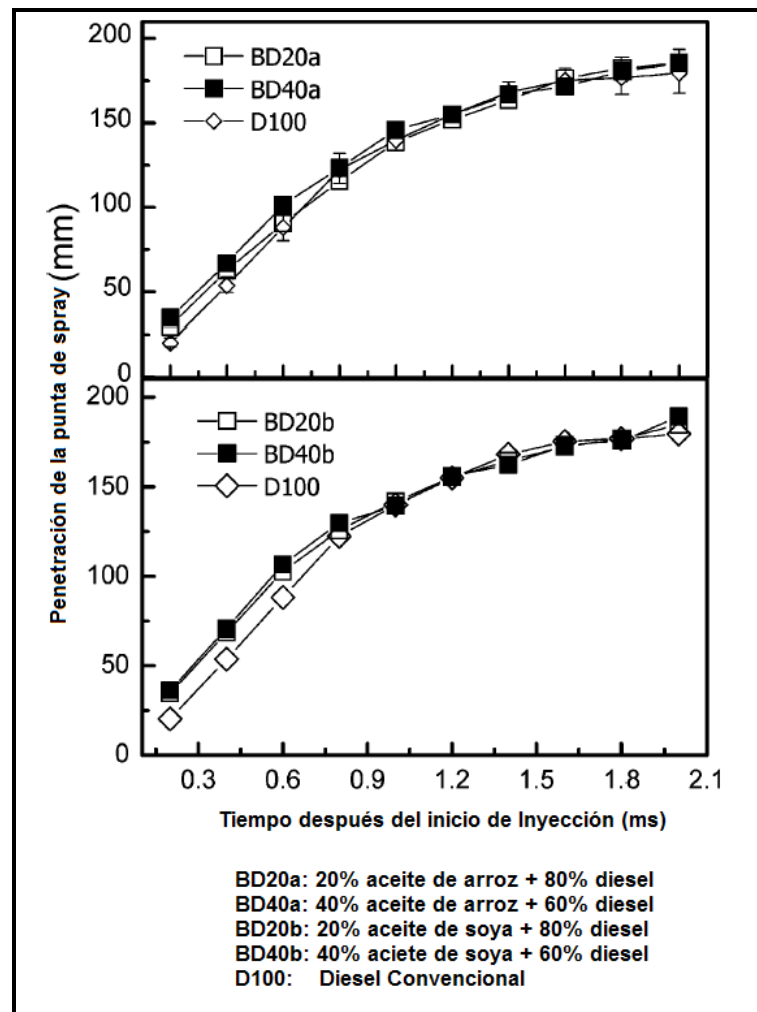


Figura 5.5: Penetración de la punta de Spray

Fuente: Chang Sik Lee, Sung Wook Park, and Sang Il Kwon, 2005, An Experimental Study on the Atomization and Combustion Characteristics of Biodiesel-Blended Fuels

Cuando se compara el biodiesel usado en un motor diesel no modificado con el diesel de petróleo, se ha constatado un rendimiento del motor similar (es decir, potencia y aceleración).

5.1.1.3.2 Gas Natural, GNC

El gas natural consiste en un 85% a 99% de metano. Se extrae principalmente de pozos de gas o en conjunto con la producción de petróleo crudo, pero también se puede obtener como un subproducto de las operaciones de los rellenos sanitarios.³⁹

Es un combustible que puede ser utilizado en los motores de ciclo Otto, bajo ciertas modificaciones, permite que los equipos funcionen sin desgaste y con menor necesidad de mantenimiento.

Las emisiones de NOx son típicamente un poco menores que los motores a gasolina dependiendo de la tecnología del motor.⁴⁰

El metano es el hidrocarburo más difícil de oxidar en un catalizador; estos han mostrado una durabilidad considerablemente reducida.

El primer requerimiento es una reserva de gas local; las redes de gasoductos distribuyen fácilmente el gas natural para estos usos estacionarios. Se requieren modificaciones de seguridad a los almacenes de combustible.

5.1.1.3.3 Gas Licuado de Petróleo, GLP

Es una mezcla de hidrocarburos, mayoritariamente propano y butano entre otros. El GLP es un derivado del procesamiento del gas natural o la refinación del petróleo. Es un gas a temperatura ambiente, pero se transforma en líquido cuando es comprimido. Un litro de propano GLP tiene cerca del 75% de la

³⁹ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17753.html

⁴⁰ www.cleanairmet.org/lac/1471/articles-58251_pdf.pdf

energía de un galón de gasolina⁴¹. El GLP tiene un mayor riesgo de explosión que el GNC.

El GLP comparado con el Petróleo tiene:

75% menos de CO

40% menos de NOx

87% menos de formación de ozono

85% menos de hidrocarburos

10% menos de CO₂.⁴²

y comparado con el Diesel:

60% menos de CO

90% menos de NOx

70% menos de formación de Ozono

90% menos de particulados

Llevando a cerca de 10% de menores emisiones de CO₂ por unidad de energía. Su combustión lleva a virtualmente nada de emisiones de particulado.¹

El uso del GLP requiere que se mejoren las instalaciones almacenamiento bajo estándares apropiados. Las instalaciones de manutención deberían ser equipadas con detectores de gases inflamables.

Los GLP son combustibles aptos para motores de Ciclo Otto, pero estos tienen que someterse a una serie de adaptaciones en el sistema de inyección. Además este tiene ventajas similares al gas natural. Estas incluyen la casi ausencia de azufre, y una proporción mayor de hidrógeno que la gasolina o el diesel.

Modificar los motores diesel de carga pesada hacia GLP reducirá significativamente la eficiencia, ya que los motores se convertirán en motores Otto.

⁴¹ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55025.html

⁴² Ayala Cueva, Galo Ing. "Combustión y Combustibles para Motores Industriales" ,2004

5.1.1.3.4 Etanol

Es producido por la fermentación de plantas de azúcar, maíz y otros productos de grano, en Latinoamérica principalmente de caña de azúcar. Como combustible el etanol se puede usar de las siguientes formas:

1. Como un aditivo para gasolina
2. Como un componente de gasolina reformulada
3. Mezclado con 15% de gasolina (o a veces más),
4. Mezclado con aditivo de mejoramiento de la ignición para usarse en motores diesel especialmente configurados para ese propósito.

Este combustible se presta para ser mezclado con gasolina para su uso en motores de ignición por chispa, el etanol es un alcohol con características de alto octano, pero bajo cetano. Un motor de ignición a compresión que funciona con etanol requiere de inyectores especiales y realizadores de ignición para lograr que el etanol se queme.

Las emisiones producidas por el etanol son las siguientes:

- Muy bajas emisiones de dióxido de azufre (SO_2) y es importante para el uso de tecnologías de reducción de emisiones.
- Reducción de monóxido de carbono (CO), el uso de etanol causa un 25 a 30% de reducción en las emisiones de CO con el 10% de etanol en la mezcla⁴³.
- Reducción de CO_2 , aunque el dióxido de carbono es liberado cuando se quema el etanol, éste es reciclado dentro de tejido orgánico durante el desarrollo de la planta por el proceso de fotosíntesis; de hecho, el uso del etanol en la gasolina puede resultar en una reducción neta de los niveles de dióxido de carbono atmosférico.
- Se incrementan las emisiones de óxidos de nitrógeno.

Respecto del transporte y almacenaje del etanol, su propensión a absorber agua ha sido motivo de preocupación al igual que la corrosión.

⁴³ www.cipres.cec.uchile.cl/~mderout/Taller2.html

5.1.1.3.5 Hidrógeno

Es elaborado por dos métodos principales para la producción industrial:

1. Fraccionar el agua en hidrógeno y oxígeno a través de la electrólisis.
2. Síntesis de producción de gas a partir de la reformación con vapor u oxidación parcial de combustibles que contengan hidrógeno.

Ambos métodos requieren grandes cantidades de energía.

El hidrógeno tiene una mayor velocidad de llama, más amplios límites de combustibilidad, mayor temperatura de detonación, se quema más caliente, y necesita menos energía que la ignición de la gasolina.

El gas de hidrógeno tiene el más alto contenido de energía por unidad de peso que cualquier combustible conocido, lo que lo hace, en principio, un transportador de energía ideal⁴⁴.

Los productos de la combustión del hidrógeno con aire son: vapor de agua y residuos insignificantes donde la máxima temperatura es limitada. Los óxidos de nitrógeno son creados a muy altas temperaturas de combustión, afortunadamente, la temperatura de autoignición del hidrógeno es solamente de 1085 °F.⁴⁵

Una máquina de combustión interna que utiliza hidrógeno como combustible puede ser ajustada para que la emisión de NOx sea 200 veces menor que la de las actuales⁴⁶. Las emisiones de compuestos tóxicos y otros hidrocarburos sólo vendrán de aceite de motor usado.

⁴⁴ biblioteca.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=34305 - 19k

⁴⁵ ingenieria.udea.edu.co/investigacion/gea/VENTAJAS.html

⁴⁶ hidrogen.motime.com

A temperaturas y presiones normales, el hidrógeno existe como un gas, haciendo más difícil el tema del transporte y almacenaje en comparación a los combustibles líquidos.

Cuando se quema, el hidrógeno produce relativamente grandes cantidades de agua que puede ser perjudicial para los motores de combustión. Además el hidrógeno posee un estequiometría muy diferente a otros combustibles y eso dificulta su proceso de combustión en el motor.

La mayoría de los fabricantes han orientado su atención de los motores de combustión interna propulsados a hidrógeno hacia los motores con celdas de combustible con hidrógeno. Sin embargo, está mayoritariamente aceptado que la tecnología con celda de combustible que usa hidrógeno está a muchos años de su comercialización⁴⁷.

En la Tabla 5.2 se muestra un resumen con el ciclo en el que puede funcionar cada uno de los combustibles estudiados.

Tabla 5.2: Ciclo de Funcionamiento de Combustibles

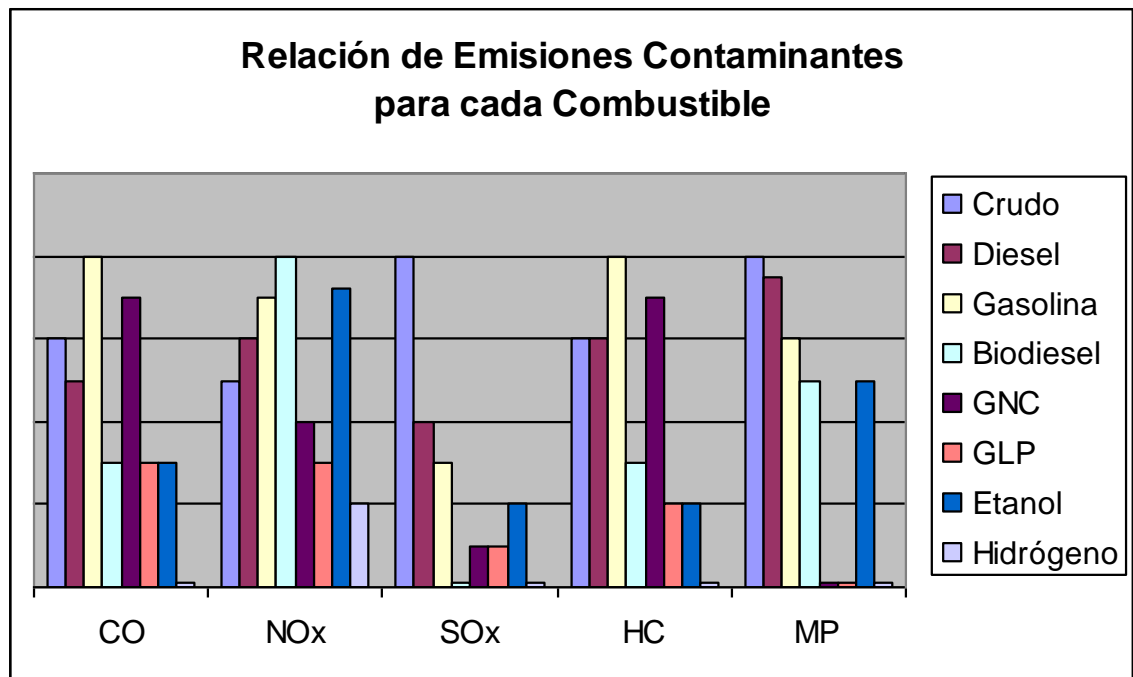
Combustible	Ciclo de Funcionamiento
Diesel	Diesel
Gasolina	Otto
Biodiesel	Diesel
GNC	Otto
GLP	Otto
Etanol	Otto
Hidrogeno	Otto

5.1.1.3.6 Combustible Recomendado._

En el Gráfico 5.1 se muestra la relación aproximada de la generación de las emisiones gaseosas para cada tipo de combustible.

Gráfico 5.1

⁴⁷ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17756.html



Un combustible ideal para poder minimizar los problemas de contaminación de los motores ALCO 251-F debe tener las siguientes características:

- Menor Contenido de Azufre.
- Mayor Número de Cetano.
- Ajustada Volatilidad (Menor Temperatura del 90% de destilado).
- Presencia de aditivos multipropósitos.

Menor contenido de Azufre._

Una característica importante del combustible es el azufre, ya que en el combustible contribuye directamente a las emisiones de MP y los niveles altos de azufre impiden el uso de tecnologías más efectivas en el control de MP y NOx (catalizadores).

El azufre se encuentra naturalmente en el petróleo crudo. El particulado de sulfato y las emisiones SOx, ambos contaminantes dañinos, son emitidos en directa proporción al contenido de azufre en el combustible.

Moverse hacia límites de azufre de 10 y 15 ppm hace posible el aprovechar las tecnologías de reducción de emisiones avanzadas que tienen extremadamente baja tolerancia para el azufre, tales como los catalizadores para NOx⁴⁸. Estos

⁴⁸ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55074.html

dispositivos pueden hacer que los motores sean tan o más limpios que los a GNC.

En la Tabla 5.3 se indica la presencia o no de azufre en cada uno de los combustibles estudiados.

Tabla 5.3: Presencia de Azufre en Combustibles

Combustible	Presencia de Azufre
Diesel	Si
Gasolina	Si
Biodiesel	No
GNC	Si
GLP	Si
Etanol	No
Hidrógeno	No

Mayor Número de Cetano._

El número de cetano es una medida de la calidad de ignición del combustible. En los motores de ignición por compresión, se refiere a la capacidad del combustible para reaccionar con el oxígeno bajo condiciones de explosión y por lo tanto posibilitar que el motor produzca mayor potencia. Cuanto más alto el número de cetano, mejora el rendimiento.

Un bajo número de cetano produce más dificultad en los arranques en frío, un incremento en el ruido de combustión, COVs y NOx debido al mayor atraso en la ignición.

El crudo combustible que se utiliza para los motores ALCO es parafínico y por lo tanto tiene un alto número de cetano.

En la Tabla 5.4 se muestra la influencia del número de cetano en las emisiones de NOx.

Ajustada Volatilidad (Menor Temperatura del 90% de destilado)._

El combustible consiste en una mezcla de hidrocarburos con diferentes pesos moleculares y puntos de ebullición. Como resultado, en tanto que

parte del mismo se evapora al calentarlo, el punto de ebullición del restante aumenta.

El término ajustada volatilidad se refiere a que los puntos de ebullición de la mezcla de hidrocarburos deben ser lo mas cercanos posibles.

Un combustible con menor temperatura de destilación puede reducir las emisiones de NOx, como se muestra en la Tabla 5.4.

Otras consideraciones del combustible._

En los motores a gasolina se desea una temperatura de inflamación tan alta como sea posible, para evitar que la última porción de la carga queme con detonación. En el motor diesel se desea, al contrario, que la temperatura de auto ignición, sea tan baja como sea posible, para que el combustible pueda encenderse al cabo de un tiempo muy pequeño de haber entrado en la cámara de combustión.

Cada uno de los combustibles para su rendimiento óptimo deberían trabajar con una cantidad de aire superior al de su relación estequiométrica, debido a los problemas de combustión, en caso de no ser lo suficientemente superior, se incrementarían las emisiones de CO, o caso contrario si el exceso de aire es demasiado se estaría desaprovechando la capacidad del motor, por lo cual se debería recalibrar las cremalleras de la bomba de inyección, para inyectar, mayor cantidad de combustible, y poder aprovechar la capacidad del motor.

Los combustibles de difícil encendido se queman mejor con una relación de compresión elevada. A medida que baja la relación de compresión, el retraso de la inflamación y la rapidez de aumento de presión crecerán.

Viscosidad._

La viscosidad del combustible ejerce una gran influencia sobre la forma de rocío, por ejemplo, altas viscosidades producen poca atomización (gotas de gran tamaño) y mayor penetración de chorro. Un motor con combustible

viscoso recibe un caudal compacto dentro de la cámara de combustión, y el arranque se dificulta tanto que aparece el escape humeante.

Una característica de los combustibles espesos es que su gran viscosidad se debe a que contienen residuos de combustibles más pesados, y por lo tanto destilan a mayor temperatura. Los combustibles de temperaturas de inflamación más bajas se recomiendan para motores Diesel.

Si el combustible tiene una porción grande de aceite pesado, éste retrasa la combustión durante la carrera de expansión; si la combustión no ha terminado cuando se abre la válvula de escape, los gases expulsados serán sucios y lo que es peor se depositarán en las paredes del cilindro sustancias medio quemadas que pueden llegar a empastar los aros del pistón si penetran en las ranuras, además se producirá la corrosión de las paredes del cilindro si el combustible contiene azufre.

Por otra parte, si la viscosidad de un combustible es baja, se acentúa su fuga por las partes del émbolo de la bomba, especialmente cuando hay desgastes. Estas fugas no son objetables por si mismas, pero evitan la correcta dosificación del combustible.

Densidad.-

La densidad del combustible, por ejemplo, puede afectar la masa del combustible inyectado a la cámara de combustión, y, de este modo, también a la proporción aire/combustible. Esto es debido a que las bombas de inyección de combustible miden el combustible por volumen, no por masa, y el combustible más denso contiene mayor masa en el mismo volumen.

Reducir la densidad tiene efectos sobre las emisiones de NOx como se muestra en la Tabla 5.4

Corrosividad, limpieza y propiedades lubricantes del combustible._

También pueden afectar la vida útil del sistema de inyección de combustible, posiblemente contribuyendo a excesivas emisiones en uso, si el equipamiento se desgasta prematuramente.

Tabla 5.4: Influencia de las Propiedades del Combustible sobre las Emisiones de NOx y MP

Modificación del Combustible	NOx	Particulados
Reducir Azufre*	---	▼▼▼
Aumentar Cetano	▼▼	---
Reducir aromáticos totales	▼▼	---
Reducir Densidad	▼▼	▼▼▼
Reducir T ₉₀ /T ₉₅	▼	---

--- : Sin efecto

▼ : Muy poco efecto

▼▼ : Poco efecto

▼▼▼ : Efecto relativamente grande

*Motores sin sistema post-tratamiento

Fuente: www.cleanairnet.org/lac/1471/articles-58251_pdf.pdf

En la Tabla 5.5 se detallan algunas de las propiedades de los combustibles que han sido consideradas para el presente análisis.

Tabla 5.5: Propiedades de los Combustibles

Combustible		Densidad Gas [Kg/m ³]	Densidad Líq. [Kg/lt]	Poder Calórico [BTU/Lb]	°API	No de Octano	No de Cetano	Relació Estequiom
Crudo	C _{0.0711} H _{0.13} S _{0.0002}	--	0.868	19973.00	32	--	55.5	14.49:
Diesel	C ₁₂ H ₂₆	--	0.808	20645.74	57.5	--	40-60	14.9:1
Gasolina	C ₈ H ₁₈	--	0.746	19029.58	70.5	98	--	14.6:1
Biodiesel	C _{18.7} H _{34.9} O ₂	--	0.875	16013.95		--	47-56	13.8:1
GN	CH ₄	0.6515	0.421	23961.04	202.5	110	--	17.3:1
GLP	C ₃ H ₈	0.508	0.509	19751.08		102	--	15.7:1
Etanol	C ₂ H ₆ O	--	0.783	11724.39		100	5	9:1
Hidrogeno	H ₂	0.0838	0.0708	726868.00		73	--	34.3:1

Fuentes: Ayala Cueva, Galo Ing."Combustión y Combustibles para Motores Industriales", 2004

www.km77.com/tecnica/alternativas/alcohol/texto.asp

El rendimiento del motor depende del tipo de combustible seleccionado, y está entre otros factores en función del poder calórico de cada combustible;

es decir, mientras mas bajo sea el poder calórico del combustible, menor el rendimiento del motor y menor la temperatura de la cámara de combustión.

La temperatura de la cámara de combustión es fundamental para generar una buena combustión. Generalmente a mayor temperatura se tiene una mejor combustión, sin embargo esto afecta las emisiones de NOx las cuales se incrementan al tener mayores temperaturas⁴⁹.

Al utilizar crudo como combustible en lugar de diesel sucede que:

- Ingresa en mayor cantidad por inyección por ser más denso.
- Por su poder calórico, menor que el diesel, genera menos presión y por lo tanto la temperatura se reduce al igual que las concentraciones de NOx, pero como consecuencia es menos eficiente.
- Su viscosidad es similar a la del diesel pues es inyectado a 148°F.
- El crudo utilizado como combustible es parafínico, tiene mayor índice de cetano que el diesel, lo que disminuye el tiempo entre la inyección y la inflamación del combustible y mejora la calidad de ignición del combustible; esto es ventajoso para la reducción de emisiones de NOx.

Analizando los diferentes combustibles para los motores ALCO 251 – F, se concluye que el combustible recomendable es:

Para obtener menores concentraciones de NOx.	→	Crudo.
Por disponibilidad, reducción de costo.	→	Crudo.
Para obtener mayor eficiencia y menor mantenimiento.	→	Diesel.

Sin considerar el combustible que se use, la cantidad de NOx producida por un motor es directamente proporcional a la edad y el diseño del motor⁵⁰. Mientras un viejo motor Diesel, pobremente afinado, puede producir alta

⁴⁹ www.conae.gob.mx/work/secciones/2601/imagenes/sistema_de_combustible.pdf

⁵⁰ www.ambienteyenergia.com.ar/htms/notas/nota_1488.htm

cantidad de NO_x, los nuevos motores de Diesel producen muy bajas emisiones de NO_x.

5.1.1.4 Inyección de Vapor / Agua._

El agua es un excelente absorbedor de calor debido a su alto calor específico y calor latente de evaporación. El calor latente de evaporación del agua es 2256 kJ/kg, el cual es aproximadamente 6 veces más que el de la gasolina bajo presión atmosférica estándar y temperatura.

La inyección de vapor o agua con el combustible ayuda a reducir el NO_x. Se logra un enfriamiento de la llama, pero el mayor efecto es que el vapor se disocia en oxígeno e hidrógeno, y por ello incrementa la concentración de los agentes reductores.

Una porción de agua puede ser introducida en el proceso de combustión de tres maneras:

- Emulsiones de agua/combustible,
- Inyección de agua en los cilindros y
- Aspersión de agua en el sistema de entrada.

El agua que inyecta el sistema es disociada en sus dos componentes moleculares por el calor de la combustión que normalmente se pierde a través del refrigerante del motor y del escape. Las moléculas de oxígeno e hidrógeno se vuelven a combinar espontáneamente acelerando la reacción de combustión con gran violencia. Es decir que el sistema aprovecha la altísima temperatura de la combustión, para disociar la pequeña parte de agua agregada a la cámara del motor.

Con un 40 % de incremento de agua por peso de combustible se consigue una reducción máxima de las concentraciones de óxidos de nitrógeno, NO_x,

de un 35 %, mientras que las concentraciones de hidrocarburos, HC, aumentan en un 50 %.⁵¹

En la Figura 5.6 se observa el efecto de la adición de agua en la concentración de NOx, HC y CO en función de la relación combustible/aire.

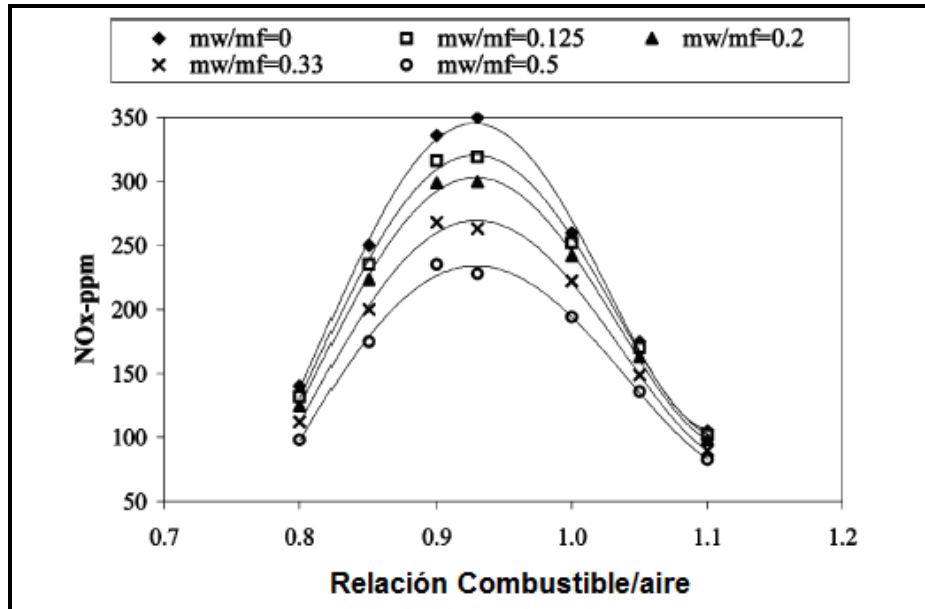


Figura 5.6: Efecto de la Adición de Agua

⁵¹ Hakan Özcan and M. S. Söylemez, 2005, Experimental Investigation of the Effects of Water Addition on the Exhaust Emissions of a Naturally Aspirated, Liquefied-Petroleum-Gas-Fueled Engine.

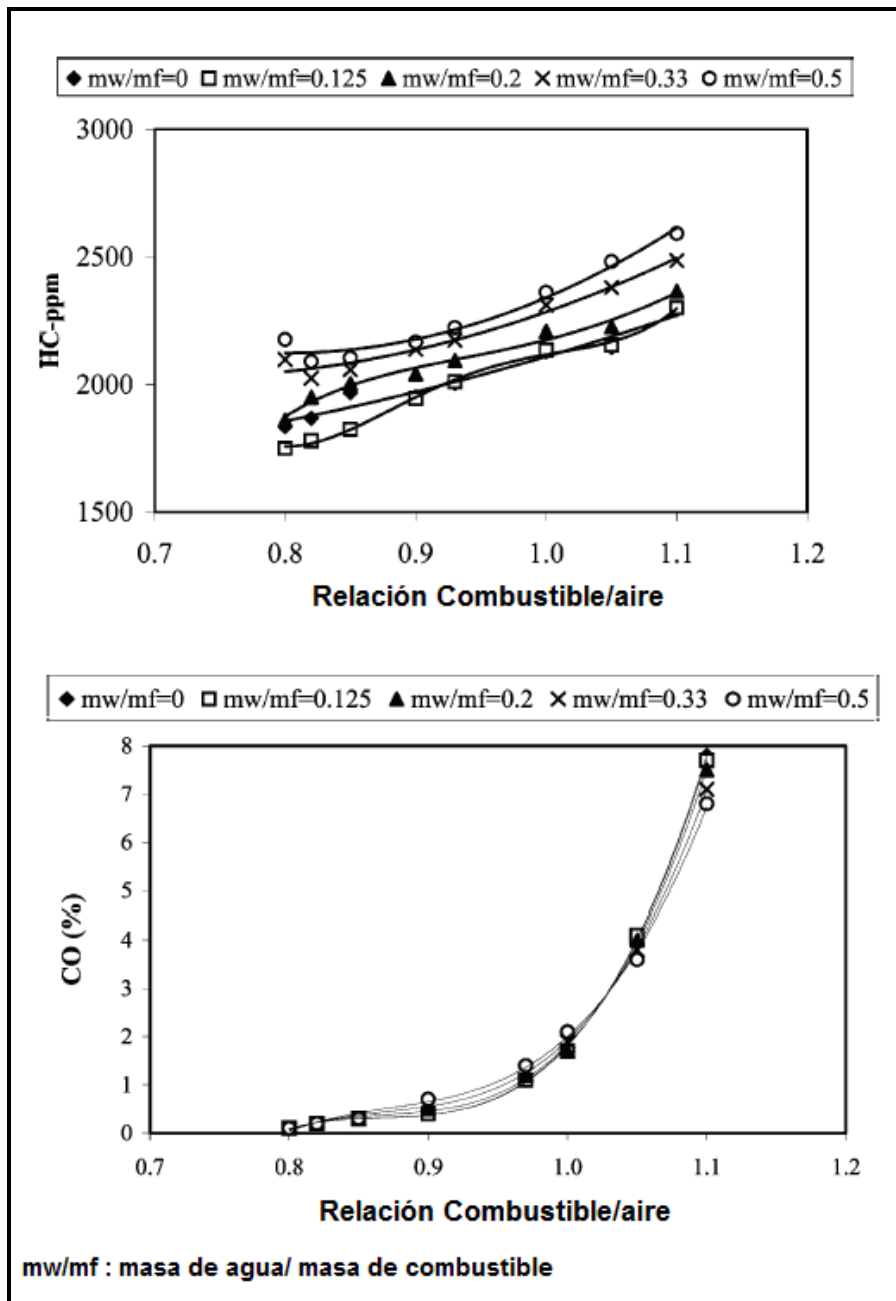


Figura 5.6: Efecto de la Adición de Agua (Continuación)

Fuente: Hakan Özcan and M. S. Söylemez, 2005, Experimental Investigation of the Effects of Water Addition on the Exhaust Emissions of a Naturally Aspirated, Liquefied-Petroleum-Gas-Fueled Engine.

El software permite generar el Gráfico 4.5⁵², en el que se puede observar la influencia de la humedad del ambiente en la reducción de las emisiones de óxidos de nitrógeno, NOx.

Esta técnica es usada muy frecuentemente en las turbinas de gas pero para motores de combustión interna, el agua utilizada debe ser extremadamente pura, de otra manera se produciría depósitos en el motor. Otro problema potencial es la alta corrosión que se produciría en el motor, la alteración del aceite del motor por la dilución con el agua y la separación del agua del aceite cuando se utiliza emulsiones.

Actualmente existe un sistema de inyección de agua denominado "Hidroinyección Fioramonti" que ha sido patentado en Argentina y consiste en un dispositivo que inyecta pequeñas dosis de agua destilada a la cámara de combustión del motor, pero solo ha sido utilizada en motores de vehículos.⁵³

5.1.1.5 Modificación de los Inyectores._

Varios cambios en el diseño de los inyectores viejos y convencionales pueden ser hechos para reducir las emisiones de NOx. Estos incluyen:

- **Controles Electrónicos._** Permiten más flexibilidad en el ajuste del tiempo para varios modos operacionales. Con esta flexibilidad adicional el tiempo puede ser retardado en los casos en donde los problemas operacionales lo permiten.
- **Mejoramiento de las Boquillas de los Inyectores._** Lo cual provee un patrón de "spray" más fino y más uniforme. El mejoramiento de este patrón tiende a reducir la cantidad de hidrocarburos no combustionados, monóxido de carbono y las emisiones de material particulado y en menor proporción la cantidad de emisiones de NOx. El uso de estas boquillas puede permitir un mejor retardo en la inyección sin ocasionar problemas de operación o

⁵² Capítulo IV

⁵³ www.ambientum.com/revistanueva/2005-04/hidroinyeccion.htm

incrementar las emisiones de otros contaminantes.

- **Uso de Bombas Inyectoras a Alta Presión.**__ A presiones más altas el patrón del "spray" puede ser aún más fino y uniforme y el proceso de inyección puede tomar menos tiempo, comenzando más tarde y terminando más pronto en el ciclo del motor. Iniciar la inyección más tarde es efectivamente similar a retardar el tiempo de inyección, lo cual reduce las emisiones de NOx. Una disminución de la duración en la inyección tiende a incrementar la eficiencia del motor, lo cual reduce algunos de los efectos adversos del retardo del tiempo de inyección. La inyección de alta presión permite que el motor de encendido por compresión sea más económico y dinámico.

5.1.1.6 Optimización de la Combustión - Relación Aire / Combustible.__

En los motores de inyección la relación aire combustible de cada cilindro puede ser ajustada controlando la cantidad de combustible que ingresa a cada cilindro. Estos motores operan en condiciones donde la combustión es más eficiente y el consumo de combustible es óptimo.

En relaciones aire combustible por debajo de la estequiométrica (mezcla rica):

- La combustión ocurre en condiciones de insuficiente oxígeno.
- La emisión de hidrocarburos no quemados aumenta.
- El monóxido de carbono aumenta por que el carbono no es suficientemente oxidado a CO₂.
- Los óxidos de nitrógeno decrecen primero por oxígeno insuficiente y luego por bajas temperaturas.

Con relación aire combustible sobre la estequiométrica (mezcla pobre):

- La combustión ocurre bajo condiciones de exceso de oxígeno.

- Los hidrocarburos permanecen en un nivel bajo, pero cuando empieza a incrementarse la relación aire-combustible estos se incrementan debido a que las bajas temperaturas impiden la combustión.
- El carbón es oxidado a CO_2 , por lo tanto el monóxido de carbono disminuye.
- Los óxidos de nitrógeno primero se incrementan rápidamente con la relación aire-combustible cerca de la estequiométrica, debido al exceso de oxígeno y picos altos de temperatura, luego decrece rápidamente con el incremento de la relación aire combustible, por que el exceso de aire enfría el pico de temperatura de combustión.

Pequeños cambios en la relación aire-combustible, aproximadamente del 10%, pueden reducir la emisión de NO_x cerca de un 30%.⁵⁴

En la Figura 5.7 se muestra como varían las concentraciones de las emisiones gaseosas dependiendo de la relación aire – combustible.

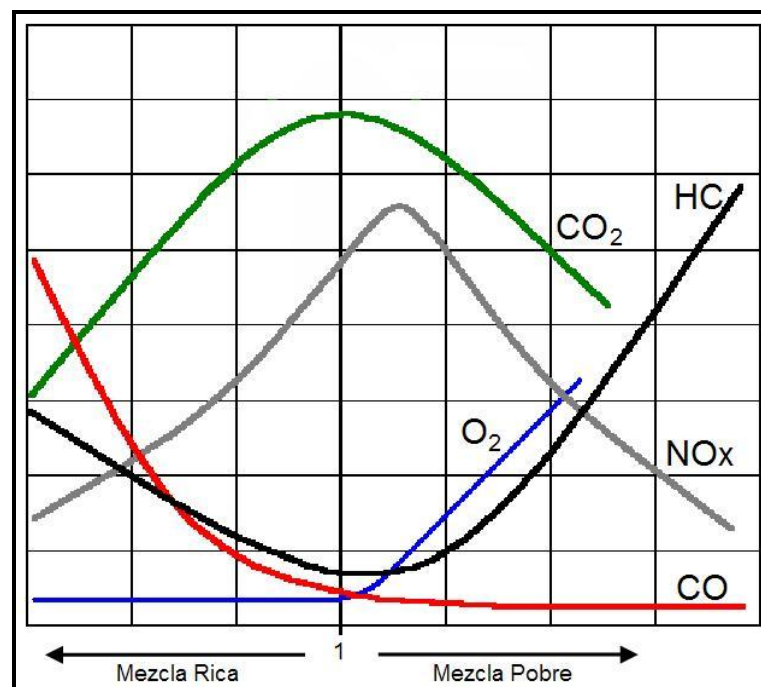


Figura 5.7: Emisiones Gaseosas vs Relación Aire – Combustible

⁵⁴ www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf

Para poder determinar los límites adecuados para la minimización de emisiones gaseosas y de rendimiento del motor, hay que realizar pruebas de campo con cambios en la relación aire-combustible

5.1.1.7 Recirculación de Gases de Escape, EGR._

La recirculación de los gases de escape consiste en enviar una parte de los gases hacia el múltiple de admisión del motor. Se utiliza para reducir la emisión de los óxidos de nitrógeno al bajar la temperatura de la cámara de combustión. El gas proveniente del escape es recirculado a la zona de combustión, lo cual reduce la temperatura de la flama y disminuye el contenido del aire para la combustión, causando que el calor se diluya en una masa mayor de gas y por lo tanto bajan las emisiones de NOx.

Consiste en una válvula que permite el paso de un porcentaje de los gases de escape al colector de admisión según las condiciones de funcionamiento del motor con la finalidad de diluir la mezcla de aire-combustible que se entrega a la cámara de combustión, en la Figura 5.8 se muestra el porcentaje de EGR en función de la carga de trabajo.

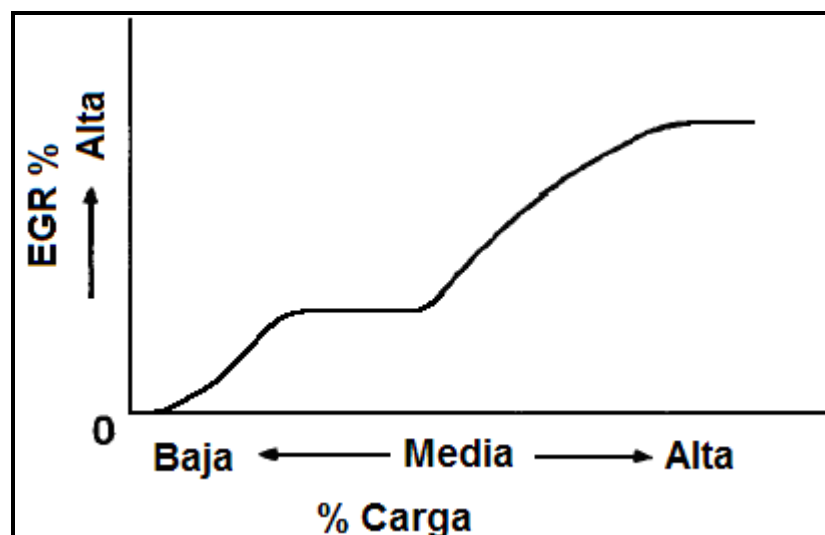


Figura 5.8: Porcentaje de EGR en función de la Carga de Trabajo

Fuente: U.S. Department of Energy, 2004, Demonstration of a Low-NOx Heavy-Duty Natural Gas Engine, www.nrel.gov/vehiclesandfuels/ngvtf/pdfs/34092.pdf

Cuando el motor está en revoluciones de descanso o está frío, no soporta la inducción de estos gases y se apaga; por esta razón estas válvulas traen incorporadas un diafragma; que al ser activadas, controlan el paso de gases abriendo o cerrando su compuerta; de ahí el nombre de válvula.

Las válvulas EGR se clasifican según su funcionamiento en:

- Neumáticas, y
- Eléctricas

Válvulas Neumáticas._ Son accionadas por depresión o vacío. Están constituidas por un diafragma empujado por un muelle, que abre o cierra una válvula a través de una varilla de mando en cuyo extremo lleva un punzón. La varilla está acoplada al diafragma, que se mueve abriendo la válvula cada vez que la depresión actúa sobre la membrana y vence la presión del muelle.

La operación correcta de esta válvula es bajo aceleración condición en la que descubre el orificio que lleva vacío hacia la válvula haciendo que esta actúe dejando pasar los gases, en cuanto deja de acelerar se corta el vacío y la válvula deja de trabajar, en la Figura 5.9 se observa un esquema de una válvula de recirculación de gases.

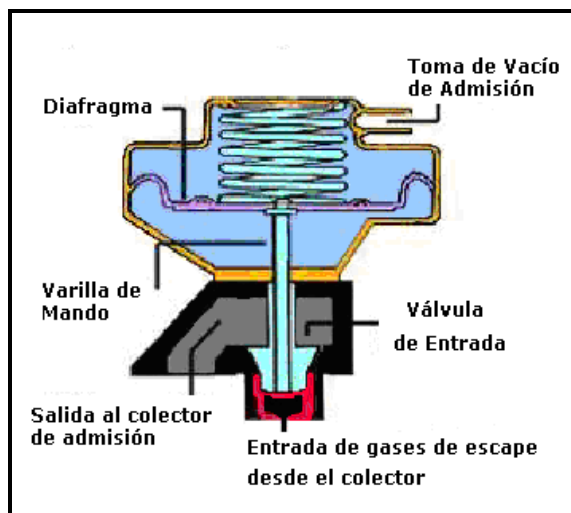


Figura 5.9: Válvula EGR (Recirculación de gases de escape)

Fuente:

www.rolcar.com.mx/Mecanica%20de%20los%20sabados/Valvula%20EGR/valvula_egr.htm

Para controlar la depresión que actúa sobre la válvula EGR se necesita de otra válvula separada, en este caso eléctrica.

Si la válvula EGR no cuenta con un dispositivo electrónico que interrumpa su funcionamiento, siempre estaría más o menos abierta, dependiendo de la admisión del colector, pero abierta.

Válvulas Eléctricas: Las válvulas EGR eléctricas se caracterizan por no tener que utilizar una bomba de vacío para su funcionamiento por lo que trabajan de forma autónoma. Constan de un solenoide que actúa al recibir señales eléctricas, abriendo un paso por el que recirculan los gases de escape. El mayor o menor volumen de gases a recircular viene determinado por una unidad de control electrónico, que tiene en cuenta ciertos parámetros como: la velocidad, la carga y la temperatura del motor.

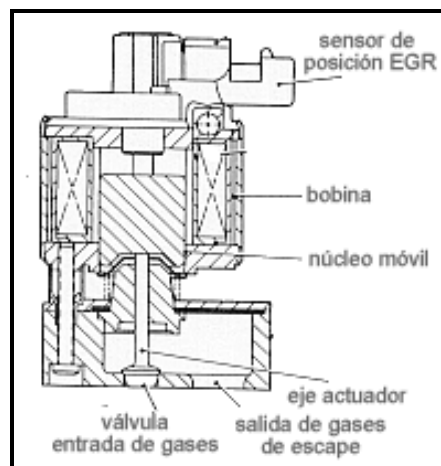


Figura 5.10: Válvula EGR Eléctrica

Fuente: meccanicavirtual.iespana.es/sistema_egr.htm

La reducción de NOx por medio de EGR, incluye:

- La dilución del oxígeno por la baja cantidad encontrada en el EGR,
- Cambio en la capacidad calórica, sin embargo no es significativo.

Teóricamente, la dilución del oxígeno se entiende como que al bajar la concentración de oxígeno, baja la presión parcial de éste, que a su vez baja la propensión de oxidar el N_2 a NO_x durante el proceso de combustión.

Los gases recirculados tienen un bajo contenido de oxígeno por lo que no pueden reaccionar con el combustible. Solamente una parte de la mezcla introducida en el cilindro se inflama, generándose menos calor y descendiendo la temperatura de la cámara de combustión. La combinación del nitrógeno con el oxígeno no puede hacerse por falta de temperatura en los gases.

Sistemas EGR sin Enfriamiento._ Una limitación de los sistemas no enfriados es que éstos elevan la temperatura del múltiple de admisión. Este incremento de temperatura reduce el beneficio del EGR en la formación de los NO_x , pues la formación de los NO_x depende de la temperatura.

La temperatura del múltiple de admisión aumenta, mientras se reduce la densidad del aire fresco, entonces reduce la masa de aire fresco que ingresa a la cámara de combustión y baja la relación aire-combustible. Una baja relación de aire-combustible generalmente incrementa las emisiones de MP por que hay menos oxígeno disponible para la combustión con el carbono. Para superar la relación baja de aire combustible, el turbo cargador puede ser ajustado para incrementar la presión en el múltiple de admisión y recobre el flujo de masa del aire fresco, pero esto requiere mas trabajo del turbo cargador y resulta en un aumento de consumo de combustible.

Sistemas EGR Refrigerado._ El EGR puede enfriarse, sin embargo, el enfriamiento está limitado por la condensación, pues una significativa porción de los gases de escape son vapor de agua. El vapor de agua es corrosivo debido a que el trióxido de azufre, SO_3 , resultado de la combustión rápidamente reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico, H_2SO_4 . Por consiguiente la temperatura del múltiple de admisión en un motor equipado con EGR, incluso un EGR refrigerado, es usualmente más alta que la de un motor sin EGR.

El EGR reduce la relación aire combustible a una carga de motor dada por dos mecanismos:

- Dilución de la carga de aire fresco, e
- Incremento de la temperatura.

Estos mecanismos tienen que ser regulados por una mayor presión del múltiple de admisión, que mantenga la densidad y la relación aire combustible lo suficiente para prevenir el excesivo incremento de MP. Para lograr esto el turbo cargador tendrá que lograr una presión más alta para la utilización del EGR.

Sistemas de mando electrónico más sofisticados son necesarios para el control del sistema EGR y el turbocargador, estos requieren información de las condiciones del motor, como masa de flujo de aire, oxígeno, NOx, o posición de la válvula EGR, necesarias para el control del rango de la válvula EGR o posiblemente un turbocargador de geometría variable (VGT). La turbomaquinaria usada con el EGR probablemente llegara cerca del límite de su capacidad, y el módulo de control del motor necesitará asegurar que no suceda.

La reducción de emisiones es viable con bajo contenido de azufre en el combustible y mayor experiencia con sistemas EGR enfriados. El bajo contenido de azufre permite que el EGR sea usado a más bajas temperaturas por que se reduce la formación de ácido sulfúrico. Adicionalmente la EGR con una trampa de MP puede permitir configuraciones más factibles.

EGR de Alta Presión._

Actualmente los sistemas toman el gas de escape de el múltiple de escape antes de el turbo cargador y recircula a través del enfriador del EGR y lo ingresa en el múltiple de admisión después del compresor y el aftercooler. Este sistema es llamado EGR de presión alta por que los gases son

tomados a alta presión antes del turbocargador y recirculados a alta presión después del aftercooler. Figura 5.11

EGR de Baja Presión._

Éste toma gases de escape luego del turbocargador y después recircula esos gases a través del aftercooler e ingresan antes del compresor. El retorno a baja presión incrementa la eficiencia del sistema EGR por que elimina la dependencia de el sistema de alta presión de las variaciones de presión que existen entre el múltiple de admisión y escape.

Actualmente los sistemas de EGR de baja presión no son recomendables para muchas aplicaciones a las preocupaciones de durabilidad asociadas con recircular el gas que contiene partículas y ácido sulfúrico por el turbocargador, compresor y aftercooler. Las partículas y ácido acumuladas en el aftercooler lo corroen y lo tapan.

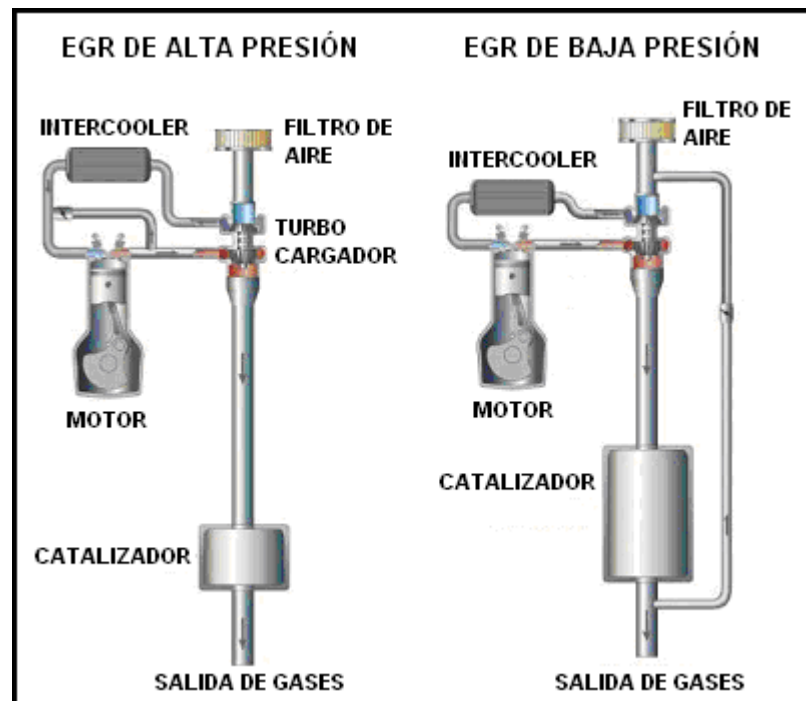


Figura 5.11: EGR de Alta y Baja Presión

Fuente:

www.sttemtec.com/index.php?show=11921_ENG&&page_anchor=http://www.sttemtec.com/p11921/p11921_eng.php

Los sistemas de baja presión de EGR son más ventajosos que los de alta presión. Por ejemplo, los sistemas de baja presión permiten bombear mas EGR por un tramo más ancho con el motor operando con otra configuración de EGR.

La presión del diferencial del EGR en un sistema de EGR de alta presión está limitada y lograr suficiente EGR es un desafío. Las presiones diferenciales requeridas deben ser creadas artificialmente alterando la eficacia del turbocargador o introduciendo otros sistemas alternos, por ejemplo el trabajo de una bomba hecho durante la operación del motor, aumentando el consumo de combustible.

Sin embargo, los EGR de baja presión no dependen de la presión diferencial característica del turbocargador, significa que no requiere el trabajo adicional de una bomba. Por consiguiente los sistemas de presión baja pueden permitir un aumento de EGR, impulsando una economía de combustible, y además una mayor reducción de emisiones. Sin embargo, el potencial de reducción de emisiones se espera que sea modesto y no se espera que sea suficiente para ajustarse a las normas de revisión requeridas. En la Figura 5.12 se puede observar el efecto de la cantidad de gas recirculado en la formación de los NOx.

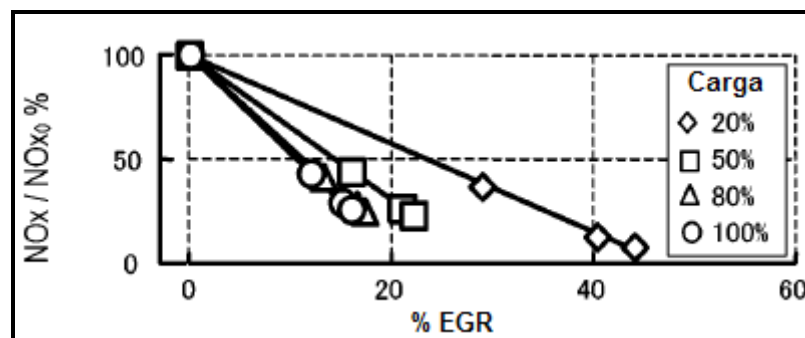


Figura 5.12: Relación entre EGR y NOx

Fuente: Hitoshi YOKOMURA, Susumu KOHKETSU, Koji MORI, 2003, EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine
www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/pdf/2003/15E_03.pdf

- La recirculación de gases de escape interna puede reducir las emisiones de NOx del 4 al 37%.
- La recirculación de gases de escape externa (modelos turboalimentados) pueden recibir reducciones que varían del 25 al 34%. ⁵⁵

Esas reducciones son obtenidas con recirculación de gases de escape del 6.6 al 12 %. Con el 6% de recirculación de gases de escape, las reducciones de NOx van del 10 al 22%. En general, el consumo de combustible es alterado por la recirculación de gases de escape en un 12%.

1

El enfriador EGR proporciona una reducción adicional del 7% en óxidos de nitrógeno comparado con un sistema sin refrigeración. ⁵⁶

Un sistema de recirculación de gases de escape permite disminuir parte de las emisiones de NOx con un impacto mínimo o nulo en el rendimiento energético; esto llevado a un análisis no es fácil de conseguir, uno de los problemas está en la cantidad de gases a recircular, un exceso de gases de escape en el colector de admisión, aumentaría la emisión de carbonilla además puede ser negativo respecto a la vida útil del motor, la cual puede verse disminuida por contaminación interna y desgaste.

El sistema EGR de baja presión es más apropiado para aplicaciones de modificación porque no requiere modificaciones del motor⁵⁷. Sin embargo este requiere un combustible con bajo porcentaje de azufre, así como trampas de MP para la recirculación por el turbo, aftercooler y compresor mientras en el otro caso se requiere de un mecanismo o bomba para contrarrestar el efecto de la presión diferencial.

⁵⁵ www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf

⁵⁶ www.pacocostas.com/not180.html

⁵⁷ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17730.html

Sistema EGR en un Motor Turbo cargado con Aftercooler._

En un motor turbo cargado es difícil introducir EGR en cargas altas debido a la alta presión en el aire de admisión. Los sistemas EGR recirculan el gas de escape utilizando la presión diferencial entre la turbina y el compresor. Este método de EGR necesita que la presión de la turbina sea mayor que la presión del compresor, $\Delta P > 0$.

En un motor turbo cargado sin embargo, $\Delta P > 0$ esta limitada a la baja región de carga, mientras que en la alta región de carga ΔP es menor que cero y la EGR es imposible. Varios métodos han sido propuestos para cambiar la condición de ΔP . Por ejemplo, algunos de esos sistemas incrementan la presión de la turbina obteniendo un $\Delta P > 0$ eso significa que el ahogo de la válvula de escape o un turbocargador de geometría variable, considerando que otro sistema de reducción de presión para obtener $\Delta P > 0$ es de una válvula aceleradora de succión o un venturi; su esquema se puede ver en la Figura 5.13.

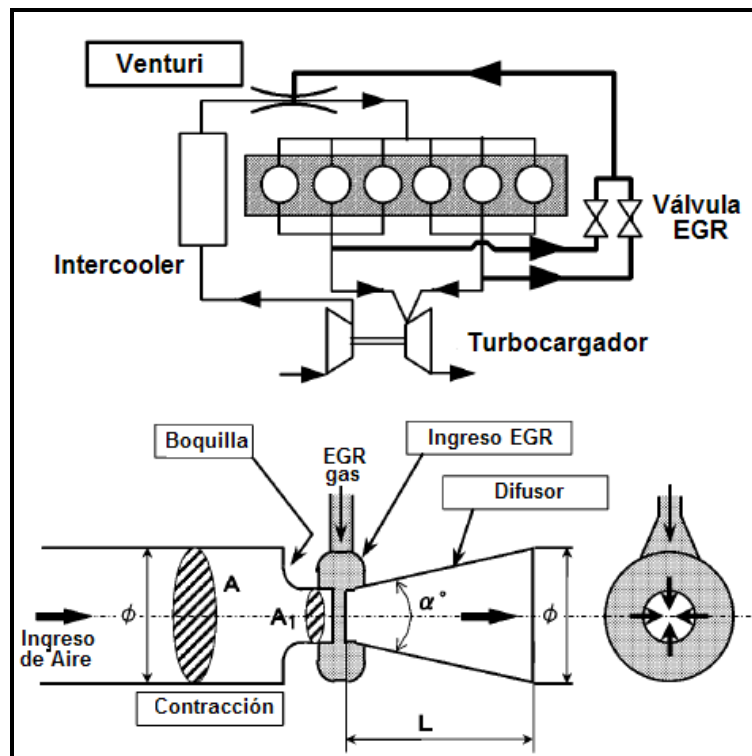


Figura 5.13: Esquema del sistema EGR con Venturi

Fuente: Hitoshi YOKOMURA, Susumu KOHKETSU, Koji MORI, 2003, EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine
www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/pdf/2003/15E_03.pdf

En este sistema la circulación de gases de escape hacia el múltiple de admisión se realiza por el cambio de presión originado por el efecto venturi en el ingreso de aire; en la Figura 5.14 se puede observar un esquema de la variación de presión.

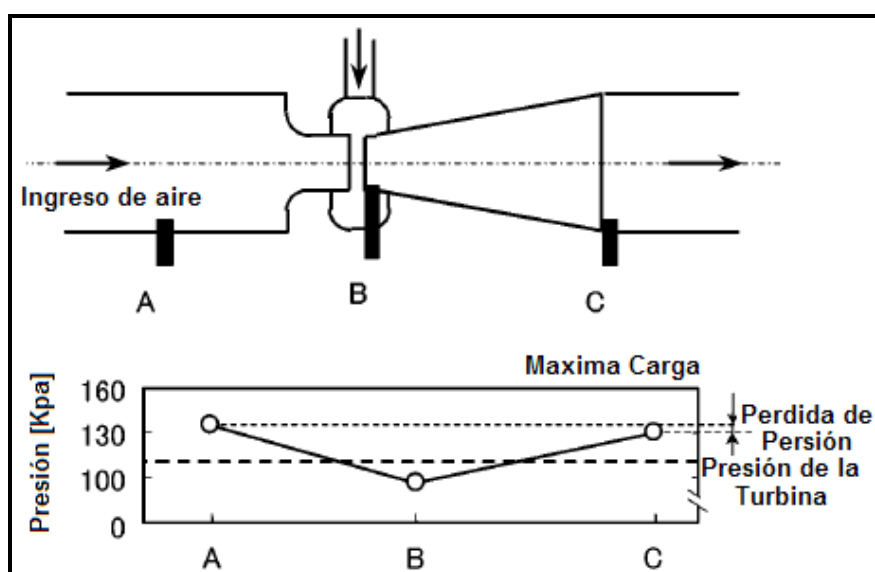


Figura 5.14: Distribución de Presión en el Sistema EGR

Fuente: Hitoshi YOKOMURA, Susumu KOHKETSU, Koji MORI, 2003, EGR System in a Turbocharged and Intercooled Heavy-Duty Diesel Engine
www.mitsubishi-motors.com/corporate/about_us/technology/review/e/pdf/2003/15E_03.pdf

Un sistema de recirculación de gases, EGR, de alta presión por venturi es una de las posibles alternativas para la reducción de las concentraciones de óxidos de nitrógeno, NO_x, en los motores ALCO 251 – F.

5.1.1.8 Retardo de la Inyección._

La inyección del combustible en la mayoría de los motores de ignición por compresión comienza un poco antes de que el pistón alcance el punto muerto superior (PMS), durante el tiempo de compresión. Si la inyección se

retarda, la mayor parte de la combustión se realiza cuando el pistón comienza su movimiento hacia el punto muerto inferior (PMI), lo que ocasiona la reducción tanto de la magnitud como de la duración del pico de temperatura, presión y tiempo de residencia y consecuentemente la disminución de la formación de óxidos de nitrógeno (NOx).

El tiempo de inyección puede ser retardado en cerca de 4 grados con respecto a las especificaciones del constructor sin que cause problemas de operación. El retardo de 4 grados significa una reducción de NOx entre el 15% y el 25 % aunque esto signifique un incremento en el consumo de combustible. La reducción de la cantidad de NOx por grado de retardo decrece cuando se incrementa los niveles de retardo.⁵⁸

La efectividad del control del NOx mediante el retardo del tiempo de ignición varía considerablemente entre los motores de inyección directa o indirecta. La aplicación de esta técnica a los motores de inyección directa generalmente resulta en una significativa reducción del NOx y un pequeño incremento en el consumo de combustible. En los motores de inyección indirecta la reducción es menor y un gran incremento en el consumo de combustible.

Desafortunadamente, esta reducción incrementa las emisiones de MP y reduce significativamente el rendimiento del combustible. Por ejemplo, las emisiones de NOx pueden disminuirse en 45% mediante el retardo de inyección en 8 grados (aproximadamente 2%), pero esto resulta en una pérdida del 7% del rendimiento del combustible.⁵⁹

Además las altas temperaturas en el escape reduce la vida útil de las válvulas de escape y turbocargador.⁶⁰

El intervalo en el que puede tener lugar la inyección se reduce a una décima de vuelta del eje cigüeñal, o sea unos 36°.⁶¹

⁵⁸ www.epa.gov/ttn/catc/dir1/fnoxdocs.pdf

⁵⁹ Environmental Protection Agency

⁶⁰ www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdogs/b03s03.pdf

Además este fenómeno puede producir golpeteo o detonación, que aumenta a medida que lo hace el retardo a la inflamación.

Los motores ALCO 251-F son de inyección directa (la inyección se realiza directamente en el cilindro), la bomba de inyección de combustible es de embolada constante y es operada desde un eje de levas, Figura 5.15 y Anexo 10, a través del impulsor ajustable, el eje de control está situado en un compartimiento a lo largo del bloque de cilindros, a cada lado del motor y está formado a base de secciones en las que se montan palanquillas a resorte, soportes y mangos de acoplamiento.⁶²



Figura 5.15: Eje de Levas

El tiempo de inyección en estos motores esta adelantado con $27^{\circ}30'$, recomendado por el fabricante, como se muestra en la Figura 5.16, para retrasar el tiempo es necesario girar el eje de levas cuatro grados para que funcione con un adelantamiento de $24^{\circ}30'$, pero en el mismo eje también están acopladas las levas de control de apertura y cierre de válvulas de admisión y escape por lo que no es posible realizar este retraso en el tiempo

⁶¹ ADAMS Orville, Motores Diesel. p.67

⁶² Capitulo II

de inyección a menos que se construya un nuevo eje de levas con el ángulo necesario.

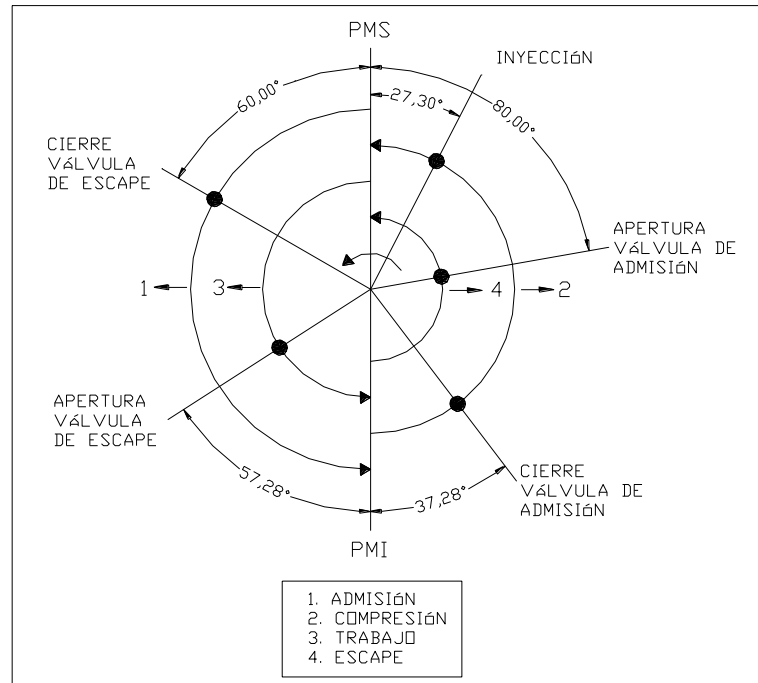


Figura 5.16: Diagrama de Momentos de Apertura y Cierre de Válvulas, Motor ALCO 251-F

Fuente: Manual de Mantenimiento ALCO

5.1.1.9 Turbo Alimentación en Conjunción con Enfriamiento Posterior

La sobrealimentación o turbo alimentación comprime el aire de combustión, lo cual significa una masa de aire más grande en la cámara de combustión, que permite que más combustible sea inyectado a la cámara de combustión, lo que ocasiona un mayor rendimiento de la energía y un poco más de incremento en la eficiencia del motor.

Un turbocargador es básicamente una bomba de aire diseñada para operar utilizando la energía de los gases de escape originalmente desperdiciadas por los motores no turbocargados. Estos gases hacen girar el rotor de la turbina acoplado a través de un eje al rotor del compresor, que al girar aspira un gran volumen de aire filtrado y lo pasa comprimido al motor.

A la máxima potencia, la sobrealimentación o turbo alimentación ocasiona que los motores generen mayor cantidad de NOx por hora, que el mismo motor sin sobrealimentación o turbo alimentación. Sin embargo las emisiones de NOx por unidad de potencia producida serán un poco menor.

La compresión del aire de combustión calienta el aire, lo cual tiende a incrementar el pico de temperatura, sin embargo el efecto del calor que se pierde por el aire adicional en la cámara de combustión, combinado con el incremento de la eficiencia del motor tiende a resultar en una pequeña disminución en la cantidad de NOx por unidad de energía producida.

Es necesario señalar que una sobre presión excesiva de aire en el múltiple de admisión puede originar uno de los siguientes problemas al motor:

- Rotura de pistón y anillos.
- Daños en los descansos del cigüeñal.
- Torcedura de bielas.
- Flexión del cigüeñal.
- Daños en la culata.
- Sobrecarga térmica de válvulas de escape ("Quemaduras") y asientos.
- Incapacidad en los sistemas de refrigeración y lubricación para evacuar el mayor calor liberado en la combustión, y mantener la temperatura del motor dentro de valores aceptables.

Reducciones del NOx pueden ocurrir si se reduce la temperatura del aire de combustión. En los motores con sobrealimentación o turbo alimentación esto puede ser logrado mediante el uso de enfriamiento posterior o "aftercooler", llamado también "intercooler". El aftercooler, o post enfriador, utiliza un intercambiador de calor para enfriar el aire de combustión comprimido y calentado, antes de ser introducido a la cámara de combustión.

Dichos intercambiadores pueden ser del tipo aire/aire, si el aire se refrigera por la circulación de otro aire, o aire/agua, si se refrigera mediante el paso de un líquido.

Reducciones del NOx asociadas con el after cooling fluctúan entre el 3% y el 35%, con mayores reducciones si se alcanza mayores reducciones de temperatura. Este sistema implica además la reducción de costos de operación por el incremento de la eficiencia del motor.⁶³

Los motores ALCO están equipados con un aftercooler agua/aire que consta de un grupo de tubos con aletas refrigerantes, instalados en la entrada de aire del soporte de sobrealimentador. Su finalidad es enfriar el aire que entra en el motor procedente del sobrealimentador.

Anteriormente el agua iba desde la salida de la bomba de los radiadores "Marley" hacia la entrada del aftercooler y para regresar nuevamente a la bomba de circulación.

En la actualidad se eliminó los radiadores y se trabaja en un sistema cerrado de refrigeración para todo el motor con un aircooler, en la Figura 5.17 se muestra un esquema del sistema, éste ahorra las pérdidas de agua que tenía el radiador, ya que era un sistema abierto, además refrigera de mejor manera el aire del aftercooler y mantiene al aceite en el rango de temperatura necesario. El rango de temperatura de funcionamiento del motor es de 600 a 700 °F, Anexo 11.

Se realizó un monitoreo de emisiones gaseosas en la Estación de Papallacta en donde el sistema de aircooler es diferente a la Estación de Lago Agrio, este enfría solamente el aftercooler, el monitoreo se lo realizó para determinar la influencia de la temperatura del aire a la salida del aftercooler en la concentración de las emisiones gaseosas, haciendolo funcionar con y sin aircooler.

La temperatura a la salida del aftercooler sin aircooler es de 211 °F, mientras que la temperatura a la salida del aftercooler con aircooler es de

⁶³ www.editec.es/trasporte3/edición/081_01.php?id=557

206 °F y las concentraciones de NO_x se mantienen en los mismos niveles.

Anexo 12

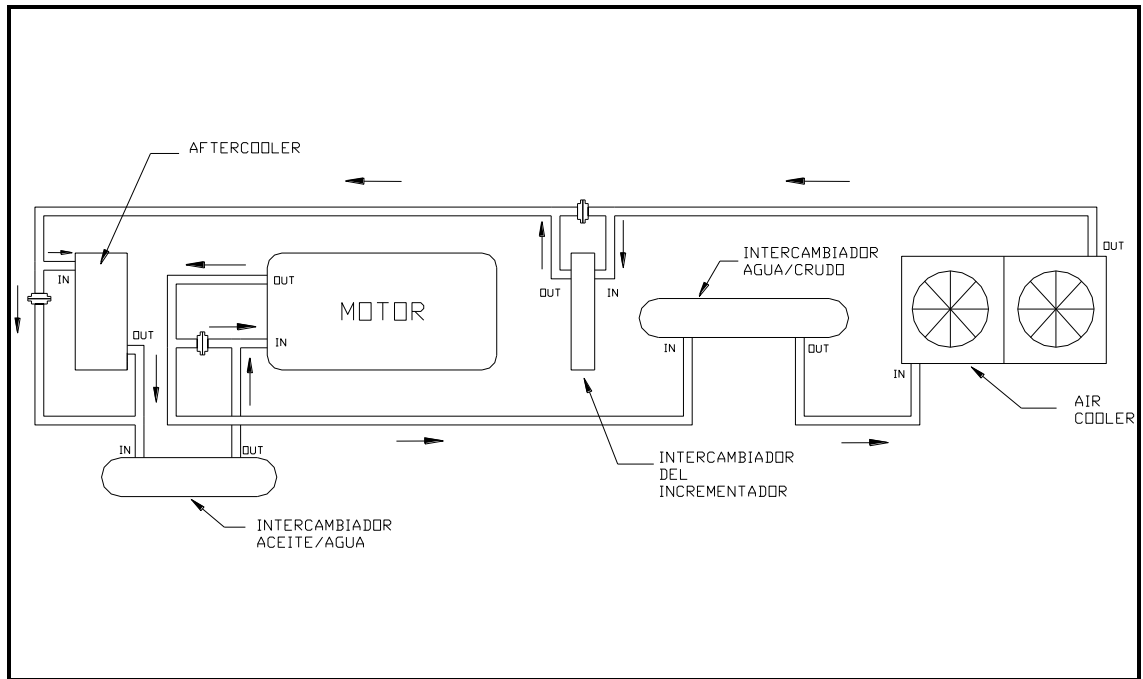


Figura 5.17: Esquema de Circulación de Agua

5.1.2 MEDIDAS SECUNDARIAS

En la Tabla 5.6, “Medidas Secundarias”, se muestran las alternativas para cada tipo de contaminante.

Tabla 5.6: Medidas Secundarias

Contaminante	Alternativas para Minimización	Eficiencia
COVs	Adsorción.	95 - 98 %
	Biofiltración.	*
	Combustión por Antorcha.	> 98 %
	Condensación.	> 90 %
	Incineradores.	*
MP	Ciclones o Separadores Centrífugos.	**
	Filtros de Tela.	99%
	Precipitadores Electrostáticos.	**
	Torre de Limpieza Húmeda.	40 - 99 %
SO_x	Absorción.	90 - 99 %
NO_x	Reducción Catalítica No Selectiva, NSCR	***
	Lean NO _x Trap (Trampa de NO _x)	40 - 50 %
	Lean NO _x Trap sobre Catalizadores Zeolíticos	****
	Reducción Catalítica Selectiva, SCR.	70 - 90 %
	Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR.	30 - 50 %
	Plasma No Térmico.	****

COVs: Compuestos Orgánicos Volátiles * Depende de la concentración y temperatura.
 MP: Material Particulado ** Depende del tamaño de la partícula.
 SO_x: Óxidos de Azufre **

NOx:

Óxidos de Nitrógeno

No aplicable

Tecnología en desarrollo.

5.1.2.1 Controles de Compuestos Orgánicos Volátiles, COVs

Entre los controles para COVs, el más factible para la aplicación en motores de combustión interna es el sistemas de adsorción.

5.1.2.1.1 Adsorción

La adsorción se emplea para remover compuestos orgánicos volátiles (COVs) de corrientes de gas con baja o media concentración. La adsorción misma es un fenómeno en donde las moléculas de gas que pasan a través de un lecho de partículas sólidas son selectivamente retenidas ahí por fuerzas de atracción, las cuales son más débiles y menos específicas que las de las uniones químicas.

Durante la adsorción, una molécula de gas emigra desde la corriente de gas hacia la superficie del sólido donde es retenida por atracción física, liberando energía el “calor de adsorción”, el cual excede o iguala al calor de condensación. Algunos gases forman verdaderas uniones químicas con los grupos adsorbentes de la superficie. A este fenómeno se le conoce como “quimisorción”.

La mayoría de los gases (“adsorbatos”) pueden ser removidos (“desorbidos”) del adsorbente calentando hasta una temperatura suficientemente alta, usualmente por medio de vapor o con gases calientes de combustión, o reduciendo la presión a un valor suficientemente bajo (desorción por vacío).

Los adsorbentes utilizados en gran escala incluyen al carbón activado, sílica gel, alúmina activada, zeolitas sintéticas, tierra de fuller y otras arcillas. Los adsorbentes son sólidos porosos, es decir sólidos con poros, cavidades, canales e intersticios, que son más profundos que anchos.

Las geometrías más frecuentes de los poros son:

- Poros cilíndricos (por ejemplo, en alúmina y óxido de magnesio).
- Poros en forma de rendija o hendidura (en carbones activados y arcillas).
- Espacios o huecos entre esferas de sólido conectadas (en sílice y otros sólidos obtenidos a partir de geles).
- Poros en forma de bote de tinta (ink-bottle shaped): el cuerpo del poro es mayor que su boca).
- Poros en forma de embudo (funnel shaped): contrario al anterior.

Se reconoce tres tipos de poros atendiendo a su tamaño:

Macroporos > 50 nm

Mesoporos 2 - 50 nm

Microporos < 2 nm

En la Figura 5.18 se muestra un esquema de la sección de corte de un sólido poroso.

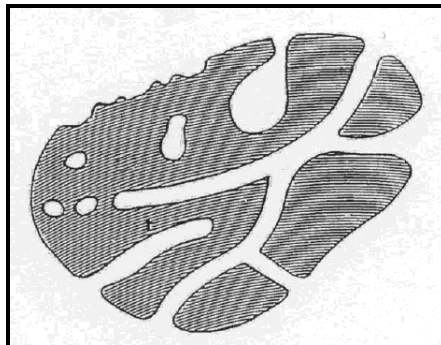


Figura 5.18: Esquema de la sección de corte de un sólido poroso

Fuente: Environmental Protection Agency, 1999, Zeolita un adsorbente versátil de Contaminantes del Aire, www.epa.gov/ttn/catc

La Zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio, y oxígeno, tiene una porosidad natural debido a que tiene una estructura cristalina con ventanas, jaulas, y superjaulas. Figura 5.19

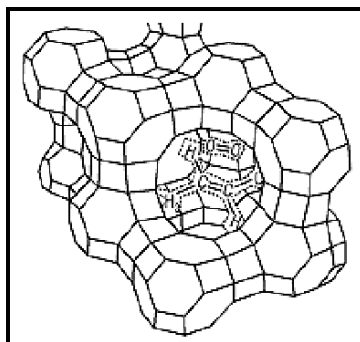


Figura 5.19: Estructura de la zeolita

Fuente: Environmental Protection Agency, 1999, Zeolita un adsorbente versátil de Contaminantes del Aire, www.epa.gov/ttn/catc

Los carbones activados tienen como característica esencial la presencia de una importante porosidad, esto hace que tengan una elevada capacidad de adsorción tanto de gases como líquidos, los carbones activados poseen propiedades de tamiz molecular debido a sus poros en forma de rendija, entre las propiedades más importantes se encuentran:

- Excelente selectividad,
- Alta velocidad y capacidad de adsorción,
- Alta resistencia a ataques químicos tanto ácidos como básicos.

Los carbones activados tienen ciertas ventajas sobre las zeolitas como por ejemplo en la separación de CO_2 y CH_4 en presencia de H_2O . Es el adsorbente más eficiente ya que alcanza altas eficiencias de remoción, entre 95 y 98%.⁶⁴

En la Figura 5.20 se incluye experimentos realizados entre diferentes adsorbentes como son: fibra de carbón activada (FCA), fibra de carbón original (FC) y alúmina. Se observa que solo el material con una porosidad desarrollada (FCA) experimenta un incremento de peso considerable al aumentar la temperatura y que verifica esta ganancia en peso.

⁶⁴ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-1ch1-s.pdf

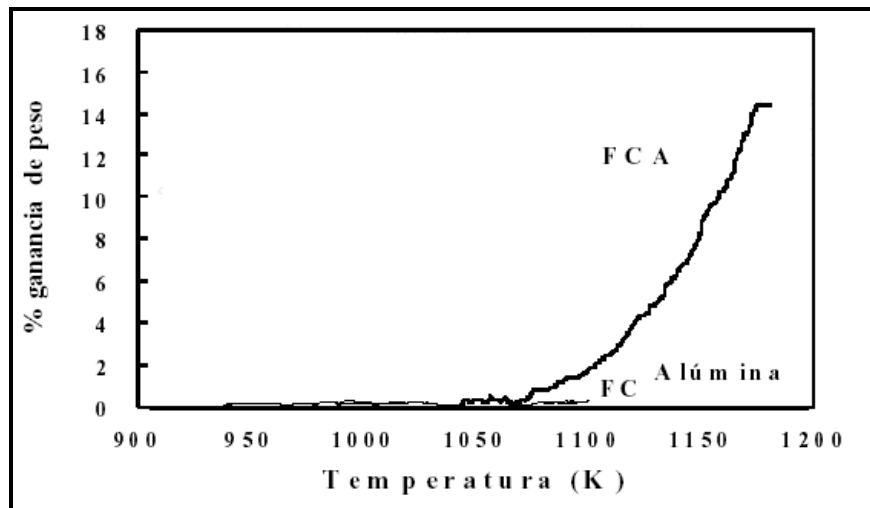


Figura 5.20: Porcentaje de ganancia en peso por depósito de carbono durante la descomposición de metano frente a la temperatura.

Fuente: Miguel Ángel de la Casa Lillo, Universidad de Alicante, 1999, Fibras de carbón y carbones activados

En la recolección de gases se utilizan cinco tipos de equipos de adsorción:

1. Lechos fijos regenerables;
2. Latas desechables/regenerables;
3. Adsorbedores de traveling bed (lecho movable);
4. Adsorbedores de lecho fluidizado; y
5. Casas de bolsas cromatográficas.

De éstos, los más comúnmente utilizados en el control de la contaminación del aire son los tipos de lecho fijo y de recipiente de carbón desechable.

Unidades de Lecho Fijo._

En las unidades de lecho fijo el tamaño puede ser diseñado para controlar corrientes continuas que contienen COVs sobre un amplio rango de relaciones de flujo, que van desde varios cientos hasta varios cientos de miles de pies cúbicos por minuto (ft³/min).

Pueden ser operados ya sea de modo intermitente o continuo. En la operación intermitente, los adsorbedores remueven COV durante un tiempo especificado (el “tiempo de adsorción”), el cual corresponde al tiempo mediante el que la fuente controlada está emitiendo COV. Después de que

el adsorbedor y la fuente son apagados, la unidad comienza el ciclo de desorción durante el cual el COV capturado es removido del carbón.

Este ciclo a la vez, consiste de tres pasos:

1. Regeneración del carbón por calentamiento, generalmente pasando vapor a través del lecho en dirección opuesta al flujo del gas;
2. Secado del lecho, con aire comprimido o con un ventilador; y
3. Enfriamiento del lecho hasta su temperatura de operación por medio de un ventilador. (En la mayoría de los diseños, el mismo ventilador puede utilizarse por ambos, el secado y el enfriamiento del lecho).

Al final del ciclo de desorción, la unidad permanece en pausa hasta que la fuente arranca de nuevo.

Unidades con Recipientes de Carbón Desechables._

Los adsorbedores tipo recipiente de carbón desechable originalmente se refieren a envases retornables relativamente pequeños, tales como tambores de 55 galones. Los adsorbedores tipo recipiente de carbón desechable difieren de las unidades de lecho fijo, en que están normalmente limitados a controlar corrientes de gas intermitentes, de bajo volumen (típicamente 100 ft³/min, máximo).

Los recipientes de carbón desechables no son diseñados para la desorción en el sitio. Sin embargo, el carbón puede ser regenerado en una planta central. El término recipiente de carbón desechable, está pasando a ser algo equívoco, ya que mucho del crecimiento en la industria se lleva a cabo en recipientes más grandes sin capacidades de regeneración.

Una vez que el carbón alcanza un cierto contenido de COV, se para la unidad, se reemplaza con otra y se desecha, se regresa a una planta de reclamación o se regenera en una planta central.

En realidad, una práctica pobre de operación puede ocasionar que el recipiente de carbón desechable permanezca conectada hasta que el carbón esté cerca de o en saturación. Esto es porque:

1. El carbón (y frecuentemente el recipiente), probablemente será desechado, así que hay la tentación de operar hasta que el carbón está saturado; y
2. Contrario a las unidades de lecho fijo, cuyas concentraciones de salida de COV son usualmente monitoreadas continuamente, los recipientes de carbón desechables usualmente no son monitoreadas.

En equilibrio, la cantidad de gas que es adsorbido sobre el carbón activado, es una función de la temperatura y presión de adsorción, de las especies químicas siendo adsorbidas y de las características del carbón, tales como el tamaño de partícula del carbón y la estructura de los poros. Para una combinación dada de adsorbente-COV a una temperatura dada, puede construirse una isoterma de adsorción, la cual relaciona la masa de adsorbato por unidad de peso de adsorbente (“adsortividad de equilibrio”), a la presión parcial del COV en la corriente del gas.

La adsortividad se aumenta con incrementos de la presión parcial del COV y decrece con aumentos de temperatura.

En la Figura 5.21 está trazada una familia de isotermas de adsorción teniendo la forma típica de la adsorción sobre carbón activado.

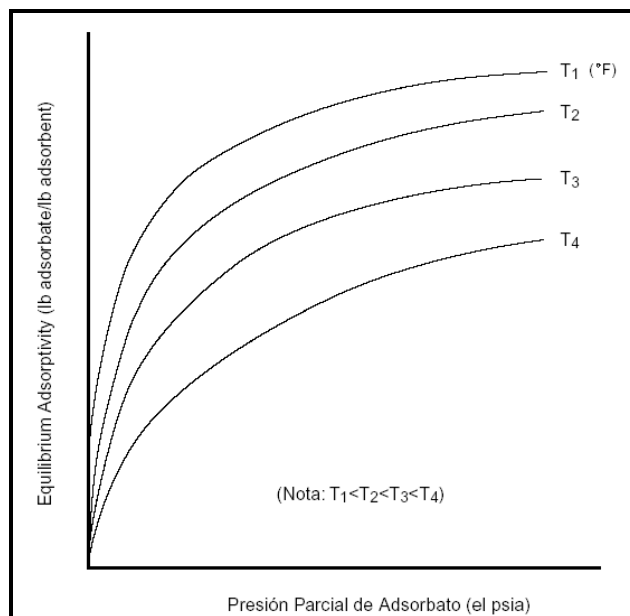


Figura 5.21: Tipo de Isotherma de Adsorción para Adsorbatos Hipotéticos

Fuente: www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-1ch1-s.pdf

Generalmente, los COVs con presiones de vapor más bajas desplazarán a aquellos con presiones de vapor más altas, resultando en que los anteriores desplazan a los últimos previamente adsorbidos.

Así, durante el curso del ciclo de adsorción, la capacidad del carbón por un constituyente de presión de vapor más alta decrece. Este fenómeno debe ser considerado al determinar el tamaño del adsorbedor.

5.1.2.2 Controles de Material Particulado, MP

Entre los controles para MP, el más factible para la aplicación en motores de combustión interna son los Filtros de Tela.

5.1.2.2.1 Filtros de Tela.

Una unidad de filtro de tela consiste de uno o más compartimientos aislados conteniendo hileras de bolsas de tela, en la forma de tubos redondos, planos o formados, o de cartuchos plizados. El gas cargado de partículas

pasa generalmente a lo largo del área de las bolsas y luego radialmente a través de la tela. Las partículas son retenidas en la cara de las bolsas corriente arriba y el gas limpio es ventilado hacia la atmósfera. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre períodos de filtrado relativamente largos y períodos cortos de limpieza. Durante la limpieza, el polvo que se ha acumulado sobre las bolsas es removido del área de la tela y depositado en una tolva para su disposición posterior.

Los filtros de tela recolectan partículas de tamaños que van desde las submicras hasta varios cientos de micras de diámetro, con eficiencias generalmente en exceso al 99 o 99.9 por ciento. La capa de polvo o plasta recolectada sobre la tela es la razón principal de esta alta eficiencia. En algunas configuraciones pueden acomodarse rutinariamente temperaturas de gas hasta cerca de 500°F, con picos hasta cerca de 550°F.⁶⁵

Debido a que las partículas tienen diferentes formas y densidades, el tamaño de la partícula se expresa usualmente como el diámetro aerodinámico. El diámetro aerodinámico de una partícula es el diámetro de una esfera con la densidad del agua que se asienta en aire en reposo a la misma razón que la partícula en cuestión. La distribución del tamaño se mide usualmente usando un impactador de cascada, el cual separa las partículas por su diámetro aerodinámico en placas. Se mide la masa de las partículas en cada placa de impacto.

En la Figura 5.22 se presenta una distribución típica de tamaño de partícula de MP, la masa acumulativa contra el tamaño de la partícula.

⁶⁵ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch1-s.pdf

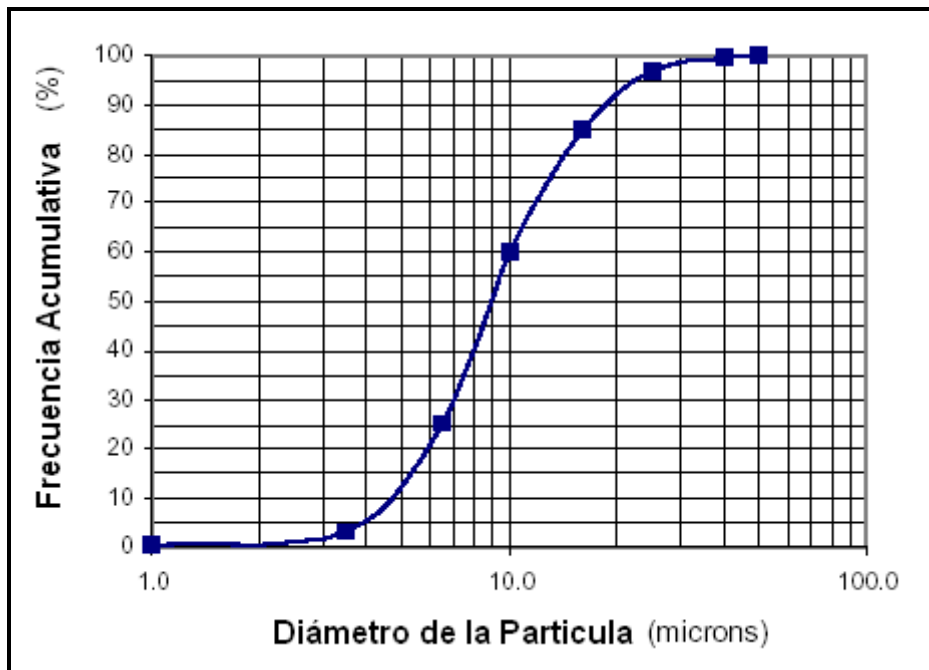


Figura 5.22: Distribución del tamaño de partícula para una fuente de MP

Fuente: www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch2-s.pdf

La mayor parte de la energía utilizada para operar el sistema aparece como caída de presión a través de las bolsas, y de las partes y conductos asociados. Los valores típicos de la caída de presión del sistema varía desde cerca de 5 hasta 20 pulgadas de agua. Los filtros de tela se utilizan donde se requiere una alta eficiencia de recolección de partículas.

Los filtros de tela pueden ser categorizados por varios medios, incluyendo:

1. Tipo de limpieza
 - Por agitación,
 - Aire a la inversa,
 - Propulsión a chorro

2. Dirección del flujo de gas

- Desde el interior de la bolsa hacia el exterior o viceversa
3. Localización del ventilador del sistema
- De succión
 - De presión
4. Tamaño
- Cantidad baja de flujo de gas.
 - Cantidad mediana de flujo de gas.
 - Cantidad alta de flujo de gas.

De estos cuatro enfoques, el método de limpieza es probablemente la característica más distintiva.

5.1.2.3 Controles de Óxidos de Azufre, SO_x

5.1.2.3.1 Absorción

La absorción es un proceso donde uno o más componentes solubles de una mezcla de gases están disueltos en un líquido (un solvente). El proceso de absorción puede categorizarse como físico o químico. La absorción física ocurre cuando el compuesto absorbido se disuelve en el solvente, la absorción química ocurre cuando el compuesto absorbido y el solvente reaccionan.

Líquidos comúnmente usados como solventes incluyen al agua, aceites minerales, aceites de hidrocarburos volátiles y soluciones acuosas.

Las eficiencias de remoción de los absorbedores de gas varían para cada sistema solvente contaminante y con el tipo de absorbedor utilizado. La mayoría de los absorbedores tienen eficiencias en exceso a 90% y los absorbedores de torres empacadas alcanzan eficiencias tan altas como 99.9% para algunos sistemas solvente-contaminantes.⁶⁶

⁶⁶ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs5-2ch1-s.pdf

La conveniencia de la absorción de gas como un método de control de la contaminación depende generalmente de los siguientes factores:

1. Disponibilidad del solvente adecuado;
2. Eficiencia de remoción requerida;
3. Concentración del contaminante en el vapor de entrada;
4. Capacidad requerida para manejar el gas residual, y,
5. Valor de recuperación de los contaminantes o del costo de disposición del solvente gastado.

El solvente seleccionado para remover a los contaminantes debe tener una solubilidad alta para el gas, baja presión de vapor y debe ser relativamente barato. El agua es el solvente más común utilizado para remover contaminantes inorgánicos.

El contaminante se difunde desde el gas hacia el líquido cuando el líquido contiene menos que la concentración de equilibrio del componente gaseoso. La diferencia entre la concentración real y la concentración al equilibrio, proporciona la fuerza impulsora para la absorción.

Un absorbedor de gas diseñado apropiadamente, proporcionará contacto completo entre el gas y el solvente, para facilitar la difusión de los contaminantes. Funcionará mejor que un absorbedor diseñado pobremente.

Tipos de Equipo de Absorción._

Los dispositivos que se basan en principios de absorción incluyen:

- Torres empacadas,
- Columnas de platos (bandejas),
- Torres de limpieza por venturi y
- Cámaras de aspersion.

Los tres últimos dispositivos son posibles alternativas para minimización de material particulado.

Torres Empacadas._

Las torres empacadas son columnas llenas de materiales de empaque que proporcionan un área de superficie grande para facilitar el contacto entre el líquido y el gas. Las torres absorbedoras empacadas pueden alcanzar eficiencias de remoción más altas, manejar razones de líquido más altas y tener requerimientos de consumo de agua relativamente más bajos que otros tipos de absorbedores de gas. Los costos de instalación, de operación y de disposición de agua residual pueden ser mayores para absorbedores de lecho empacado que para otros absorbedores.

En la Figura 5.23 se muestra un diagrama esquemático de una torre empacada a contracorriente; el empaque está separado en dos secciones.

Los materiales de empaque proporcionan una superficie húmeda grande para la corriente de gas, maximizando el área disponible para la transferencia de masa. Los materiales de empaque se encuentran disponibles en una variedad de formas, cada una teniendo características específicas con respecto al área de superficie, caída de presión, peso, resistencia a la corrosión y costo. En ambientes adversos, la vida del empaque puede ser tan corta como de 1 a 5 años debido a la corrosión, el ensuciamiento y al rompimiento.

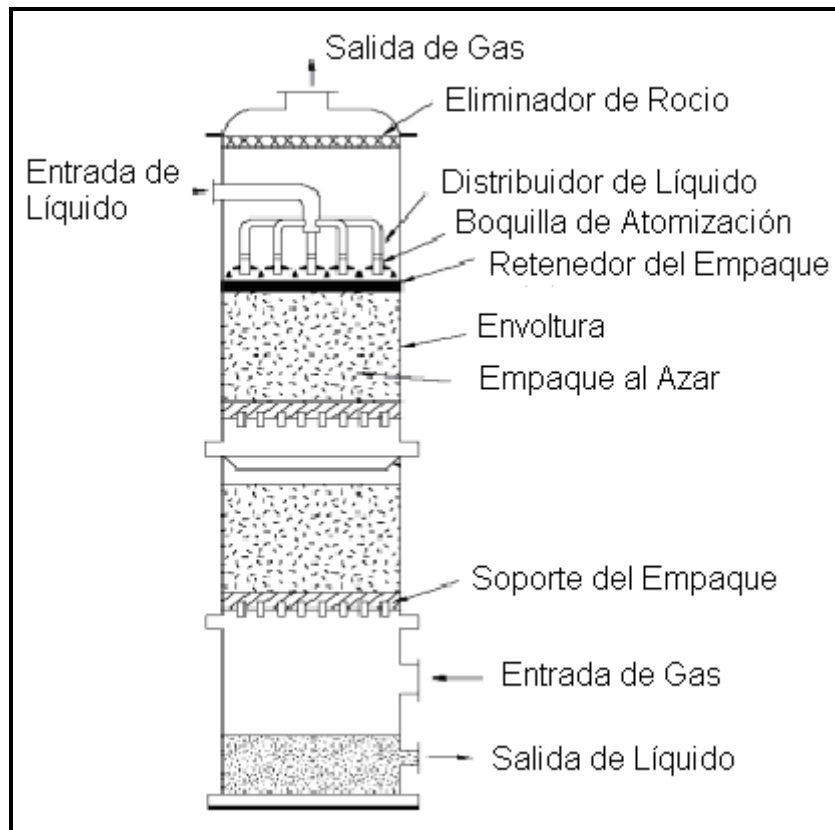


Figura 5.23: Torre Empacada Para Absorción de Gas

Fuente: www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs5-2ch1-s.pdf

5.1.2.4 Controles de Óxidos de Nitrógeno, NO_x

5.1.2.4.1 Reducción Catalítica No Selectiva, NSCR._

Los catalizadores NSCR de tres vías, actúan sobre las emisiones de NO_x, CO y COV; mediante reacciones de oxidación y reducción, transformando a los mismos en compuestos no tóxicos: Nitrógeno y Agua y Dióxido de Carbono.

La formulación incluye una serie de sustancias activas como óxidos de aluminio, metales nobles (catalíticamente activos): Platino, Rodio, Paladio, y promotores o retardadores específicos, que aumentan o retardan la acción catalítica de los anteriores, sobre determinadas reacciones. Las reacciones

de oxidación se catalizan por medio de platino paladio y la acción reductora mediante el rodio.

El NSCR es usado en motores que trabajan con mezcla rica debido a que éste trabaja con la presencia de CO y HC en el gas de escape del motor, el catalizador convierte el NOx en nitrógeno y oxígeno.

Para que las eficiencias de la conversión sean altas, la relación aire combustible debe permanecer en un rango bastante estrecho aproximándose a la relación estequiométrica $\lambda=1$. La eficiencia de conversión de NOx disminuye dramáticamente cuando el motor trabaja con un régimen de mezcla pobre, mientras la eficiencia de conversión de HC y CO también es algo reducida.

Los motores que funcionan con mezcla pobre son caracterizados por un alto contenido de oxígeno en el gas de escape, esto hace imposible usar sistemas NSCR. En la Figura 5.24 se observa el rendimiento del catalizador NSCR para la conversión de NOx.

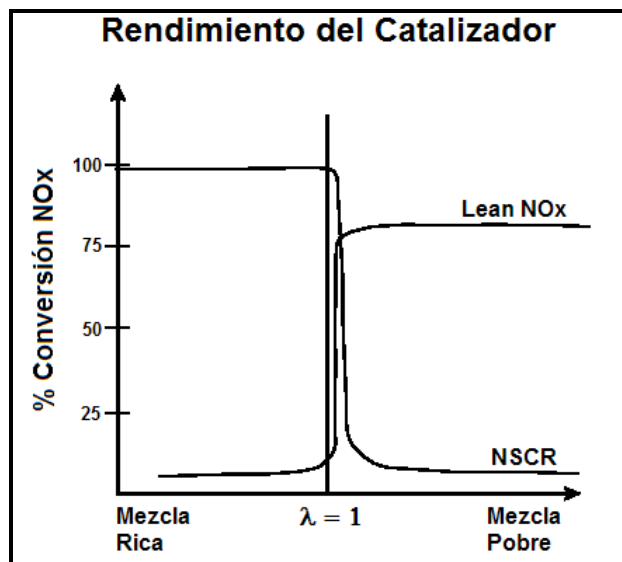
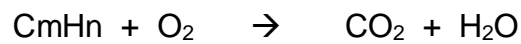
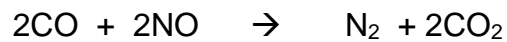


Figura 5.24: Rendimiento del Catalizador NSCR

Fuente: Manufacturers of Emission Controls Association, Emission Control Technology for Stationary Internal Combustion Engines, 1997, www.meca.org/jahia/Jahia/engineName/filemanager/pid/229/icengine.PDF?actionre q=actionFileDownload&fileItem=243

Reacciones Químicas

Estas son altamente exotérmicas (liberan calor). Las reacciones químicas más importantes son:



Estas reacciones son las que tienen lugar en los catalizadores de oxidación, y mediante ellas se obtienen grandes reducciones de HC y CO. Si el catalizador es de tres vías también se eliminan los óxidos de nitrógeno.

Los Figura 5.25 muestra las reducciones de contaminantes utilizando catalizador. En el primer gráfico se observa las medidas efectuadas antes del catalizador y en el segundo las mediciones efectuadas luego del catalizador.

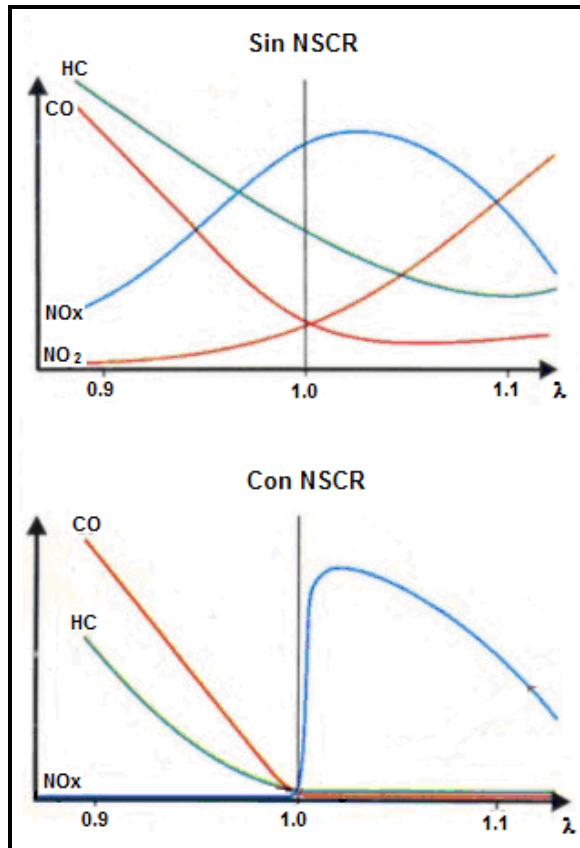


Figura 5.25: Reducciones Contaminantes utilizando un NSCR

Fuente: mecanicavirtual.iespana.es/sistema_egr.htm

Los catalizadores NSCR no son aplicables en los motores ALCO 251-F debido a que estos funcionan con exceso de aire en el caso de los ubicados en la estación de bombeo No.º1 de Lago Agrio el exceso es del 180%, consecuentemente la relación $\lambda = 2.8$.

5.1.2.4.2 Lean NOx Trap (Trampas de NOx)._

Son catalizadores con formulación y estructuras que permiten reducir emisiones de NOx en condiciones ricas de oxígeno en los gases de escape de los motores diesel. Una cantidad pequeña de combustible (equivalente a aproximadamente un 3% del consumo de combustible) puede inyectarse al catalizador para proporcionar los hidrocarburos adicionales necesarios para reducir emisiones de NOx significativamente y al mismo tiempo reducir las emisiones de CO y de HC.

En la Figura 5.26 se observa el mecanismo de reducción del NOx, en la primera fase existe un almacenamiento pobre como nitrato NO₃, para luego pasar a una reducción estequiométrica de N₂ con la ayuda de una pequeña cantidad de combustible inyectado.

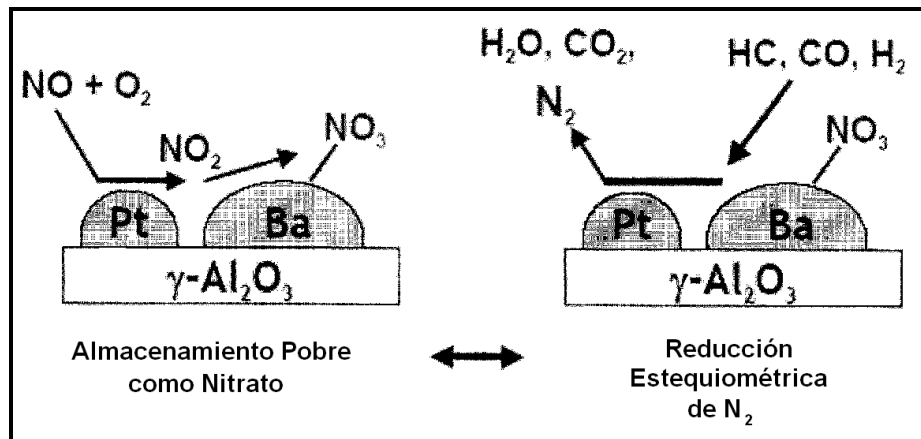


Figura 5.26: Mecanismo del Lean NOx

Fuente: Wachs Israel, Automotive Catalytic Converter

En pruebas en un motor diesel equipado con la tecnología lean NOx se ha demostrado reducción de aproximadamente un 50% en las concentraciones de NOx y 40% en las concentraciones de CO y HC, pero la eficiencia de almacenamiento de los óxidos de nitrógeno, NOx, similar al de otras tecnologías, es función de la temperatura de los gases de escape. Figura 5.27.

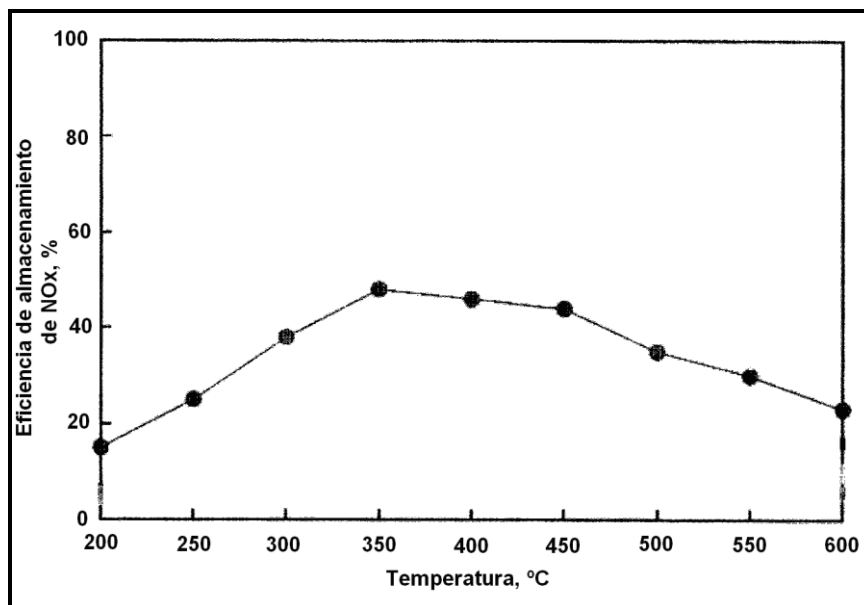


Figura 5.27: Eficiencia de almacenamiento de NOx

Fuente: Wachs Israel, Automotive Catalytic Converter

La temperatura promedio de los gases de escape en los motores ALCO es de 595°F igual a 313 °C. Como se observa en la Figura 5.27 la eficiencia de almacenamiento para los óxidos de nitrógeno, NOx, en los motores ALCO sería aproximadamente 40%.

Desventaja._

El principal problema de la tecnología Lean NOx es el envenenamiento por azufre, ya que los óxidos de azufre, SOx, y los óxidos de nitrógeno, NOx, son adsorbidos en los mismos sitios

Además, existen problemas de durabilidad, pues las estructuras tienden a colapsarse en un corto periodo de tiempo.

El problema para los motores ALCO 251- F es el alto contenido de azufre que posee el combustible que utiliza ya que tiene un porcentaje en peso igual a 0.61% equivalente a 6100 ppm; en el caso de este combustible el alto porcentaje el azufre no permitiría la reducción esperada de los óxidos de nitrógeno, NOx.

5.1.2.4.3 Lean NOx Trap sobre Catalizadores Zeolíticos._

Existe un interés renovado de reemplazar el amoníaco por gas natural u otros hidrocarburos, debido a que el amoníaco es más costoso y presenta problemas de almacenamiento y manejo. Además, se requiere un sistema de control sofisticado para evitar el desprendimiento de este compuesto a la atmósfera.

Adicionalmente, el descubrimiento de la SCR de NOx con hidrocarburos en exceso de oxígeno involucró el uso de zeolitas, siendo la zeolita ZSM-5 intercambiada con cobre (Cu-ZSM-5), el material más estudiado. No obstante, la actividad, selectividad y estabilidad térmica todavía no son aceptables para uso comercial.

La zeolita es una roca compuesta de aluminio, silicio y oxígeno, son aluminosilicatos hidratados altamente cristalinos que al deshidratarse desarrollan una estructura porosa con diámetros de poro mínimos entre 3 a 10 angstroms.⁶⁷

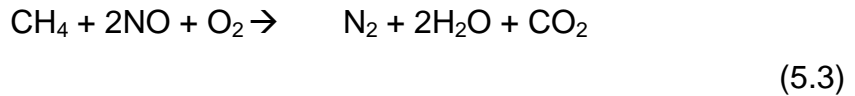
La reducción catalítica selectiva de NOx con hidrocarburos sobre catalizadores zeolíticos podría encontrar aplicación en sistemas de combustión donde las condiciones son menos severas.

Es de anotar que Cu-ZSM-5 es más reactiva con hidrocarburos de dos o más carbonos siendo poco activa con metano.

El principal problema de los catalizadores basados en zeolitas es la baja resistencia al vapor de agua y al envenenamiento por SO₂.

Cuando el agente reductor es metano la reacción es:

⁶⁷ omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_3.html



En la reducción catalítica selectiva, una mol de metano reacciona por cada mol de nitrógeno formado, mientras que la reducción no selectiva conduce a la oxidación de metano sin la producción de nitrógeno. Entre los factores a considerar en la selección de un catalizador efectivo se encuentran: actividad, selectividad, estabilidad térmica y resistencia a la inhibición o envenenamiento por los productos presentes en los gases de salida de los tubos de escape y chimeneas, tales como H₂O y SO₂.

Desventajas._

- El principal problema de los catalizadores basados en zeolitas es la baja resistencia al vapor de agua y al envenenamiento por SO₂. Como una posible alternativa se han ensayado zeolitas ácidas cargadas con dos cationes metálicos, generalmente un metal de transición y un metal noble para mejorar la resistencia al vapor de agua.
- Aunque se ha avanzado en el entendimiento de la reducción catalítica selectiva de NO_x con metano sobre catalizadores basados en zeolitas metálicas, hasta el momento no se ha encontrado un catalizador que sea estable bajo condiciones reales de operación y que presente un rango de actividad lo suficientemente amplio para ser aplicado comercialmente.

5.1.2.4.4 Reducción Catalítica Selectiva, SCR._

La Selective Catalytic Reduction - SCR (Reducción Catalítica Selectiva) es aplicada a las unidades de combustión de fuentes estacionarias, accionadas por combustibles fósiles, para el control de emisiones de NO_x.

Los sistemas de SCR han experimentado relativamente pocos problemas de operación o mantenimiento.

La SCR es implementada típicamente en unidades de combustión de fuentes estacionarias que requieren de un nivel más alto de reducción de NO_x del que puede ser alcanzado mediante la Selective Non-Catalytic Reduction - SNCR (Reducción No Catalítica Selectiva), explicado en el numeral 5.1.2.4.3, o los controles de combustión. Teóricamente, se pueden diseñar sistemas de SCR para eficiencias de remoción de NO_x de superiores al 90%. Sin embargo, no siempre es práctico mantener esta eficiencia desde el punto de vista del costo.

En la práctica, los sistemas de SCR operan a eficiencias en el rango del 70 al 90%.⁶⁸ Los costos de la SCR varían según el tipo de unidad controlada y la fuente de combustible.

Tal como la SNCR, el proceso de SCR se basa en la reducción química de la molécula de NO_x. La diferencia principal entre la SNCR y la SCR es que la SCR emplea un catalizador basado en metales con sitios activados para incrementar la velocidad de la reacción de reducción. Un agente reductor (reactivo) basado en el nitrógeno tal como el amoníaco o la urea, es inyectado dentro del gas de postcombustión. Figura 5.28 El reactivo reacciona selectivamente con el gas de combustión NO_x dentro de un rango específico de temperatura y en la presencia del catalizador y oxígeno para reducir al NO_x en nitrógeno molecular (N₂) y vapor de agua (H₂O).

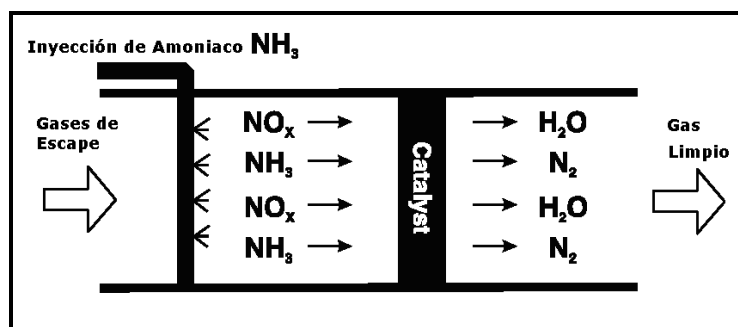


Figura 5.28: Esquema Sistema SCR

⁶⁸ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf

Fuente:

www.meca.org/.../engineName/filemanager/pid/229/icengine.PDF?actionreq=actionFileDownload&fileItem=243

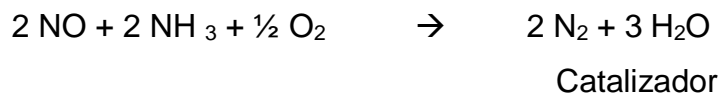
La ventaja principal es la mayor eficiencia de reducción de NO_x. Sin embargo, la disminución en la temperatura de reacción y el aumento en la eficiencia se encuentran acompañada por un aumento en los costos de capital y de operación. El aumento en el costo es debido principalmente a los grandes volúmenes de catalizador requeridos para la reacción de reducción.

Química de la Reducción, Reactivos y Catalizador._

El agente reductor empleado por la mayoría de los sistemas de SCR es el amoníaco (NH₃) en fase gaseosa puesto que penetra en los poros de catalizador más prontamente que la urea acuosa. El amoníaco, ya sea en forma anhídra o acuosa, es vaporizado antes de la inyección mediante un vaporizador. Dentro del rango apropiado de temperatura, el amoníaco en fase gaseosa se descompone enseguida en radicales libres incluyendo NH₃ y NH₂.

El amoníaco en forma de hidróxido amónico líquido, es vaporizado, diluido con aire e inyectado directamente en la corriente de gases a tratar a través de un distribuidor, entran en contacto con el NO_x y lo reducen a N₂ y H₂O.

La representación de esta reacción se presenta a continuación:



(5.2)

La ecuación 5.2 indica que se requiere 1 mol de NH₃ para remover un mol de NO_x.

El catalizador disminuye la energía de activación requerida para la reacción de reducción e incrementa la velocidad de reacción

Esta suposición de una relación lineal de 1 a 1 entre la cantidad de reactivo y los NO_x removidos es válida hasta alrededor del 85% de NO_x. Después, la eficiencia de remoción empieza a nivelarse y se requiere más de la cantidad teórica de amoníaco para la remoción adicional de NO_x. Los sistemas de SCR emplean típicamente una relación estequiométrica de 1.05 moles de amoníaco por mol de NO_x.

La reacción catalítica, representada por la ecuación 5.2, ocurre resultando en la formación de nitrógeno y agua, los que son desorbidos enseguida hacia el gas de escape. El sitio en el cual ocurre la reacción es reactivado enseguida mediante la oxidación.

La temperatura alta del gas de combustión convierte al amoníaco en radicales libres y proporciona la energía de activación para la reacción. La reacción también requiere de oxígeno en exceso, típicamente del 2 al 4 por ciento, para lograr completarse. La reducción de los NO_x con amoníaco es exotérmica, resultando en la liberación de calor. Sin embargo, debido a que la concentración de NO_x en el gas de combustión a la entrada de la SCR es típicamente de 0.02 a 0.01 % por volumen, la cantidad de calor liberada es correspondientemente pequeña. El equilibrio termodinámico no es un factor limitante en la reducción de NO_x si el gas de combustión se encuentra dentro del rango de temperatura requerido.

Reactivo._

El amoníaco anhidro es cerca del 100% de amoníaco puro. Es un gas a temperatura atmosférica normal, y por lo tanto debe ser transportado y almacenado bajo presión.

El amoníaco anhidro con frecuencia requiere permisos especiales para su transportación y almacenamiento, sin embargo no se ha encontrado ninguna norma sobre es uso de amoníaco.

Las aplicaciones de SCR que usan amoníaco acuoso por lo general lo transportan y lo almacenan a una concentración de 29.4% de amoníaco en agua, aunque algunas aplicaciones recientes utilizan una solución al 19%.⁶⁹ El uso del amoníaco acuoso reduce los problemas de transporte y almacenamiento. Sin embargo, el amoníaco acuoso requiere mayor capacidad de almacenaje que el amoníaco anhidro. Mientras que la solución al 29.4% posee una presión de vapor sustancial a temperaturas del aire normales, por lo general se requiere un vaporizador para proporcionar suficiente vapor de amoníaco al sistema de SCR.

El amoníaco acuoso es el reactivo que se emplea más comúnmente.

Escabullimiento del Amoníaco._

El escabullimiento del amoníaco se refiere al exceso de reactivo que pasa a través del reactor. El amoníaco en el gas de combustión causa un número de problemas incluyendo los efectos sobre la salud y la formación de sulfatos de amoníaco. Los límites sobre el escabullimiento del amoníaco, impuestos ya sea por los límites permisibles o por requisitos de diseño, ponen restricciones sobre el rendimiento de la SCR.

El escabullimiento del amoníaco no permanece constante a medida que el sistema de SCR opera sino que aumenta a medida que la actividad del catalizador disminuye. Los sistemas de SCR diseñados adecuadamente, que operan cerca a la estequiometría teórica y suministran un volumen de catalizador adecuado, mantienen niveles bajos de escabullimiento del amoníaco, de aproximadamente 2 a 5 ppm.

Catalizador._

⁶⁹ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf

Los catalizadores de SCR están compuestos de metales activos o cerámicas con una estructura altamente porosa. Dentro de los poros del catalizador se encuentran sitios activos.

Estos sitios tienen un grupo ácido en el extremo de la estructura del compuesto en donde ocurre la reacción de reducción, después de que ocurre la reacción de reducción, el sitio se reactiva mediante la rehidratación o la oxidación. Al paso del tiempo, sin embargo, la actividad del catalizador disminuye, requiriendo el reemplazo del catalizador.

Originalmente, los catalizadores para la SCR eran metales preciosos tales como el platino (Pt). Al final de los años setenta, investigadores japoneses usaban metales de base que consistían de vanadio (V), titanio (Ti), y tungsteno (W), lo que reducía significativamente el costo de los catalizadores. En los años ochenta, los óxidos metálicos tales como el óxido de titanio (TiO_2), el óxido de zirconio (ZrO_2), el pentóxido de vanadio (V_2O_5) y el óxido de silicio (SiO_2) se emplearon para ampliar el rango de la temperatura de reacción. Las zeolitas, silicatos de óxido de aluminio cristalinos, también fueron introducidas para las aplicaciones a alta temperatura (675°F a 1000°F); sin embargo, las zeolitas tendieron a ser prohibitivas en su costo.

Las mejoras en las formulaciones de los catalizadores disminuyen las reacciones adicionales no deseadas tales como las conversiones a óxidos de azufre (O_2 a SO_3) y aumentan la resistencia a los venenos del gas de combustión. Los nuevos diseños de catalizadores también aumentan la actividad catalizadora, la superficie por unidad de volumen y el rango de temperatura para la reacción de reducción. Como consecuencia, hay una disminución correspondiente en los volúmenes de catalizador requeridos y un aumento en la vida de operación del catalizador.

Los catalizadores aceleran la velocidad de la reacción de reducción de los NO_x en gran manera, pero algunos catalizadores tienen más propiedades favorables para una aplicación determinada. Los requisitos de rendimiento

que impulsan la selección del catalizador incluyen el rango de temperatura de reacción, la velocidad de flujo del gas de combustión, la fuente de combustible, la actividad y selectividad del catalizador y la vida de operación del catalizador.

En las Figuras 5.29 y 5.30 se pueden observar los resultados de pruebas realizadas utilizando $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Pt}$, como catalizador para condiciones de emisión de un motor Diesel y con mezcla pobre. Los valores de emisión considerados para cada caso son los indicados en la Tabla 5.7:

Tabla 5.7: Condiciones de Emisión de un Motor Diesel y con Mezcla Pobre

Gas	Diesel	Mezcla Pobre
NO	1000 ppm	500 ppm
NO ₂	---	500 ppm
C ₃ H ₆	50 ppm	---
CO	300 ppm	---
CO ₂	5%	5%
O ₂	10%	10%
H ₂ O	5%	5%

Fuente: Fuente: S. Hodjati, P. Bernhardt, C. Petit, V. Pitchon, A. Kiennemann, Removal of NO_x: Part I. Sorption/desorption processes on barium aluminate, 1998

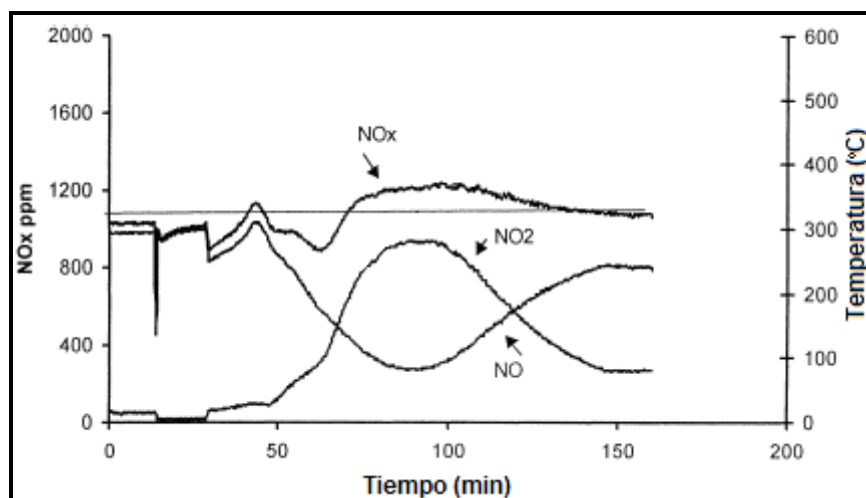


Figura 5.29: Detalle de la absorción con una mezcla de diesel en Pt/Al₂O₃

Fuente: Fuente: S. Hodjati, P. Bernhardt, C. Petit, V. Pitchon, A. Kiennemann, Removal of NOx: Part I. Sorption/desorption processes on barium aluminate, 1998

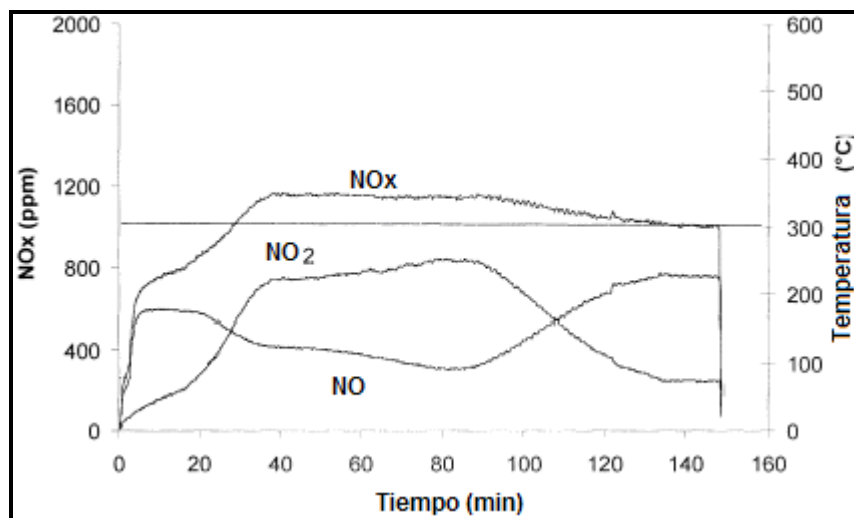


Figura 5.30: Detalle de la absorción con una mezcla pobre en Pt/Al₂O₃

Fuente: S. Hodjati, P. Bernhardt, C. Petit, V. Pitchon, A. Kiennemann, Removal of NOx: Part I. Sorption/desorption processes on barium aluminate, 1998

Para obtener la formulación óptima del catalizador y del diseño de la SCR para alguna aplicación, al proveedor del catalizador y al de la SCR se les debe de informar de los constituyentes del combustible, tales como azufre, cloro, fluoruro, álcalis y metales traza.

Estos constituyentes del combustible y de las cenizas, pueden determinarse por análisis químico. Los datos analíticos asociados pueden utilizarse para modificar la composición del catalizador, para determinar el volumen del catalizador y para diseñar los componentes del reactor de la SCR.

Generalmente se garantiza al catalizador por una vida de operación que varía entre 10000 horas y 30000 horas.⁷⁰

⁷⁰ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf

Los elementos catalizadores colocados en un marco forman un módulo catalizador.

Los módulos se van juntando en capas múltiples para crear un lecho reactor de un volumen total de catalizador que es requerido. Un módulo típico tiene una superficie de 1m x 2m y 1m de altura.³⁶

El reemplazo del catalizador no es frecuente, por lo general menor de una capa por año. La mayoría de los fabricantes de SCR ofrecen un servicio de desecho. El catalizador es reactivado para nuevo uso o sus componentes son reciclados para otros usos. Si el catalizador no puede ser reciclado o reutilizado, se debe desechar el catalizador desgastado en un relleno sanitario aprobado.

Las formulaciones de catalizador no son consideradas como residuos peligrosos.

Los catalizadores aceleran la velocidad de la reacción de reducción de los NO_x en gran manera, pero algunos catalizadores tienen más propiedades favorables para una aplicación determinada. Los requisitos de rendimiento que impulsan la selección del catalizador incluyen el rango de temperatura de reacción, la velocidad de flujo del gas de combustión, la fuente de combustible, la actividad y selectividad del catalizador y la vida de operación del catalizador.

Además, el diseño debe considerar el costo del catalizador, incluyen los costos de desecho puesto que los costos del catalizador pueden resultar en un 20% o más de los costos de capital para un sistema de SCR.

Temperatura._

El uso de un catalizador en el proceso de SCR disminuye el rango de temperatura requerido para maximizar la reacción de reducción de los NO_x.

A temperaturas por debajo del rango especificado, la cinética de la reacción disminuye y se produce escabullimiento del amoníaco. A temperaturas por encima del rango especificado, se forma óxido nitroso (N_2O) y ocurre la degeneración y desactivación del catalizador.

En un sistema de SCR, la temperatura óptima depende de tanto del tipo de catalizador utilizado en el proceso como de la composición del gas de combustión. Para la mayoría de los catalizadores comerciales (óxidos metálicos), las temperaturas óptimas para el proceso de SCR varían entre 480 °F y 800 °F.⁷¹

La Figura 5.31 es una gráfica de la eficiencia de remoción de NO_x como función de la temperatura para un catalizador típico de tipo óxido metálico. La figura muestra que la velocidad de la remoción de NO_x aumenta con la temperatura hasta un máximo de 700°F a 750°F. A medida que la temperatura aumenta por encima de 750°F, la velocidad de reacción y la eficiencia de remoción de NO_x resultante empiezan a disminuir.

A medida que la temperatura del gas de combustión se aproxima al óptimo, la velocidad de reacción aumenta y un volumen menor de catalizador logra la misma eficiencia de remoción de NO_x .

⁷¹ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf

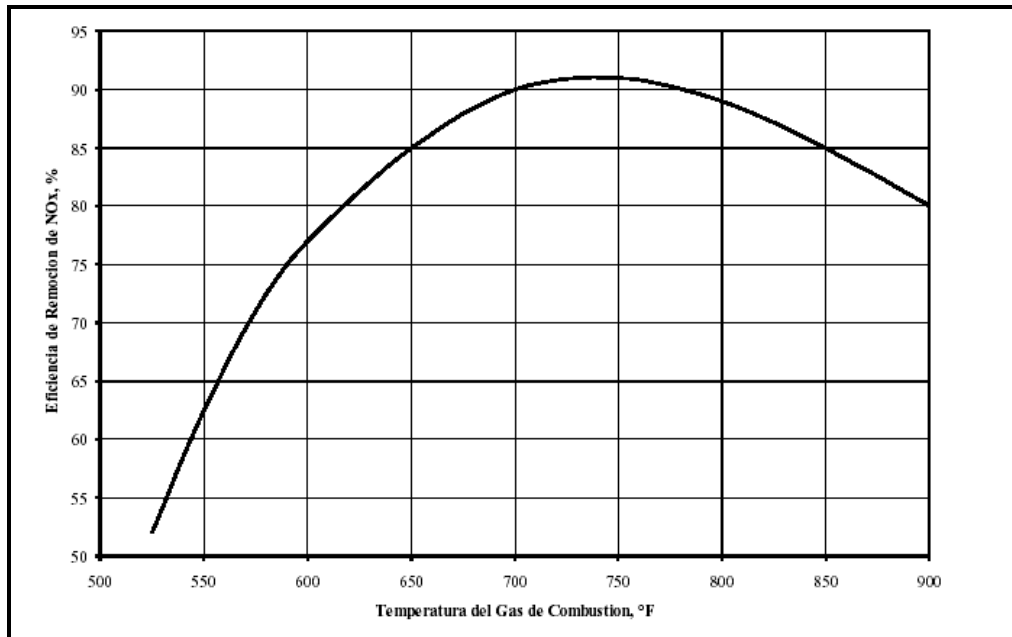


Figura 5.31: Remoción de NOx vs. Temperatura

Fuente: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf>

La Figura 5.32 muestra el cambio en el volumen de catalizador requerido contra la temperatura. Hay una disminución de aproximadamente un 40% en el volumen de catalizador requerido a medida que la temperatura del gas de combustión aumenta desde 600°F al rango óptimo, 700 a 750 °F. Esta disminución en el volumen de catalizador también resulta en una disminución significativa en el costo de capital para el sistema de SCR.

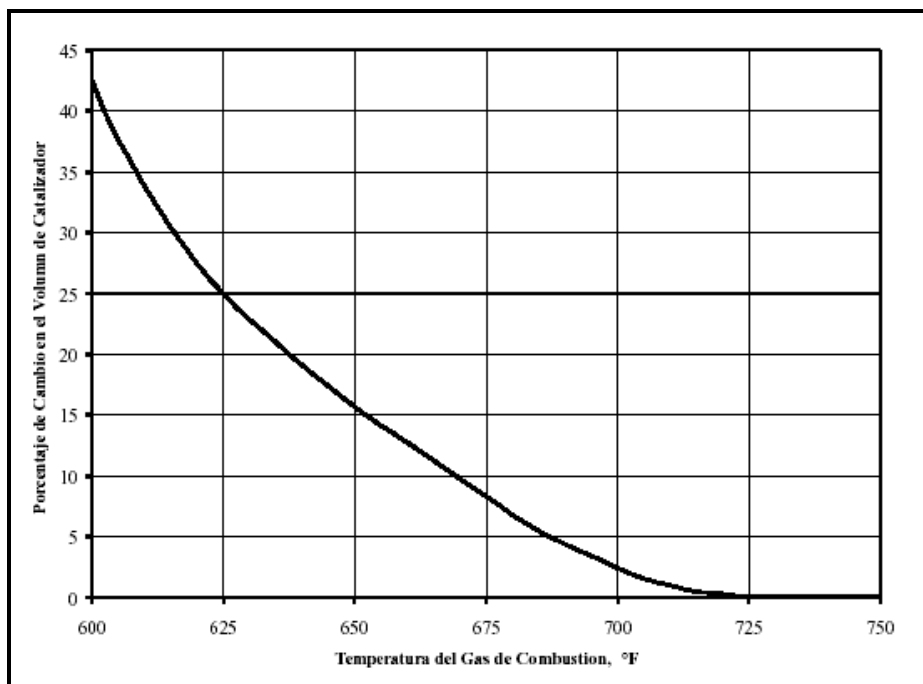


Figura 5.32: Cambio en el Volumen de Catalizador vs. Temperatura

Fuente: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf>

Grado de Mezclado._

El reactivo debe ser dispersado y mezclado a través del gas de combustión para asegurar un contacto suficiente entre los reactivos. El mezclado se realiza mediante un sistema de inyección de amoníaco en fase gaseosa a presión dentro del gas de combustión.

El mezclado del gas de combustión y el amoníaco ocurre antes de entrar al reactor de SCR.

Desactivación del Catalizador._

Los catalizadores pierden su actividad al paso del tiempo por varias razones.

- **Envenenamiento.-** Ciertos constituyentes de los combustibles que son liberados durante la combustión actúan como venenos de los catalizadores. Los venenos de los catalizadores incluyen al óxido de calcio y al óxido de

magnesio; sodio, arsénico, cloro, fluoruro y plomo. Estos constituyentes desactivan al catalizador al difundirse dentro de los sitios activos de los poros y ocuparlos irreversiblemente. El envenenamiento del catalizador representa la causa principal de la desactivación de los catalizadores.

En el caso de combustibles con alto porcentaje en azufre, durante su combustión se produce también SO_2 que puede ser catalíticamente oxidado a SO_3 . La oxidación del SO_3 puede reaccionar con el agua y el amoníaco no reaccionado (NH_3) para formar ácido sulfúrico y sulfato amónico.

Las sales de sulfato se pueden depositar y acumular sobre el catalizador dando lugar a su desactivación si la temperatura del catalizador no es suficientemente alta, y el ácido sulfúrico formado puede provocar problemas de corrosión.

- **Taponado/Contaminación.-** Las sales de amoníaco y azufre, la ceniza flotante y otra materia particulada en el gas de escape puede causar, el taponamiento o la contaminación del catalizador. La materia particulada se deposita sobre la superficie y en los sitios con poros activos del catalizador. Esto resulta en una disminución del número de sitios disponibles para la reducción de NO_x y un aumento en la pérdida de la presión del gas de escape a través del catalizador.
- **Erosión.-** Los impactos de la materia particulada y las altas velocidades intersticiales del gas erosionan el material del catalizador.
- **Envejecimiento.-** El envejecimiento del catalizador es un cambio en las propiedades físicas y químicas de los poros del catalizador que ocurre con el tiempo.

Parámetros de Diseño

El diseño del sistema SCR es una tecnología patentada. Los detalles amplios de la teoría y las correlaciones que pueden usarse para estimar los

parámetros de diseño, tales como el volumen requerido del catalizador, no están publicados en la literatura técnica.

Además, el diseño es altamente específico del sitio. A la luz de estas complejidades, el diseño del sistema SCR se realiza generalmente proporcionando todos los datos específicos de la planta al proveedor del sistema SCR, quién especifica el volumen requerido del catalizador y otros parámetros de diseño en base a experiencias previas y a dinámica de fluidos por computadora y a modelado de cinética química.⁷²

Ventajas y desventajas de un SCR._

Ventajas:

- Reducciones más altas de NO_x en comparación con la Reducción Selectiva No Catalítica (Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR).
- Es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x.
- Las reacciones ocurren dentro de un rango de temperatura más bajo y más amplio que en la SNCR.
- No requiere modificaciones a la unidad de combustión.

Desventajas:

- Costos de inversión y de operación significativamente más altos que la SNCR.
- Dificultades de operación con combustibles que contienen azufre.
- Se requieren grandes cantidades de reactor y catalizador.

5.1.2.4.5 Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR._

La SNCR está basada en la reducción química de la molécula de NO_x a nitrógeno molecular (N₂) y vapor de agua (H₂O). Un agente reductor con base en nitrógeno (reactivo), tal como amoníaco o urea, es inyectado en el

⁷² www.estruplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=1034

gas después de la combustión. El reactivo puede reaccionar con un número de componentes del gas de combustión. Sin embargo, la reacción de reducción de NO_x se favorece sobre otros procesos de reacción química en un rango específico de temperatura y en presencia de oxígeno, por lo tanto, se considera un proceso químico selectivo.

En aplicaciones típicas de campo, la SNCR puede lograr eficiencias de reducción de NO_x de 30% a 50% e incluso hasta 65%.⁷³

Las aplicaciones SNCR tienden a tener costos de capital bajos comparados con los Reductores Catalíticos Selectivos (SCR).

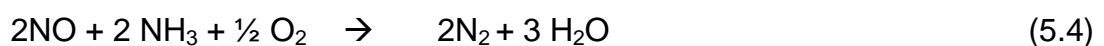
Química de la Reducción

La SNCR es un proceso químico relativamente simple. El proceso comienza con un reactivo en base a amoníaco, amoníaco (NH₃) o urea (CO(NH₂)₂), siendo vaporizado, ya sea antes de la inyección por un vaporizador o después de la inyección por el calor de la combustión.

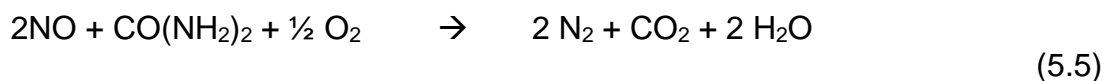
Dentro del rango de temperatura apropiado, la urea o el amoníaco en fase gas se descomponen entonces en radicales libres, incluyendo NH₃ y NH₂. Después de una serie de reacciones, los radicales del amoníaco entran en contacto con el NO_x y lo reducen a N₂ y H₂O.

La representación global de estas reacciones está dada a continuación para ambos, la urea y el amoníaco. El NO_x está representado como NO, puesto que es la forma predominante de NO_x.

La ecuación de la reacción del amoníaco está dada por:



La reacción para la urea está dada por:



⁷³ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch1-s.pdf

Reactivos

El amoníaco y la urea, han sido empleados exitosamente como reactivos.

El costo del reactivo es una gran porción de los costos anuales de operación de un sistema SNCR. El amoníaco es generalmente menos caro que la urea. Sin embargo, la selección de un reactivo se basa no sólo en el costo, sino en las propiedades físicas y en consideraciones de operación.

La urea es utilizada generalmente en una solución acuosa al 50%. A esta concentración, la solución de urea debe calentarse y circularse en climas fríos debido a su bajo punto de congelamiento, 64°F. La urea es inyectada como una solución acuosa y vaporizada por el calor. También puede ser transportada en forma de pastillas (pellets), las cuales minimizan los requisitos de transporte. Sin embargo, para producir urea en fase acuosa para utilizarse en el sistema SNCR, la urea debe ser mezclada con agua en el establecimiento.

Los sistemas en base a urea tienen varias ventajas sobre los sistemas en base a amoníaco. La urea es un líquido no tóxico, menos volátil, que puede almacenarse y manejarse con más seguridad que el amoníaco. Las gotas de solución de urea pueden penetrar más adentro en el gas de combustión. Esto mejora el mezclado con el gas de combustión. Debido a estas ventajas, la urea es comúnmente más utilizada que el amoníaco en aplicaciones de sistemas SNCR.

Razón Estequiométrica Normalizada

La Razón Estequiométrica Normalizada, NSR por su siglas en inglés (Normalized Stoichiometric Ratio), define la cantidad de reactivo necesario para alcanzar la meta de reducción de NO_x.

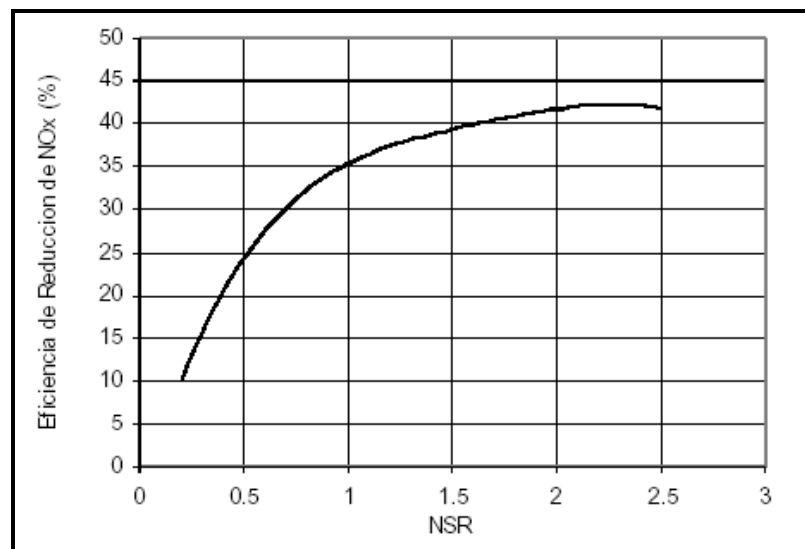
Teóricamente dos moles de NO_x pueden ser removidas con una mol de urea o dos moles de amoníaco. En la práctica, se necesita inyectar más que la cantidad teórica de reactivo en el gas de combustión para obtener un nivel específico de reducción de NO_x. Esto es debido a la complejidad de las

reacciones químicas reales que involucran al NO_x y al reactivo inyectado y a las limitaciones de mezclado entre el reactivo y el gas de combustión (razón cinética). Los valores típicos de NSR están entre 0.5 y 3 moles de amoníaco por mol de NO_x .⁷⁴

Los factores que influyen el valor de la NSR incluyen:

- Por ciento de reducción de NO_x ;
- Concentración de NO_x no controlado en los gases de combustión;
- Temperatura y tiempo de residencia disponibles para las reacciones de reducción de NO_x ;
- Escabullimiento permisible de amoníaco; y

La Figura 5.33 muestra la reducción de NO_x como una función de la NSR. A medida que la NSR aumenta, la reducción de NO_x aumenta. Sin embargo, a medida que la NSR aumenta, el incremento en la reducción de NO_x disminuye exponencialmente. La razón cinética limita la posible reducción de NO_x a mucho menos que el valor teórico. Aumentando la cantidad de reactivo no aumenta significativamente la reducción de NO_x para valores de NSR por encima de 2.0.



⁷⁴ www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch1-s.pdf

Figura 5.33: Efecto de la NSR en la Reducción de NO_x.Fuente:

<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch1-s.pdf>

Escabullimiento de Amoníaco._ El escabullimiento del amoníaco se refiere al exceso de reactivo que pasa a través del reactor.

Los valores típicos de NSR requieren que se inyecte significativamente más reactivo en la práctica que lo requerido por la razón estequiométrica teórica. Además, la cantidad de NO_x removido es generalmente mucho menor que la cantidad de NO_x no controlado. Esto deja una gran porción del reactivo inyectado, sin reaccionar.

La mayor parte del reactivo en exceso utilizado en el proceso, es destruido a través de otras reacciones químicas. Sin embargo, una pequeña porción permanece en el gas de combustión, a medida que el amoníaco se escabulle.

El amoníaco en la corriente del gas de combustión tiene varios impactos negativos, el amoníaco tiene un olor detectable a niveles de 5 ppm o mayores y presenta un riesgo a la salud en niveles de 25 ppm o mayores.

Tiempo de Residencia

El tiempo de residencia es la cantidad de tiempo que los reactivos están presentes dentro del reactor químico. Antes que los reactivos salgan, todos los pasos en el proceso de SNCR deben completarse, incluyendo:

- El mezclado de la urea inyectada, con el gas de combustión;
- Evaporación del agua;
- Descomposición de la urea a NH₃;
- Descomposición del NH₃ a NH₂ y radicales libres; y
- Química de la reacción de reducción de NO_x.

Aumentando el tiempo de residencia disponible para la transferencia de masa y las reacciones químicas, aumenta generalmente la remoción de NO_x. Además, a medida que la ventana de temperatura para la reacción es disminuida, se requiere mayor tiempo de residencia para alcanzar el mismo

nivel de reducción de NO_x. El tiempo de residencia puede variar desde 0.001 hasta 10 segundos.

Temperatura.

La reacción de reducción de NO_x ocurre dentro de un rango específico de temperatura, en el que se dispone del calor adecuado para conducir la reacción. A menores temperaturas, las cinéticas de las reacciones son lentas y se produce el escabullimiento de amoníaco. A temperaturas mayores, el reactivo se oxida y se genera NO_x adicional.

La Figura 5.34 se muestra la eficiencia de reducción de NO_x para SNCR con urea y amoníaco a varias temperaturas.

- Para el amoníaco, la temperatura óptima es desde 1600°F a 2000°F. Su rango óptimo de temperatura puede reducirse inyectando gas hidrógeno con el amoníaco.
- Para la urea, el rango óptimo de temperatura es entre 1650°F y 2100°F.

El reactivo es inyectado en regiones donde la temperatura del gas de combustión está dentro del rango especificado. El posicionamiento correcto de los puertos de inyección resulta en mayores eficiencias de reducción de NO_x.

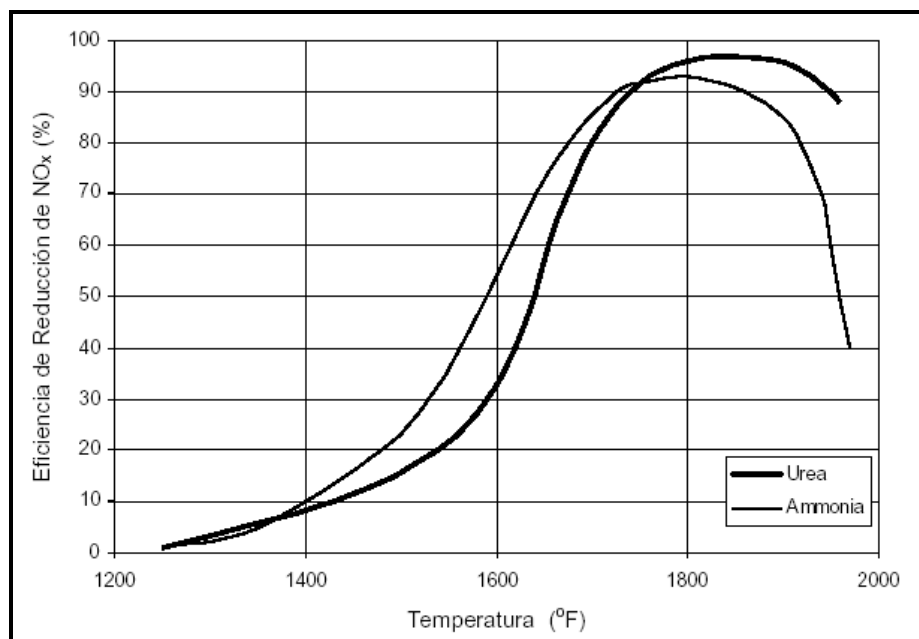


Figura 5.34: Efecto de la Temperatura en la Reducción de NO_x

Parámetros de Desempeño de la SNCR._

La razón de la reacción de reducción determina la cantidad de NO_x removido del gas de combustión. Los factores importantes de diseño y operacionales que afectan la reducción de NO_x por un sistema SNCR incluyen:

- Rango de temperatura de reacción.
- Tiempo de residencia disponible en el rango óptimo de temperatura.
- Grado de mezclado entre el reactivo inyectado y los gases de combustión.
- Nivel no controlado de concentración de NO_x.
- Razón molar de reactivo inyectado a NO_x no controlado y
- Escabullimiento de amoníaco.

Ventajas:

- Los costos de capital y de operación están entre los más bajos entre todos los métodos de reducción de NO_x.
- La reconversión de la *SNCR* es relativamente simple y requiere poco tiempo de paro en unidades grandes y medianas.
- Es efectivo en costo para uso estacional o aplicaciones de carga variable.
- Acepta corrientes de gas residual con niveles altos de MP.
- Puede aplicarse con controles de combustión para proporcionar mayores reducciones de NO_x.

Desventajas:

- La corriente de gas debe estar dentro de un rango de temperatura específico.
- No es aplicable a fuentes con bajas concentraciones de NO_x.
- Menores reducciones de NO_x que con la Reducción Selectiva Catalítica.

5.1.2.4.6 Plasma No Térmico._

El sistema de anticontaminación por plasma frío o plasma no térmico es una solución innovadora en el tratamiento de los gases de escape. Aún en fase

de investigación, el concepto está basado en la creación de un medio ionizado mediante el establecimiento de un campo eléctrico impulsado a través de los gases que deben tratarse. Bajo el efecto de este campo eléctrico, las moléculas de gas se fragmentan y reaccionan con más eficacia en el catalizador.

Un plasma no térmico es un gas parcialmente ionizado en el cual la energía de los electrones es considerablemente mayor que la de los iones y las moléculas del gas, de tal forma que el gas se encuentra a temperatura y presión ambiente. En los plasmas no térmicos la energía se usa para crear especies químicamente activas y no para calentar el gas.

El concepto global actúa en dos etapas complementarias:

- La primera está relacionada con el reactor plasma no térmico que produce electrones altamente energéticos y radicales libres (O, N), que chocan contra las moléculas estables del gas de escape. Al contener el efluente un exceso de oxígeno, las reacciones químicas que resulten de esta modificación del medio producirán la oxidación del NO en NO₂.
- En la segunda etapa, interviene un catalizador específico que complementa la reacción de transformación de las moléculas contaminantes. Este catalizador transforma el NO₂ producido por el reactor de plasma frío en N₂

El sistema plasma no térmico es insensible a la contaminación generada por el azufre contenido en el combustible, que va acompañada de una reducción de eficacia de los catalizadores convencionales.

El sistema se encuentra en etapa de desarrollo y no está comercializado.

5.2 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA

Como se demostró en el monitoreo realizado, los óxidos de nitrógeno generados por los motores ALCO 251-F del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano – SOTE, exceden con más del 50 % al límite permisible ⁷⁵ como se muestra a continuación:

Tabla 5.8: Exceso de Óxidos de Nitrógeno

Óxidos de Nitrógeno		
Generado	Límite Permisible	Exceso
[mg/m³]	[mg/m³]	[%]
3780	1900	50.26

Una vez estudiadas las posibles alternativas para la minimización de emisiones gaseosas se elaboró un cuadro comparativo para poder seleccionar la mejor, Tabla 5.9.

⁷⁵ Tabla 3.1

Como se observa en la Tabla 5.9, “Medidas Primarias”, existen alternativas que reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno, NO_x, pero no pueden ser aplicadas, debido a que no son técnicamente posibles para los motores ALCO 251-F, ya que se necesitan realizar modificaciones del motor, cambiando así su diseño original perdiendo la garantía del fabricante.

En la Tabla 5.10, se muestran las posibles alternativas para la reducción de óxidos de nitrógeno.

Tabla 5.10: Medidas Secundarias para reducción de óxidos de nitrógeno NOx

Alternativas para Minimización	Eficiencia
Reducción Catalítica No Selectiva, NSCR	***
Lean NO _x Trap (Trampa de NO _x)	40 - 50 %
Lean NO _x Trap sobre Catalizadores Zeolíticos	****
Reducción Catalítica Selectiva, SCR.	70 - 90 %
Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR.	30 - 50 %
Plasma No Térmico.	****

*** No aplicable

**** Tecnología en desarrollo.

Las posibles soluciones se reducen a dos:

- Reducción Catalítica Selectiva, SCR.
- Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR.

En la Tabla 5.11, se muestra una comparación entre los sistemas SCR y SNCR.

La temperatura de los gases de escape en los Motores ALCO tienen un promedio de 595 °F, Tabla 3.18 ⁷⁶, por lo tanto la posible solución se reduce a un Sistema de Reducción Catalítica Selectiva, SCR.

5.2.1 ALTERNATIVA RECOMENDADA

La alternativa recomendada para la minimización de la concentración de los óxidos de nitrógeno, NOx, generados por los motores ALCO 251-F del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano – SOTE es un Sistema de Reducción Catalítica Selectiva, SCR.

⁷⁶ Capitulo III

Con la Reducción Catalítica Selectiva se logra solucionar el problema de contaminación que tienen los motores, pero el diseño es altamente específico del sitio, el diseño del sistema SCR generalmente lo realiza el proveedor, quién especifica el volumen requerido del catalizador y otros parámetros de diseño en base a experiencias previas y a dinámica de fluidos por computadora y a modelado de cinética química.⁷⁷

La eficiencia de remoción teórica de óxidos de nitrógeno, NOx, para este sistema se muestra en la Tabla 5.12

Tabla 5.12: Eficiencia de Remoción de Óxidos de Nitrógeno

Temperatura Gas de Escape [°F]	Eficiencia [%]
595	75 *

* Figura 5.25

El volumen requerido de catalizador depende de la temperatura de los gases de combustión como se muestra en la Figura 5.39, con la temperatura promedio de 595 °F en los gases de escape de los motores ALCO se requiere un 40 % más volumen de catalizador para que el sistema funcione de manera óptima, lo que resulta en un aumento de los costos en el sistema además de los costos de desecho que pueden resultar en un 20% más de los costos del sistema, la mayoría de los fabricantes de SCR ofrecen un servicio de desecho.

El costo de sistema de reducción catalítica selectiva oscila entre USD 50 y 125 por bhp⁷⁸, como los motores ALCO 251-F son de 2500 bhp @ 1050 rpm, por lo tanto el costo aproximado de un sistema de reducción catalítica selectiva puede variar entre \$125.000 y \$ 350.000.

⁷⁷ www.estruplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=1034

⁷⁸ Manufacturers of Emission Controls Association, Emission Control Technology for Stationary

Internal Combustion Engines, 1997, www.meca.org/.../engineName/filemanager/pid/229/ /icengine.PDF?actionreq=actionFileDownload&fileItem=243

El reemplazo del catalizador no es frecuente, por lo general se garantiza al catalizador por una vida de operación que varía entre 10000 horas y 30000 horas mientras que los motores ALCO trabajan un promedio de 530 horas por mes, en la Tabla 5.13 se muestra el tiempo de reemplazo del catalizador para estos motores.

Tabla 5.13: Tiempo Aproximado de Reemplazo del Catalizador

Trabajo Motor ALCO por Mes	Vida Operación Catalizador	Reemplazo Catalizador	Reemplazo Catalizador
[Horas]	[horas]	[Meses]	[Años]
530	10000 - 30000	18 - 54	1.5 – 4.5

El problema para los motores ALCO 251- F es el alto contenido de azufre que posee su combustible ya que tiene un porcentaje en peso igual a 0.61% equivalente a 6100 ppm; en el caso de estos combustibles el alto porcentaje de azufre durante la combustión produce dióxido de azufre, SO₂, que puede ser catalíticamente oxidado a trióxido de azufre, SO₃.

La oxidación del SO₃ puede reaccionar con el agua y el amoniaco no reaccionado (NH₃) para formar ácido sulfúrico (H₂SO₄) y sulfato amónico (NH₄)₂SO₄.

Las sales de sulfato se pueden depositar y acumular sobre el catalizador dando lugar a su desactivación si la temperatura del catalizador no es suficientemente alta, y el ácido sulfúrico formado puede provocar problemas de corrosión.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

1. Mediante el monitoreo realizado, se determinó que los Motores ALCO 251-F de las estaciones de bombeo del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, SOTE, sobrepasan el límite máximo permisible para emisiones a la atmósfera provenientes de fuentes fijas para actividades hidrocarburíferas en las concentraciones de óxidos de nitrógeno, NO_x, aproximadamente en un 50%.
2. A través de una comparación con el analizador de gases IMR 1400, propiedad de Petroproducción, el equipo Testo 350, FIGEMPA, y en base a los resultados del software, se concluye que el equipo analizador de gases TELEDYNE'S PORTABLE EMISSIONS MONITOR Modelo PEM-9002, Serie No. 229467, propiedad de Gerencia de Oleoducto – Petroecuador, se encuentra descalibrado en las mediciones de monóxido de carbono, CO, por lo tanto los datos que entrega la máquina no son confiables.
3. La generación de los óxidos de nitrógeno, NO_x, son producto directo de la temperatura de combustión, que es la que ocasiona mayor impacto, del exceso de aire de combustión y del contenido de nitrógeno en el combustible en menor escala.
4. La cantidad de óxidos de nitrógeno, NO_x, producida por los Motores ALCO 251- F son consecuencia de la edad y el diseño de los motores. Para la solución del problema de contaminación es necesario realizar una combinación de las medidas primarias y secundarias para obtener mejores porcentajes de reducción.
5. El software desarrollado es una herramienta útil, que permite variar parámetros de funcionamiento del motor, para realizar un estudio de tendencias de las concentraciones de emisiones gaseosas.
6. La alternativa recomendada para la minimización de las concentraciones de óxidos de nitrógeno, NO_x, generados por los motores ALCO 251-F del

Sistema de Oleoducto Transecuatoriano – SOTE es la implementación de un Sistema de Reducción Catalítica Selectiva, SCR.

6.1 RECOMENDACIONES

1. El equipo analizador de gases TELEDYNE'S PORTABLE EMISSIONS MONITOR Modelo PEM-9002, Serie No. 229467, propiedad de Gerencia de Oleoducto – Petroecuador, necesita una calibración o el reemplazo de la celda electroquímica para la medición de óxido de carbono, CO.
2. Elaborar un procedimiento para la realización del monitoreo de emisiones gaseosas contaminantes en las chimeneas de las fuentes de emisión, ya que al no existir normas o procesos a seguir se pueden cometer errores que influirían en los resultados del monitoreo, además de no cumplir con las mínimas normas de seguridad.
3. Se recomienda utilizar un combustible con menos cantidad de azufre o realizar un estudio de desulfurización, ya que este disminuye la eficiencia y aumenta los costos del sistema de reducción catalítica selectiva, SCR.

BIBLIOGRAFÍA

- ADAMS, O. Motores Diesel. 7ma. ed. Barcelona, Gustavo Pili, 1980, 596 p.
- AYALA CUEVA, Galo Ing. "Combustión y Combustibles para Motores Industriales", 2004
- ARGUIMBAU, F. Combustibles y Combustión, Primera ed. Argentina, Montesó, 1950, 334 p.
- BAENA PAZ, G. Instrumentos de Investigación, 5ta ed. México, 1981.
- CENGEL, Y. Termodinámica. 2da ed. Colombia, McGraw Hill, 1996, pp 864.
- CLARK, G. Industrial and Marine Fuels Reference Book. Primera ed. London, Butterworths, 1988, 600 p.
- COOPER C. D. y ALLEY F. C. Air Pollution Control a Design Approach. 3ra ed. pp 547 - 565, 342 – 347
- ECUADOR, MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, NARVAEZ, I. Revisión De Parámetros de Control para Emisiones a la Atmósfera. S. L. 2003
- ECUADOR, MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS, Reglamento Ambiental para las Operaciones Hidrocarburíferas. S. L. 2003
- ECUADOR, PETROECUADOR. Curso Teórico Practico sobre Reparación y Mantenimiento de Motores Alco. Lago Agrio, s.f. 199 p.
- ECUADOR, PETROECUADOR. SOTE, Manual de Operaciones. S. L. 2001, 284 p.
- FAIRES V. M. y SIMMANG C. M. Thermodynamics. 6ta. ed. United States of America, Collier Macmillan, 1978, 647 p.
- GLASSMAN, I. Combustión. 2da. ed. California, Academic Press, 1987, 501 p.
- GRIFFIN, R. D. Principles of Air Quality Management 1994, pp 169 - 206, 218 – 274
- HABERMAN, Termodinámica con Transferencia de Calor., Editorial Trillas, 1996, pp112 – 118, 415 – 430, 651.
- HICKS, T. G. Standard Handbook of Engineering Calculations. 2da. ed. United States of America, Mc Graw Hill, 1985, pp 3.187 – 3.199.

HOWEL, J. R. y BUCKIUS, R.O. Principios de Termodinámica para Ingenieros. Traducido del inglés por Ileana Velasco. Primera ed. Mexico, McGraw Hill, 1990, pp 483 – 549

KIRILLIN, Termodinámica Técnica. pp 556 – 589

KOLMAN, Termodinámica. Traducido del inglés por McGraw Hill. 2da. ed. Colombia, McGraw Hill, 1975, pp 271 – 341

MIRALLES DE IMPERIAL J. Y VILLATA J. Motor Diesel, Inyección y Combustión. Perú, Ediciones Ceac, 1989, 244 p.

MIRALLES DE IMPERIAL, J. Turbo, Sobrealimentación de Motores Rápidos. 2da ed. Peru, Ediciones Ceac, 1984, 211 p.

OBERT E. F. Motores de Combustión Interna, Análisis y Aplicaciones. Traducido de inglés por Cristóbal Monsivais. 2da. ed. Mexico, Continental, 1984, 764 p.

STINSON, K. W. Diesel Engineering Handbook. 12va. ed. United States of America, Diesel Publications, 1985, pp 29 - 44.

TELEDYNE. Instruction Manual PEM 9002, California, pp 44.

WARK, K. JR. Termodinámica. Traducido del inglés por Jose Luis Torres 5ta. ed. Mexico, McGraw Hill, 1991, pp 514 – 603

Páginas Web Consultadas.-

Contaminación Atmosférica

- www.estrucplan.com.ar/Eflugas.htm
- www.iespana.es/natureduca/cont_atmosfera.htm

Efectos de la Contaminación Atmosférica

- www.universoe.com/ciencia/articulo/ecologia/17_contaminantes.shtml
- www.epa.gov/air/espanol/contaminantes/index.html
- www.epa.gov/air/espanol/contaminantes/taketox.html
- www.unesa.net/unesa/html/sabereinvestigar/largoviaje/huellaemision.htm

Emisiones No Reglamentadas

- html.rincondelvago.com/efecto-invernadero_1.html

Contaminantes de la Combustión

- www.oni.escuelas.edu.ar/2001/santa-fesur/motor/comocon.htm

Óxidos de Carbono

- www.airinonow.org/espanol/html/ed_co.html

Óxidos de Nitrógeno

- www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780

NOx térmico proveniente de la combustión

- www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780

NOx proveniente del combustible

- www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780
- www.alfinal.com/petroleo/petroleo.shtml

Efecto Invernadero

- pdf.rincondelvago.com/files/0/2/4/00014024.pdf
- www.iespana.es/natureduca/ant_eco_efectoinverna.htm
- html.rincondelvago.com/efecto-invernadero_1.html

Ozono

- www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoteoria.htm
- www.epa.gov/air/espanol/peg/key01.html
- www.iespana.es/natureduca/cont_atmosfera.htm
- www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoteoria.htm
- www.iespana.es/natureduca/ant_eco_ozonoestudios.htm

Lluvia Ácida

- www.esi.unav.es/asignaturas/ecologia/Hipertexto/10CAtm1/340DepAc.htm
- www.tierramerica.net/2000/0813/losabias.shtml
- www.eco2site.com/informes/atmosf.asp
- www.estrucplan.com.ar/contenidos/EfluGas/EfluGas-Lluvias.asp
- www.iespana.es/natureduca/cont_lluvia_acida.htm
- www.sagan-gea.org/hojared/Hoja13.htm
- www.redes.org.uy/estudiantes/diccionario/conceptos/lluvia.htm
- www.tierramerica.net/2000/1015/losabias.shtml
- www.energia.gob.mx/wb/distribuidor.jsp?seccion=571
- www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/10CAtm1/340DepAc.htm
- www.infoagro.com/agricultura_ecologica/lluvia_acida.asp
- www.iespana.es/natureduca/cont_lluvia_acida.htm

Termodinámica de los Gases

- www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=414
- www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=407
- www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=430
- <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=409>
- Termodinámica - calor específico
- <http://thermo.sdsu.edu/TEST-Espanol/testhome/Test/intro/exStatesT.html>

Caracterización Del Combustible

- www.pignc-ispi.com/forums/oilgas/messages/721.html

Aditivos para Combustibles

- www.cleanairnet.org/lac/1471/articles-58251_pdf.pdf
- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55074.html

Combustible

- www.km77.com/tecnica/alternativas/alcohol/texto.asp
- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55074.html
- www.km77.com/tecnica/alternativas/alcohol/texto.asp
- www.conae.gob.mx/work/secciones/2601/imagenes/sistema_de_combustible.pdf
- www.ambienteyenergia.com.ar/htms/notas/nota_1488.htm

Biodiesel

- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17757.html
- www.eco-sitio.com.ar/biodiesel.htm

Gas Natural

- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17753.html
- www.cleanaimet.org/lac/1471/articles-58251_pdf.pdf

GLP

- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/article-55025.html

Etanol

- www.cipres.cec.uchile.cl/~mderout/Taller2.html

Hidrógeno

- bibliotecnica.upc.es/pfc/mostrar_dades_PFC.asp?id=34305 - 19k
- ingenieria.udea.edu.co/investigacion/gea/VENTAJAS.html
- hidrogen.motime.com
- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17756.html

Inyección de Vapor / Agua

- www.ambientum.com/revistanueva/2005-04/hidroinyeccion.htm

Optimización de la Combustión - Relación Aire / Combustible

- www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf

Recirculación de Gases de Escape, EGR

- www.rolcar.com.mx/Mecanica%20de%20los%20sabados/Valvula%20EGR/valvula_egr.htm
- mecanicavirtual.iespana.es/sistema_egr.htm
- www.sttemtec.com/index.php?show=11921_ENG&&page_anchor=http://www.sttemtec.com/p11921/p11921_eng.php
- www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdocs/b03s03.pdf
- www.pacocostas.com/not180.html
- www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-17730.html

Retardo del Tiempo de Inyección

- www.epa.gov/ttn/catc/dir1/fnoxdocs.pdf
- www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch03/bgdogs/b03s03.pdf

Turbo Alimentación en Conjunción con Enfriamiento Posterior

- www.editec.es/trasporte3/edición/081_01.php?id=557
- www.monografias.com/trabajos6/turbo/turbo.shtml
- www.pisteros.com/Secciones/HTM/Articulos_interes/Turbocompresores.htm

Adsorción

- www.lenntech.com/espanol/adsorcion.htm
- www.monografias.com/trabajos14/esquema/esquema.shtml
- www.gaisa.com.ar/pro8.htm
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-1ch1-s.pdf
- <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/covs.asp>
- sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/Tesis/Ingenie/Paredes_M_L/cap4.htm - 57k

Biofiltración

- www.cinvestav.mx/publicaciones/avayper/sepoct02/Frederic.PDF
- www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=732
- www.lasallista.edu.co/revista/vol%201%20-%202/61_%2066%20biofiltración.pdf

Combustión por Antorcha

- www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=811
- <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/metodos.asp>
- www.e-seia.cl/portal/ficha/ficha_principal_web.php?idExpediente=332

Condensación

- www.ffii.nova.es/f2i2/publicaciones/libro_seguridad_industrial/LSI_Cap07.pdf
- www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/temas_interes/download/TECNOTECA.pdf
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-1ch2-s.pdf
- www.aitex.es/estudios/emisiones_atmosfericas.pdf
- debwiley.com/infoeeu2004/science/files/cica/pmcontech2.pdf

Incineradores

- www.e-asphalt.com/magazine/fthermas.pdf
- new.ine.gob.mx/dgicurg/calair/lineas/download/inem_vol4.pdf
- www.sustentable.cl/portada/Industria/2249.asp
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs3-2ch2-s.pdf
- www.cra.gov.co/gc/www/resources/udm_luisanibals.pdf

Ciclón

- www.sesma.cl/sitio/pag/aire/indexjs3aireglosario.asp
- www.estrucplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=436
- www.uam.es/personal_pdi/ciencias/jaimefa/jaimecuevas/clase7.pdf

Filtros de Tela

- new.ine.gob.mx/dgicurg/cclimatico/download/Mexico_Co-control_Final_Report.pdf
- debwiley.com/infoeeuu2004/science/files/cica/pmcontech2.pdf
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch1-s.pdf
- <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=449>

Precipitadores Electrostáticos

- www.luisCIFuentes.cl/docs/Moreno-Cifuentes-ApuntesdeIngenieria-1997.pdf
- www.escolar.com/article.php?sid=72
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch3-s.pdf
- www.pnuma.org/redes_ambientales_cd/capacitacion/Cuaderno%20de%20Contaminacion%20del%20Aire.pdf

Torre de Limpieza Húmeda

- debwiley.com/infoeeuu2004/science/files/cica/cs6ch2-s.pdf
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs6ch2-s.pdf
- <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=442>

Controles de Óxidos de Azufre, SO_x

- ingenieria.udea.edu.co/CURSOS/IQU-555.html
- www.fe.doe.gov/international/Publications/96hemib.pdf
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs5-2ch1-s.pdf
- <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=714>

Reducción Catalítica Selectiva, SCR

- www.icp.csic.es/cyted/Monografias/Monografias2001/A1-013.pdf
- www.iie.org/programs/energy/training/MondaySlides/Modulo%204C%201.ppt
- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch2-s.pdf
- www.meca.org/.../engineName/filemanager/pid/229/icengine.PDF?actionreq=actionFileDownload&fileItem=243
- www.achemamerica.de/images/TB1_s.pdf
- www.arvinmeritor.com/tech_library/documents/GP01-15-SP.pdf

Reducción Catalítica Selectiva con Metano

- www.ist.csic.es/cyted/Monografias/Monografias2001/A1-013.pdf
- omega.ilce.edu.mx:3000/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/55/htm/sec_3.html
- <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=726>

Reducción No Catalítica Selectiva, SNCR

- www.sma.df.gob.mx/sma/modules.php?name=Biblioteca&d_op=getit&lid=302
- <http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/Entrega.asp?identrega=735>
- <http://www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=780>

- www.epa.gov/ttn/catc/dir2/cs4-2ch1-s.pdf
- www.copitival.es/Copiti4/normativa_contamin_PROTOC13.htm