

Universidad Católica Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y
Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica,
Mecánica
Eléctrica y Mecatrónica.



**IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULO ANALIZADOR DE GASES DE
COMBUSTIÓN PORTÁTIL PARA EL LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS
DE LA EPIMMEM DE LA UCSM**

Tesis presentada por los Bachilleres:

Aragón Duran, Michael Karin
Rivas Quispe, Saulo Ricardo

para optar el Título Profesional de

Ingeniero Mecánico Electricista

Asesor:

MSc. Sierra Vásquez, Julio Raúl

Arequipa – Perú

2021

UCSM-ERP

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA
INGENIERIA MECANICA ELECTRICA Y MECATRONICA
TITULACIÓN CON TESIS
DICTAMEN APROBACIÓN DE BORRADOR

Arequipa, 06 de Enero del 2021

Dictamen: 001892-C-EPIMMEM-2021

Visto el borrador de tesis del expediente 001892, presentado por:

2008601281 - ARAGON DURAN MICHAEL KARIN

2011190251 - RIVAS QUISPE SAULO RICARDO

Titulado:

**IMPLEMENTACIÓN DE MÓDULO ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN PORTÁTIL PARA EL
LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS DE LA EPIMMEM DE LA UCSM**

Nuestro dictamen es:

APROBADO

1530 - FERNANDEZ BARRIGA CAMILO GRIMALDO
DICTAMINADOR



1828 - GORDILLO ANDIA CARLOS ALBERTO
DICTAMINADOR



Dedicatorias

Agradezco en primera instancia a Dios nuestro padre creador por darme fuerza y salud en este momento tan crítico que enfrenta nuestro planeta por la pandemia. En segunda instancia agradezco a toda mi familia en especial a mi madre Andrea Quispe quien fue padre y madre por brindarme todo su apoyo y consejos y a mi novia quien con su amor incondicional siempre estuvo a mi lado brindándome su apoyo en muchos momentos difíciles de mi vida.

Rivas Quispe, Saulo Ricardo

Agradezco en primera instancia a Dios, nuestro padre creador, por darme fuerza y salud en este momento tan crítico que enfrenta nuestro planeta por la pandemia. En segunda instancia, agradezco a toda mi familia, en especial a mis padres Rosa y Nicolas por brindarme todo su apoyo y consejos; a mi novia quien con su amor incondicional siempre estuvo a mi lado brindándome su apoyo en todos los momentos difíciles de mi vida.

Aragón Duran, Michael Karin

Agradecimiento



Agradecemos a la Universidad Católica de Santa María alma mater en educación y a todos los docentes de la facultad de Ciencias de Ingeniería Físicas y Formales de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica eléctrica y Mecatrónica quienes fueron un pilar fundamental en nuestro crecimiento y formación como profesional.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como fin la implementación de un módulo analizador de gases de combustión portátil (Kimo Kigaz 310 Pro) para el laboratorio de termofluidos de la EPIMMEM de la UCSM para realizar prácticas de tal manera que pueda ser utilizado por los alumnos.

Gracias al uso del analizador de gases se puede analizar el comportamiento de los gases de combustión y mejorar la eficiencia y rangos de funcionamiento de un sistema de combustión, para lo cual se elaboraron guías de práctica.

La primera práctica consiste que el alumno realice el reconocimiento físico del equipo y así familiarizarse con su operación e importancia de los parámetros medidos en un análisis de gases de combustión y realizar medición de gases CO y CO₂ con el analizador de gases de combustión Kimo Kigaz 310 PRO.

La segunda práctica consiste en realizar mediciones, análisis de gases de combustión y realizar interpretación y la importancia de los parámetros medidos en un análisis.

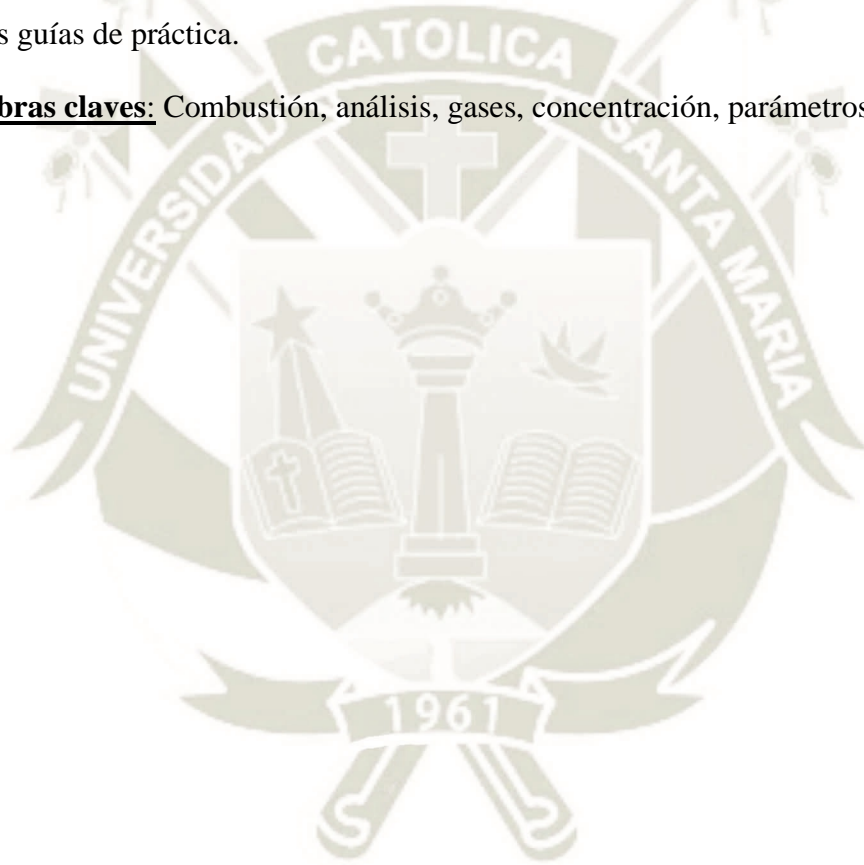
En la tercera práctica consiste en realizar la medición de gases de combustión y el uso de estos parámetros encontrados para el cálculo de la eficiencia y a partir de los resultados optimizar el proceso de combustión de las diferentes máquinas a base de un proceso de combustión.

En las pruebas y análisis se pudo observar que la regulación del oxígeno en una combustión juega un papel fundamental en el resultado de la eficiencia y niveles de concentración de gases de chimenea de una máquina de combustión, así mismo también se pudo observar que las concentraciones de gases de combustión varían en función de varios parámetros

como: porcentaje de oxígeno y temperatura como se pueden visualizar en el capítulo IV de este trabajo. Se elaboró un dashboard simulador de un análisis de gases de combustión donde se puede observar y analizar como el rendimiento de una máquina de combustión varía según la modificación de parámetros de combustión.

Los resultados finales de este proyecto fueron óptimos puesto que se llegó a concluir la implementación del módulo portátil de análisis de gases de combustión y el desarrollo de las guías de práctica.

Palabras claves: Combustión, análisis, gases, concentración, parámetros



ABSTRACT

The purpose of this thesis is to implement a portable combustion gas analyzer module (Kimo Kigaz 310 Pro) for the thermofluid laboratory of the EPIMMEM of the UCSM to use in practices by the students.

Using the gas analyzer, it is possible to analyze the performance of the combustion gases and improve the efficiency and operating ranges of a combustion system and were prepared some guides.

The first practice consists of the student know the physical equipment and become familiar with operation and importance of the parameters measured in a combustion gas analysis and know CO and CO₂ gas measurements with the Kimo Kigaz 310 combustion gas analyzer. PRO.

The second practice consists in know measurements, analysis of flue gases and interpreting the importance of the parameters measured in an analysis.

The third practice consists in realize measuring the combustion gases and using these parameters found to calculate the efficiency and, based on the results, optimize the combustion process of the different machines based on a combustion process.

In tests and analysis it was observed that the regulation of oxygen in a combustion plays a fundamental role in the result of the efficiency and concentration levels of flue gases of a combustion engine, and it was also observed that the concentrations of Combustion gases change according to several parameters such as: oxygen percentage and temperature as can be seen in chapter IV of this thesis. A simulator dashboard of a combustion gas analysis

was elaborated where it know and analyzed how the performance of a combustion engine change when modify the combustion parameters.

The final results of this project were optimal to the implementation of the portable flue gas analysis module and the development of the practice guides.

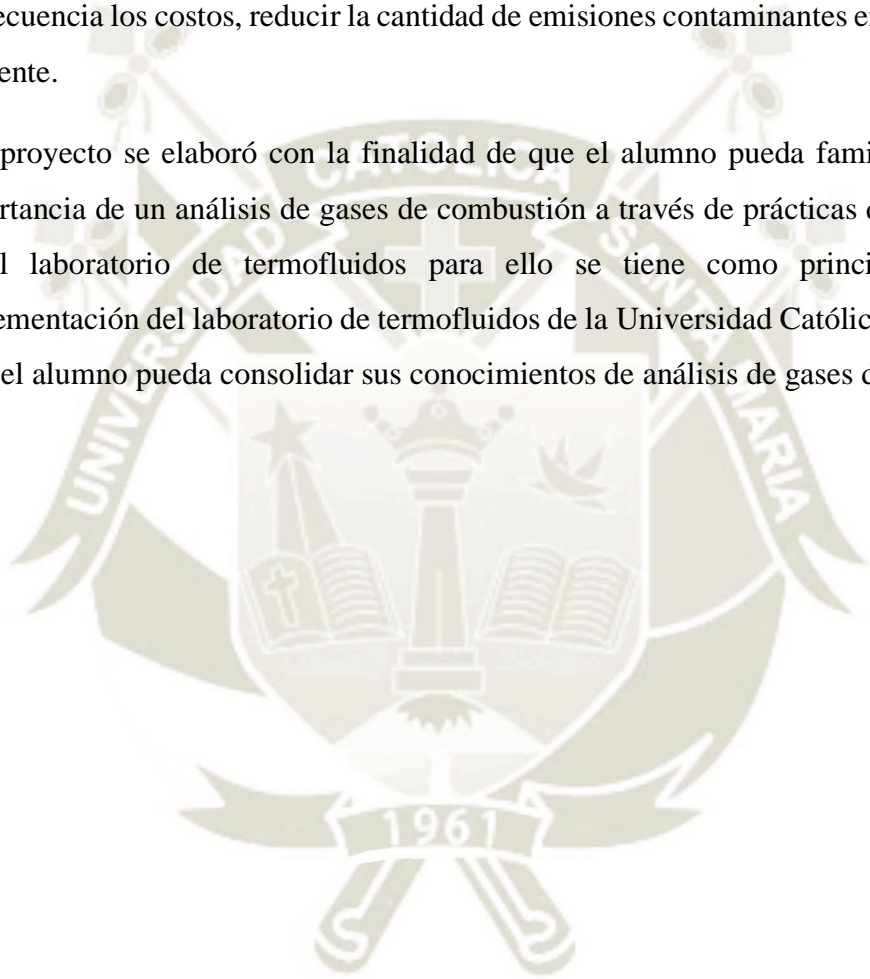
Keywords: Combustion, analysis, gases, concentration, parameters



INTRODUCCIÓN

El análisis de gases de combustión es una de los pilares fundamentales en mantenimiento de una máquina de combustión pues nos permite alargar la vida de este, aumentar la eficiencia de la máquina de combustión, bajar el consumo de combustible y en consecuencia los costos, reducir la cantidad de emisiones contaminantes enviados al medio ambiente.

Este proyecto se elaboró con la finalidad de que el alumno pueda familiarizarse con la importancia de un análisis de gases de combustión a través de prácticas que se realizaran en el laboratorio de termofluidos para ello se tiene como principal objetivo la implementación del laboratorio de termofluidos de la Universidad Católica de Santa María y así el alumno pueda consolidar sus conocimientos de análisis de gases de combustión.



ÍNDICE

DICTAMEN APROBATORIO

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

1. GENERALIDADES.....	1
1.1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO	1
1.1.1. Enunciado del problema.....	1
1.2. Planteamiento del Problema.....	1
1.3. Formulación del Problema	2
1.4. Sistematización del problema	2
1.5. Objetivos	3
1.5.1. Objetivo General:	3
1.5.2. Objetivos específicos:.....	3
1.6. Justificación.....	3
1.7. Hipótesis de la investigación	3
1.7.1. Hipótesis General.	3
1.7.2. Hipótesis Específicas.....	4
2. CAPÍTULO II:.....	6
2.1. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1.1. Contaminación atmosférica	6
2.1.2. El cambio climático.....	7
2.1.3. Contaminación del aire	10
2.1.4. Material particulado	13
2.1.5. Razones para realizar el análisis de gases de combustión	13
2.1.6. Formación de emisiones contaminantes en motores de combustión interna.	16
2.1.7. Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido.....	17
2.1.8. Gases de escape de un motor a gasolina.....	21

2.1.9.	Gases de escape de un motor diésel	22
2.1.10.	Normativas de control de emisiones	23
2.1.11.	Normativas europeas de emisiones para vehículos	24
2.2.	Combustión	27
2.2.1.	Oxidación.....	28
2.2.2.	Instalaciones De Combustión	28
2.2.3.	Aire de combustión	29
2.2.4.	Productos de la combustión	30
2.2.4.1.	Nitrógeno (N_2):	31
2.2.4.2.	Anhídrido carbónico (CO_2):	31
2.2.4.3.	Vapor de agua (humedad):	32
2.2.4.4.	Oxígeno (O_2):	32
2.2.4.5.	Monóxido de carbono (CO):	32
2.2.4.6.	Óxidos de nitrógeno (NO y NO_2 , fórmula total (NO_X):	33
2.2.4.7.	Anhídrido sulfuroso (SO_2):	34
2.2.4.8.	Sulfuro de hidrógeno (H_2S):	34
2.2.4.9.	Sustancias sólidas (polvo, hollín):	34
2.2.5.	Unidades de Medida	35
2.2.5.1.	Ppm (Partes Por Millón)	35
2.2.5.2.	Mg/ Nm^3 (miligramos por metro cúbico)	36
2.2.5.3.	Mg/kWh (Miligramos por kilovatio hora de energía usada)	37
2.2.6.	Analizadores De Gases De Combustión	38
2.2.6.1.	Analizadores de gases de combustión portátiles.....	38
2.2.6.2.	Analizadores de gases de combustión permanentes.....	39
2.2.6.3.	Analizadores de gases de combustión infrarrojos	40
2.2.6.4.	Analizadores de gases de combustión Bacharach	41
2.2.6.5.	Analizadores de gases de combustión electroquímicos	41
2.2.6.6.	Analizadores de gases de combustión multisensor	42
2.2.7.	Sensores Electroquímicos.....	43
2.2.7.1.	Técnicas Electroquímicas.....	44
2.2.7.2.	Sensores químicos	50
2.2.7.3.	Sensor de oxígeno	52

2.2.7.4.	Sensores para CO, SO₂ y NO_X	53
2.2.8.	Sistemas de monitoreo extractivos	55
2.2.8.1.	Sistemas extractivos completos o directos (nivel de la fuente)	57
2.2.8.2.	Sistemas extractivos con dilución	59
2.2.9.	Componentes del sistema de muestreo y metodología de análisis.....	61
2.2.9.1.	Sonda de muestreo (probeta)	61
2.2.9.2.	Línea de transporte de muestra (umbilical).....	63
2.2.9.3.	Sistema de acondicionamiento de muestra	64
2.2.9.4.	Bomba de muestreo	64
2.2.10.	Sistemas de analizadores	65
2.2.11.	Sistema de adquisición, tratamiento y comunicación (satc)	67
2.2.12.	Quemadores.....	68
2.2.12.1.	Quemadores atmosféricos	68
2.2.12.2.	Quemadores mecánicos	69
2.2.12.3.	Quemadores para combustibles gaseosos	70
2.2.12.4.	Quemador de pre mezcla	71
2.2.12.5.	Vaporización por pulverización	72
2.2.12.6.	Quemador para combustible sólido	73
3.	CAPÍTULO III:	76
3.1.	DESARROLLO DE MEDICIONES CON EL MÓDULO ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN	76
3.2.	Datos técnicos del instrumento utilizado	76
3.3.	Medición Gases	77
3.4.	Medición Presión	78
3.5.	Medición Temperatura	78
3.6.	Otras funciones	78
3.7.	Cálculos justificativos	79
3.7.1.	Parámetros medidos directamente.....	79
3.7.2.	Parámetros calculados	79
3.7.2.1.	Exceso de aire	79
3.7.2.2.	Óxidos de nitrógeno	80
3.7.2.3.	Dióxido de carbono	80

3.7.2.4.	Concentración de monóxido de carbono corregido no diluido o corregido .	81
3.7.2.5.	Pérdida de calor de la combustión	81
3.7.2.6.	Constante de Sievert para el Combustible	82
3.7.2.7.	Pérdida por inquemados	82
3.7.2.8.	Rendimiento	83
3.8.	Pruebas realizadas.....	84
3.8.1.1.	Simulador de analizador de gases de combustión.....	84
3.8.1.2.	Prueba de análisis de gases de combustión.....	87
3.8.1.3.	Medición de análisis de gases de combustión	90
3.8.2.	Medición de CO ambiental	93
3.8.2.1.	Medición de CO2 ambiental	95
3.8.2.2.	Medición de temperatura ambiental	97
3.8.2.3.	Medición de temperatura en los gases de combustión.....	99
3.8.2.4.	Medición de tiro o fuerza ascensional	100
4.	CAPÍTULO IV: ADQUISICIÓN DE DATOS Y RESULTADOS DE MEDICIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN	104
4.1.	Adquisición de datos	104
4.2.	Factores de entrada para el análisis de gases de combustión.....	104
4.3.	Procedimiento para la adquisición de datos	105
4.4.	Medición y Análisis de gases de combustión	106
4.4.1.	Análisis de gases de combustión en vehículo gasolina	106
4.4.1.1.	Datos de medición de gases	107
4.4.1.2.	Análisis de los gases de combustión	108
4.4.2.	Análisis de gases de combustión en vehículo Diesel	113
4.4.2.1.	Datos de medición de gases	114
4.4.3.	Análisis de gases de combustión en una caldera.....	116
4.4.3.1.	Datos de medición de gas.....	117
4.4.3.2.	Análisis de los gases combustión de la caldera.....	117
5.	CONCLUSIONES.....	123
6.	Recomendaciones	124
	BIBLIOGRAFÍA	125
7.	ANEXOS.....	127



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Muestra anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019	8
Figura 2 Contaminación y sus efectos en la salud	11
Figura 3 PM 10 Promedio anual de contaminación en ciudades seleccionadas (mg/m ³)	12
Figura 4 Concentraciones promedio anual para PM10 y PM25 -2011.....	13
Figura 5 Razones para realizar análisis de gases	14
Figura 6 Mecanismo de formación de emisiones	17
Figura 7 Variación de la concentración de HC, CO y NO en los gases de escape	20
Figura 8 Composición de los gases de escape de un motor a gasolina.....	22
Figura 9 Composición de los gases de escape de un motor a diésel.....	23
Figura 10 Instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor Diesel.....	24
Figura 11 Instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor gasolina.....	25
Figura 12 Ciclo europeo de medida de emisiones NEDC. a) Parte urbana UCD. b) Parte Extraurbana EUCD	26
Figura 13 Concentración de Aire en la combustión	30
Figura 14 Efectos del monóxido de carbono según el tiempo y concentración aérea	33
Figura 15 Analizador de gases Kimo 310 pro	39
Figura 16 Analizador de gases permanente	40
Figura 17 Analizador de gases de combustión infrarrojos	41
Figura 18 Analizador de gases multisensor	42
Figura 19 Sensor Electroquímico	44
Figura 20 Clasificación basada en el carácter de la señal	45
Figura 21 Representación de una celda electroquímica de tres electrodos.....	47
Figura 22 Señal de excitación.....	50
Figura 23 Sensor Químico	51
Figura 24 Sensor de oxígeno (esquema).....	53
Figura 25 Sensor para CO y otros gases (esquema)	55
Figura 26 Tipos de extracción de gases	56
Figura 27 Método extractivo directo: sistema frío- seco	58
Figura 28 Sistemas extractivos de dilución	61

Figura 29 Quemadores Atmosféricos	69
Figura 30 Quemador mecánico.....	70
Figura 31 Quemador combustible gaseoso.....	71
Figura 32 Quemador combustible Liquido.....	72
Figura 30 Quemador para carbón pulverizado de bajo NOx	74
Figura 31 Simulación de intoxicación por monóxido de carbono por tiempo de exposición.....	83
Figura 32 Simulador de analizador de gases de combustión relación CO ₂ -CO	85
Figura 33 Simulador eficiencia vs exceso de aire.....	86
Figura 34 Simulador de analizador de gases – eficiencia método Indirecto	87
Figura 35 Medición de gases de combustión.....	106
Figura 36 Análisis del oxígeno motor otto	108
Figura 37 Análisis de monóxido de carbono motor otto	109
Figura 38 Análisis de dióxido de carbono motor otto	110
Figura 39 Análisis de óxido de nitrógeno motor otto	111
Figura 40 Análisis final de gases de combustión motor otto.....	112
Figura 41 Medición de gases de combustión.....	113
Figura 42 Análisis de gases de combustión motor Diesel	115
Figura 43 Análisis de gases de combustión.....	116
Figura 44 Análisis de oxígeno	118
Figura 45 Análisis de monóxido de carbono	119
Figura 46 Análisis de dióxido de carbono	120
Figura 47 Análisis de Óxidos de nitrógeno	121
Figura 48 Análisis de gases de una caldera	122

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes.....	10
Tabla 2 Límite de emisiones en g/km. Normativa europea para Vehículos turismo	27
Tabla 3 Características de los sistemas de monitoreo.....	56
Tabla 4 Sistemas extractivos con dilución.....	60
Tabla 5 Características técnicas principales.....	76
Tabla 6 Parámetros medidos en forma directa.....	79
Tabla 7 CO_2 máximo de los combustibles.....	80
Tabla 8 Propiedades de los Combustibles.....	82
Tabla 9 Sistema de análisis de gases por el método extractivo	88
Tabla 10 Característica de los sistemas de monitorio extractivos	88
Tabla 11 Esquema de realización del análisis de gases de combustión.....	89
Tabla 12 Estándar nacional de CO.....	94
Tabla 13 Control personal.....	96
Tabla 14 Medición de CO_2 ambiental	96
Tabla 15 Medición de temperatura de ambiente.....	97
Tabla 16 Medición de temperatura de gases.....	99
Tabla 17 Medición de tiro.....	101
Tabla 18 Parámetros de gases de medición	104
Tabla 19 Medición de gases de combustión gasolina	107
Tabla 20 Medición de gases de combustión	114
Tabla 21 Medición de gases de combustión	117



CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1.1.1. Enunciado del problema.

“Implementación de módulo analizador de gases de combustión portátil para el laboratorio de termofluidos de la EPIMMEM de la UCSM”

1.2. Planteamiento del Problema

La Universidad Católica de Santa María es una de las mejores instituciones reconocidas a nivel nacional e internacional por formar los mejores profesionales y futuros líderes de nuestro país, además de ser la primera unidad académica fuera de Lima en contar con la certificación emitida por la comisión de acreditación de ingeniería de ABET para 6 de sus escuelas profesionales como Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Mecánica, Ingeniería Mecánica Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería Industrial, Ingeniería Mecatrónica.

En la formación de un ingeniero intervienen tanto la parte teórica como la parte práctica, en la parte teórica la Universidad Católica de Santa María en la facultada de ciencias e ingenierías físicas y formales cuenta con los educando mejor calificados y preparados para desarrollar la función de padres formadores de grandes profesionales ingenieros y en la parte practica la Universidad Católica de Santa María cuenta y necesita de los laboratorios e equipos mejor implementados y equipados para poner en práctica el desarrollo técnico de todas las teorías, habilidades y conocimientos aprendidos durante nuestra etapa de formación como ingenieros, pero si no contamos con laboratorios bien implementados al acabar la carrera de ingeniería y enfrentarnos a un mercado laboral tan competitivo como lo es actualmente, no podremos concretar exitosamente nuestro crecimiento como

ingenieros llevándonos a un posible problema de déficit de conocimiento técnico-práctico. Por la importancia del caso se ha venido realizando esfuerzos para adquirir y desarrollar los módulos y equipos necesarios que completen y enriquezcan nuestro laboratorio y así permitiéndonos desarrollar a plenitud todas nuestras prácticas necesarias en nuestra formación y crecimiento como Ingenieros Mecánicos, Mecánicos Eléctricos y Mecatrónicos.

1.3. Formulación del Problema

En este siglo XX, la industria global se basa primordialmente en la combustión del carbón, petróleo y gas para operar fábricas y plantas de energía, para mover aviones, trenes y automóviles, etc. Generando una gran cantidad de gases de combustión que pueden ser contaminantes.

El análisis de gases nos permite evaluar y diagnosticar el tipo de gases de combustión que son emitidos al medio ambiente.

1.4. Sistematización del problema

¿Qué rutinas se pueden realizar para obtener los cálculos con un analizador de gases de combustión?

¿Cómo será el proceso de implementación del sistema analizador de gases de combustión de la Universidad Católica de Santa María?

¿De qué manera se pueden elaborar guías de prácticas de dichas experimentaciones de laboratorio para el desarrollo del módulo de cálculo a partir de datos experimentales?

¿Cuál es la finalidad de implementar el módulo analizador de gases de combustión en la Universidad Católica de Santa María?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General:

Implementar un módulo didáctico de analizador de gases de combustión portátil para el laboratorio de termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica De Santa María.

1.5.2. Objetivos específicos:

- Instalar la unidad de medición de gases de combustión en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.
- Elaboración de guías de laboratorio para realizar la práctica de análisis de gases de combustión.
- Realizar un análisis con los datos obtenidos con el módulo analizador de gases de combustión.

1.6. Justificación

Esta investigación se justifica ante la necesidad de tener uno de los laboratorios de termofluidos más completos y actualizados, de igual manera tener guías de prácticas de laboratorio que favorezcan el aprendizaje de los estudiantes de Ciencias e Ingenierías Físicas y formales de la Universidad Católica Santa María.

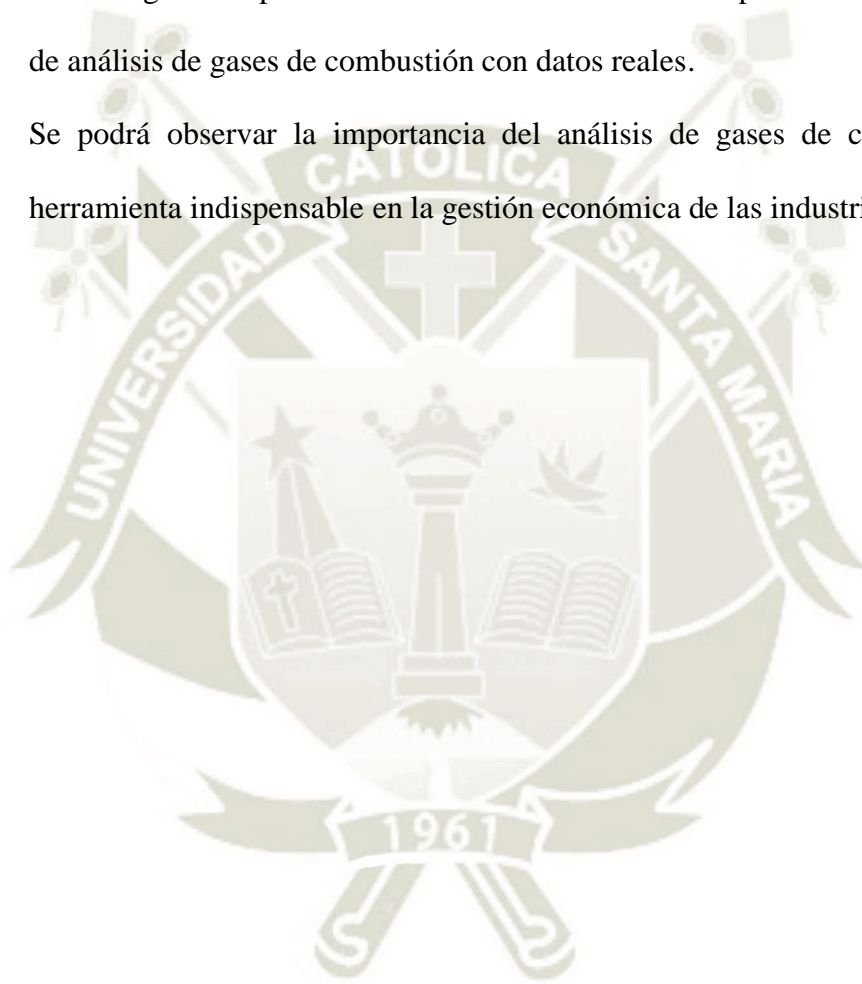
1.7. Hipótesis de la investigación

1.7.1. Hipótesis General.

Es probable que, implementando el módulo analizador de gases de combustión, se favorezca grandemente el laboratorio de termofluidos de la Universidad Católica de Santa María.

1.7.2. Hipótesis Específicas.

- Se podrá realizar mediciones de emisiones para controlar el cumplimiento de los valores límite para contaminantes en los gases de combustión.
- Al tener guías de práctica del laboratorio el estudiante podrá realizar las prácticas de análisis de gases de combustión con datos reales.
- Se podrá observar la importancia del análisis de gases de combustión como herramienta indispensable en la gestión económica de las industrias.





CAPÍTULO II

CAPÍTULO II:

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Contaminación atmosférica

La contaminación del aire ha sido un problema de salud pública desde el descubrimiento del fuego, debido a los humos producidos en el proceso de combustión. Inicialmente el problema se presentó en espacios cerrados o con ventilación deficiente, pero posteriormente llegó a afectar la calidad de aire en los asentamientos urbanos. Séneca en el año 61 a.c. escribió sobre el "Aire cargado de Roma" y en el siglo XI se llegó a prohibir la quema de carbón en Londres. (Bedoya, 2014)

Los problemas modernos de contaminación del aire se remontan al siglo XVIII en Inglaterra con el nacimiento de la revolución industrial debido el uso de combustibles fósiles para la producción de energía. A fines del siglo XIX e inicios del siglo XX, el humo y las cenizas llegaron a ser el principal problema de contaminación urbana, situación que empeoró con el creciente uso del automóvil. Desde mediados del siglo XX en ciudades como Londres y más tarde Los Ángeles, en los Estados Unidos, se presentaron episodios importantes de salud pública a causa de la contaminación del aire. (Bedoya, 2014)

A raíz de una conferencia sobre contaminación del aire realizada en Milán en 1957, en donde se trataron los aspectos de salud pública relacionados con la contaminación del aire en Europa, la Organización Mundial de la Salud (OMS) se empezó a preocupar por este tema, especialmente por sus efectos nocivos sobre la salud. La OMS revela que hoy en día, en el mundo más de 3,1 millones de personas

mueren cada año por causas directamente atribuibles a la contaminación del aire, equivalente al 5,3% de las muertes totales. El 40% de estas muertes se deben a la contaminación ambiental urbana y el resto a la contaminación del aire en espacios cerrados. (Bedoya, 2014) (WHO, 2009).

Las primeras legislaciones para regular las emisiones contaminantes las promulgó Estados Unidos en la década de los sesenta, setenta y noventa, después fue seguido por algunos países europeos, Japón y finalmente la Unión Europea en conjunto. Actualmente, en Europa los techos nacionales de emisión (NEC) de determinados contaminantes atmosféricos son regulados por la Directiva 2001/81/EC (NECD) y la calidad de aire ambiente por medio de la Directiva 2008/50/EC, que entró en vigor en junio de 2008. Estas normativas tienen como objetivo: limitar las emisiones de contaminantes para reforzar la protección del medio ambiente y de la salud humana, así como avanzar hacia el objetivo de no superar los niveles críticos de contaminantes y de proteger de forma eficaz a toda la población frente a los riesgos para la salud que se derivan de la contaminación atmosférica. (Bedoya, 2014)

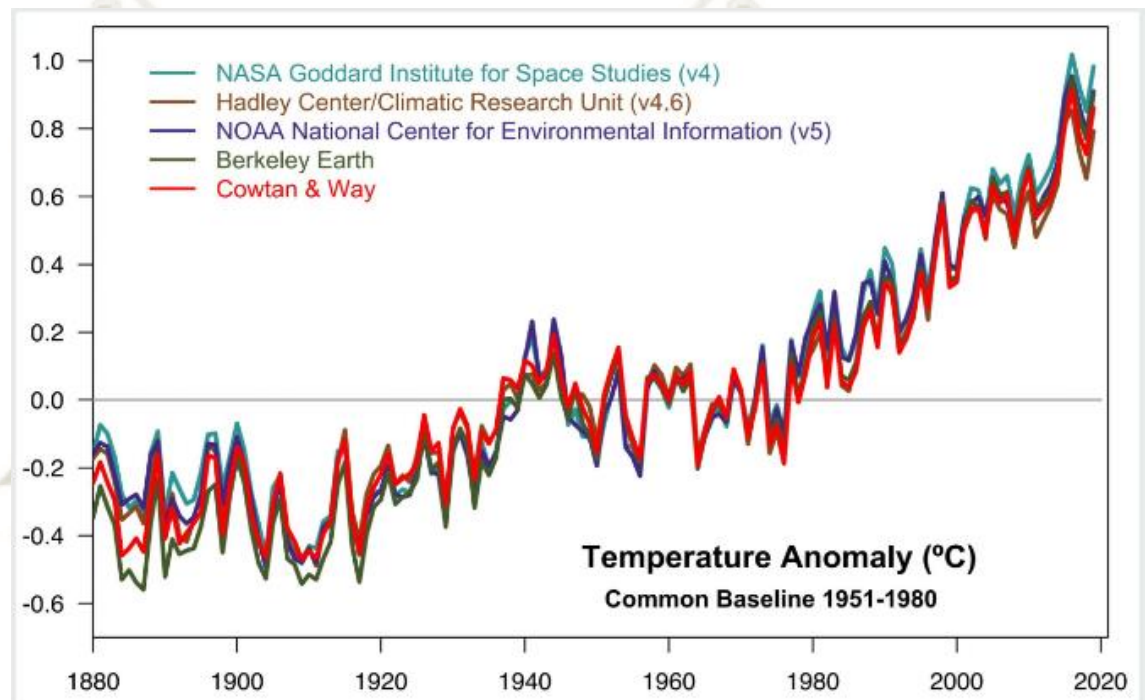
2.1.2. El cambio climático

Por su parte, el problema del cambio climático causado por los Gases de Efecto Invernadero (GEI) fue descubierto por el científico sueco Svante Arrhenius (1859-1927) en 1896. Descubrió que debido a la capacidad de absorción de la radiación infrarroja del vapor de agua y del dióxido de carbono, los combustibles fósiles podrían dar lugar o acelerar el calentamiento de la tierra. Arrhenius llegó a establecer una relación entre la concentración de dióxido de carbono atmosférico y

la temperatura. Este descubrimiento no tuvo relevancia hasta los años ochenta, en donde se observó un aumento significativo en la curva de temperatura media anual global, como se observa en la Figura 1. (Bedoya, 2014)

Figura 1

Muestra anomalías de temperatura anuales desde 1880 hasta 2019



Fuente: NASA GISS / (Gavin Schmidt, 2019)

Hoy en día se conoce que la quema de petróleo, carbón y gas natural ha causado un aumento del CO₂ en la atmósfera que últimamente es de 1,4 ppm al año y produce el consiguiente aumento de la temperatura. Se estima que desde que el hombre mide la temperatura hace unos 150 años (siempre dentro de la época industrial) ésta ha aumentado 0,5 °C y se prevé un aumento de 1 °C en el 2020 y de 2 °C en el 2050. Adicionalmente, se estima que más de 140 mil personas mueren al año por causas del cambio climático. (WHO, 2009)

En 1998 se promulgó el protocolo de Kioto sobre el cambio climático cuyo objetivo fue reducir las emisiones de los principales gases de efecto invernadero en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2012. Para el caso del CO₂ el objetivo planteado fue reducir su emisión en un 8%. La XV Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático que se celebró en Copenhague, Dinamarca, en diciembre de 2009, cuyo objetivo era la conclusión de un acuerdo jurídicamente vinculante sobre el clima, válido en todo el mundo y de aplicación a partir de 2012, no alcanzó a tener carácter oficial, debido a no haber obtenido un acuerdo unánime. De todas formas, en Europa se llegó a un acuerdo para reducir las emisiones de CO₂ de los vehículos ligeros, limitando las emisiones de CO₂ a 130 g/km, con aplicación progresiva desde 2012 hasta 2015 (Regulation (EC) No. 443/2009). (Bedoya, 2014)

Además, del dióxido de carbono (CO₂), existen otros gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global, tales como el gas metano (CH₄) óxido nitroso (N₂O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF₆), los cuales están contemplados en el Protocolo de Kioto y en las normativas ambientales de carácter local. Cada GEI tiene una influencia térmica (forzamiento radiactivo) distinta sobre el sistema climático mundial por sus diferentes propiedades radiactivas y períodos de permanencia en la atmósfera. En la literatura científica, tales influencias se homogenizan en una métrica común definida como el cambio en el flujo de energía en la tropopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera), en W m⁻². Los gases con mayor forzamiento radiactivo positivo (influencia térmica de calentamiento) son el dióxido de carbono [CO₂], el óxido nitroso [N₂O], metano [CH₄] y los cloro-fluoro-

carbonos, que en total equivalen a un valor de forzamiento radiactivo de $2,4 \text{ W m}^{-2}$ en el año 2000. También hay GEI que tienen un forzamiento radiactivo negativo o influencia térmica de enfriamiento como ciertos compuestos de azufre y el ozono estratosférico, pero aún estos efectos no están estudiados científicamente en profundidad. (Bedoya, 2014) (CRFEC, 2005).

2.1.3. Contaminación del aire

Al analizar los factores que afectan la contaminación del aire se encuentra que el transporte urbano es uno de los mayores productores de contaminación ambiental en la ciudad de Arequipa ya que, es responsable de la producción de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), compuestos orgánicos volátiles (COV) entre otros. Tal como se muestra en la tabla 1. (Sánchez, 2018)

Tabla 1
Principales contaminantes atmosféricos químicos y sus fuentes

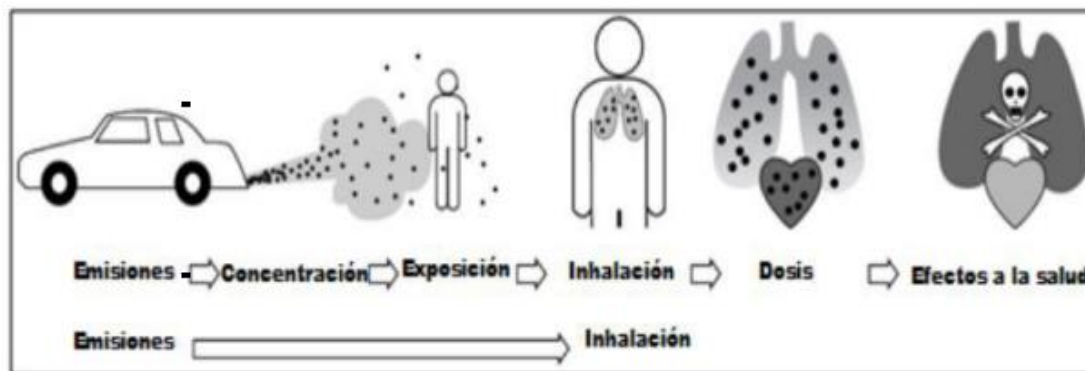
Contaminantes	Formación	Estado Físico	Fuentes
Partículas en suspensión (PM), PM ₁₀ , Humos Negros	Primaria y Secundaria	Sólido, líquido	Vehículos Procesos industriales Humo de tabaco
Dióxido de Azufre (SO ₂)	Primaria	Gas	Procesos Industriales Vehículos
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Primaria y Secundaria	Gas	Vehículos Estufas y cocinas de gas
Monóxido de Carbono (CO)	Primaria	Gas	Vehículos Combustiones en interiores Humo de tabaco
Compuestos orgánicos volátiles (COV _x)	Primaria, Secundaria	Gas	Vehículos, industria humo de tabaco y combustiones en interiores
Plomo (Pb)	Primaria	Sólido (partículas finas)	Vehículo, industria
Ozono (O ₃)	Secundaria	Gas	Vehículos (secundario a foto-oxidación de NO _x y COV _x)

Fuente: (Sánchez, 2018)

Los efectos de la contaminación del aire en la salud son diversos entre ellos podemos señalar las enfermedades respiratorias, cardiovasculares neumonías,

enfermedades al corazón entre otras. El proceso de estas enfermedades lo podemos observar en la representación de la figura 2. (Sánchez, 2018)

Figura 2
Contaminación y sus efectos en la salud

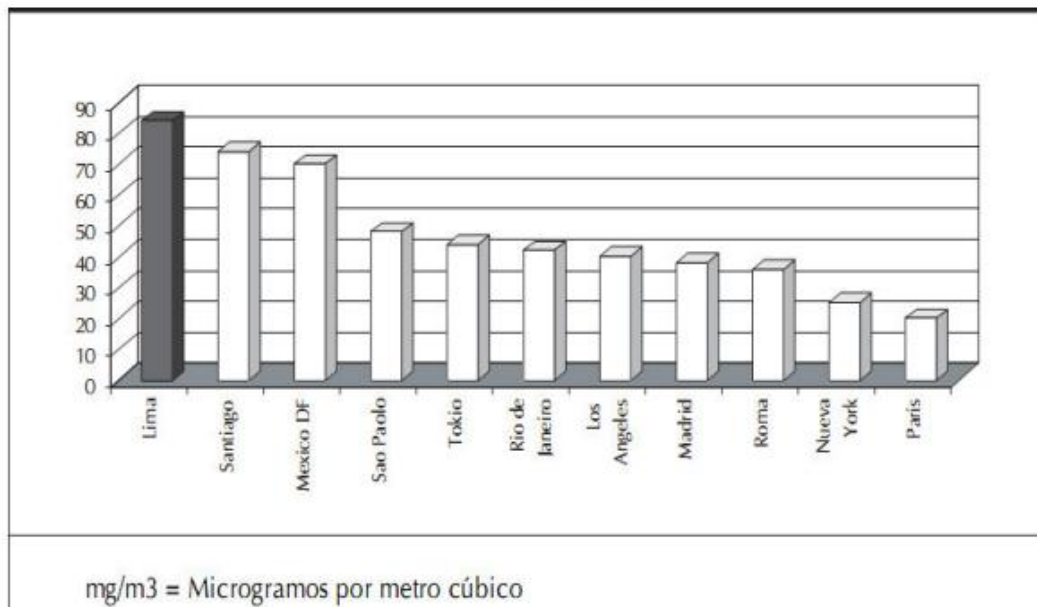


Fuente: (Sánchez, 2018)

Asimismo, investigaciones del Banco Mundial (2007) - Análisis Ambiental del Perú, Retos para un Desarrollo Sostenible- señala que Lima es una de las ciudades más contaminadas del mundo. Ya que las concentraciones de contaminantes en algunas partes de Lima son más altos que en otras ciudades latinoamericanas con severa contaminación del aire como Ciudad de México y Santiago, y son considerablemente más altos que ciudades fuera de la región como Los Ángeles, Tokio y Roma que han reducido exitosamente sus concentraciones de aire contaminado, a pesar de haber tenido sectores de transporte y de industria más grandes. Tal como se observa en la figura 3. (Sánchez, 2018)

Figura 3

PM 10 Promedio anual de contaminación en ciudades seleccionadas (mg/m3)

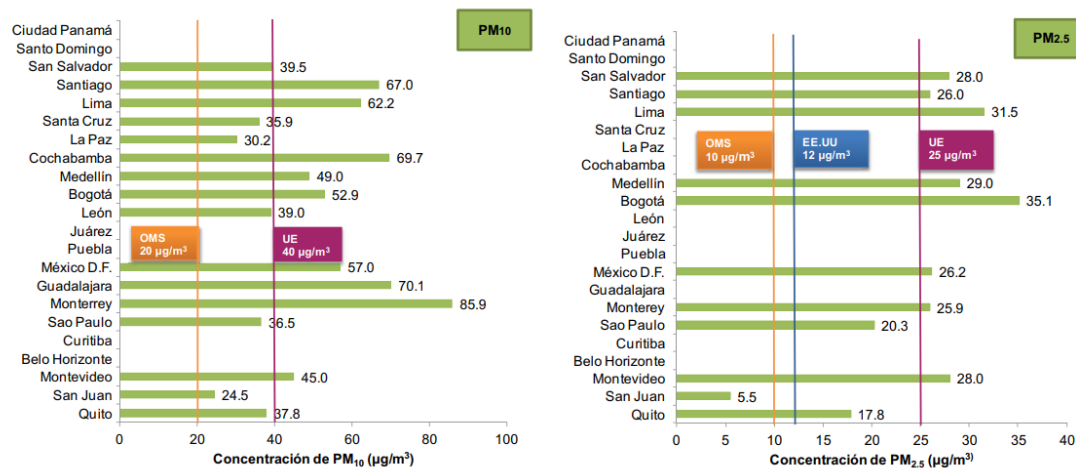


Fuente: Adaptada de (Sánchez, 2018)

Asimismo, el estudio indica que el problema de la contaminación del aire es más crítico en los corredores industriales del país, tal como lo es Lima Callao, el cual se lleva casi el 75 por ciento del costo estimado asociado al impacto sobre la salud. Del mismo modo, el Consejo Nacional del Ambiente (CONAM, 2006) reveló que solo por exposición al material particulado, en Lima, mueren más de 6 000 personas al año y los gastos de salud por dicha exposición representan un aproximado de US\$ 300 millones. Por otra parte, el estudio La Calidad del Aire en América Latina del 2013 del Clean Air Institute, también hace hincapié en los altos niveles de concentración de PM10 del año 2011 superando los límites permitidos de la OMS, UE y EE.UU. Ver Figura 4. (Sánchez, 2018)

Figura 4

Concentraciones promedio anual para PM10 y PM25 -2011



Nota Bene: No hay un estándar anual de la USEPA para PM₁₀

Fuente: Clear Air Institute (La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica) (Green & Sanches, 2013)

2.1.4. Material particulado

Es una mezcla de partículas sólidas y líquidas minúsculas, que se encuentran en el aire que respiramos. Del material particulado, las partículas “finas” o más pequeñas (aquellas con un diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros o PM 2,5) son especialmente dañinas, puesto que pueden penetrar profundamente en los pulmones, donde pueden causar inflamación y empeoramiento de condiciones cardíacas o pulmonares; entre otras afecciones. (Clean Air Institute en su estudio: La Calidad del Aire en América Latina del 2013). (Sánchez, 2018)

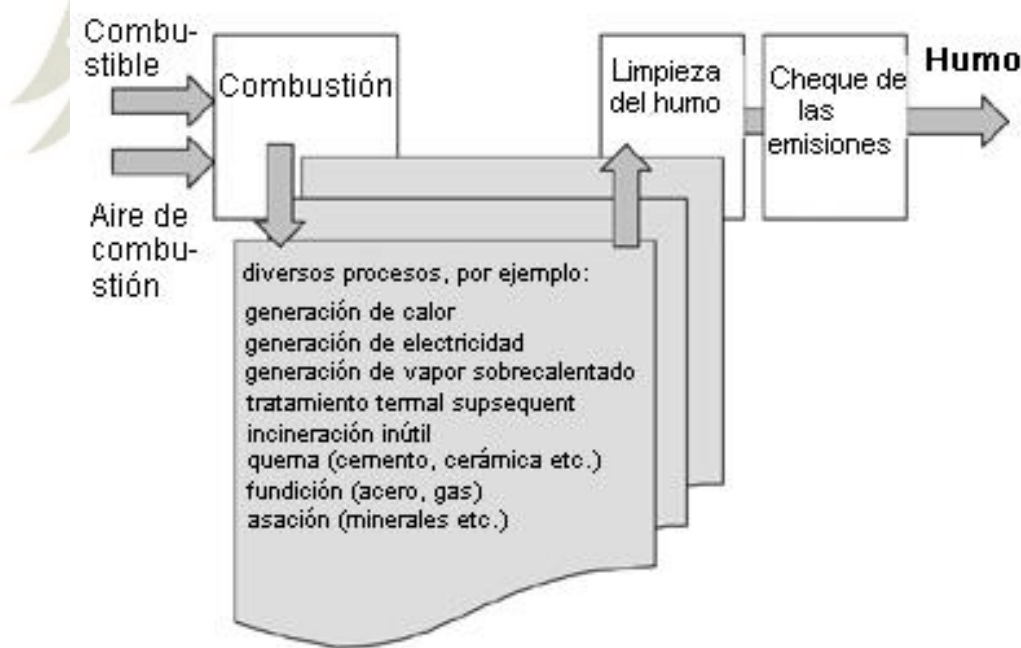
2.1.5. Razones para realizar el análisis de gases de combustión

El análisis de gases (que es la tecnología de medición usada para determinar la composición de los gases) es una herramienta indispensable para garantizar la

gestión económica y segura del proceso en virtualmente todos los campos de la industria.

Está enfocado a los procesos de combustión, aunque este es un término genérico que incluye un gran número de procesos diferentes. La Figura 5 muestra la secuencia de un proceso de combustión en secciones, que empieza (a la izquierda) con el aporte del combustible y del aire de combustión a una cámara de combustión, seguido por la combustión real y los diversos procesos ejecutados en su interior, pasando por la limpieza de los gases de combustión y la comprobación de las emisiones finales. (Academia Testo, 2018)

Figura 5
Razones para realizar análisis de gases



Fuente: Adaptado de (Academia Testo, 2018)

El análisis de gases proporciona información acerca de la composición de los gases de combustión y de los gases de escape en todas las fases de esta cadena de proceso.

Es por consiguiente una herramienta indispensable para la operación económica y segura de la instalación en conformidad con la reglamentación oficial y, por consiguiente, también para la calidad y eficiencia de la producción. (Academia Testo, 2018)

Los analizadores de gases de se usan ampliamente para analizar gases de combustión en la industria y en ninguna forma está reducido su empleo al campo específico del control de emisiones. Se puede hacer una distinción, con un cierto solapamiento, entre las siguientes aplicaciones: (Academia Testo, 2018)

- Trabajos de ajuste y revisión para reparación general, por ejemplo, después del mantenimiento de la instalación, en concepto de investigación de averías en caso de procesos inestables, en la preparación para las mediciones oficiales, después de reparaciones, etc.
 - Mediciones en proceso de combustible, aire de combustión, quemador y en la cámara de combustión para optimizar la combustión con la finalidad de ahorrar combustible, mejorar el rendimiento y prolongar la vida operativa de la instalación.
 - Mediciones en proceso para controlar una atmósfera gaseosa definida en la cámara de combustión o en cámaras de combustión especiales o en hornos durante procesos tales como incineración, tostación, tratamiento superficial, etc.
 - Mediciones de proceso y emisiones para controlar el funcionamiento correcto de los equipos de limpieza de los gases de combustión.
 - Mediciones de emisiones para controlar el cumplimiento de los valores límite para contaminantes en los gases de combustión corriente arriba o en la chimenea.
- (Academia Testo, 2018)

2.1.6. Formación de emisiones contaminantes en motores de combustión interna.

La combustión en los motores de combustión interna es una fuente importante de contaminación del aire, debido a que genera emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos inquemados (HC), óxidos de nitrógeno (NOX), partículas y otros productos que dependen de la composición del combustible. En la combustión de combustibles que solo contengan carbono, hidrógeno y oxígeno, la mayoría de estas emisiones se originan por fenómenos asociados a combustión incompleta dentro de los cilindros, excepto los óxidos de nitrógeno. (Fonseca, 2012)

La cantidad de emisiones depende de varios factores como son el diseño del motor, las condiciones de operación, las condiciones atmosféricas, el tipo de combustible y el sistema de postratamiento de gases empleado. Por ejemplo, dependiendo de las condiciones de operación, un motor de gasolina de cuatro tiempos sin sistema de postratamiento puede emitir alrededor de 0,2 a 5 % en volumen de CO, 300 a 6000 ppmV de HC (base metano C₁) y hasta 2000-3000 ppmV de NOX. (Fonseca, 2012)

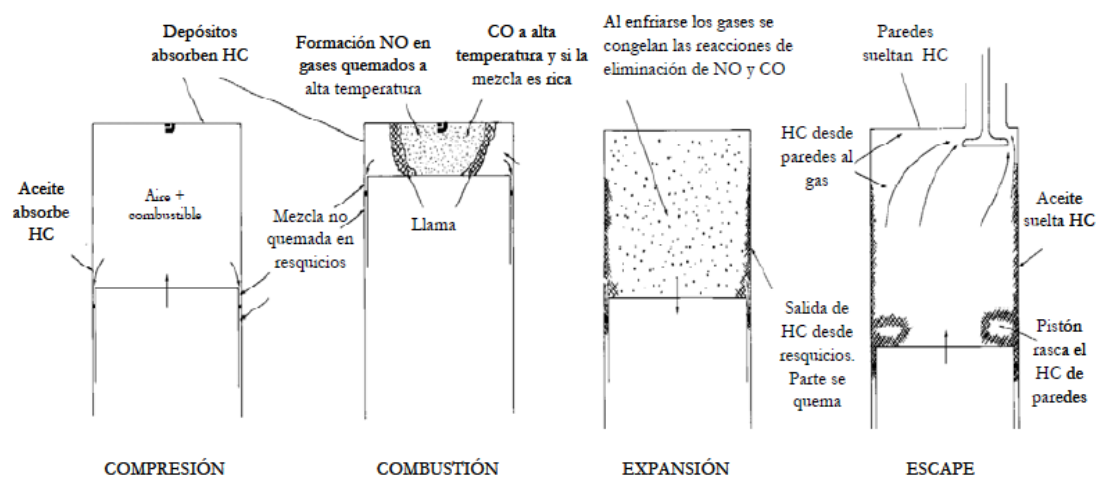
Por su parte, en los motores de encendido por compresión, sin postratamiento de gases, las emisiones de CO son relativamente bajas, aproximadamente entre un 0,02 y 0,1% en volumen. De igual manera las emisiones de HC están entre una quinta y una décima parte de las emisiones de HC en los motores de encendido provocado. A diferencia de las emisiones de NOX que son comparables para los dos tipos de motores. Como se verá más adelante, los sistemas de postratamiento, por mecanismos químicos o físicos, permiten reducir las emisiones contaminantes que finalmente se expulsan a la atmósfera. (Fonseca, 2012)

El mecanismo de formación de las emisiones contaminantes en los motores de combustión interna, está gobernado tanto por el proceso físico como por la química de la combustión, como se verá en los siguientes dos apartados. (Fonseca, 2012)

2.1.7. Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido

Como se puede observar en la figura 6, después de que la chispa enciende la llama en la mezcla aire/combustible comprimida, la llama se propaga rápidamente por la cámara de combustión. El monóxido de nitrógeno (NO) se forma en las zonas de alta temperatura de los gases quemados, debido a la oxidación del nitrógeno presente en el aire admitido. En este tipo de motores, las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO₂) son muy bajas, debido a que esta sustancia se forma por oxidación de monóxido de nitrógeno cuando hay exceso de oxígeno, que en condiciones normales de funcionamiento es muy escaso o no hay. (Fonseca, 2012)

Figura 6
Mecanismo de formación de emisiones



Fuente: (Fonseca, 2012).

El CO se forma principalmente por dos razones:

La falta de oxígeno en algunas zonas dentro de la mezcla aire/combustible. En estas zonas sólo se alcanza la oxidación parcial de las moléculas de combustible y, por lo tanto, cuando la relación aire/combustible es menor que la estequiométrica, la formación de CO crece rápidamente al aumentar el dosado. Como se indicó anteriormente, en este tipo de motores, la mezcla suele ser rica en condiciones de arranque en frío y calentamiento del motor, así como en transitorios como las aceleraciones. Por lo tanto, estas condiciones de funcionamiento contribuyen de forma importante sobre las emisiones totales de CO. La cinética lenta de las reacciones de oxidación del CO que se ha formado por equilibrio químico a alta temperatura en las reacciones de combustión. (Fonseca, 2012)

Durante la carrera de expansión, los gases producto de la combustión se enfrían rápidamente, causando la congelación de las reacciones químicas elementales involucradas en la destrucción del CO y del NO hacia su equilibrio químico a baja temperatura y, por lo tanto, las emisiones reales de CO y NO son más altas que las esperadas de acuerdo a las consideraciones del equilibrio químico. Los gases de escape no están en equilibrio químico, pero llegarían al mismo en tiempos de residencia muy superiores. (Fonseca, 2012)

Por otro lado, las emisiones de hidrocarburos inquemados (HC) se deben a varios motivos. El primero es el apagado de la llama cuando ésta entra en contacto con las paredes de la cámara de combustión, que están a baja temperatura, formando una capa delgada de mezcla aire/combustible que permanece inquemada. También se forma HC en los pequeños resquicios que hay en la cámara de combustión (entre la

corona del pistón y la pared del cilindro, alrededor de la bujía y en la zona de la junta de culata), debido a que la llama es incapaz de propagarse en estos sitios tan estrechos.

Adicionalmente, en la capa de aceite lubricante que se encuentra en las paredes del cilindro y en depósitos de la cámara de combustión se adsorben vapores de combustible que son liberados en la carrera de escape y llevados en forma de bucles sobre la cabeza del pistón hacia la válvula de escape. Por último, también se forman hidrocarburos inquemados en el arranque en frío por la presencia de combustible líquido en la cámara de combustión. (Fonseca, 2012)

El combustible inquemado que queda atrapado dentro de los resquicios de la cámara de combustión durante las carreras de compresión y combustión, sale de estos sitios durante la carrera de expansión debido a la baja presión. La mayor cantidad de HC que se libera durante la carrera de expansión, se mezcla con los gases de combustión y son parcial o totalmente oxidados antes de salir del motor. Durante la carrera de escape, los hidrocarburos inquemados, así como el CO y el NOX salen del motor formando parte de los gases de escape. (Fonseca, 2012)

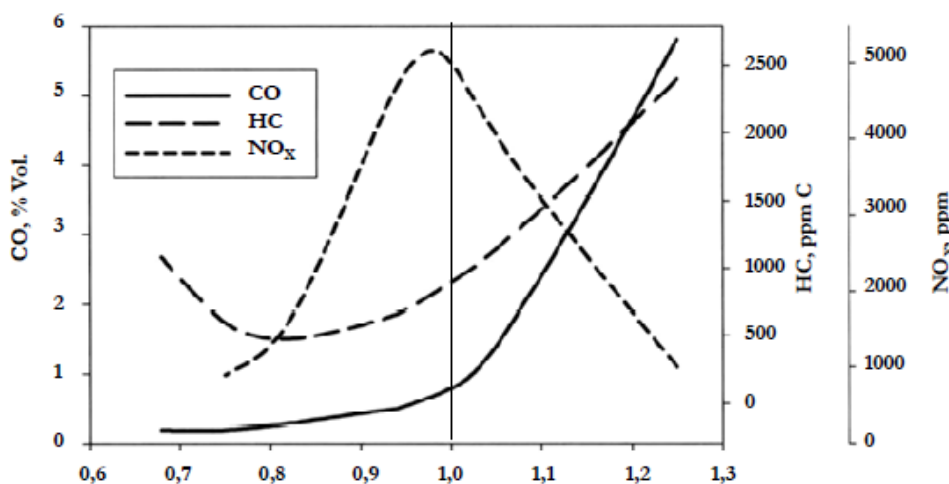
De lo anteriormente expuesto, se ve que la formación del NO y del CO se debe principalmente a fenómenos asociados a la química y cinética de la combustión (Mecanismo de Zeldovich para la formación de NO), mientras que la formación de HC se debe principalmente a fenómenos físicos de apagado de llama en las paredes del cilindro, atrapamiento de combustible en los pequeños resquicios del motor y al fenómeno de adsorción y desorción de vapores de combustible en el aceite

lubricante, es decir su composición es en buena parte combustible no quemado y pequeñas porciones de combustible parcialmente oxidado. (Fonseca, 2012)

La relación aire/combustible es el parámetro que más influye en las concentraciones de las emisiones de escape de un motor. Las tendencias que existen sobre la influencia del dosado relativo sobre la concentración de CO, HC y NOX en los gases de escape en un motor de encendido provocado convencional de mezcla homogénea se puede observar en la Figura. 7. Las emisiones de NOX son máximas para un dosado ligeramente pobres, debido a que se conjuga una alta temperatura de combustión con un relativo exceso de oxígeno. CO y HC se reduce para bajos dosados, aunque para dosados por debajo de un valor crítico, las emisiones de HC vuelven a incrementarse debido a problemas de apagado de llama en algunas zonas de la mezcla que conducen adicionalmente una mala operación del motor. (Fonseca, 2012)

Figura 7

Variación de la concentración de HC, CO y NO en los gases de escape



Fuente: (Fonseca, 2012).

Durante el arranque en frío y el calentamiento del motor, se emiten grandes cantidades de HC y CO debido a la baja evaporación del combustible y al mayor dosado que se requiere para que el motor arranque.

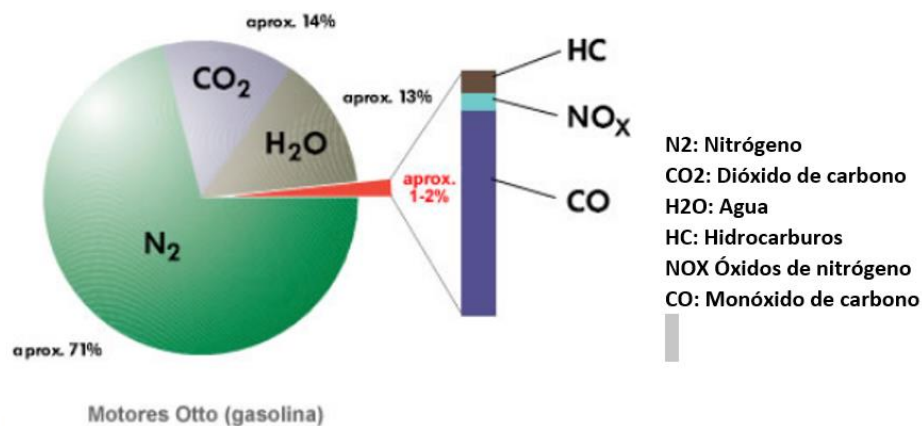
Normalmente, para reducir las emisiones sería deseable operar los motores en mezcla pobre, pero los catalizadores usados para el control simultáneo del NOX, el CO y los HC requieren que el motor opere en dosados cercanos al estequiométrico. (Fonseca, 2012)

2.1.8. Gases de escape de un motor a gasolina

Los gases son las partículas que salen por el tubo de escape del automóvil, siendo la principal fuente de contaminación atmosférica. Si la combustión se realiza acorde a la relación estequiométrica, los productos serían H₂O, CO₂ y N₂, de los cuales ninguno es contaminante. Pero debido a que, en la práctica, la combustión sucede de manera incompleta, se obtiene productos altamente contaminantes liberados hacia la atmósfera; como es el caso del monóxido de carbono CO, los óxidos de nitrógeno NO_x, e hidrocarburos HC. (Mafla & Ortiz, 2007)

Figura 8

Composición de los gases de escape de un motor a gasolina

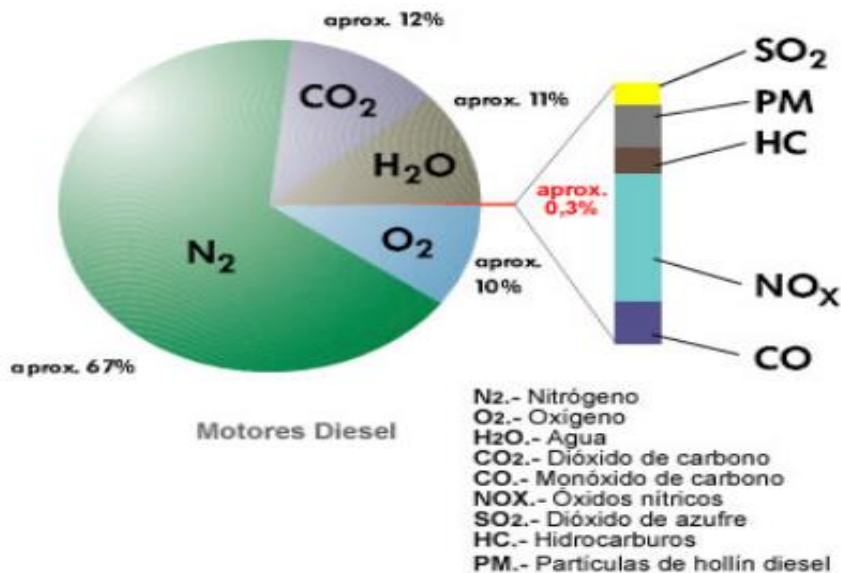


Fuente: Extraído de (Mafla & Ortiz, 2007)

2.1.9. Gases de escape de un motor diésel

Los combustibles empleados en los motores de encendido por compresión son mezclas de hidrocarburos donde el comburente es aire, por lo cual la combustión se da en presencia de nitrógeno y se tendrán como productos normales de la combustión: dióxido de carbono, agua y nitrógeno, pero además se tendrá contaminantes gaseosos, humos y partículas. (Mafla & Ortiz, 2007)

Figura 9
Composición de los gases de escape de un motor a diésel



Fuente: Extraído de (Mafla & Ortiz, 2007)

2.1.10. Normativas de control de emisiones

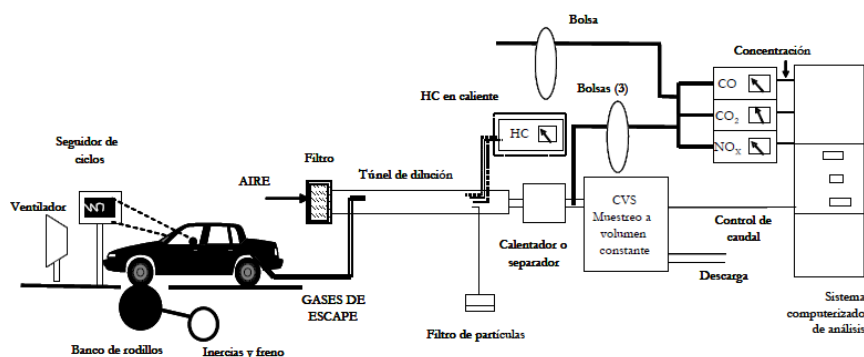
Desde finales de los años noventa a nivel mundial se han promulgado diferentes normativas para el control de emisiones de vehículos de carretera, motores estacionarios y otras aplicaciones. Las normativas más importantes son la americana, la europea y la japonesa. En todas estas normativas, se establecen tanto los procedimientos de medida como los límites de emisión. (Mafla & Ortiz, 2007)

Normalmente las medidas normalizadas de emisiones se dan en forma de "factor de emisión" (*FE*) en gramos por unidad de trabajo realizado. Para el caso de los motores de vehículos pesados o de motores estacionarios, el factor de emisión se da como emisión específica en gramos por unidad de energía efectiva producida (g/kW.h) y en el caso de motores de vehículos de transporte por carretera, se dan en gramos por kilómetro recorrido (g/km). (Fonseca, 2012)

2.1.11. Normativas europeas de emisiones para vehículos

La regulación de emisiones para vehículos nuevos se inició en Europa en el año 1970 con la directiva 70/220/CE de la que derivan casi todas las posteriores y que ha sido sustituida en el año 2007 por la 715/2007 y la 692/2008 para su implementación. Según esta directiva, los ensayos de emisiones en los vehículos ligeros (vehículos de pasajeros de menos de 9 plazas y vehículos industriales de menos de 3500 kg) se hacen en un banco de rodillos simulando una conducción en carretera y mediante la medida de las emisiones de forma diluida y acumuladas en una bolsa o integradas a lo largo del ciclo, según el esquema de la Figura.10 para motores diésel y Figura.11 para motores de gasolina. A diferencia de los ensayos para motores a gasolina, en los motores diésel, se miden los hidrocarburos inquemados en caliente mediante la integración del valor de emisión instantáneo, y se mide la masa de partículas por medio del pesaje de filtros. (Fonseca, 2012)

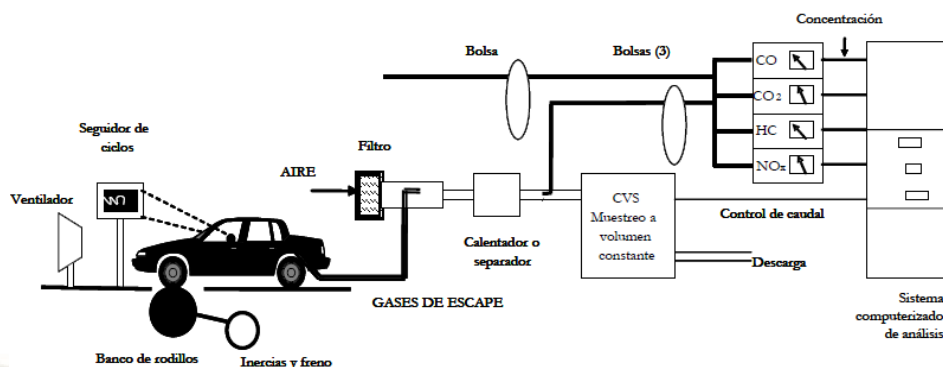
Figura 10
Instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor Diesel



Fuente: (Payri et al 2011).

Figura 11

Instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor gasolina

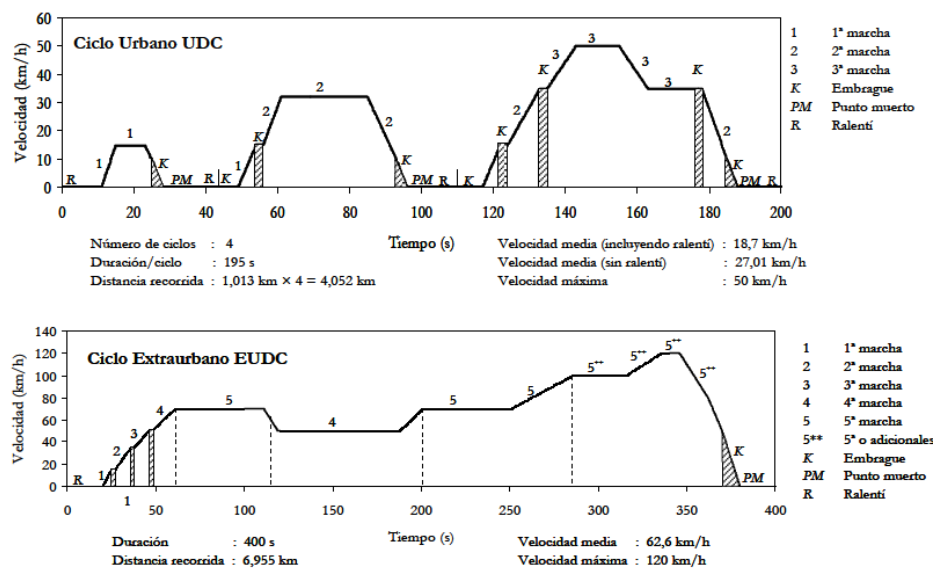


Fuente: (Payri et al 2011).

El banco de rodillos actúa sobre las ruedas tractoras, por medio de un sistema de frenado que simula la resistencia al avance (aerodinámica y rodadura) del vehículo y una inercia que simula su peso. En el banco de rodillos se reproduce un ciclo de conducción en forma de velocidad – tiempo. En la normativa europea, el ciclo de conducción oficial (New European Driving Cycle - NEDC) se inicia con el arranque en frío (21°C ambiente) del motor, incluye una parte urbana (Urban Driving Cycle - UDC) que dura 13 minutos y recorre un poco más de 4 km, formada por 4 ciclos iguales, que se conocen como el ciclo de conducción ECE-15 y que se representan en la Figura 12. a) y por una parte extraurbana (Extra-Urban Driving Cycle EUDC) de aproximadamente 7km y casi 7 minutos que se representa en la Figura.12.b). (Fonseca, 2012)

Figura 12

Ciclo europeo de medida de emisiones NEDC. a) Parte urbana UDC. b) Parte Extraurbana EUCD



Fuente: (Fonseca N. 2012)

La normativa de emisiones ha impuesto de manera progresiva una serie de límites de emisión que se han denominado sucesivamente desde Euro 1 a Euro 6. Estos límites se aplican sobre la media ponderada de emisiones del ciclo completo. La normativa correspondiente a la Euro 1 (también conocida como la EC 93) se estableció mediante las directivas 91/441/EEC (sólo turismos) y 93/59/EEC (turismos y vehículos industriales de menos de 3500 kg). La Euro 2 (EC 96), mediante la directiva 94/12/EC y 96/69/EC. La Euro 3 y Euro 4, mediante las directivas 98/69/EC y 2002/80/EC. Y, por su parte, la Euro 5 y 6, se establecieron mediante la Regulación 715/2007 y la Regulación 692/2008, en la que se estableció la forma de implementarla.

La normativa también introduce diferentes límites de emisión para los vehículos con motor de encendido por compresión (motores diésel) que para los de encendido

provocado (gasolina, GLP, LPG, etanol, etc.) como se muestra en la Tabla. 2, que incluye los límites que se han establecido hasta el año 2014. (Fonseca, 2012)

Tabla 2
Límite de emisiones en g/km. Normativa europea para Vehículos turismo

Fase	Fecha	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Motor de encendido por compresión (diésel)						
Euro 1	jul 1992	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2, IDI	ene 1996	1	-	0,7	-	0,08
Euro 2, DI ^a	ene 1996	1	-	0,9	-	0,1
Euro 3	ene 2000	0,64	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	ene 2005	0,5	-	0,3	0,25	0,025
Euro 5 ^b	sep 2009	0,5	-	0,23	0,18	0,005 ^e
Euro 6	sep 2014	0,5	-	0,17	0,08	0,005 ^e
Motor de encendido provocado (gasolina)						
Euro 1	jul 1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	ene 1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	ene 2000	2,3	0,2	-	0,15	-
Euro 4	ene 2005	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5 ^b	sep 2009	1	0,1 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}
Euro 6	ene 2014	1	0,1 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}

a- Hasta el 30/09/1999 (después de esta fecha los DI deben cumplir los límites de IDI).

b- Entra en vigor para todos los vehículos en enero de 2011.

c- y NMHC = 0,068 g/km

d- Aplicable sólo a vehículos con motor de inyección directa (DI)

e- 0,0045 g/km usando el procedimiento PMP de medida de partículas

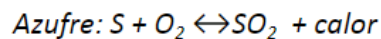
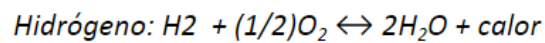
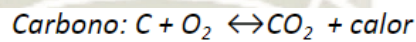
Fuente: Fonseca 2012

2.2. Combustión

Consiste en una reacción química de oxidación en la que diversos elementos combustibles, principalmente Carbono (C), Hidrógeno (H), y Azufre (S), se combinan con el Oxígeno (O_2). La reacción se lleva a cabo con un desprendimiento de energía, en forma de calor y luz. (Muñoz, 2012)

La combustión también se entiende como la conversión de energía química, contenida en combustibles tales como carbón, petróleo, madera, bagazo, etc., en calor a través de un proceso de oxidación. Por tanto, la combustión es el término

técnico para la reacción química del Oxígeno con los componentes de los combustibles, incluyendo la emisión de energía. Después de la combustión, junto al volumen de gases, se genera una cierta cantidad de residuos sólidos tales como cenizas, hollín, inquemados y escorias. Los combustibles sólidos, tales como el carbón duro, carbón bituminoso, turba, madera, paja y bagazo, contienen esencialmente Carbono (C), Hidrógeno (H_2), Oxígeno (O_2), pequeñas cantidades de Azufre (S), Nitrógeno (N_2) y Agua (H_2O). (Muñoz, 2012)



2.2.1. Oxidación

Denominación de todas las reacciones químicas en las que una sustancia se combina con el oxígeno. Las oxidaciones incluyen la disipación de energía y son muy importantes en la ingeniería (combustión) y la biología (respiración), por ejemplo. (Academia Testo, 2018)

2.2.2. Instalaciones De Combustión

Las instalaciones de combustión son instalaciones para generar calor quemando combustibles sólidos, líquidos o gaseosos. Se requieren en diversos campos, por ejemplo: (Academia Testo, 2018)

- Calefacción (instalaciones de calefacción y sistemas de calefacción de edificios).
- Generación de energía eléctrica.
- Generación de vapor o agua caliente.
- Fabricación de determinados materiales (para usar en la industria del cemento, vidrio o cerámica, por ejemplo).

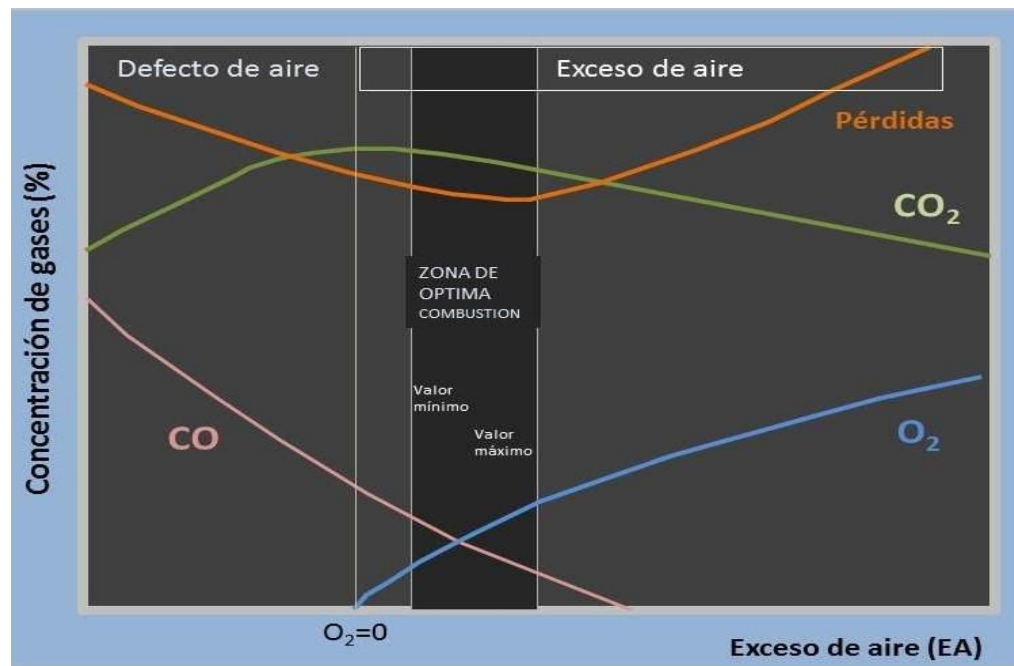
- Tratamiento térmico superficial de piezas metálicas.
- Incineración de residuos y materiales recuperados (desperdicios, neumáticos usados, etc.).

2.2.3. Aire de combustión

El aire que se usa en las reacciones de combustión es el aire atmosférico. Debido a que ni el Nitrógeno (N_2) ni los gases inertes del aire reaccionan durante la combustión, se los suele agrupar, y se considera que el aire solo está formado por 21 % de Oxígeno (O_2) y 79% de Nitrógeno (N_2). Mantener un flujo de aire adecuado durante la combustión es fundamental para asegurar una completa combustión. El flujo de aire total incluye el aire de combustión, la infiltración de aire y el aire de dilución. En un proceso real este volumen ideal de Oxígeno no es suficiente para un quemado completo ya que hay una mezcla insuficiente de combustible y Oxígeno. Por tanto, al proceso de combustión se le debe suministrar más volumen de Oxígeno del estequiométrico. Esta cantidad adicional de aire de combustión se conoce como valor de exceso de aire. El rendimiento más elevado de combustión se consigue con un exceso (limitado) de volumen de Oxígeno, es decir, en una atmósfera oxidante. El exceso de aire es de gran importancia para un proceso de combustión óptimo y para un funcionamiento económico de las plantas. Elevados volúmenes de exceso de aire reducen las temperaturas de combustión y aumentan la pérdida de energía no aprovechada y liberada a la atmosfera a partir de los gases de combustión aun calientes. Con un residuo exceso de aire algunos componentes del combustible no se queman. Esto significa una disminución el

rendimiento de la combustión y un aumento de la contaminación al emitir inquemados a la atmósfera tales como (CO). (Muñoz, 2012)

Figura 13
Concentración de Aire en la combustión



Fuente: El gráfico es extraído de (Muñoz, 2012) Análisis comparativo de gases de combustión de calderas Bagaceras

2.2.4. Productos de la combustión

Los gases de escape generados en los procesos de combustión se denominan gases de combustión. Su composición depende del tipo de combustible y de las condiciones de combustión, ej. el valor del coeficiente de exceso de aire. Muchos de los componentes de los gases de combustión son contaminantes del aire y por tanto deben eliminarse de los gases de combustión con procedimientos especiales

de limpieza extremadamente lentos y costosos, antes de liberar el gas a la atmósfera conforme a la normativa legal. (Academia Testo, 2018)

A continuación, se explican los principales componentes de los gases de combustión:

2.2.4.1. Nitrógeno (N_2):

Con el 79 % en volumen, el nitrógeno es el principal componente del aire. Este gas incoloro, inodoro e insípido se aporta mediante el aire de combustión, pero no tiene un papel directo en la misma; pasa como medio inerte y medio para disipar el calor y se devuelve a la atmósfera. Sin embargo, el nitrógeno contribuye en parte, junto con el nitrógeno del combustible, a la formación de óxidos de nitrógeno peligrosos. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.2. Anhídrido carbónico (CO_2):

El anhídrido carbónico es un gas incoloro e insípido, con un gusto ligeramente ácido, y se genera en todos los procesos de combustión y durante la respiración. Debido a su propiedad de filtrar el calor radiante, es una contribución importante al efecto invernadero. Su contenido en el aire ambiente es sólo del 0,03% y la concentración máxima permitida de anhídrido carbónico (CO_2) en el puesto de trabajo es del 0,5%; concentraciones en el aire inhalado superiores al 15% producen la pérdida de conciencia en las personas. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.3. Vapor de agua (humedad):

El Hidrógeno contenido en el combustible reaccionará con el Oxígeno y formará agua. Esta agua, junto con el contenido de agua del combustible y del aire de combustión, a elevadas temperaturas se convierte en vapor y es contenido en los gases de combustión los cuales salen por la chimenea transportando calor. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.4. Oxígeno (O_2):

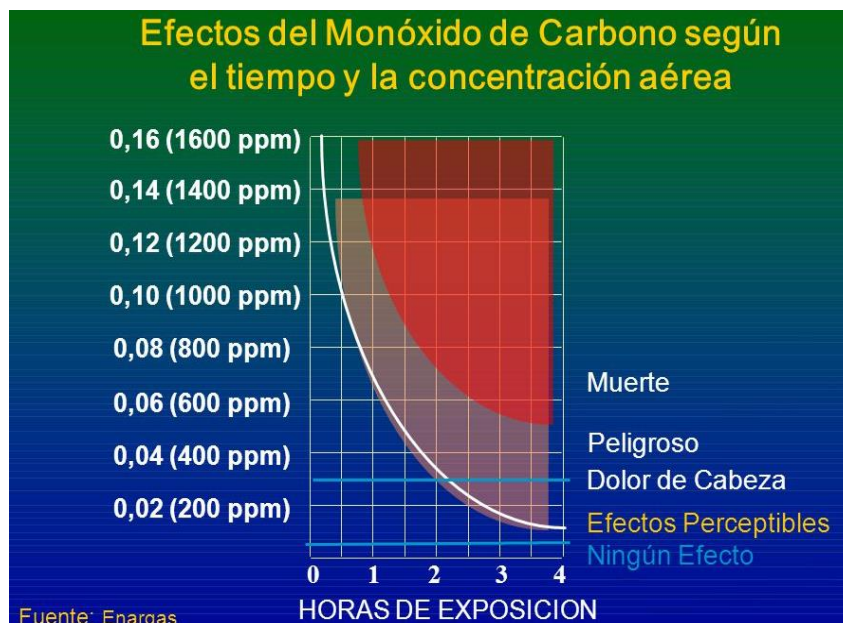
El oxígeno no utilizado en el proceso de combustión, si hay exceso de aire, aparece como gas en los gases de combustión y es una medida de la eficiencia de la combustión. Se usa para determinar los parámetros de combustión y como variable de referencia. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.5. Monóxido de carbono (CO):

El monóxido de carbono es un gas tóxico incoloro e inodoro. Se genera en gran medida como consecuencia de la combustión incompleta de combustibles fósiles (instalaciones de combustión), combustibles de motor (vehículos) y otros materiales que contienen carbono. El CO es, en general, inocuo para las personas porque rápidamente se une con el oxígeno del aire para formar CO_2 . En recintos cerrados, sin embargo, el CO es extremadamente peligroso, ya que las personas que respiran aire con una concentración de sólo 700 ppm morirán en pocas horas. La concentración máxima en el puesto de trabajo es 50 ppm. (Academia Testo, 2018)

Figura 14

Efectos del monóxido de carbono según el tiempo y concentración aérea



Fuente: Extraída de Enargas (Ocanas, 2019)

2.2.4.6. Óxidos de nitrógeno (NO y NO₂, fórmula total (NO_x):

En los procesos de combustión, el nitrógeno del combustible y, a temperaturas elevadas, el del aire de combustión se une en cierta medida con el oxígeno del aire de combustión para formar óxido nítrico NO (NO combustible y NO térmico) en primera instancia, que luego se oxida cuando entra en contacto con el oxígeno en el conducto de los gases de combustión y posteriormente en la atmósfera, para formar el peligroso dióxido de nitrógeno (NO₂). Ambos óxidos son tóxicos; el NO₂ en particular es un peligroso veneno respiratorio y en combinación con la luz solar contribuye a la formación de ozono. (Academia Testa, 2018)

2.2.4.7. Anhídrido sulfuroso (SO_2):

El anhídrido sulfuroso es un gas incoloro, tóxico con un olor picante. Se produce como resultado de la oxidación del mayor o menor volumen de azufre contenido en el combustible. La concentración máxima en el puesto de trabajo es 5 ppm. En combinación con agua o condensado, se forman ácido sulfuroso (H_2SO_2) y ácido sulfúrico (H_2SO_4), ambos de los cuales están relacionados con los diversos tipos diferentes de deterioro medioambiental a la vegetación y edificios. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.8. Sulfuro de hidrógeno (H_2S):

El sulfuro de hidrógeno es un gas tóxico que huele mal incluso en concentraciones mínimas (aprox. $2,5 \mu\text{m}/\text{m}^3$). Es un componente que se encuentra naturalmente en el gas natural y el petróleo y por consiguiente está presente en refinerías e instalaciones de procesado de gas natural, pero también en actividades agrícolas y, no de forma menos importante, tras la combustión incompleta en los convertidores catalíticos de vehículos.

Se usan diversos métodos para eliminar el H_2S de los gases de combustión, incluida la combustión para formar SO_2 , determinados procesos de absorción o, para niveles más importantes, la conversión en azufre elemental en una instalación Claus. (Academia Testo, 2018)

2.2.4.9. Sustancias sólidas (polvo, hollín):

Las sustancias sólidas en los gases de combustión se originan a partir de los constituyentes incombustibles de los combustibles sólidos y líquidos. Estas incluyen, por ejemplo, óxidos de silicio, aluminio, calcio, etc., en el carbón

y los sulfatos de diversas sustancias en el fueloil pesado. El efecto nocivo del polvo sobre las personas está producido particularmente por la deposición de sustancias tóxicas y cancerígenas en las partículas de polvo. (Academia Testo, 2018)

2.2.5. Unidades de Medida

La concentración de los constituyentes del gas es un indicador de la presencia de contaminantes en los humos. (Academia Testo, 2018)

Generalmente se utilizan las siguientes unidades:

2.2.5.1. Ppm (Partes Por Millón)

Al igual que el "porcentaje (%)", la unidad ppm representa una relación. Porcentaje significa "un número determinado de partes por cada cien partes"; ppm significa "un número determinado de partes por millón de partes". Si, por ejemplo, una botella de gas contiene 250 ppm de monóxido de carbono (CO), esto significa que, si se extraen de esta botella un millón de moléculas de gas, 250 de ellas serán moléculas de monóxido de carbono. El resto de las 999.750 moléculas son moléculas de dióxido de nitrógeno (N_2) y de oxígeno (O_2). La unidad ppm no depende de la presión ni de la temperatura y se utiliza para concentraciones más bajas. Si están presentes concentraciones mayores, éstas se especifican en porcentaje (%). Los porcentajes se convierten como sigue:

$$10.000 \text{ ppm} = 1\% \quad 1.000 \text{ ppm} = 0,1\% \quad 100 \text{ ppm} = 0,01\% \quad 10 \text{ ppm} = 0,001\%$$

$$1 \text{ ppm} = 0,0001\%$$

Una concentración de oxígeno de 21% vol. correspondería a una concentración de 210.000 ppm de O_2 . (Academia Testo, 2018)

2.2.5.2. Mg/Nm^3 (miligramos por metro cúbico)

Con la unidad mg/Nm^3 , se utiliza como variable de referencia el volumen normal (metros cúbicos normales, Nm^3) y la masa del gas nocivo se especifica en miligramos (mg). Como esta unidad depende de la presión y de la temperatura, se utiliza como referencia el volumen en condiciones normales; estos se definen como sigue:

Temperatura: 0 °C

Presión: 1013 mbar (hPa)

No obstante, esta especificación sola no es definitiva ya que las proporciones en volumen en los gases de combustión cambian según el contenido de oxígeno (dilución de los gases de combustión con el aire ambiente). (Academia Testo, 2018)

Por consiguiente, las lecturas se deben convertir a un determinado volumen de oxígeno, el contenido de oxígeno de referencia (O_2 de referencia). Solamente las especificaciones con el mismo oxígeno de referencia son comparables directamente. El contenido de oxígeno (O_2) medido en los gases de combustión también se requiere para la conversión de ppm a mg/Nm^3 . Las conversiones para monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO_x) y anhídrido sulfuroso (SO_2) se describen a continuación. (Academia Testo, 2018)

Los factores contenidos en las fórmulas corresponden a la densidad normal de los gases en mg/m^3 .

Equivalencia:

Equivalencia de concentración según los Gases

CO	1 ppm equivale a $1.25 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
NO	1 ppm equivale a $1.34 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
NO_x	1 ppm equivale a $2.05 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
SO₂	1 ppm equivale a $2.86 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

Fuente: NTP-350301-(2009)

2.2.5.3. Mg/kWh (Miligramos por kilovatio hora de energía usada)

Para determinar las concentraciones de gases nocivos en la unidad basada en la energía, mg/kWh , los cálculos se realizan usando datos específicos del combustible. Por consiguiente, hay factores de conversión diferentes dependiendo del combustible. Los factores de conversión para ppm y mg/m^3 en la unidad basada en la energía, mg/kWh , se muestran a continuación. No obstante, antes de la conversión a mg/kWh , las concentraciones de los valores de las emisiones medidas se deben convertir a gases de combustión sin diluir (0% de contenido de oxígeno de referencia). (Academia Testo, 2018)

En el caso de los combustibles sólidos, los factores de conversión también dependen de la forma en la que está presente el combustible (en forma de trozos, astillas, polvo, virutas, etc.) (Academia Testo, 2018)

2.2.6. Analizadores De Gases De Combustión

Los analizadores de gases de combustión se utilizan para identificar los niveles de contaminantes en las emisiones de las calderas, motores o cualquier otro tipo de sistema de energía que implica la combustión. Vienen en una amplia variedad de tipos, diferenciados tanto por la complejidad de su capacidad analítica y el método en el que trabajan. También se pueden clasificar en base a su nivel de portabilidad. (Dominion, 2014)

2.2.6.1. Analizadores de gases de combustión portátiles

Los analizadores de gases portátiles son razonablemente exactos, pero no tienen las mismas capacidades de análisis como los analizadores de gases de tipo grande. Por lo general, consisten en una unidad en forma de caja y una sonda que se inserta en el horno, caldera u otra cámara de combustión. Incluso los sensores más pequeños pueden rastrear múltiples tipos de gases, como el oxígeno y el dióxido de carbono. (Dominion, 2014)

Figura 15
Analizador de gases Kimo 310 pro



Fuente: Adaptado de Kimo Instrumems (Systems, 2019)

2.2.6.2. Analizadores de gases de combustión permanentes

Los analizadores de gases permanentes más grandes permanecen en un lugar y producen resultados con calidad de laboratorio en forma regular.

Estos tipos de analizadores de gases de escape vienen en muchos tipos. Algunos están diseñados para controlar continuamente las emisiones de un sistema de combustión. Estos se conocen como sistemas de control de emisiones continuas o CEMS. (Dominion, 2014)

Figura 16
Analizador de gases permanente

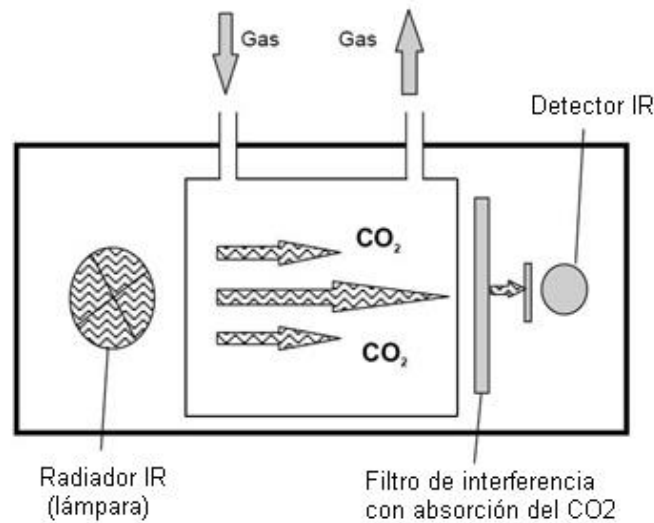


Fuente: Adaptado de (HANDLEIDING, 2019)

2.2.6.3. Analizadores de gases de combustión infrarrojos

Los analizadores de gases de combustión infrarrojos utilizan tecnología infrarroja para rastrear las cantidades de ciertos tipos de gases en los gases de combustión de un sistema de combustión. Trabajan en la idea de que diferentes tipos de gases absorben diferentes longitudes de onda de la radiación infrarroja. Estos analizadores suelen ser portátiles y son los mejores en la medición de monóxido de carbono y dióxido de azufre. (Dominion, 2014)

Figura 17
Analizador de gases de combustión infrarrojos



Fuente: Extraída de (Academia Testo, 2018)

2.2.6.4. Analizadores de gases de combustión Bacharach

Los analizadores de gases de combustión Bacharach se utilizan para rastrear la cantidad de hollín de un gas particular. (Dominion, 2014)

2.2.6.5. Analizadores de gases de combustión electroquímicos

Los analizadores de gases de combustión utilizan sensores electroquímicos para determinar la composición de los gases de combustión. Incluyen tres electrodos revestidos que reaccionan de una manera determinada con gases. Esta reacción es leída por el analizador. (Dominion, 2014)

2.2.6.6. Analizadores de gases de combustión multisensor

Los analizadores de gases pueden venir equipados con múltiples sensores que rastrean varios gases al mismo tiempo. Algunos pueden rastrear cinco gases o más a la vez, lo que permite al operador obtener una idea más completa de la composición del gas de combustión de un sistema. (Dominion, 2014)

Figura 18
Analizador de gases multisensor



Fuente: Extraída de (Academia Testo, 2018)

Estos analizadores multisensor presentan sensores que se adaptan a cualquier requerimiento y satisfacen todas sus necesidades. Acceso directo a los sensores, el usuario puede cambiarlos sin necesidad de enviar el instrumento al servicio técnico. (Dominion, 2014)

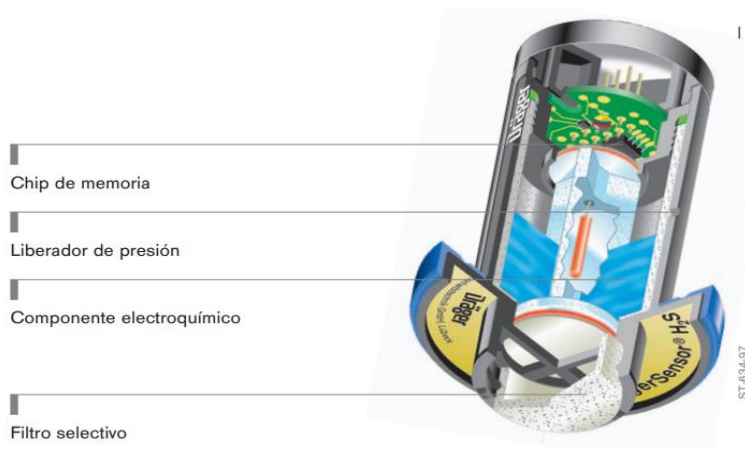
2.2.7. Sensores Electroquímicos

Los sensores electroquímicos adecuados para determinar el contenido de oxígeno y los constituyentes nocivos del gas tales como CO , SO_2 o NO_x , funcionan basándose en el principio de la valoración potenciométrica sensible a los iones.

Los sensores están rellenos con un electrolito acuoso, específico para la tarea, en el que están dispuestos dos o tres electrodos, igualmente combinados específicamente, entre los que hay un campo eléctrico. Los sensores están sellados del exterior mediante membranas permeables al gas. (Academia Testo, 2018)

El principio de operación de los sensores químicos basados en transducción electroquímica es la conversión del resultado de una reacción electroquímica, la que sucede entre el analito y el receptor en una señal medible. Se pueden aplicar diferentes técnicas analíticas para “interrogar” al sensor químico, y estas pueden ser divididas entre: (a) aquellas que sólo registran la corriente eléctrica producida espontáneamente debido a la reacción electroquímica y, (b) aquellas que requieren la aplicación de una corriente eléctrica o potencial eléctrico para que la reacción ocurra. (Baéz, 2017)

Figura 19
Sensor Electroquímico



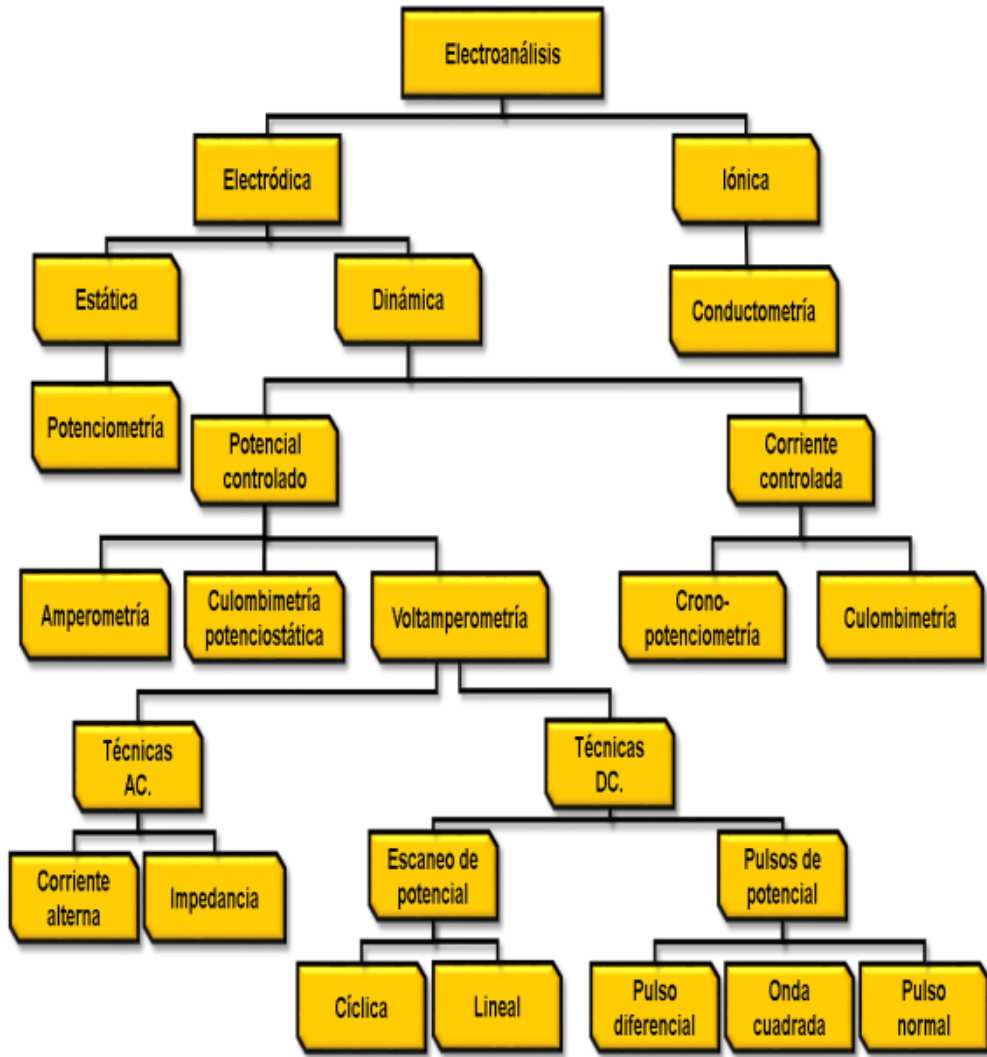
Fuente: Extraída de (Draeger, 2019)

2.2.7.1. Técnicas Electroquímicas

Las técnicas electroquímicas pueden clasificarse en diversas categorías tomando en consideración, a su vez, diferentes criterios. Sin embargo, con fines de simplificación, en el siguiente texto se utilizará la clasificación basada en el carácter de la señal. Así, la Figura 20 muestra un esquema de esta clasificación. (Baéz, 2017)

Técnicas estáticas, son aquellas donde la variación de la corriente es igual a 0. La técnica estática más utilizada es la potenciometría y puede ser descrita como la medición del potencial generado por un electrodo indicador con respecto a un electrodo de referencia, el cual no experimenta polarización. La configuración clásica de un electrodo potenciométrico involucra un electrodo metal/ion metálico inmerso en una disolución electrolítica separada por una membrana salina. Por ejemplo, el sensor de pH es un electrodo potenciométrico ampliamente conocido. (Baéz, 2017)

Figura 20
Clasificación basada en el carácter de la señal



Fuente: (Baéz, 2017)

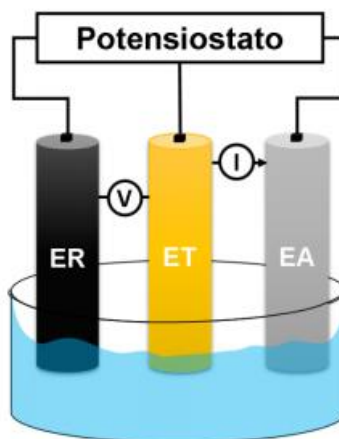
Técnicas dinámicas, son aquellas donde la variación de la corriente es diferente de 0. Este tipo de técnicas puede ser subdividido, a su vez, en: (a) aquellas basadas en corriente controlada y (b) aquellas basadas en potencial controlado. En el caso de corriente controlada, la señal de entrada es una variación de corriente y la señal de salida es una respuesta de potencial. En

el caso de potencial controlado, se obtiene una señal de corriente por medio de la variación del potencial del sistema. Esta última subdivisión con control de potencial incluye además una amplia variedad de técnicas electroquímicas, las cuales son conocidas como técnicas volt amperométricas. Cabe señalar que el uso de las técnicas volt amperométricas ha sido posible gracias a la invención del potencióstato. (Baéz, 2017)

En la Figura 21. se muestra una representación gráfica de una celda electroquímica típica, la cual tiene una configuración de tres electrodos: referencia, auxiliar y de trabajo. El electrodo de trabajo es aquel electrodo en el que se lleva a cabo el proceso de oxidación-reducción estudiado; este electrodo está representado en dicha figura con las siglas ET (electrodo de trabajo). El electrodo auxiliar, representado por las siglas EA (electrodo auxiliar), asiste en el flujo de corriente (I) a través de la celda. La corriente producida por la reacción ocurrida en el electrodo de trabajo viaja a través del electrodo auxiliar hasta el potencióstato. Por último, el electrodo de referencia, representado por las siglas ER (electrodo de referencia), se encarga de mantener un potencial (V) constante ante los cambios de las condiciones experimentales. Así, el potencial del electrodo de trabajo siempre referencia contra el potencial de este electrodo, recibiendo así su nombre. (Baéz, 2017)

Figura 21

Representación de una celda electroquímica de tres electrodos



Fuente: El gráfico es extraído de (Báez, 2017). Integración de sensores electroquímicos basados en nanomateriales funcionales para la detección de contaminantes en aguas.

Tal como se mencionó anteriormente, en el caso de las técnicas volt amperométricas, el potencial se varía hasta obtener una respuesta de la corriente representativa de las reacciones de oxidación-reducción que tienen lugar en la celda electroquímica. Esta respuesta de la corriente es a menudo una corriente faradaica debido al proceso de transferencia de uno o varios electrones en la interfase electrodo disolución, y puede ser relacionado con la concentración del analito objeto de estudio. Las técnicas electroquímicas pueden ser utilizadas para detectar concentraciones muy bajas del analito, y además es la respuesta de la corriente es muy rápida dado que en estas técnicas no se requiere que el sistema llegue al equilibrio. Cabe señalar que estas las técnicas electroquímicas son en general muy sensibles y además es posible aplicarlas usando electrodos miniaturizados. (Baéz, 2017)

La Figura 20. (mencionada anteriormente) refleja el alto número de técnicas electroquímicas actualmente aplicadas. A continuación, se describen brevemente las técnicas. Estas técnicas son (a) voltamperometría de barrido lineal, (b) voltamperometría cíclica, (c) voltamperometría de redisolución anódica, y (d) voltamperometría de onda cuadrada. La Figura 22. muestra la señal de excitación de cada una de ellas. (Baéz, 2017)

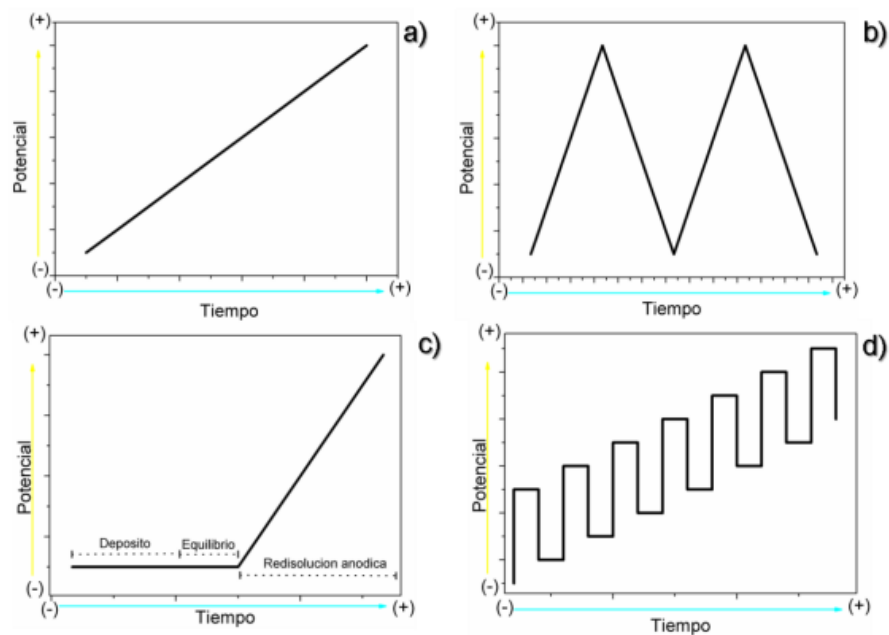
Voltamperometría de barrido lineal (LSV: linear sweep voltammetry). En este método, el potencial entre los electrodos de trabajo y de referencia se varía linealmente con el tiempo, y la corriente generada por el electrodo de trabajo debido a la reacción electroquímica correspondiente es registrada y representada en una curva de respuesta I-E. (Baéz, 2017)

Voltamperometría cíclica (CV: cyclic voltammetry). Este método involucra un ciclo de potencial entre dos valores. Puede entenderse como dos pasos de voltamperometría de barrido lineal aplicados consecutivamente para llegar devuelta al valor de partida. Así, el potencial es variado linealmente primero de V_0 a V_1 , y finalmente la variación es invertida de V_1 a V_0 . (Baéz, 2017)

Voltamperometría de redisolución anódica (ASV: anodic stripping voltammetry). Este método comprende un paso de pre-concentración dado a un potencial fijo, donde el analito es depositado sobre el electrodo de trabajo (sensor), seguido posteriormente por un segundo paso en donde el potencial es escaneado en una ventana de potencial adecuada induciendo la redisolución del analito. El primer paso usualmente se lleva a cabo en una

disolución no quiescente, ya sea bajo agitación magnética o flujo continuo. El último paso normalmente se aplica bajo condiciones quiescentes e incluye la aplicación de otra técnica voltamperométrica, tal como voltamperometría de barrido lineal (LSV) o la voltamperometría de onda cuadrada (SWV) en una ventana de potencial en la cual el analito es Redisuelto. Voltamperometría de onda cuadrada (SWV: square wave voltammetry). En este método se aplica a una celda electroquímica un barrido de potencial basado en pulsos de onda cuadradas, mientras que la corriente es medida justo al final de la aplicación de cada pulso. Este método es muy apropiado para discriminar la corriente faradaica producida debido a los procesos electroquímicos que toman lugar en la celda electroquímica, a partir de la corriente capacitiva producida por la carga y descarga del capacitor de doble capa generada en la interfase electrodo-disolución. Mediante el empleo de esta técnica se consiguen mejores factores de sensibilidad y límites de detección. (Baéz, 2017)

Figura 22
Señal de excitación



(a) Voltamperometría de barrido lineal, (b) Voltamperometría cíclica, (c) Voltamperometría de redisolución anódica con Voltamperometría lineal y (d) Voltamperometría de onda cuadrada.

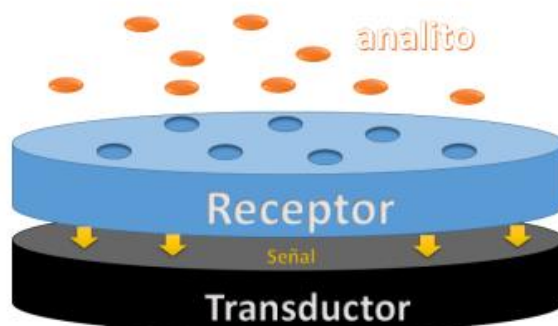
Fuente: Báez, M. (2017)

2.2.7.2. Sensores químicos

De acuerdo con la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC: International Union of Pure and Applied Chemistry), un sensor químico puede ser definido como un dispositivo que transforma la información química en una señal analítica útil. Dicha información química puede ser desde la concentración de un componente específico de la muestra hasta la composición total de la misma. Además, un sensor químico debe proveer una respuesta rápida, continua y reversible al analito o analitos en el medio de la muestra. La estructura básica de un sensor químico incluye

dos unidades funcionales: el transductor y el receptor, los cuales se ilustran en la figura 23. (Baéz, 2017)

Figura 23
Sensor Químico



Fuente: El gráfico es extraído de (Báez, 2017). Integración de sensores electroquímicos basados en nanomateriales funcionales para la detección de contaminantes en aguas.

El transductor es un dispositivo analítico que proporciona un tipo de energía de salida que tiene una determinada relación con el tipo de energía de entrada. Es decir, en el caso de los sensores químicos, el transductor recibe la información química del receptor y la transforma en una señal eléctrica medible. Siguiendo la clasificación IUPAC, los transductores pueden clasificarse de acuerdo a su principio operativo en los siguientes: ópticos, electroquímicos, eléctricos, sensibles a masa, magnéticos y termométricos. El receptor (o elemento de reconocimiento) es el componente del sensor químico que se encuentra en contacto directo con el analito, e interactúa selectivamente con él. Esta interacción genera una información química que

es transmitida hacia el transductor, el cual está en contacto directo con el receptor. (Baéz, 2017)

En años recientes, los materiales nanoestructurados han sido utilizados para mejorar el rendimiento analítico de diferentes transductores gracias a sus propiedades únicas. Entre ellas se encuentra su alta relación superficie-volumen de la que se deriva su gran superficie específica. Además, los nanomateriales se han aplicado como receptores en una gran diversidad de sensores químicos debido a sus excelentes propiedades catalíticas. (Baéz, 2017)

2.2.7.3. Sensor de oxígeno

Los gases de combustión y las moléculas de oxígeno contenidas en ellos penetran a través de la membrana permeable al gas hasta el cátodo. Debido a su composición material, tiene lugar una reacción química en el cátodo con la formación de iones OH (los iones son partículas cargadas). Estos iones migran al ánodo a través del electrolito, creando un flujo de corriente proporcional a la concentración de O_2 . La caída de tensión desarrollada en una resistencia situada en el circuito sirve luego como señal de medición que se utiliza para el procesado electrónico posterior. (Academia Testo, 2018)

La resistencia incorporada con coeficiente de temperatura negativo (NTC), se usa para compensar los efectos de la temperatura, garantizando así que el sensor permanezca estable frente a los cambios de temperatura. La duración

de un sensor de oxígeno de este tipo es de unos 3 años. (Academia Testo, 2018)

Ecuaciones de reacción del sensor de oxígeno:

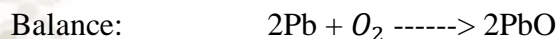
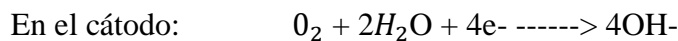
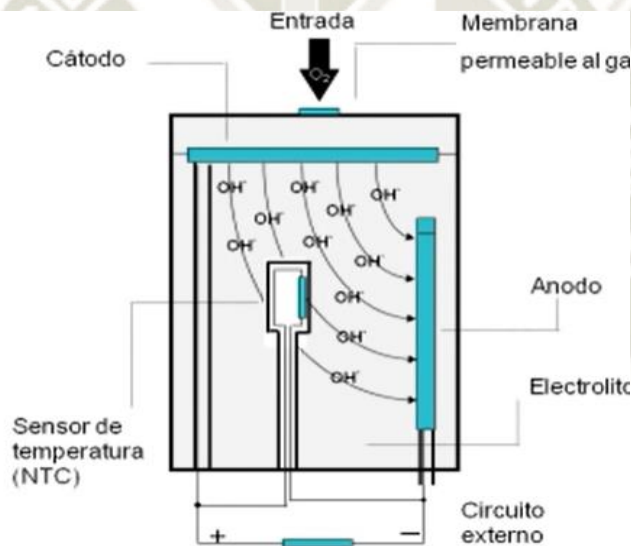


Figura 24
Sensor de oxígeno (esquema)



Fuente: Sensores electroquímicos. Pertenece a este sitio (Academia Testo, 2018)

2.2.7.4. Sensores para CO, SO₂ y NO_x

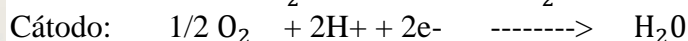
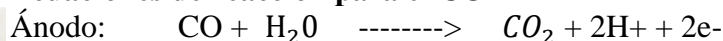
Para componentes del gas tales como CO, SO₂ o NO_x, se usan sensores con tres electrodos. (Academia Testo, 2018)

El funcionamiento se explica basándonos en un sensor de CO; cómo se aplica esto a los otros componentes se puede ver a partir de las ecuaciones de reacción. (Academia Testo, 2018)

Las moléculas de monóxido de carbono (CO) pasan, a través de la membrana permeable al gas, al electrodo de trabajo donde se forman iones H^+ como consecuencia de una reacción química. Estos migran en el campo eléctrico al contraelectrodo, donde se genera un flujo de corriente en el circuito externo mediante otra reacción química desencadenada por el oxígeno (O_2) del aire puro, también aportado. El tercer electrodo (electrodo de referencia) sirve para estabilizar la señal del sensor. La duración operativa de este tipo de sensor es de unos 2 años. (Academia Testo, 2018)

La duración de este tipo de sensor es alrededor de 2 años.

- **Ecuaciones de reacción para el CO**



- **Otras ecuaciones de reacción**

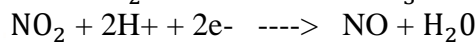
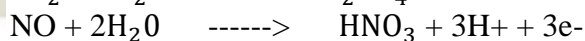
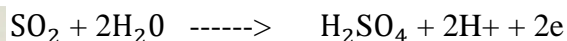
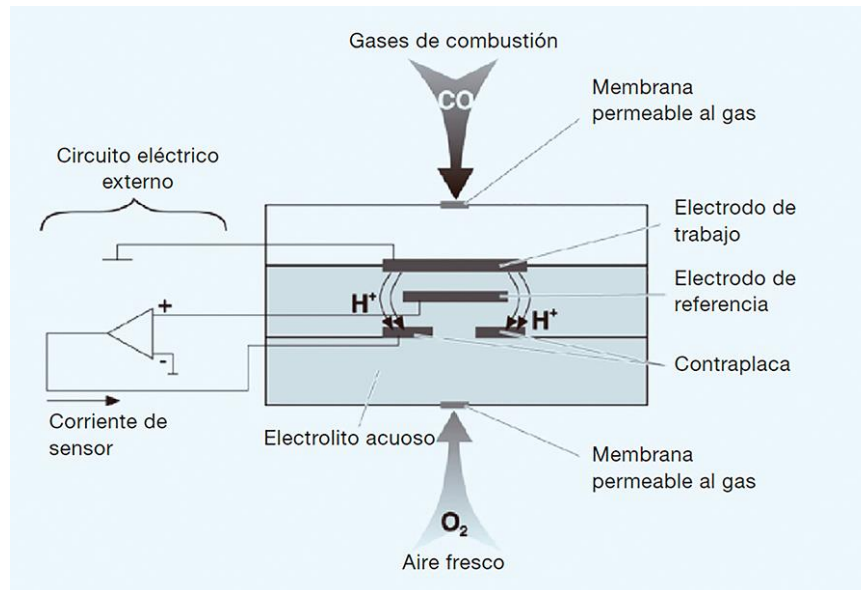


Figura 25
Sensor para CO y otros gases (esquema)



Fuente: Sensores electroquímicos. Pertenece a este sitio. (Academia Testo, 2018)

2.2.8. Sistemas de monitoreo extractivos

Estos sistemas realizan el muestreo en la chimenea o ducto, seguido de un acondicionamiento de la muestra, para luego transportarla hasta los analizadores que se encuentran en un área remota protegida a nivel de la planta o chimenea.

Para definir como se realizará la extracción se debe evaluar las características de la emisión, si esta es caliente, si es húmeda, si es coloreada, ya que en este último caso indicará la presencia de material particulado suspendido. (MINAN, 2014)

Tabla 3
Características de los sistemas de monitoreo

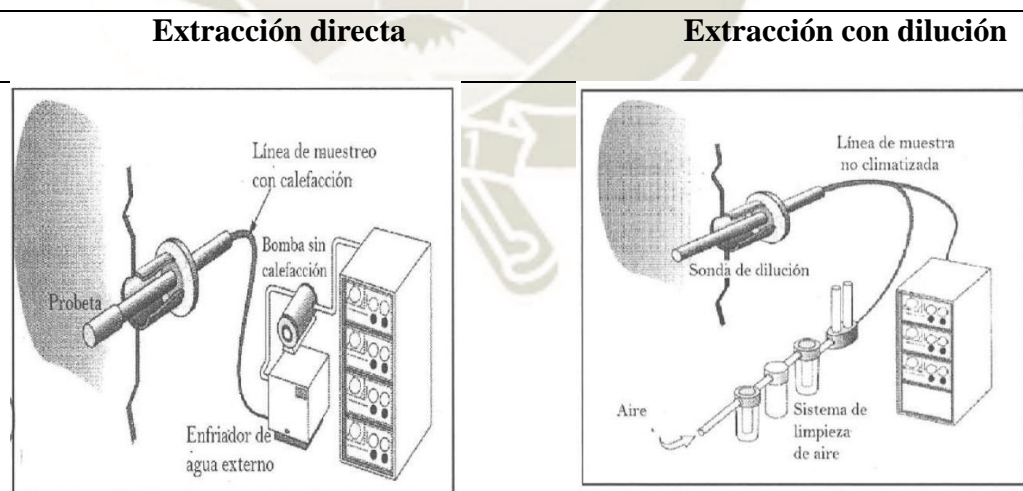
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad en ubicación del punto de muestreo. • Es versátil, fácil de expandir y modificar. • Es posible el uso de una amplia gama de analizadores. • Permite medir bajas concentraciones. • Acepta gas de calibración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Podría alterar la muestra • El tiempo de respuesta podría ser lento • La inversión podría ser lata • El mantenimiento podría ser frecuente

Fuente: Resolución (MINAN, 2014), protocolo nacional de sistemas de monitoreo continuo de emisiones.

Clasificación de los sistemas extractivos

- Completos o directos (nivel de la fuente)
- Con dilución

Figura 26
Tipos de extracción de gases



Fuente: Extraída de (MINAN, 2014)

2.2.8.1. Sistemas extractivos completos o directos (nivel de la fuente)

Se clasifican en:

- Sistemas Extractivos Completos Frío - Seco
- Sistemas Extractivos Completos Caliente – Húmedo

a) **Sistemas extractivos completos frío – seco**

Se instala a nivel de la fuente. Este sistema considera el enfriamiento, acondicionamiento de los gases y la remoción de la fracción de agua antes de la medición; el gas debe enfriarse, secarse y limpiarse (mediante filtros) antes de ser introducido a los analizadores.

El acondicionamiento de la muestra puede ser en la misma sonda o antes del ingreso al analizador. En el caso de que sea en la sonda no se requiere que el resto del sistema sea calefaccionado, pero se debe tener la consideración de realizar un mantenimiento diario del sistema de acondicionamiento. El acondicionamiento antes del ingreso al analizador, requiere la calefacción de la sonda y de la línea de muestreo para prevenir la condensación de humedad en el trayecto.

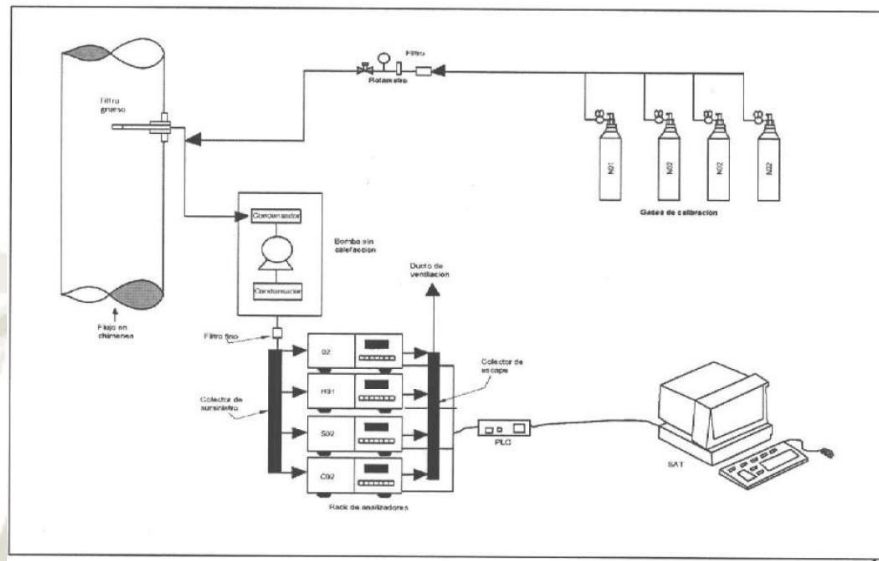
Al condensar la muestra para eliminar el vapor de agua, se debe evaluar si hay pérdidas de gases por arrastre, dependiendo de la solubilidad del gas en el agua (como es el caso del CO) (MINAN, 2014)

Ventajas:

- Sencillo de implementar y operar.
- Mejor ambiente para el equipo y el personal.
- Menor costo de mantenimiento y sencillo de diagnosticar.

- Permite el uso de varios y diversos analizadores.
- Los cálculos de las emisiones son en base seca

Figura 27
Método extractivo directo: sistema frío- seco



Fuente: Extraída de (MINAN, 2014)

b) Sistemas extractivos completos caliente - húmedo

Instalados a nivel de la fuente; no remueven la fracción de agua. Miden los gases en caliente por lo que requieren una sonda, línea de muestreo y bomba calefaccionada para evitar la condensación, reteniendo de esta forma, la fracción húmeda de la muestra. La sonda o probeta se encuentra en caja caliente para evitar la condensación del agua, el filtrado de las partículas también se hace en caliente, luego del paso de la muestra por la sonda o probeta, se requiere que la línea continúe caliente por sobre la temperatura de rocío del gas, para ello se debe calentar con generadores eléctricos o

vapor y llevar un control de la temperatura cada cierto tramo de línea.
(MINAN, 2014)

Ventajas:

Tecnológicamente avanzado.

Sencillo de operar, reparar y mantener.

2.2.8.2. Sistemas extractivos con dilución

Se clasifican en:

- Sistemas Extractivos con dilución en base seca.
- Sistemas Extractivos con dilución en base húmeda.

a) Sistemas Extractivos con dilución en base seca.

La humedad es removida y la muestra es diluida. La sonda o probeta de dilución se inserta en la chimenea más la dilución se realiza fuera de ella, se conoce como sonda toma muestra ex-situ. El aire usado para la dilución debe ser limpio y seco. (MINAN, 2014)

b) Sistemas Extractivos con dilución en base húmeda

La muestra es diluida pero la humedad no es removida del sistema. La sonda o probeta donde se realiza la dilución, es una sonda toma muestra in situ y es diseñada de tal forma que considera tres modos de operación, modo de muestreo, de purga y de calibración. (MINAN, 2014)

Estos sistemas la dilución de muestra promueve lo siguiente:

- Reduce la humedad de la muestra, evitando la condensación del agua y la absorción de gases solubles en agua.

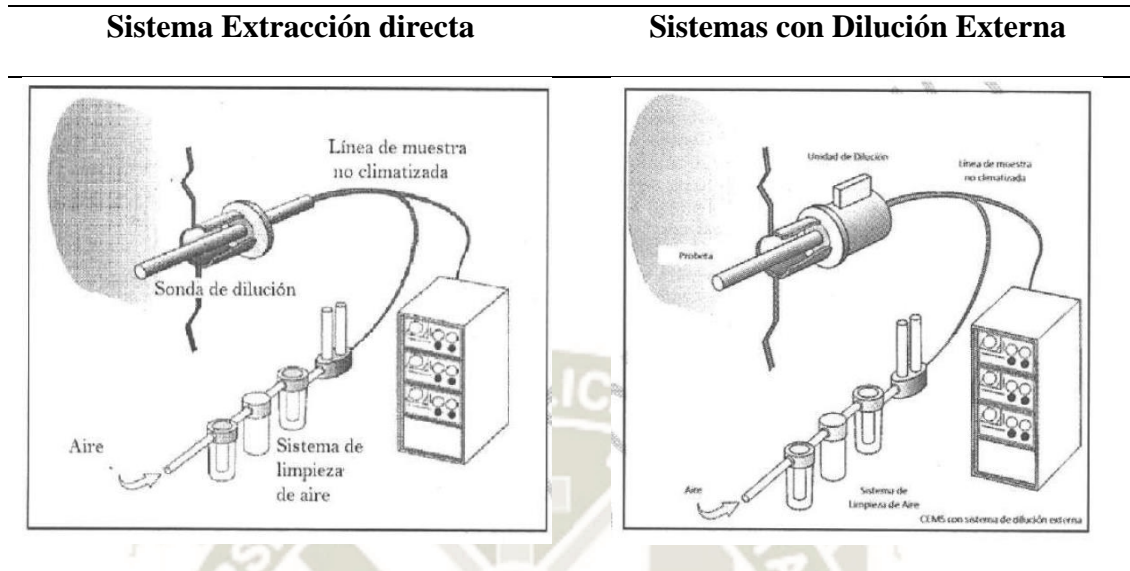
- Permite un bajo volumen de muestra, a comparación de los sistemas que realizan acondicionamiento de muestra, lo cual reduce la posibilidad de obstrucción de los filtros.
- Permite el uso de una línea de muestra sin calefacción, que se utiliza para trasportar la muestra extraída hasta el analizador.

Tabla 4
Sistemas extractivos con dilución

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Requiere pocos componentes. • Puede ser usado para medir gases solubles. • Bajo costo de mantenimiento. • Aplacable a Muestras con mucho agua y polvo. • Permite el uso de varios analizadores. Reduce al mínimo las propiedades corrosivas de la muestra. • Larga vida útil de los equipos, incluyendo filtros. • Capacidad de usar una amplia variedad de analizadores. 	<ul style="list-style-type: none"> • Está limitado por el rango de los analizadores. • La tasa de dilución depende de la presión y masa de los gases. • Si la concentración de los gases emitidos es muy baja, al diluir se hará más pequeña por lo que correría el riesgo de que el analizador no pudiera detectarlo. • Requieren de un gas dilutor libre de los componentes que se desean medir y libre de componentes que generen una interferencia cruzada.

Fuente: Extraída de (MINAN, 2014)

Figura 28
Sistemas extractivos de dilución



Fuente: Extraída de (MINAN, 2014)

2.2.9. Componentes del sistema de muestreo y metodología de análisis

Los componentes a considerar son los siguientes:

- Sonda de muestreo.
- Línea de transporte de muestra.
- Sistema de acondicionamiento de muestro.
- Bomba de muestreo.
- Sistema de analizadores.
- Sistema de adquisición de datos

2.2.9.1. Sonda de muestreo (probeta)

Según el sistema a implementar, la sonda o probeta a usar, puede ser de tipo simple o con dilución.

a) Sonda simple:

- Debe contar al menos con un filtro para la retención de material particulado grueso. El filtro debe contar con una placa o vaina deflectora para minimizar la obstrucción de los filtros, desviando el material particulado grueso que viene con la corriente de gas.
- La sonda debe permitir la difusión de los gases de calibración dentro del espacio entre el deflector y el filtro, desplazando los gases de la chimenea (evitando posibles reacciones del gas de calibración con el material particulado de la corriente de gas); para desde ahí, ingresar al sistema de muestreo durante la calibración del sistema.
- La sonda puede incluir un filtro inercial, que corresponde a un diseño de filtro interno que puede actuar como filtrado primario, en reemplazo del filtro del extremo de la sonda o como un filtro secundario, para limpiar adicionalmente el material particulado desde la corriente de gas muestreado.

b) Sonda de dilución:

- Se utilizan en los sistemas de monitoreo extractivos con dilución.
- El montaje de la sonda o probeta se hace en la chimenea o ducto, debe estar diseñada para acoplarse a la línea umbilical.
- En el caso que se requiera contar con el resultado de la concentración de oxígeno (por ejemplo, para la determinación de CO_2 y la eficiencia de la combustión), el sensor puede estar integrado en la sonda o probeta.

2.2.9.2. Línea de transporte de muestra (umbilical)

La línea de transporte de muestra o línea umbilical, conduce la muestra desde la probeta de la chimenea hasta el sistema de acondicionamiento de la muestra o a los analizadores, mantiene la muestra sobre el punto de rocío del gas, impide la condensación de la humedad e impide la dilución de los gases en el agua presente. La línea de transporte de muestra se compone de un paquete o umbilical de líneas de muestreo, cables, entre otros. Una configuración típica de umbilical contiene la línea de muestreo misma, líneas para el gas de calibración, líneas de aire comprimido, para flujo reverso y líneas de poder para cualquier equipo eléctrico en la chimenea. Los componentes de la línea de transporte de muestra deben estar encerrados en una capa de aislamiento inerte, resistente a la abrasión y retardante de llamas, envuelto con un elemento de calefacción y encerrados en una cubierta protectora externa. (MINAN, 2014)

El recorrido del umbilical deberá ser diseñado para prevenir la acumulación de humedad en la línea de muestreo, para ello debe ser calefaccionada hasta el sistema de extracción de humedad, para evitar la condensación. La temperatura de calefacción es usualmente 120°C o a una temperatura similar a la de los gases de la chimenea. Se debe contar con sensores de temperatura lo largo de línea de muestreo. Las líneas de muestreo son hechas generalmente de PFA teflón, debido a su inercia química, si se requieren medir las temperaturas más altas, superiores a los 250 °C, puede usarse acero inoxidable. (MINAN, 2014)

2.2.9.3. Sistema de acondicionamiento de muestra

El sistema de acondicionamiento de la muestra deberá incluir todos los componentes necesarios y accesorios requeridos (tubos, válvulas, enfriadores, drenajes, purgas y limpieza, filtros, entre otros), para acondicionar la muestra no tratada hasta una condición adecuada para su ingreso a los analizadores de gases.

El principal acondicionamiento, es la remoción de la humedad de la corriente de gas; asimismo filtra material particulado fino, regula los flujos, controla la temperatura de la sonda y manguera e incorpora la bomba de muestra.

El CEMS incluirá las alarmas que monitorearan la operación del acondicionamiento de la muestra, para que no excedan los límites especificados como flujo, temperatura, presión, contenido de humedad y dispositivo de remoción de componentes que interfieran en el análisis. (MINAN, 2014)

Los materiales utilizados deberán ser inertes a los gases de la emisión.

Se puede considerar cualquiera de los siguientes sistemas:

- Condensador refrigerado.
- Enfriadores termoelectrónicos o de efecto peltier.
- Sistemas con doble condensado (remueve la humedad del sistema mediante un chiller secundario bajo presión positiva).
- Condensador en corriente a chorro o jet.
- Secadores por difusión o permeabilidad selectiva.

2.2.9.4. Bomba de muestreo

Es una bomba de paso simple de la muestra, se incorpora al sistema de acondicionamiento, se instala en la línea de muestreo después del enfriador, permitiendo que maneje una

muestra fría y seca. La bomba de muestreo es una parte integral de los sistemas de tipo monitoreo extractivo, se pueden utilizar: bombas de diafragma, bomba impulsora o eyector Venturi. (MINAN, 2014)

Las consideraciones para la bomba son las siguientes:

- Debe ser capaz de abastecer de suficiente muestra a los analizadores.
- Debe ser diseñada para que no haya infiltración del aire del ambiente dentro de la corriente de muestra.
- Debe ser inmune al ataque de los gases de chimenea.
- Debe ser capaz de resistir altas temperaturas.
- No deben ingresar contaminantes a la muestra de gas como aceites lubricantes, sellantes, entre otros.

2.2.10. Sistemas de analizadores

Los analizadores tienen diversas metodologías de detección de gases, miden la propiedad física, química o electromagnética de una sustancia o elemento dado. Los métodos considerados para los analizadores, incluyen al menos cuatro componentes (excepto para los métodos electro analítico) siendo estos: (MINAN, 2014)

a) Fuentes de radiación

Cuenta con una fuente de radiación que genera una luz en un campo cercano, que es irradiada a través del gas analizador y es recibida por el detector. La longitud de onda de luz esta sintonizada con una línea de absorción específica del gas a medir, la fuente de radiación muestra en forma continua, esta línea de absorción única cuya forma y capacidad de absorción se analiza.

b) Limitadores espectrales

Este componente hace que el equipo mida un único componente del gas, a partir de la capacidad de absorción de una única línea de absorción molecular espectral, la absorción tiene lugar por la transformación de la energía irradiada de la luz a energía interna de la molécula.

c) Componentes ópticos

Sensores de luz transmitida, se compone de una unidad transmisora y otra receptora. La unidad transmisora está conectada a la fibra óptica que transporta la luz. Para direccionar y enfocar la luz, se usan lentes, orificios y diafragmas para enfocar la luz hacia la cámara de análisis y sobre el detector; cuenta con espejos semiplateados para dividir el haz de luz, desviando parte al sistema de análisis de medición y parte a la referencia; cuenta asimismo con cortadores de luz a motor o electrónicos que se emplean para producir una oscilación de la fuente de luz y espejos para producir una señal cero.

d) Detectores

La unidad receptora contiene una foto detector y una tarjeta electrónica de circuito impreso y está conectada a la unidad transmisora, mediante un cable de conexión de sensores, para capturar y traducir el efecto creado por el gas contaminante en el sistema analítico. En el receptor, la luz se conduce a un detector adecuado, a continuación, la señal del detector se transforma en una señal óptico y se transmite a través de una segunda fibra óptica a la unidad central, donde se calcula la concentración de los componentes del gas según la señal de absorción.

2.2.11. Sistema de adquisición, tratamiento y comunicación (satc)

El sistema de control, que es el sistema de adquisición y tratamiento de los datos, así como de comunicación, Debe contar con un procesador de datos o datalogger, que es un controlador de procesos inteligentes con entradas y salidas para las señales eléctricas, con acondicionamiento para adición de módulos de comunicación; permite incorporar las funciones de mando de válvulas del sistema de muestras, gestión de alarmas tanto para los analizadores como del conjunto del sistema de medición. El SATC, además debe contar con un sistema para validación y almacenamiento de datos, verificación del estado de los analizadores y de los otros componentes en forma remota, visualización en pantalla de gráficos, la transmisión de los resultados de la concentración de los gases a los operadores y autoridades competentes. (MINAN, 2014)

En general cada sistema de adquisición de datos debe consistir de lo siguiente:

- PLC, para el control de la sonda o probeta, del sistema de acondicionamiento de muestra, de los analizadores y los gases de calibración.
- Datalogger, que permita procesar, almacenar y reportar la data monitoreada.

Las consideraciones requeridas para el sistema de control, adquisición y tratamiento de los datos son:

- Permitir la visualización de los datos en tiempo real.
- Permitir la programación de calibraciones automáticas.
- Chequeo de la calibración.
- Reporte estadístico de valores y gráficos de tendencias.
- Incluir procedimientos automatizados de validación de datos.

- Efectuar el cálculo de las emisiones.

2.2.12. Quemadores

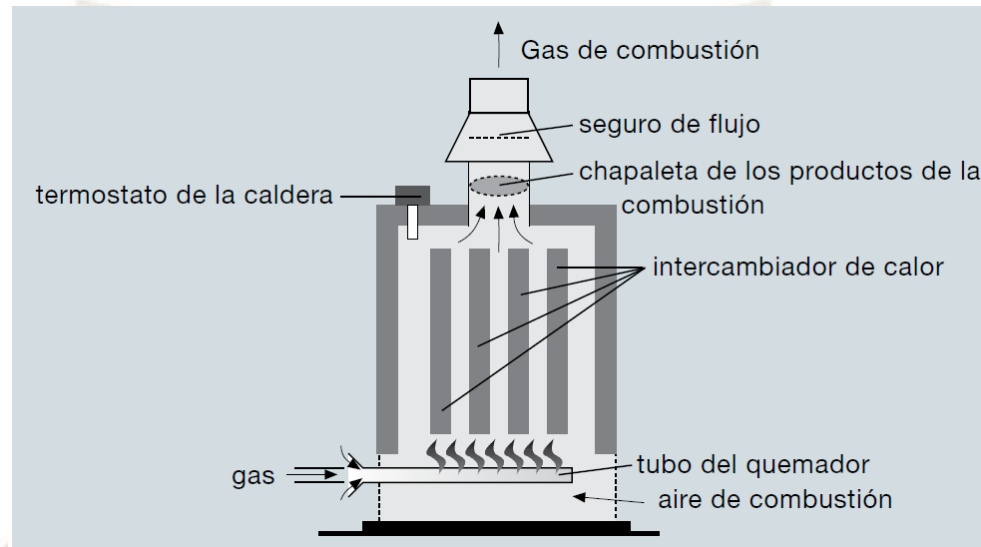
Los quemadores son los dispositivos que permiten realizar la mezcla para la reacción de combustión entre el combustible y el comburente de manera controlada y regulable en toda la salida del quemador, asegurando la aportación adecuada de ambos para conseguir la potencia calorífica especificada, y distribuyendo la zona de reacción (llama) y la circulación de los productos de combustión de modo que se transfiera a la carga, del modo más eficiente posible todo el calor producido. Según sea el combustible utilizado, los quemadores se clasifican en quemadores de combustible gaseoso, combustible líquido y combustible sólido. (Ramírez, 2019)

2.2.12.1. Quemadores atmosféricos

Estos quemadores se derivan de los quemadores por inyección y se montan principalmente como parrillas o quemadores para el tratamiento de superficies. Estos quemadores trabajan con auto succión de aire. Las parrillas se componen de tubos quemadores individuales o varillas con un inyector y un tubo de mezcla cada una. El aire principal (aprox. el 60 %) se succiona en el tubo de inyección por la presión negativa del gas que fluye. La mezcla de gas y aire fluye por las toberas del quemador, se vuelve a mezclar al salir con el aire secundario (aprox. 40 %) y se enciende. Se forma una llama azulacea larga. El gas de combustión se presiona por la ascensión térmica a través del intercambiador de calor. Detrás del

intercambiador, la presión negativa natural de la campana de la chimenea se encarga de extraer los productos de la combustión. (Testo, 2014)

Figura 29
Quemadores Atmosféricos

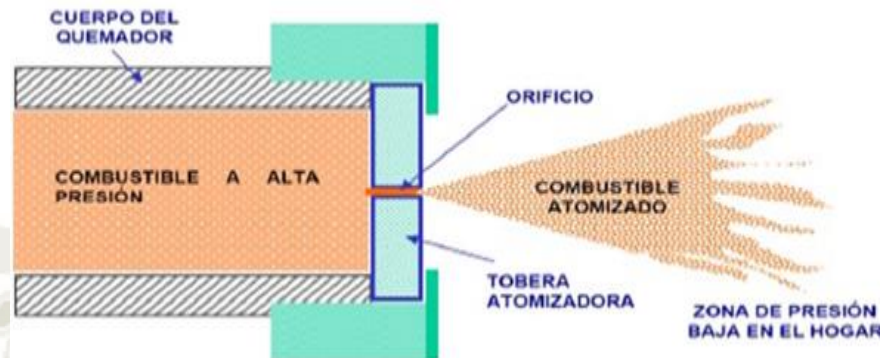


Fuente: Extraída de (Academia Testo, 2018)

2.2.12.2. Quemadores mecánicos

Este tipo de quemadores son los más utilizados en la industria, ya que para que se dé la pulverización, el combustible utilizado debe ser de baja viscosidad. En estos quemadores la pulverización se realiza a través de una tobera donde llega el combustible a presión impulsado por una bomba. (Enriquez Rosero & Jaramillo Restrepo, 2012)

Figura 30
Quemador mecánico

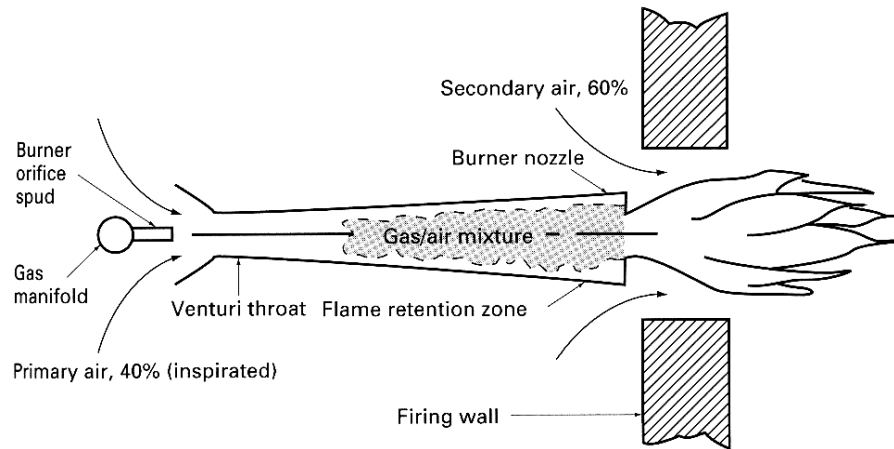


Fuente; (Enriquez Rosero & Jaramillo Restrepo, 2012)

2.2.12.3. Quemadores para combustibles gaseosos

La combustión de gas aparentemente es la más sencilla, pero en realidad es más difícil y peligrosa que los otros combustibles. Una razón de lo anterior, es que la flama en muchos tipos de gas tiene poca luminosidad por lo que es difícil verla en el horno, otra es que la acumulación del gas sin quemarse por resultado de fugas dentro del horno, o pérdida de fuego dentro del horno, o por pérdida de fuego dentro de los quemadores no lo hace visible y por tal motivo no será notado por los operadores dando por consecuencia una explosión. (Ramírez, 2019)

Figura 31
Quemador combustible gaseoso



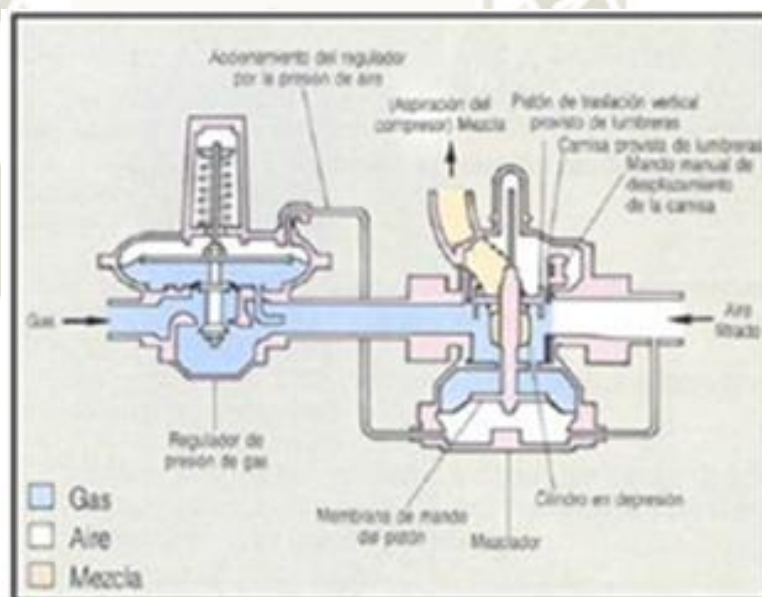
Fuente: Extraída de (Ramírez, 2019)

2.2.12.4. Quemador de pre mezcla

Debido al incremento de los requisitos legales (rendimiento, valores de NO_x y CO) se han desarrollado nuevas técnicas de combustión. Los quemadores de premezcla destacan por rendimientos elevados (hasta el 92 %) y poca contaminación. Los quemadores de premezcla pertenecen al grupo de los quemadores atmosféricos. El aire de combustión puede añadirse a través de un tubo de succión en el lugar de emplazamiento en función del aire del entorno, o desde el aire libre, independientemente del aire del entorno. Un ventilador aspira aire de combustión a través de boquillas de entrada en la camisa interior hermética a gases o en los elementos térmicos. Encima del ventilador se regula la cantidad de aire necesaria para la cantidad de gas (rendimiento de la caldera) mediante un regular de presión diferencial. Por

lo que se pueden ajustar cantidades de exceso de aire muy bajas. Ventaja: pérdida de calor de la combustión muy baja, por tanto, un mayor rendimiento. La mezcla de gas y aire se presiona, enciende y quema con llama corta o una película de llama a través de un quemador cerámico para el tratamiento de superficies o de un quemador matriz. Los productos de la combustión llegan con sobrepresión (200 Pa) después del enfriado al sistema hermético de los productos de la combustión y, a continuación, a través del sistema de campana de la chimenea al aire libre. (Testo, 2014)

Figura 32
Quemador combustible Liquido



Fuente: (Enriquez Rosero & Jaramillo Restrepo, 2012).

2.2.12.5. Vaporización por pulverización

En estos quemadores, el aceite se presuriza mediante una bomba de aceite eléctrica (7 - 20 bar) y después se lleva a una tobera de aceite en la que se pulveriza en partículas extrafinas. Un ventilador succiona aire de la

habitación y lo transporta por el tubo del quemador hasta la tobera de aceite, donde se mezcla con el aceite pulverizado con ayuda de dispositivos de mezclado adecuados (disco deflector, criba deflectora, arandelas de disco, discos de rotación, entre otros). (Enriquez Rosero & Jaramillo Restrepo, 2012)

2.2.12.6. Quemador para combustible sólido

Los quemadores de carbón pulverizado se colocan en diferentes posiciones, dependiendo del combustible, tamaño y forma del horno. El carbón de bajo contenido de compuestos volátiles debe pulverizarse finamente para obtener mejor relación de combustión. (Ramírez, 2019)

Una parte total del aire requerido aproximadamente el 10 al 20 % es necesario para soplar el combustible dentro del horno. Si se usa poco aire primario, el combustible puede depositarse en los quemadores o en los tubos, con el peligro de ignición y daño del quemador. El tamaño y forma de las toberas de los quemadores, distribuidores, así como las tuberías de aire y carbón tienen efecto importante en la estabilidad de los fuegos y temperatura del horno. (Ramírez, 2019)

Los quemadores que se usan con mayor frecuencia son los circulares de un solo registro, diseñados para quemar solo carbón pulverizado. Este tipo de quemadores puede equiparse para quemar cualquier combinación de los tres combustibles principales. Sin embargo, el quemar una combinación de carbón pulverizado con combustóleo con el mismo quemador debe limitarse

a periodos cortos de emergencia debido a que existe la posibilidad de que se forme coque en el elemento de carbón pulverizado. (Ramírez, 2019)

Figura 30

Quemador para carbón pulverizado de bajo NOx



Fuente: (Enriquez Rosero & Jaramillo Restrepo, 2012)














CAPÍTULO III

CAPÍTULO III:

3.1. DESARROLLO DE MEDICIONES CON EL MÓDULO ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN

3.2. Datos técnicos del instrumento utilizado

Tabla 5
Características técnicas principales

Instrumento: KIMO kigaz 310 Pro	
	Célula de O ₂ de larga vida
	Células CO-H ₂ , NO, NO ₂ , SO ₂ y CH ₄ intercambiables
	3 sensores de presión internos piezoeléctricos
	Dilución del CO
	Auto cero dentro de conducto
	Control automático de la bomba de aspiración
	Sensor de temperatura, termopar integrado en la punta de contacto.
	Impresora integrada al equipo
	Bomba de aspiración tipo diafragma con motor
	Duración de carga de batería es de 10 horas
	Trampa de agua

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Rangos de medición

Parámetros	Sensor	Rango de medición	Resolución	Precisión*	Tiempo resp (T_w)
O ₂	Electroquímico de larga duración	De 0% a 21%	0.1% vol.	±0.2% vol.	30 s
CO (con compensación de H ₂)	Electroquímico	De 0 a 8000 ppm	1 ppm	De 0 a 200 ppm : ±10 ppm De 201 a 2000 ppm : ±5% del valor medido De 2001 a 8000 ppm : ±10% del valor medido	30 s
NO	Electroquímico	De 0 a 5000 ppm	1 ppm	De 0 a 100 ppm : ±5 ppm. De 101 a 5000 ppm : ±5% del valor medido	30 s
NO bajo rango	Electroquímico	De 0 a 500 ppm	0.1 ppm	De 0 a 100 ppm : ±2 ppm. De 101 a 500 ppm : ±2% del valor medido	30 s
NO _x	Calculado**	De 0 a 5155 ppm	1 ppm		-
NO ₂	Electroquímico	De 0 a 1000 ppm	1 ppm	De 0 a 100 ppm : ±5 ppm. De 101 a 1000 ppm : ±5% del valor medido	80 s
SO ₂	Electroquímico	De 0 a 5000 ppm	1 ppm	De 0 a 100 ppm : ±5 ppm. De 101 a 5000 ppm : ±5% del valor medido	80 s
CO ₂	Calculado**	De 0 a 99% vol	0.1% vol		-
CH ₄	Semiconductor	De 0 a 10000 ppm De 0 a 1% Vol De 0 a 20 % LEL	1 ppm 0.0001% Vol 0.002% LEL	±20% del fondo de escala	40 s
Temperatura humos	Termopar K	De -100 a 1250°C	0.1°C	±1.1°C ó ±0.4% del valor medido	45 s
Temperatura amb.	NTC interno	De -20 a 120°C	0.1°C	±0.5°C	30 s
Temperatura amb.	Pt100 1/3 DIN (sonda externa)	De -50 a 250°C	0.1°C	±0.3% del valor medido ±0.25°C	-
Punto de rocío	Calculado**	De 0 a 99°C _{dg}	0.1°C		-
Temperatura ACS	Termopar K (sonda externa)	De -200 a 1300 °C	0.1°C	±1.1°C ó ±0.4% del valor medido	-
Tiro	Piezoelectrico	De -10 a 10 Pa De -1000 a 1000 Pa	0.1Pa 1 Pa	De -100 a -10 Pa : ±2 Pa De -10 a +10 Pa : ±0.5 Pa De +10 a +100 Pa : ±2 Pa Fuera de los rangos indicados: ±2 % del valor medido	-
Presión diferencial	Piezoelectrico	De -20000 a 20000 Pa	1 Pa	De -20000 a -751 Pa : ±0.5% del valor medido ±4.5 Pa De -750 a -61 Pa : ±0.9% del valor medido ±1.5 Pa De -60 a 60 Pa : ±2 Pa De 61 a 750 Pa : ±0.9% del valor medido ±1.5 Pa De 750 a 20000 Pa : ±0.5% del valor medido ±4.5 Pa	-
Pérdidas	Calculado**	De 0 a 100%	0.1%		-
Velocidad de humos	Calculado**	De 0 a 99.9 m/s	0.1 m/s		-
Exceso de aire (λ)	Calculado**	De 1 a 9.99	0.01		-
Eficiencia menor (η ₁)	Calculado**	De 0 a 100%	0.1 %		-
Eficiencia mayor (η ₂) (condensación)	Calculado**	De 0 a 120%	0.1%		-
Índice de opacidad	Instrumento externo	De 0 a 9			

3.3. Medición Gases

- Medición del CO y CO₂ en humos y en cualquier ambiente

- CO máximo
- Exceso de Aire
- Cálculo de Eficiencia
- Pérdidas
- Dilución del CO hasta el 4%
- Auto cero en humos
- Sensor intercambiable de O_2
- Sensor intercambiable de NO
- Sensor intercambiable de CO- H_2
- Sensor intercambiable de SO_2

3.4. Medición Presión

- Medición de presión diferencial
- Medición de tiro
- Medición de caudal de la bomba de succión

3.5. Medición Temperatura

- Temperatura de ambiente
- Temperatura de humos
- Diferencial de temperaturas
- Temperatura ACS con 2 termopares
- Punto de rocío

3.6. Otras funciones

- 15 combustibles pre programados
- Índice de opacidad

3.7. Cálculos justificativos

3.7.1. Parámetros medidos directamente

Tabla 6
Parámetros medidos en forma directa

Tipo	Nomenclatura	Unidad de medida
Oxígeno	O_2	%
Monóxido de carbono	CO	ppm
Temperatura ambiental	Amb. T	°C
Temperatura de gases de combustión	Gas T	°C
Monóxido de nitrógeno	NO	ppm
Dióxido de azufre	SO_2	ppm

Fuente: Elaboración propia

3.7.2. Parámetros calculados

3.7.2.1. Exceso de aire

$$EA = \frac{CO_{2max}}{CO_2} = 1 + \frac{O_2}{21 - O_2}$$

Donde:

- CO_{2max} = valor de CO_2 máximo específico del combustible en %
- CO_2 = valor de CO_2 calculado en %
- O_2 = valor de O_2 medido en %
- 21 = conteo de oxígeno en el aire

3.7.2.2. Óxidos de nitrógeno

$$NO_x = \frac{NO}{0.97}$$

Donde:

- NO: Monóxido de nitrógeno medido directamente por el sensor
- NO_x : óxidos de nitrógeno en ppm
- 0.97: valor referencial

3.7.2.3. Dióxido de carbono

$$CO_2 = \frac{(21 - O_2med)}{21} * CO_{2max}$$

Donde:

- CO_{2max} = CO_2 máximo específico del combustible en %
- O_2med = O_2 medido por el equipo analizador de gases

Tabla 7
CO₂máximo de los combustibles

TIPO	CO _{2max} (%)	CO _{2max} (ppm)
RESIDUALES	15.8	158000
DESTILADOS	15.5	155000
GLP	13.8	138000
GAS NATURAL	11.9	119000

Fuente: NTP 350.300.2008

3.7.2.4. Concentración de monóxido de carbono corregido no diluido o corregido

$$CO_{corr} = CO \times \lambda$$

Donde:

- CO = Valor del CO medido
- λ = Coeficiente de exceso de aire

3.7.2.5. Pérdida de calor de la combustión

$$q_A = K \cdot \frac{T_G - T_A}{CO_2}$$

Donde:

- T_G = Temperatura de gases a la salida de la chimenea °C.
- T_A = Temperatura de ambiental o del ingreso al quemador °C.
- CO_2 = Concentración volumétrica de CO_2 en los gases de escape, base seca.
- K = Constante de Siegert para el combustible.

Tabla 8
Propiedades de los Combustibles

TIPO	CTE DE SIEGERT (K)	CONSTANTE (K ₁)
RESIDUALES	0.53	54
DESTILADOS	0.48	53
GLP	0.4	48
GAS NATURAL	0.35	40

Fuente: NTP 350.300.2008

3.7.2.6. Constante de Sievert para el Combustible

$$K = 255 \cdot \frac{\%C}{PCS}$$

Donde:

- PCS = Poder calorífico del combustible
- %C= Porcentaje de C del combustible

3.7.2.7. Pérdida por inquemados

$$Pi = K1 \cdot \frac{CO}{CO_2 + CO}$$

Dónde:

- CO = valor de CO medido en los gases de escape
- CO₂= valor de CO₂ medido en los gases de escape
- K1= Constante de Sievert

3.7.2.8. Rendimiento

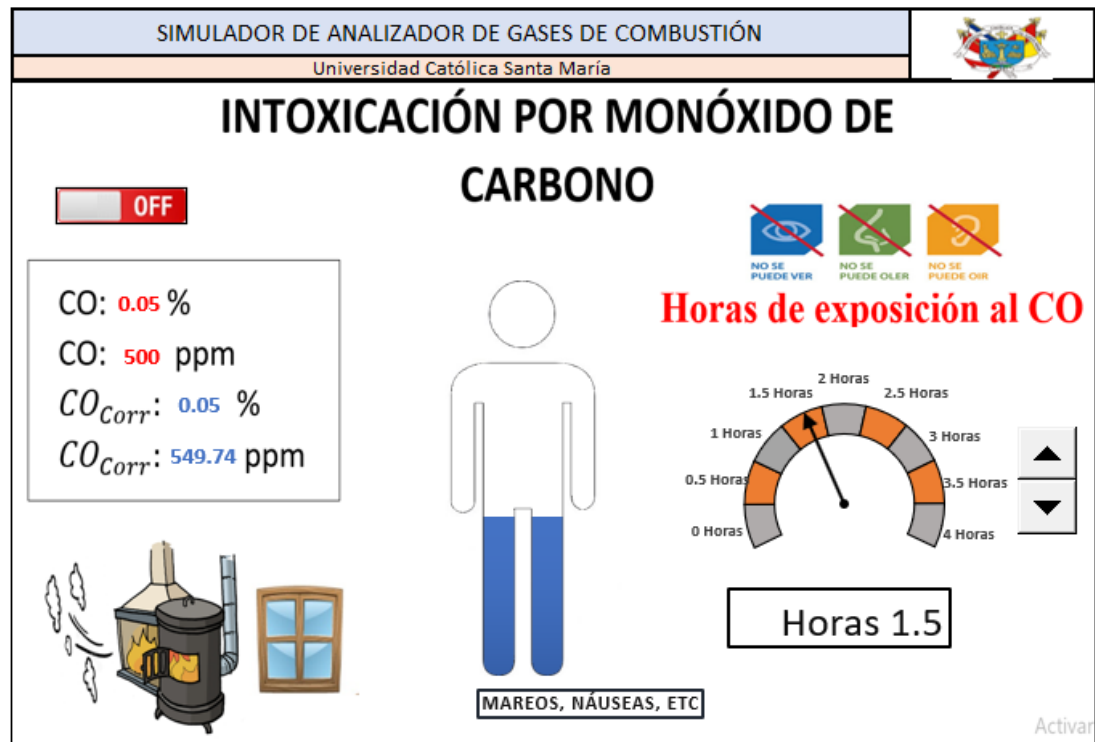
$$\eta = 100 - q_A - q_i$$

Donde:

- q_A = Pérdida de calor de la combustión
- q_i = Pérdida por inquemados

Figura 31

Simulación de intoxicación por monóxido de carbono por tiempo de exposición



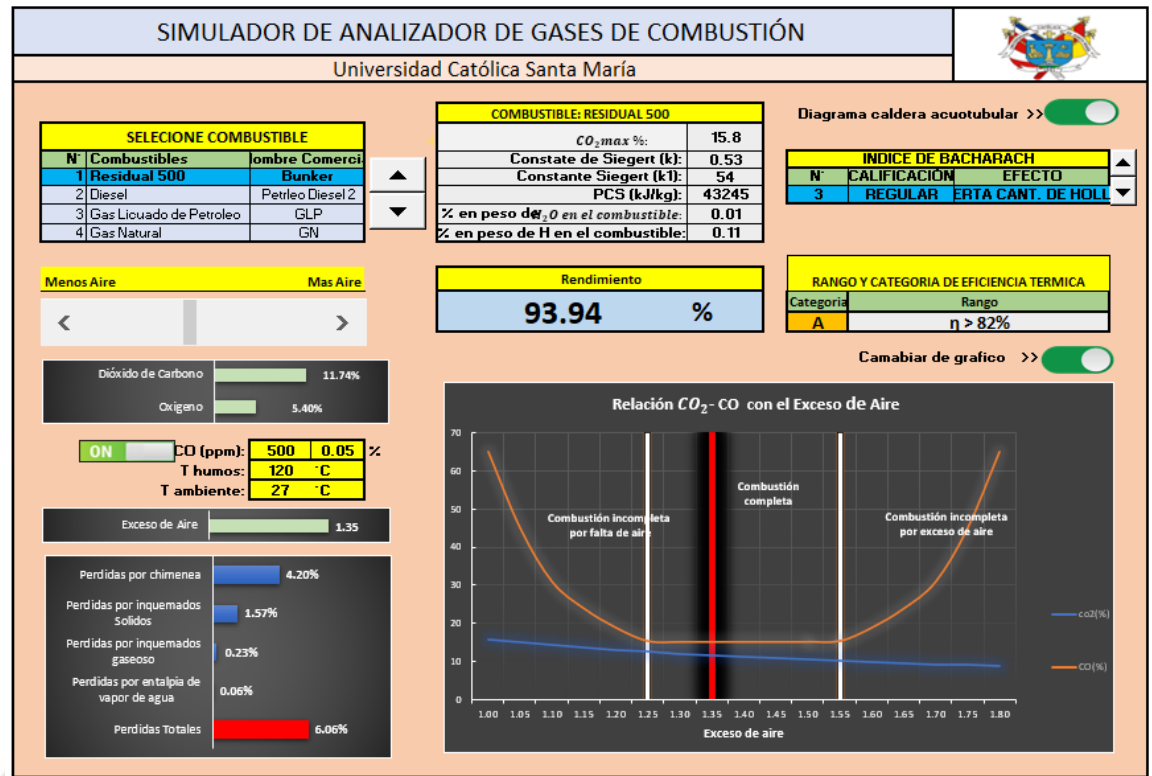
Fuente: Elaboración propia

3.8. Pruebas realizadas

3.8.1.1. Simulador de analizador de gases de combustión

Se elaboró un programa de cálculo en Excel, el cual simula ser un analizador de gases de combustión en el cual se podrá observar y analizar cómo el rendimiento varía según se vayan cambiando los parámetros de combustión. Se inicia seleccionando el tipo de combustibles de una lista de cuatro combustibles (residual 500, Diesel 2, gas licuado de petróleo y gas natural) luego se selecciona el índice de Bacharach que va de una calificación de 1 a 9 (1 excelente, 2 buena, 3 regular, 4 pobre, 5 muy pobre y de 6 a 9 pobrísima) luego se procede a seleccionar el porcentaje de oxígeno que entra al quemador con una barra móvil horizontal que simulará ser el tornillo de regulación de entrada de aire al quemador.

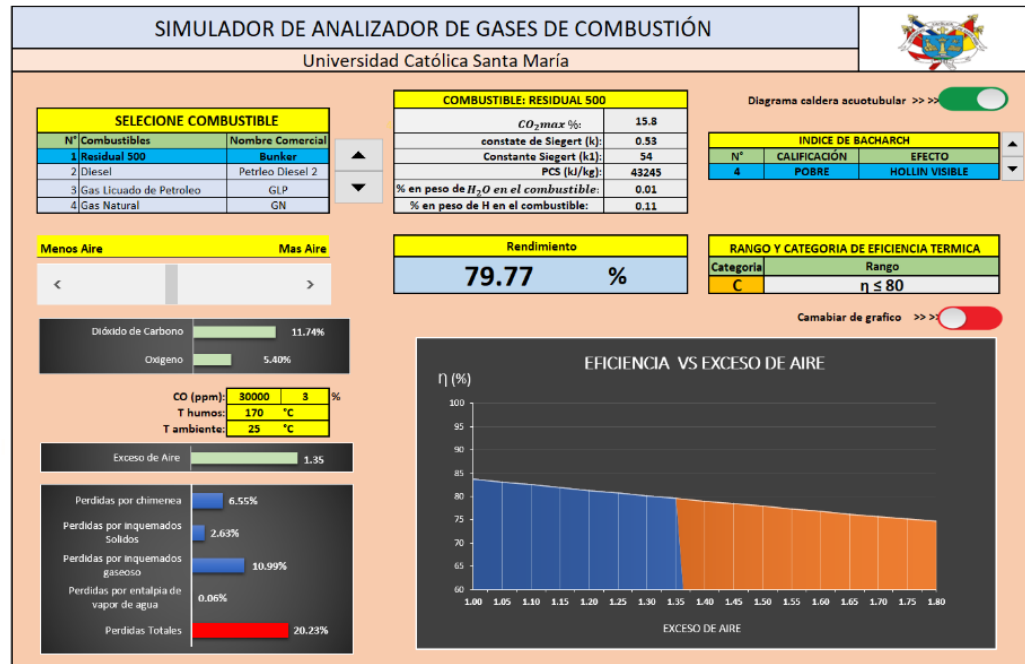
Figura 32
Simulador de analizador de gases de combustión relación CO₂-CO



Fuente: Elaboración propia

Cómo datos de entrada tendremos los valores de monóxido de carbono, temperatura de ambiente y temperatura de gases de combustión, como datos de salida tendremos el dióxido de carbono, oxígeno, exceso de aire y las pérdidas de combustión (pérdidas por chimeneas, pérdidas por inquemados sólidos, pérdidas por inquemados gaseoso, pérdidas por entalpia de vapor de agua).

Figura 33
Simulador eficiencia vs exceso de aire



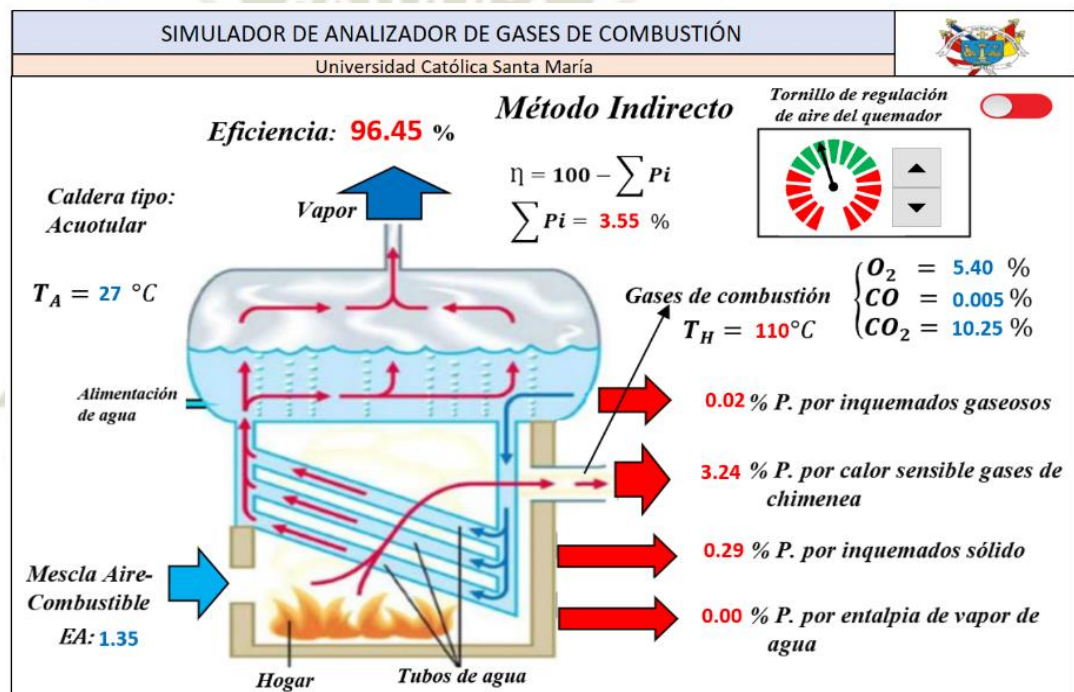
Fuente: Elaboración propia

El programa nos dará como resultado el rendimiento del generador, así como su rango y categoría de eficiencia térmica también nos mostrará un diagrama de eficiencia y dos graficas (una gráfica representa la relación del dióxido de carbono y el monóxido de carbono con el exceso de aire y la segunda grafica representa la eficiencia vs el exceso de aire). La figura 32 se encuentra dividida en tres áreas (combustión incompleta por falta de aire, combustión completa y combustión incompleta por exceso de aire) y de acuerdo a los valores ingresados el programa nos ubicará en una de las tres áreas donde se podrá observar el aumento o descenso de las concentraciones de CO y CO₂ según el exceso de aire. En la figura 33 se visualizará la eficiencia en función del exceso de aire y se podrá observar como el

rendimiento del equipo analizado se ve afectado por el aumento o disminución del aire con el que es alimentado.

En la figura 34 se puede observar el cálculo de la eficiencia por el método indirecto, así como la influencia de los parámetros de los gases de combustión en su resultado del rendimiento de una caldera.

Figura 34
Simulador de analizador de gases – eficiencia método Indirecto



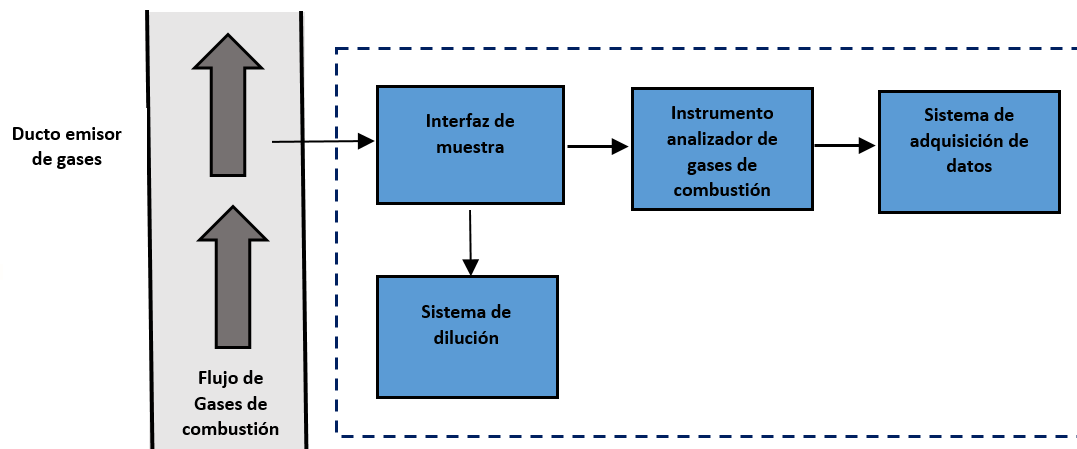
Fuente: Elaboración propia

3.8.1.2. Prueba de análisis de gases de combustión

Se realiza la medición de gases de combustión usando el método de muestreo extractivo este método consiste en determinar los parámetros contaminantes del gas de combustión, a través del empleo de un dispositivo mecánico tal como una bomba, para enviar una muestra de gases de combustión al dispositivo de muestreo o interfaz de muestra como un tubo adsorbente o depósito de muestreo, pasando

luego al análisis del instrumento y finalmente los datos pasaran a un sistema de adquisición de datos.

Tabla 9
Sistema de análisis de gases por el método extractivo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10
Característica de los sistemas de monitorio extractivos

Ventaja	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Flexibilidad en ubicación del punto de muestreo. • Es versátil, fácil de expandir y modificar. • Es posible el uso de una amplia gama de analizadores • Permite medir bajas concentraciones. • Acepta gas de calibración. 	<ul style="list-style-type: none"> • Podría alterar la muestra • El tiempo de respuesta podría ser lento. • La inversión podría ser alta • El mantenimiento podría ser frecuente.

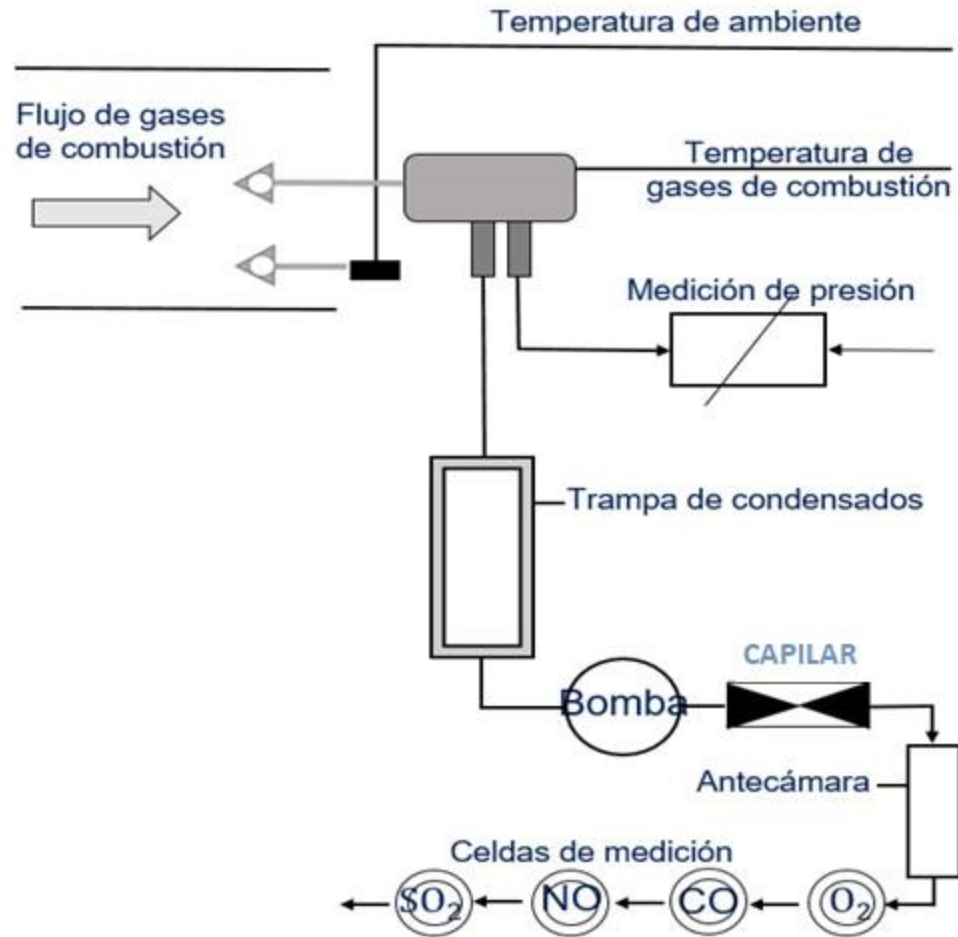
Fuente: Resolución Ministerial N° 355-2014 MINAN

Este tipo de análisis de gases es una análisis extractivo donde se colocará una sonda en la salida de gases de combustión, el gas de combustión va a ser extraído a través de esa sonda, va pasar al interior del analizador para lo cual previamente debe ser

filtrado y enfriado, en el interior del analizador de gases de combustión se encontrara una bomba que se encargara de succionar los gases de combustión y traerlos a través de la sonda, luego de la manguera hacia el interior del analizador, la trampa de condensados se encontrara directamente en el dispositivo de análisis de gases la función de la trampa de condensado; es al realizarse la primera descompresión de los gases de combustión y retener los condensados ácidos que se generaran sobre las paredes de la trampa, además de pasar el gas por una trampa de condensados también se lo pasara a través de filtros, por posibilidad de que los gases a analizar contengan una gran cantidad de hollín u otros partículas que es necesario filtrar para evitar que dañen la celda y disminuyan la vida útil del equipo analizador de gases de combustión, una vez que el gas está limpio pasará a través de la celda de combustión que se encuentra en una disposición en serie pasando el gas de una celda a otra pata, posteriormente ser expulsado desde el mismo equipo hacia el exterior por lo que se recomienda realizar la prueba de análisis de gases de combustión en un lugar abierto o ventilado.

Tabla 11

Esquema de realización del análisis de gases de combustión



Fuente: Elaboración propia

3.8.1.3. Medición de análisis de gases de combustión

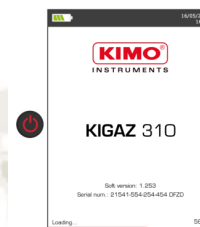
Medición de análisis de gases de combustión

Pasos para realizar la medición

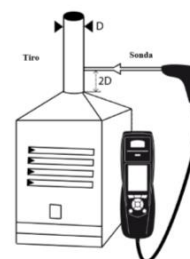
- Conecte la sonda de humos al analizador.



- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.



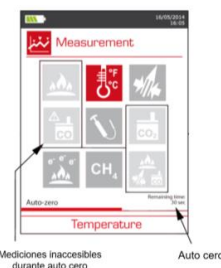
- Inserte la sonda en la chimenea como se muestra en la figura.



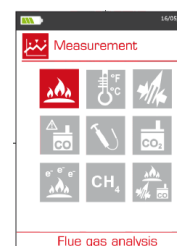
- Seleccione medición y Pulse "OK"



- Se mostrará todas las mediciones disponibles.
- Esperar que termine el auto cero.



- Seleccionar análisis de gases de combustión.



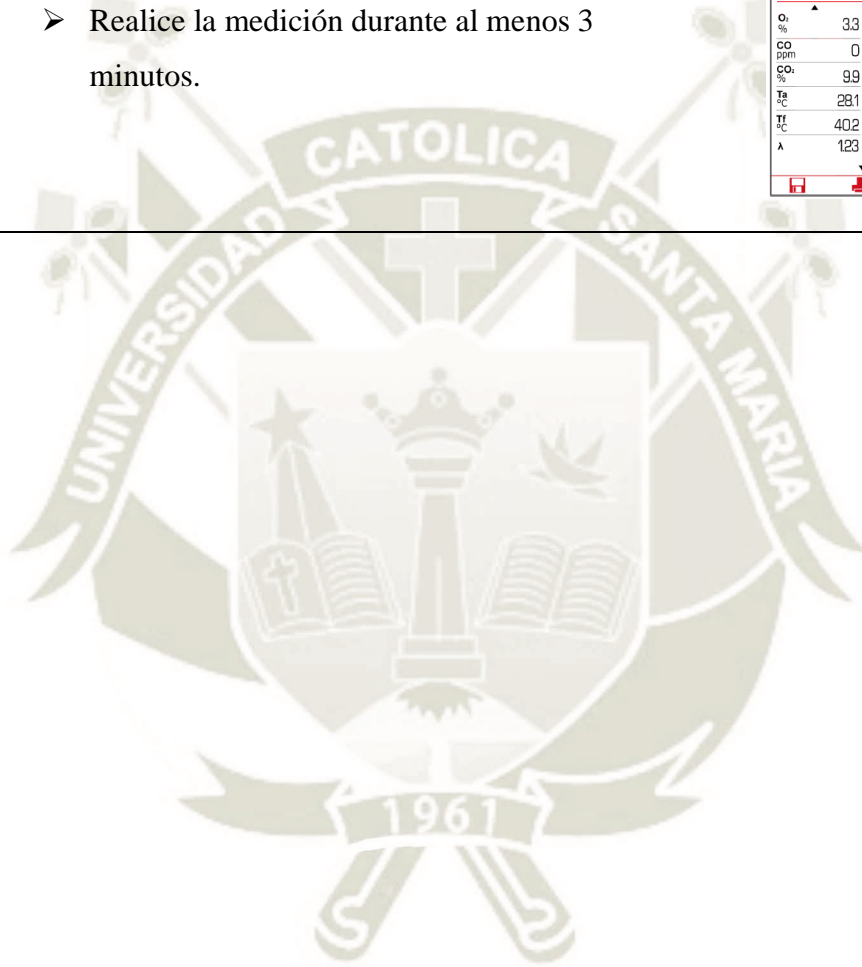
➤ Seleccione el tipo de combustible



➤ Se iniciará la medición de gases

➤ Realice la medición durante al menos 3 minutos.

Flue gas analysis			
Salvador/Fos Nat. gas			
O ₂ %	3.3	η _s %	994
CO ppm	0	η _t %	1071
CO ₂ %	99	Q _s %	06
T _a °C	281	ΔT °C	0
T _f °C	402	NO ppm	0
λ	123	NO _x ppm	0



3.8.2. Medición de CO ambiental

Los gases de combustión, por ejemplo, de los coches o los gases de escape de pequeños motores de gasolina, estufas y lámparas, o los generados por la combustión de madera o carbón, así como los gases liberados por las estufas de gas y los sistemas de calefacción, contienen monóxido de carbono. El monóxido de carbono liberado por estas fuentes puede acumularse en concentraciones peligrosas en recintos cerrados o semicerrados. Las personas y animales en estos recintos pueden sufrir envenenamiento por monóxido de carbono si se inhala este gas. (Academia Testo, 2018)

Los síntomas más comunes del envenenamiento por monóxido de carbono son dolores de cabeza, mareos, desmayos, náuseas, vómitos, dolor pectoral y confusión. La absorción de monóxido de carbono en altas concentraciones puede dar lugar a pérdida de la consciencia o, incluso, la muerte. A menos que se sospeche explícitamente el envenenamiento por monóxido de carbono, frecuentemente será difícil de diagnosticar como tal, porque los síntomas de otras enfermedades son relativamente similares. El envenenamiento por monóxido de carbono puede ser fatal en personas embriagadas o dormidas, sin que se manifiesten síntomas en primer lugar. La medición se basa en la difusión del aire a medir en la célula (cámara de medición). A este fin hay una abertura en la célula que está protegida por una malla metálica para impedir la penetración de polvo y otras partículas. (Academia Testo, 2018)

Durante la medición se ha de tener en cuenta lo siguiente:

El polvo fino influye sobre el camino óptico y por consiguiente sobre la medición.

La condensación influye sobre el camino óptico y por consiguiente sobre la medición.

Tabla 12
Estándar nacional de CO

Parámetro	Periodo	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor (ppm)
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	10,000	80000
	1 hora	30,000	24000

Fuente: D.S 074-2001-PCM (PCM.D.S.074, 2001)

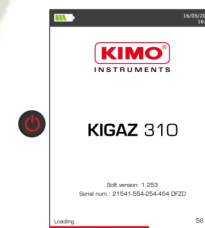
Medición de CO ambiental

Pasos para realizar la medición

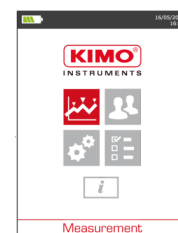
- Conecte la sonda de humos al analizador.



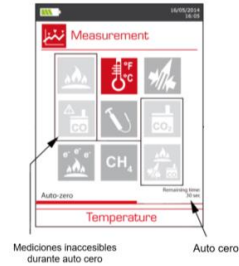
- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.



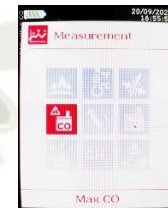
- Seleccione medición y Pulse "OK"



- Se mostrará todas las mediciones disponibles.
- Esperar que termine el auto cero.



- Seleccione CO ambiental.



- Se iniciará la medición del CO ambiental.



3.8.2.1. Medición de CO₂ ambiental

El aire expirado contiene aproximadamente 40.000 ppm de CO₂ y por ello no se debe exhalar directamente sobre la sonda o en su dirección. Se recomienda sujetar la sonda en un soporte y alejarse unos pasos.

El movimiento normal del aire normalmente es suficiente para mezclar el gas CO₂ con los demás componentes del aire. Cuando se realizan medidas en el puesto de trabajo, el aire debe medirse, no obstante, a la altura de la cabeza.

Medición del CO₂ veamos cuadro “control personal” de los gases de combustión Concentración de CO₂, valores básicos. (Academia Testo, 2018)

Tabla 13
Control personal

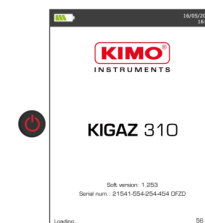
CO ₂ % en Vol.	CO ₂ en ppm	
0.033...0.04	330...400	Aire puro en el campo
0.07	700	Aire urbano
0.1	1	Valor limite en oficinas, valor máximo según pettenkofer
0.5	5	Valor limite umbral
0.7	7	Valores máximos en cines después de una sesión
2	20	Valor de tolerancia fisiológica frecuente a corto plazo
2...4	20.000...40.000	Respiración más rápida, aumento de la frecuencia cardiaca
4.0...5.2	40.000.52.000	Aire espirado
4...8	40.000.80000	Dolores de cabeza, mareos
8...10	80.00...100.00	Convulsiones, pérdidas rápida de la consciencia
20	200	Fatal en pocos segundos

Fuente: Extraída de (Academia Testo, 2018)

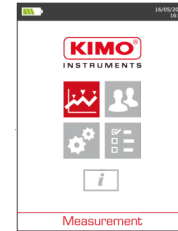
Tabla 14
Medición de CO₂ ambiental

Pasos para realizar la medición

- Conecte la sonda de humos al analizador.
- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.



- Seleccione medición y Pulse "OK"
- Seleccione medición de CO_2 ambiental y Pulse "OK" y realice medición



Fuente: Extraída de (KIMO, 2019)

3.8.2.2. Medición de temperatura ambiental

Para medir La temperatura del aire de combustión se debe introducir la sonda en la abertura de la admisión del quemador. Para instalaciones de combustión que no dependen del aire de ambiente, la temperatura debe medirse en un lugar apropiado en la tubería de suministro. (Academia Testo, 2018)

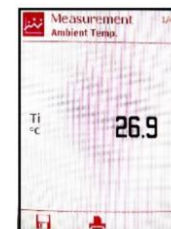
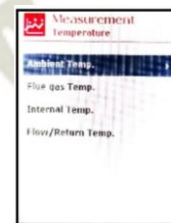
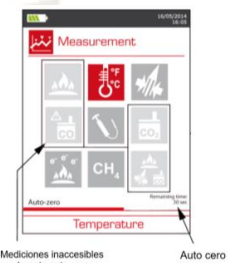
Tabla 15
Medición de temperatura de ambiente

Pasos para realizar la medición

- Conecte la sonda de humos al analizador.



- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.
- Seleccione medición y Pulse "OK"
- Se mostrará todas las mediciones disponibles.
- Esperar que termine el auto cero.
- Seleccionar temperatura.
- Seleccione "Temperatura de ambiente" y. Pulse "OK".
- La temperatura detectada por la sonda se muestra en la pantalla del analizador".



Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)

3.8.2.3. Medición de temperatura en los gases de combustión

Para medir la temperatura de los gases de combustión se mide en el centro del flujo de los gases de combustión. La temperatura y la concentración de anhídrido carbónico (CO_2) están aquí en su nivel más alto y el contenido de oxígeno (O_2) está en el más bajo. (Academia Testo, 2018)

Tabla 16
Medición de temperatura de gases

Pasos para realizar la medición

- Conecte la sonda de humos al analizador.



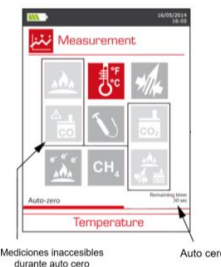
- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.



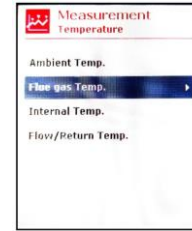
- Seleccione medición y Pulse "OK"



- Se mostrará todas las mediciones disponibles.
- Esperar que termine el auto cero.
- Seleccionar temperatura.



- Seleccione Temperatura de gases de combustión.



- La temperatura detectada por la sonda se muestra en la pantalla del analizador".



Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)

3.8.2.4. Medición de tiro o fuerza ascensional

Para la realización de medición del tiro, en las calderas de tiro natural, es requisito básico para impulsar los gases de combustión a través de la chimenea. Debido a la menor densidad de los gases de combustión calientes en comparación con el exterior más frío, se genera un vacío en la chimenea, que también se llama tiro de la chimenea. Como consecuencia de este vacío, el aire de la combustión es aspirado, venciendo todas las resistencias de la caldera y del conducto de gases de combustión. El caso de la caldera presurizada, las presiones en las chimeneas no son importantes ya que el ventilador del quemador genera la presión positiva necesaria para impulsar los gases de combustión. (Academia Testo, 2018).

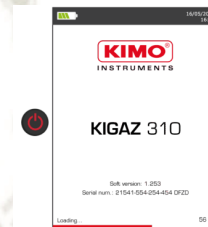
Tabla 17
Medición de tiro

Pasos para realizar la medición

- Conecte la sonda de humos al analizador.



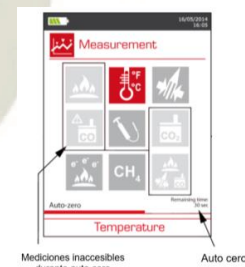
- Encienda el analizador.
- Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado.



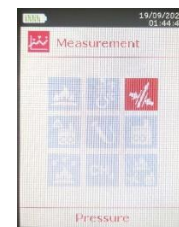
- Seleccione medición y Pulse "OK"



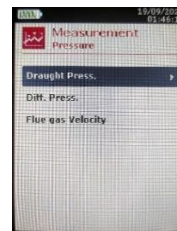
- Se mostrará todas las mediciones disponibles.
- Esperar que termine el auto cero.



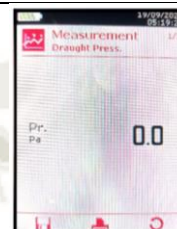
- Seleccione presión



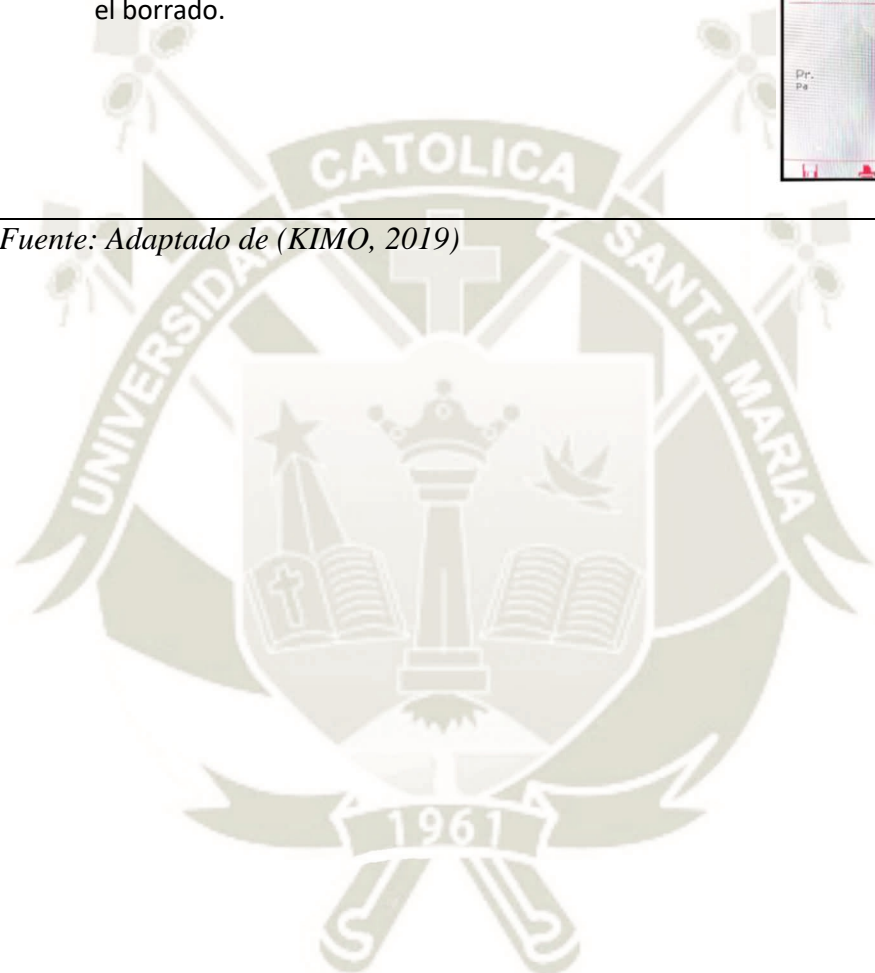
- Seleccione Presión de tiro



- Se inicia la medición y el analizador muestra el borrado.



Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)





CAPÍTULO IV

CAPÍTULO IV: ADQUISICIÓN DE DATOS Y RESULTADOS DE MEDICIONES DE GASES DE COMBUSTIÓN

4.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se realizó el análisis de gases de combustión a vehículos y una caldera, las muestras fueron tomadas según dos regímenes de funcionamiento para los vehículos según sus rpm e incremento de temperatura y para la caldera según su temperatura.

4.2. Factores de entrada para el análisis de gases de combustión

Para realizar el análisis de gases de combustión se tomó como punto de partida el rpm de los vehículos ralenti (800rpm -1000rpm), 1500rpm, 2000rpm, 2500rpm y 300rpm y la temperatura desde el encendido de la máquina de combustión hasta alcanzar su temperatura de funcionamiento estándar.

Los parámetros de combustión medidos son:

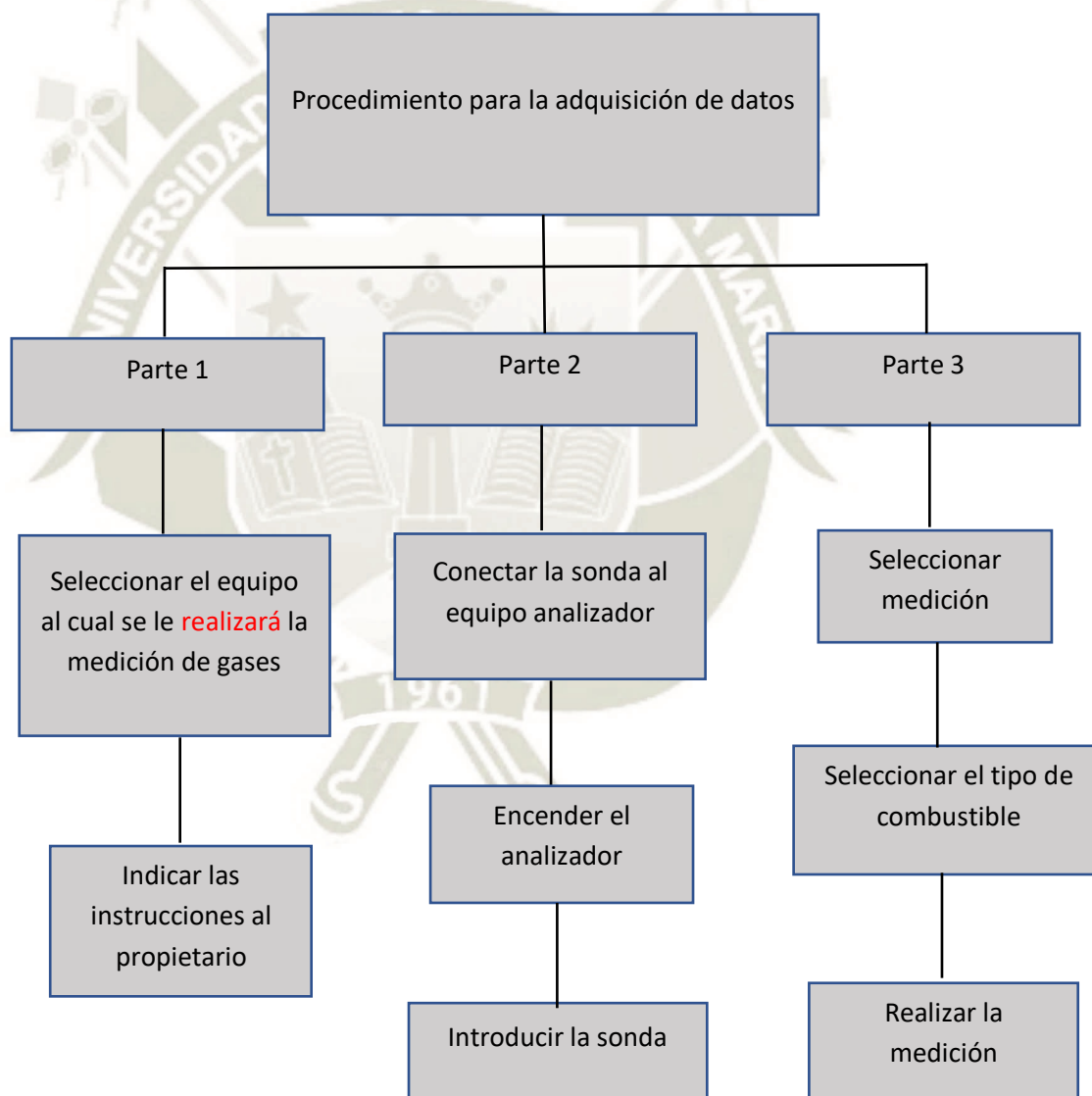
Tabla 18
Parámetros de gases de medición

Valores Medidos Directamente		
Parámetro	Nomenclatura	Unidad de Medida
Oxígeno	O ₂	%
Monóxido de carbono	CO	Ppm
Temperatura de Ambiente	°T	°C
Temperatura de gases de combustión	°T	°C
Monóxido de Nitrógeno	NO	Ppm
Valores Calculados		
Parámetro	Nomenclatura	Unidad de Medida
Dióxido de Carbono	CO ₂	%
Exceso de Aire	EA	
Temperatura Diferencial	°T	°C

Baja Eficiencia	η	%
Alta Eficiencia	η	%
Pérdidas	P_i	%
Óxidos de Nitrógeno	NO_x	ppm

Fuente: Elaboración propia

4.3. Procedimiento para la adquisición de datos



4.4. Medición y Análisis de gases de combustión

4.4.1. Análisis de gases de combustión en vehículo gasolina

Datos de vehículo

- Placa: V4A-224
- Número de motor: M16A1539105
- Combustible: Gasolina
- Año de fabricación: 2010
- Marca: Suzuki
- Kilometraje: 33919

Figura 35
Medición de gases de combustión



Fuente: Elaboración propia

4.4.1.1. Datos de medición de gases

Tabla 19

Medición de gases de combustión gasolina

Parámetros	Unida d	Medid a N° 1	Medid a N° 2	Medid a N° 3	Medid a N° 4	Medid a N°5	Medid a N° 6
Oxígeno	%	0	0	0	0	0	0
Monóxido de carbono	ppm	355	335	79	51	0	0
Temperatura de Ambiente	°C	22.6	22.8	23.1	23.3	23.5	23.6
Temperatura de Gases	°C	47.2	47.6	48.7	50.1	51.8	56.4
Monóxido de nitrógeno	ppm	0	0	0	0	0	0
Dióxido de carbono	ppm	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5
Exceso de aire		1	1	1	1	1	1
Temperatura Diferencial	°C	24.6	24.8	25.6	26.8	28.3	32.8
Baja Eficiencia	%	99.1	99.1	99.1	99	99	98.8
Alta Eficiencia	%	99.1	99.1	99.1	99	99	98.8
Pérdidas	%	0.9	0.9	0.9	1	1	1.2
Óxido Nitroso	ppm	0	0	0	0	0	0
CO corregido	ppm	355	335	79	51	0	0
Velocidad del Vehículo	RPM	ralentí	1000	1500	2000	2500	3000

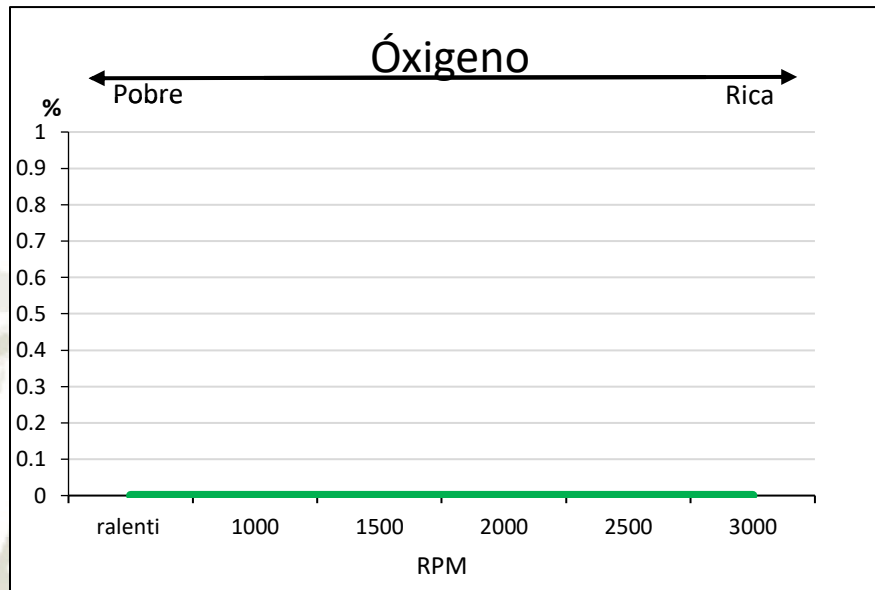
Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2. Análisis de los gases de combustión

- Análisis del oxígeno motor gasolina

Figura 36

Análisis del oxígeno motor otto



Fuente: Elaboración propia

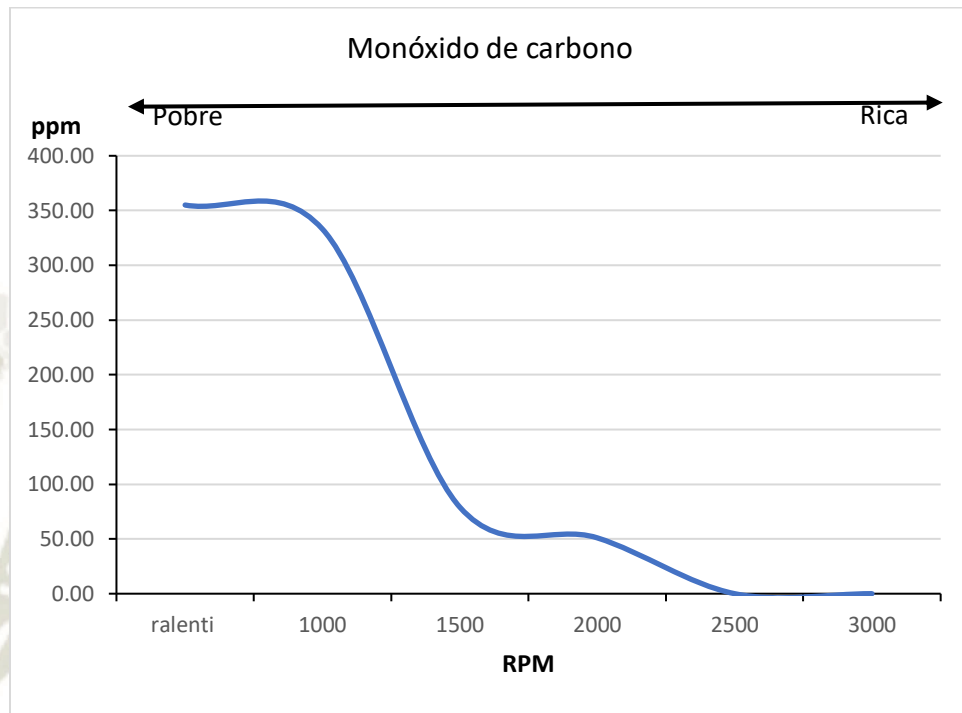
En la figura 36, se puede observar como la concentración de oxígeno residual se mantiene en un nivel bajo y constante desde la primera medición efectuada hasta la última medición realizada, indicándonos que no hay oxígeno excedente debido a que todo el oxígeno es consumido en el proceso de combustión.

El oxígeno residual es uno de los productos de una combustión, pero no es dañino para el medio ambiente, ni para las personas.

- **Análisis del monóxido de carbono motor otto**

Figura 37

Análisis de monóxido de carbono motor otto

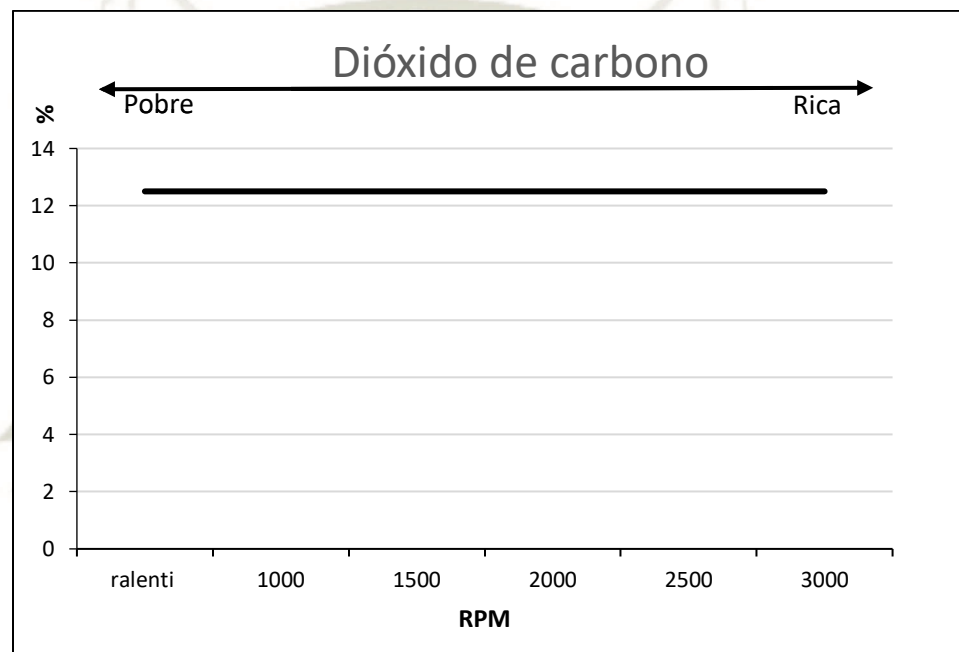


Fuente: Elaboración propia

El monóxido de carbono es un indicador para saber si la combustión es buena o mala. Altos niveles de CO $>0.5\%$ indican combustión incompleta por exceso de aire o exceso de combustible, pero un CO bajo <0.5 indica que la mayor parte del combustible se ha oxidado de forma correcta transformándose en CO_2 . En la figura 37, se puede observar que la concentración de CO no supera los 400 ppm (0.04% de CO), indicándonos que es una combustión eficiente.

- **Análisis del dióxido de carbono motor otto**

Figura 38
Análisis de dióxido de carbono motor otto



Fuente: Elaboración propia

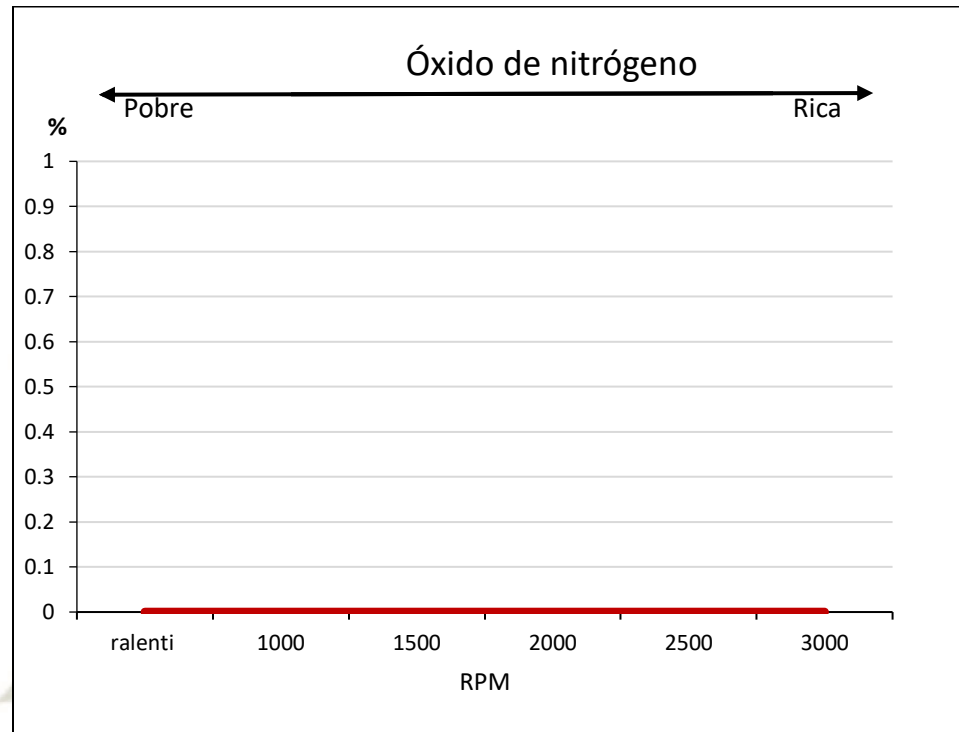
En la figura 38, se puede observar como el porcentaje de dióxido es elevado y constante indicando que se realiza una buena combustión.

El dióxido de carbono es otro de los mejores indicadores de la eficiencia de una combustión entre más alto sea este valor es mejor, un CO_2 alto indica una combustión eficiente y un buen funcionamiento del motor este valor porcentual se ubica entre un 12% y el 15%.

- **Análisis de Óxidos de nitrógeno motor otto**

Figura 39

Análisis de óxido de nitrógeno motor otto



Fuente: Elaboración propia

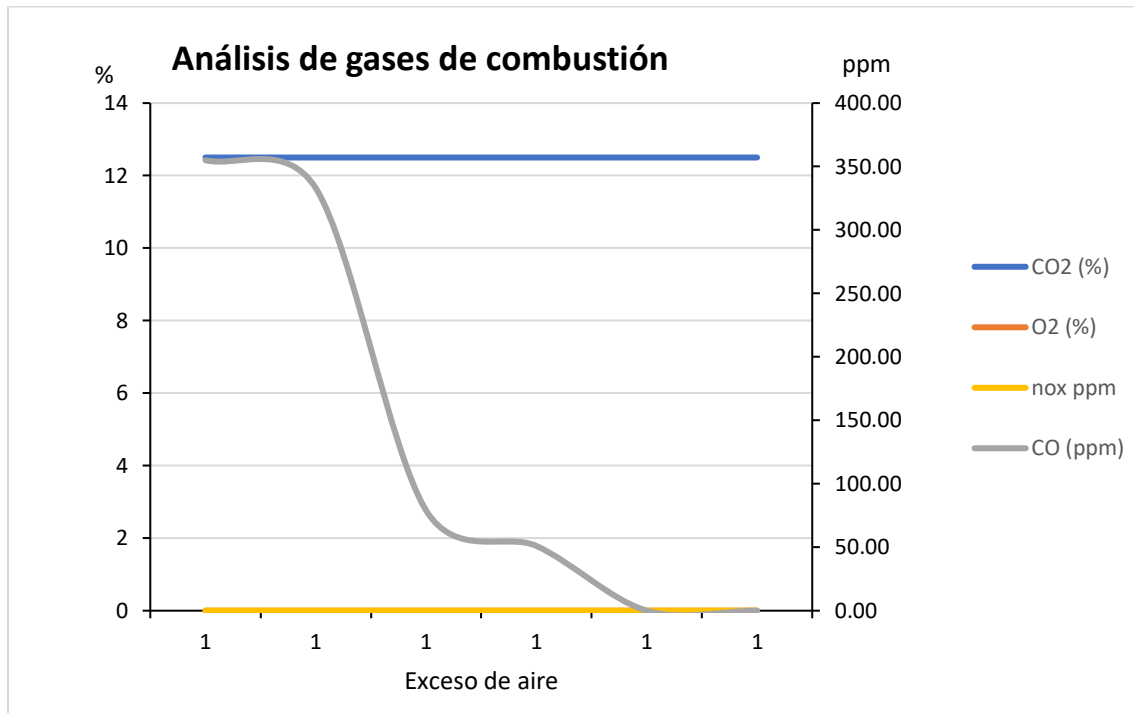
Los óxidos de nitrógeno se forman por un alto exceso de aire o elevadas condiciones de temperatura y presión.

Los óxidos de nitrógeno no son un indicador de la eficiencia de una combustión. En la figura 39, se puede observar que no se cuenta con NO_x debido a que no se tiene las condiciones de temperatura y presión para su formación.

- Análisis final de los gases de combustión motor otto

Figura 40

Análisis final de gases de combustión motor otto



Fuente: Elaboración propia

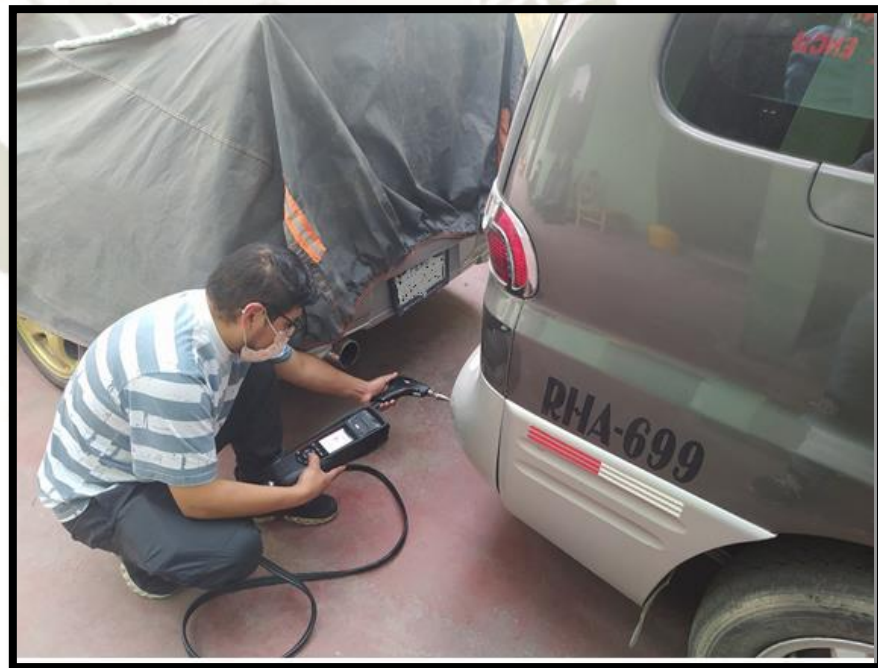
En la figura 40, se puede observar que a lo largo de todas las mediciones los valores de oxígeno residual se mantienen en su valor porcentual más bajo, el dióxido de carbono se mantiene en su valor porcentual más alto, la concentración de óxidos de nitrógeno es nulo, el CO es menor al 0.04% y la mezcla se encuentra en el valor de mezcla estequiométrica ideal indicándonos que la combustión realizada es eficiente.

4.4.2. Análisis de gases de combustión en vehículo Diesel

Datos de vehículo

- Placa: RHA-699
- Número de motor: D4B23612315
- Combustible: Diesel
- Año de fabricación: 2001
- Marca: Hyundai
- Kilometraje: 113792

Figura 41
Medición de gases de combustión



Fuente: Elaboración propia

4.4.2.1. Datos de medición de gases

Tabla 20
Medición de gases de combustión

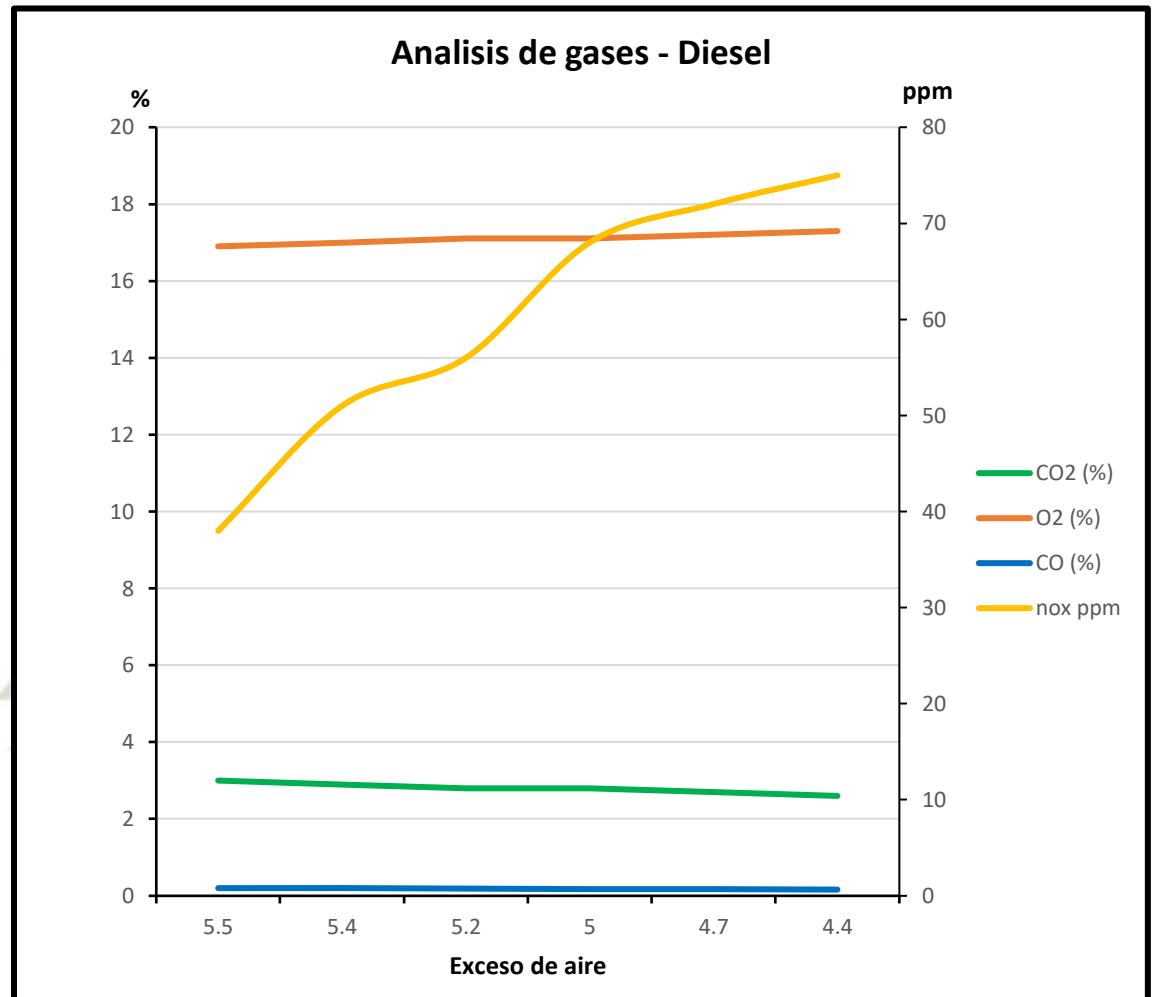
Parámetros	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medid a N° 3	Medida N° 4	Medida N°5	Medida N° 6
Oxígeno	%	16.9	17	17.1	17.1	17.2	17.3
Monóxido de carbono	ppm	390	378	333	314	305	290
Temperatura de Ambiente	°C	23.1	23.7	24	24.4	24.7	25.4
Temperatura de Gases	°C	64.1	67.4	78.4	93.8	95.3	98
Monóxido de nitrógeno	ppm	37	49	51	79	85	87
Dióxido de carbono	ppm	3	2.9	2.8	2.8	2.7	2.6
Exceso de aire		5.14	5.3	5.49	5.52	5.58	5.6
Temperatura Diferencial	°C	41	43.7	54.4	69.4	70.6	72.6
Baja Eficiencia	%	92.9	91.9	90	87.7	85	83
Alta Eficiencia	%	100	100	90	87.7	85	83
Pérdidas	%	0	0	10	12.3	15	17
Óxido Nitroso	ppm	38	51	53	72	82	85
CO corregido	ppm	2004.6	2003.4	1828.1 7	1733.2 8	1701.9	1624
Velocidad del Vehículo	RPM	ralentí	1000	1500	2000	2500	3000

Fuente: Elaboración propia

- **Análisis de los gases de combustión motor Diesel**

Figura 42

Análisis de gases de combustión motor Diesel



Fuente: Elaboración propia

En la figura 42, se puede observar que el oxígeno medido es muy alto y el dióxido de carbono es muy bajo (el opuesto a una correcta medición de gases de combustión) llegando a una concentración máxima del 3%, el exceso de aire es muy elevado produciendo cantidades altas de inquemados todos estos parámetros nos indican que la combustión realizada no es buena.

4.4.3. Análisis de gases de combustión en una caldera

Datos de la caldera

- Caldera marca: Cleaver Brooks
- Tipo: Piro tubular
- Potencia nominal: 300 BHP
- Numero de pasos: 4
- Presión de diseño 150 psi
- Flujo de ingreso: 150 gal/h
- Combustible utilizado: Petróleo

Figura 43
Análisis de gases de combustión



Fuente: (Escobar Rosales, 2015)

4.4.3.1. Datos de medición de gas

Tabla 21

Medición de gases de combustión

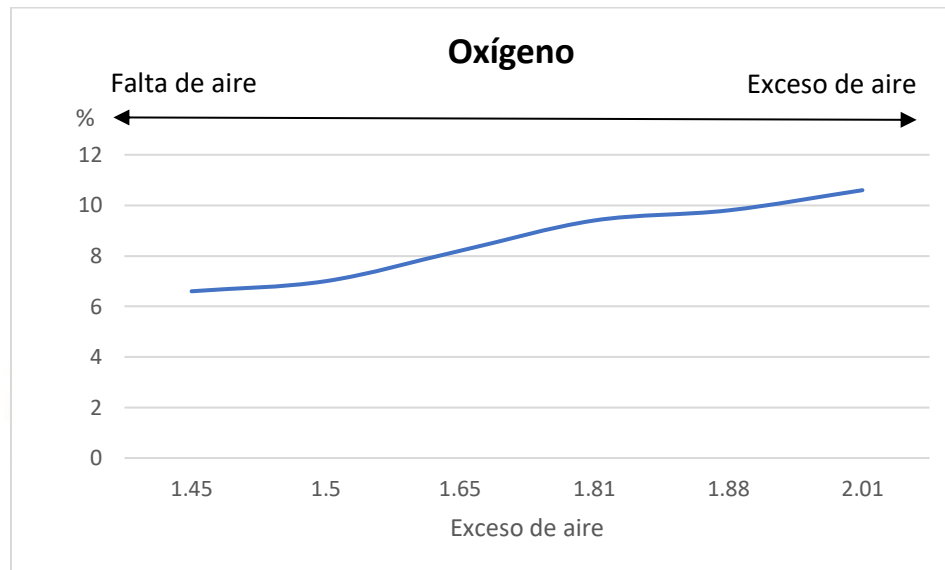
Parámetros	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3	Medida N° 4	Medida N°5	Medida N° 6
Valores Medidos Directamente							
O_2	%	6.52	7	8.27	9.4	9.83	10.55
CO	Ppm	35	27	21	16.4	16	15.8
T_A	°C	25	25	25	25	25	25
T_H	°C	169	178	207	218	220	225
NO	ppm	10.48	17.46	24.25	29.1	31.04	32.5
Valores Calculados							
CO_2	ppm	10.69	10.33	9.39	8.56	8.24	7.71
EA		1.45	1.5	1.65	1.81	1.88	2.01
T_D	°C	144	153	182	193	195	200
η	%	93.16	92.54	90.33	88.81	88.27	87.18
Pérdidas	%	6.84	7.46	9.67	11.19	11.73	12.82
NO_x	ppm	10.8	18	25	30	32	33.5

Fuente: (Escobar Rosales, 2015)

4.4.3.2. Análisis de los gases combustión de la caldera

- **Concentración de oxígeno en los humos**

Figura 44
Análisis de oxígeno



Fuente: Elaboración propia

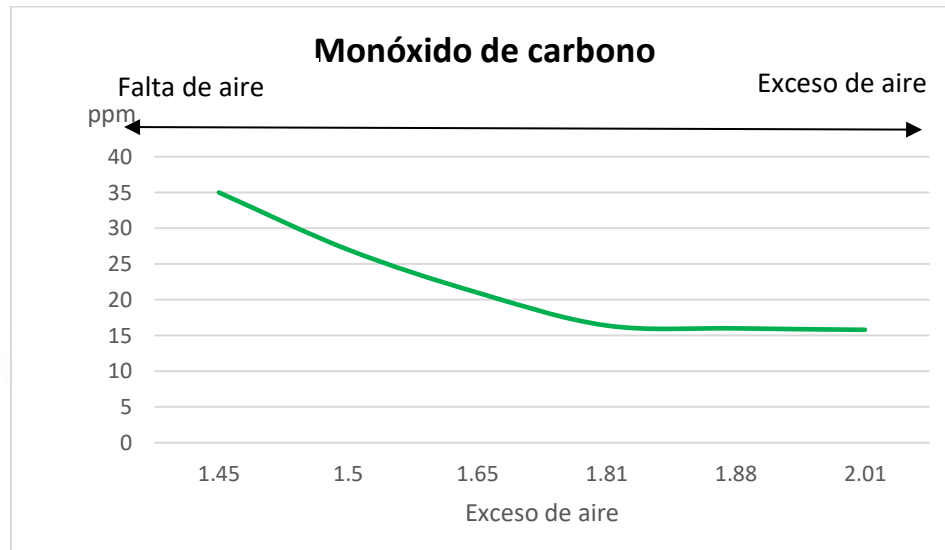
En figura 44, se puede observar el incremento del oxígeno de 6.6% a 10.6% indicándonos que es una combustión de mezcla aire-combustible pobre; saliéndose ligeramente del límite máximo para una buena combustión puesto el rango óptimo de oxígeno es de 5% a 10%.

Una concentración elevada de oxígeno también nos indicará un exceso de aire alto, puesto que tienen una relación directa.

- **Concentración de monóxido de carbono en humos**

Figura 45

Análisis de monóxido de carbono



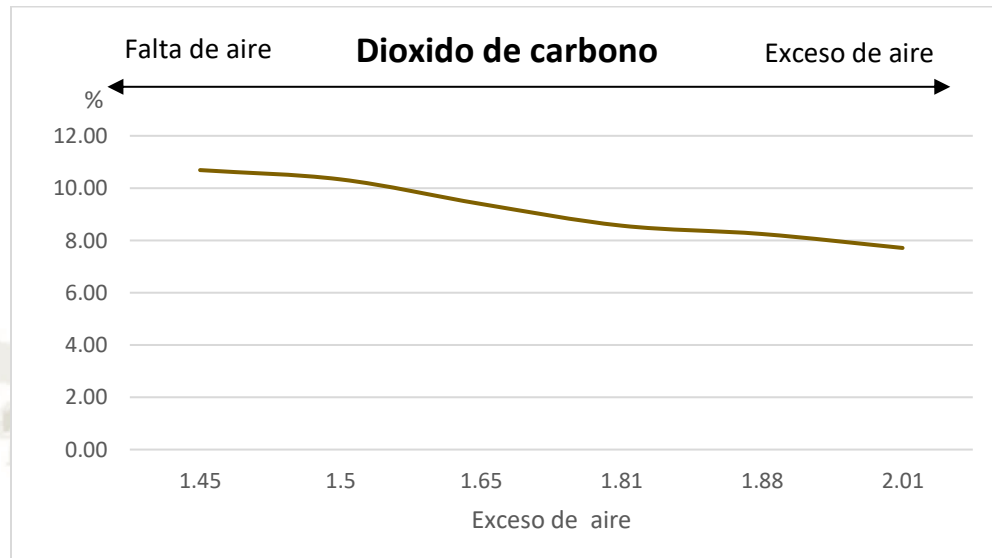
Fuente: Elaboración propia

En la figura 45, se puede observar el descenso de la concentración de monóxido de carbono debido a que el CO es inversamente proporcional al oxígeno como se pudo observar en la figura anterior de la concentración del oxígeno, es decir, una alta lectura de oxígeno o una baja en monóxido de carbono significan una mezcla pobre.

La concentración de CO mostrada en la figura nos da unos valores de 35 a 15.8 ppm, siendo estos unos muy buenos valores puesto que los valores de CO óptimos en una caldera van de 0 a 200 ppm si nos da más de estos valores debemos revisar la caldera.

- **Concentración de dióxido de carbono en humos**

Figura 46
Análisis de dióxido de carbono

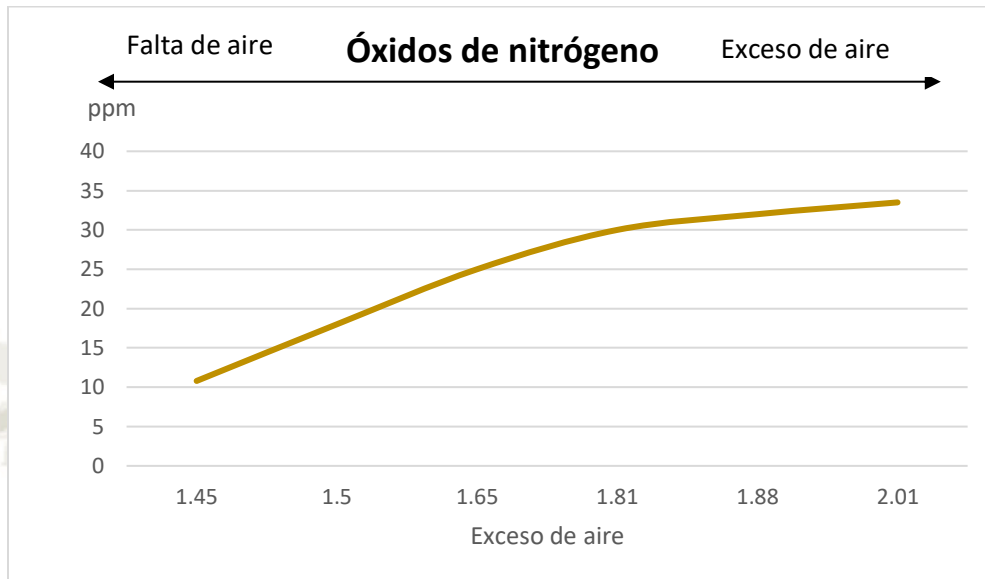


Fuente: Elaboración propia

En la figura 46, se puede observar como la concentración de dióxido de carbono decrece de 10.7 a 7% indicándonos que es una combustión de mezcla aire-combustible pobre, estos valores de dióxido de carbono nos indican que la combustión de la mezcla aire-combustible es buena puesto que se encuentran dentro de los valores óptimos para una buena combustión. Los valores de CO_2 típicos de una buena combustión oscilan entre 8 a 11%, cuánto más alto, mejor.

- **Concentración de óxidos de nitrógeno en humos**

Figura 47
Análisis de Óxidos de nitrógeno



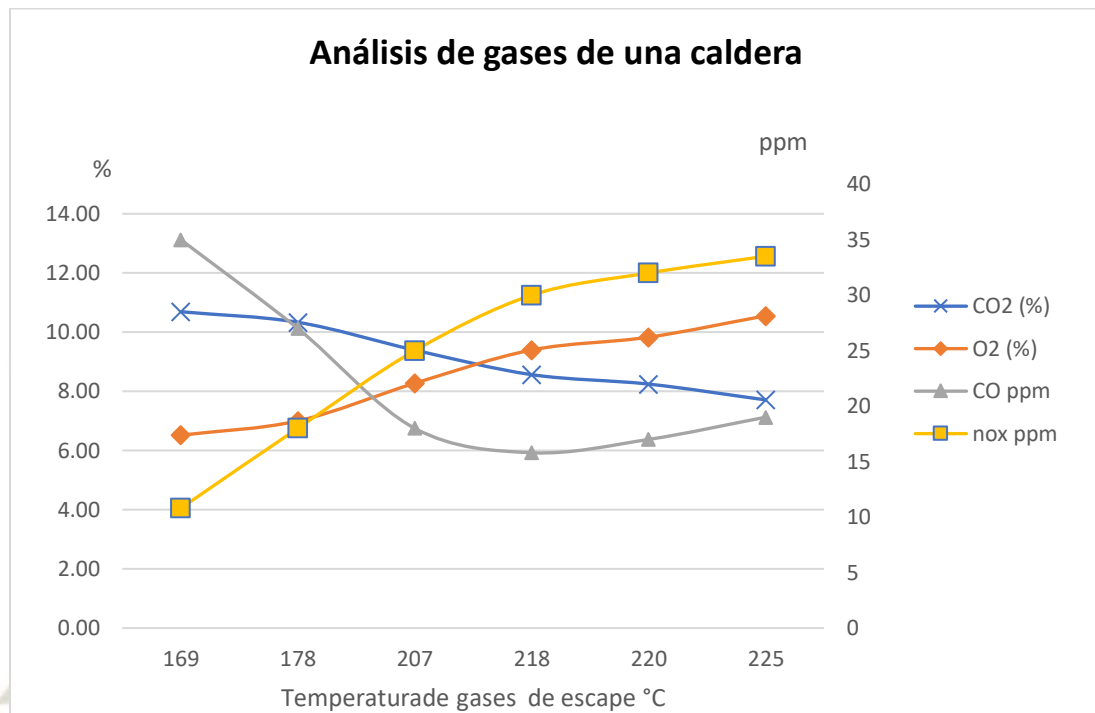
Fuente: Elaboración propia

En la figura 47, se puede observar como la concentración de óxidos de nitrógeno aumenta conforme el exceso de aire aumenta, esto debido a que al entrar una mayor cantidad de aire a la cámara de combustión también ingresa una mayor cantidad de nitrógeno a la mezcla aire combustible provocando con el aumento del exceso de aire de la mezcla pobre un incremento de la concentración de óxidos de nitrógeno.

Los valores típicos para una caldera con combustible diésel son de 0-120 ppm de concentración de óxidos de nitrógeno.

- **Análisis de los gases de combustión de la caldera**

Figura 48
Análisis de gases de una caldera



Fuente: Elaboración propia

En la figura 48, se puede observar el aumento del porcentaje de oxígeno y óxidos de nitrógeno y disminución de las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono con el aumento de temperatura de la caldera indicándonos que estos valores se encuentran en la zona de exceso de aire del diagrama de combustión.

Según los límites máximos permisibles para calderas de vapor de uso industrial, según lo indica la Norma Técnica Peruana 350.301-2009, la caldera si cumple con los límites máximos establecidos en la NTP.

CONCLUSIONES

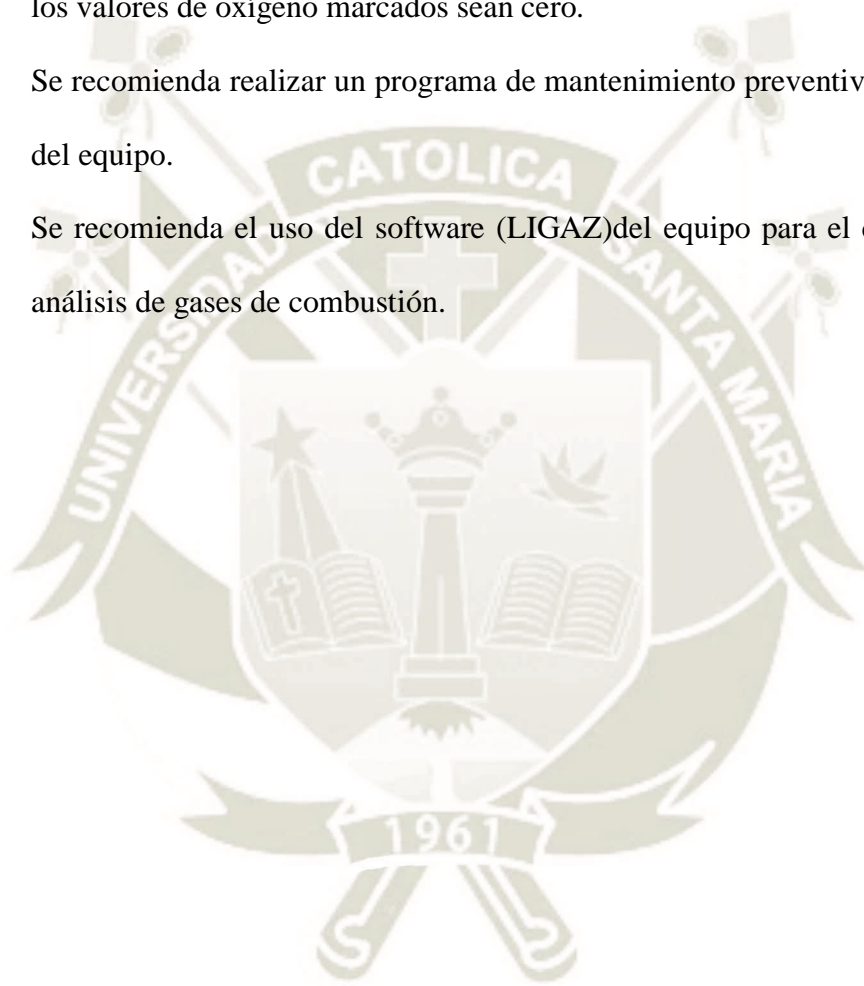
Primero En este proyecto de investigación de la tesis se logró la implementación de un módulo didáctico de analizador de gases de combustión para el laboratorio de termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica-Eléctrica y Mecatrónica de la Universidad Católica De Santa María.

Segundo Se logró Instalar la unidad de medición de gases de combustión en el laboratorio de la Escuela Profesional de Ingeniera Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.

Tercero Se logró realizar la elaboración de guías de laboratorio para realizar la práctica de análisis de gases de combustión, que nos permitió analizar el comportamiento de los gases de combustión en relación con la temperatura, rpm, eficiencia y landa los cuales fueron graficados y analizados en el capítulo IV.

RECOMENDACIONES

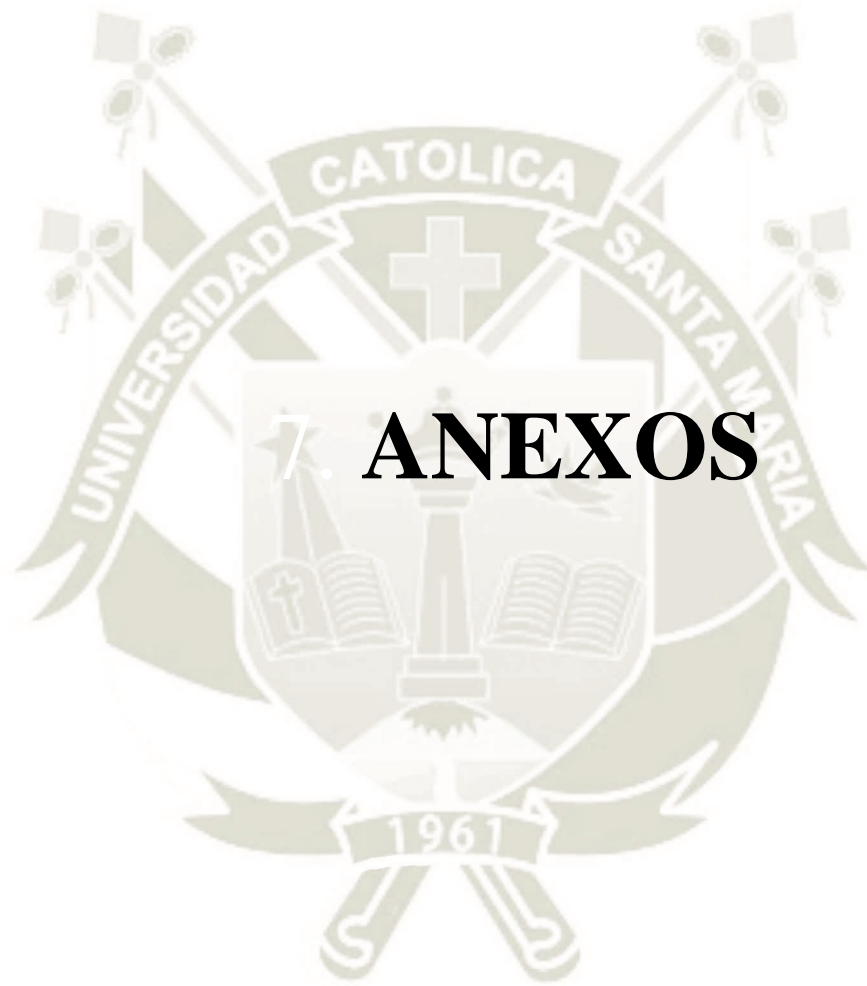
- Se recomienda realizar una revisión periódica del filtro.
- Se recomienda antes de realizar una medición de gases de combustión, realizar una prueba de estanqueidad tapando la entrada de la alimentación de la sonda y revisar que los valores de oxígeno marcados sean cero.
- Se recomienda realizar un programa de mantenimiento preventivo para el cuidado del equipo.
- Se recomienda el uso del software (LIGAZ) del equipo para el complemento del análisis de gases de combustión.




BIBLIOGRAFÍA

- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/?q=como-se-hacen-las-mediciones>
- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/energia-y-combustion>
- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/unidades-de-medida>
- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/sensores-electroquimicos>.
- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <http://www.academiatesto.com.ar/cms/instalaciones-de-combustion>
- Academia Testo. (2018). *Academia Online*. Recuperado el 13 de Octubre de 2020, de <https://www.academiatesto.com.ar/cms/gases-de-combustion-1>
- Baéz, M. (2017). Integración de sensores electroquímicos basados en nanomateriales funcionales para la detección de contaminantes en aguas. (*Tesis Doctoral*). Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona.
- Bedoya, O. (2014). Desarrollo de una herramienta en Excel para la evaluación de procesos de manufactura de productos de aluminio utilizando un enfoque de sostenibilidad. (*Tesis de maestría*). Instituto Tecnológico Metropolitano, Lima.
- Dominion. (2014). *Dominion Industrial*. Recuperado el 13 de 10 de 2020, de <https://dominionindustrial.wordpress.com/2014/03/25/aplicaciones-industriales-analizadores-de-gases/#:~:text=Los%20analizadores%20de%20gases%20port%C3%A1tiles,de%20gases%20de%20tipo%20grande.&text=Incluso%20los%20sensores%20m%C3%A1s%20peque%C3%B1os,y%20el>
- Draeger. (2019). <https://www.draeger.com/es>. Obtenido de https://www.draeger.com/es_csa/Oil-Gas-Industry/Productselector/Portable-Gas-Detection#s=23
- Enriquez Rosero, S., & Jaramillo Restrepo, D. (2012). DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE QUEMADOR DE LECHO. (*Tesis*). UNIVERSIDAD EAFIT, Medellín.
- Escobar Rosales, A. A. (2015). Analisis Comparativo en la operacion de una caldera pirotubular utilizando gas licuadode petroleo en sustitucion del diesely su impacto sobre el medio ambiente. (*Tesis de Pregrado*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.

- Fonseca, N. (2012). Aspectos de la medición dinámica instantánea de emisiones de motores. Aplicación al desarrollo de un equipo portátil y una metodología para estudios de contaminación de vehículos en tráfico real. (*Tesis Doctoral*). Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Green, J., & Sanches, S. (2013). La calidad del aire en America Latina . *Clear air Institute*.
- HANDLEIDING, P. (2019). <https://www.autoadviezen.nl/>. Obtenido de https://www.autoadviezen.nl/Downloads/Handleidingen_APK_Apparatuur_02/003_Roetmeters/Protech%20Opax%202000-II.pdf
- KIMO, K. 3. (2019). <https://sauermanngroup.com/>. Obtenido de <https://sauermanngroup.com/en-INT/measuring-instruments/combustion/flue-gas-analyzers/kigaz-310#site-header>
- Mafla, M., & Ortiz, M. (2007). Metodología para certificar la calibración de analizadores de gases y opacímetros. (*Tesis de pregrado*). Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- MINAN. (2014). Protocolo nacional de sistemas de monitoreo de emisiones. *Resolución Ministerial N°355-2014*.
- Muñoz, M. (2012). *Análisis comparativo de gases de combustión de calderas bagaceras*. Escuintla: CENGICAÑA.
- NTP350.300. (2008). Norma Técnica peruana. *Norma Técnica Peruana 350.300.208*.
- Ocanas, F. (2019). *slideplayer.es*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/3198418/>
- PCM.D.S.074. (2001). Decreto Supremo 074. *PCM*.
- Ramírez, F. (2019). *IDOC PUB*. Obtenido de <https://idoc.pub/documents/tipos-de-quemadores-ylyxr2pjdvm>
- Sánchez, C. (2018). Implementación del sistema de inspecciones técnicas vehiculares y su impacto en la reducción de accidentes y contaminación ambiental del aire en Lima Metropolitana 2009-2016. (*Tesis de pregrado*). Universidad San Martín de Porres, Lima.
- Systems, D. A. (2019). <https://www.disai.net/>. Obtenido de https://www.disai.net/wp-content/uploads/catalogos_pdf/HT-KIMO-ANALIZ.COMBUSTION-Kigaz300.pdf
- Testo. (2014). *Guía práctica Técnica de Medición para Calefacción*. Obtenido de <https://www.testo.com/es-ES/empresa/guias-practicas-registro-guia-combustion>
- WHO. (2009). *Estadísticas sanitarias mundiales 2009*. Organización mundial de la Salud. WHOSIS.



7. ANEXOS

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES		Docente:
	ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA- ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA		
	LABORATORIO DE TERMOFUIDOS		
	GUÍA DE ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN		Código: _____ Semestre: _____ Grupo: _____ FECHA: _____
Apellidos y Nombres: _____		Guía. N.º: 01	

SESIÓN: RECONOCIMIENTO DE EQUIPO Y MEDICION DE CO Y CO2

I.- OBJETIVOS:

- Realizar el reconocimiento físico de equipo analizador de gases de combustión KIMO KIGAZ 310 PRO.
- Familiarizar la operación del equipo analizador de gases KIMO KIGAS 310PRO.
- Familiarizar al alumno con la importancia de los parámetros medidos en un análisis de gases de combustión.
- Realizar medición de gases CO y CO2 con el analizador KIMO KIGAS 310PRO.

II.- MARCO TEÓRICO:

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

Los analizadores de gases de combustión se utilizan para identificar los niveles de contaminantes en las emisiones de las calderas, motores o cualquier otro tipo de sistema de energía que implica la combustión.

PARTES DE ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN

> Conexiones

Conexión para sondas externas
(Pt100, CH₄,...)



Conexión de termopares

Vista superior

Conexión de la sonda de humos



Toma de presión - Toma de presión +

Vista inferior



Alimentación Conexión USB

Vista lateral

Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)



Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)



Fuente: Adaptado de (KIMO, 2019)

Análisis De Gases De Combustión

- El análisis de gases permite evaluar dichas fases del proceso por lo que respecta al exceso de aire, corrientes de aire exterior a calcular y las partes individuales de la instalación a equilibrar por separado.
- Las tareas del análisis de gases están orientadas en este caso a optimizar la combustión, comprobando la limpieza de los gases de combustión y controlando el cumplimiento con los valores límite.
- El propósito del análisis de los productos de la combustión es asegurar el funcionamiento económico y ecológico de las calderas y motores de combustión. Estas fórmulas y tablas se pueden usar para comprender el análisis de productos de la combustión

La parte fundamental de cualquier analizador son los sensores o sistemas de sensores específicos de la sustancia. Su funcionamiento se basa en principios físicos o químicos tales como absorción, adsorción, transmisión, ionización, oxidación catalítica o propiedades paramagnéticas o electroquímicas. Los sensores reaccionan a un cambio en el parámetro con un cambio correspondiente en su propiedad (por ejemplo, mayor absorción de luz o reducción de la conductividad), a partir de lo cual se puede conformar la señal de medida. (Academia Testo, 2018)

Los principales grupos de sensores son:

- Sensores para determinar la temperatura
- Sensores para determinar la presión
- Sensores para determinar el flujo volumétrico
- Sensores para determinar las concentraciones de sustancias

Tipos de sensores utilizados:

- Tipo 1: Sensor de oxígeno (sensor de dos electrodos)
- Tipo 2: Sensores para CO, SO₂ y NO_x (sensor de tres electrodos)

Combustión:

La combustión es la conversión de la energía química primaria contenida en combustibles tales como carbón, petróleo y madera en energía calorífica secundaria por medio de un proceso de oxidación. La combustión es, por consiguiente, el término técnico para la reacción del oxígeno con los constituyentes inflamables de combustibles, que libera energía. (Academia Testo, 2018)

Las combustiones tienen lugar a temperaturas elevadas (hasta 1000°C y superiores) y desprenden calor. El oxígeno necesario se aporta como parte del aire de

combustión. Al mismo tiempo, se genera un volumen significativo de gases de combustión y, dependiendo del tipo de combustible, determinada cantidad de residuos (cenizas, carbonilla). (Academia Testo, 2018)

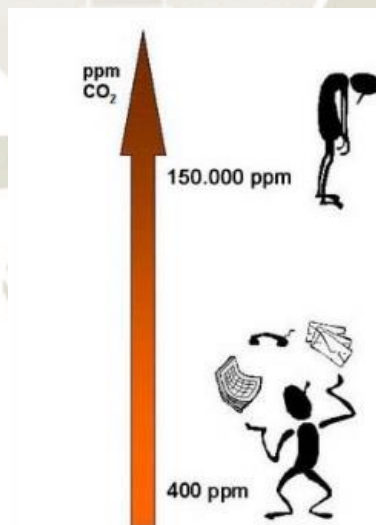
Oxidación:

Denominación de todas las reacciones químicas en las que una sustancia se combina con el oxígeno. Las oxidaciones incluyen la disipación de energía y son muy importantes en la ingeniería (combustión) y la biología (respiración). (Academia Testo, 2018)

Anhídrido carbónico (CO₂)

El anhídrido carbónico es un gas incoloro e insípido con un gusto ligeramente ácido. Bajo el efecto de la luz del sol y el pigmento de las hojas verdes, la clorofila, las plantas convierten el anhídrido carbónico (CO₂) en oxígeno (O₂). La respiración de las personas y animales vuelve a convertir el oxígeno (O₂) en anhídrido carbónico (CO₂). Esto crearía un equilibrio que es perturbado por los gases de combustión. Esta perturbación incrementa el efecto invernadero. La concentración máxima permitida de anhídrido carbónico (CO₂) en el puesto de trabajo es de 5000 ppm. Se produce inmediatamente la pérdida de consciencia tan pronto como la concentración en el aire inhalado supera el 15 % en volumen (150.000 ppm). (Academia Testo, 2018)

Efecto del CO₂ en las personas



Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un veneno respiratorio, incoloro e inodoro, y producto de la combustión incompleta. Si la concentración supera un nivel determinado,

detiene la absorción de oxígeno por la sangre. Si, por ejemplo, el aire inhalado en un recinto contiene 700 ppm de CO, el que inhale el aire morirá antes de 3 horas. La concentración máxima permitida de monóxido de carbono (CO) en el puesto de trabajo es 30 ppm.

Medir el contenido de CO₂ del aire ambiente depende de las necesidades de la persona que efectúa la medición. Fundamentalmente, hay dos requisitos diferentes para medir:

- a) Estático, en otras palabras, constantemente; posiblemente regulado por un sistema de aire acondicionado.
- b) Portátil, en otras palabras, con un instrumento portátil para medición esporádica en cualquier punto escogido, por ejemplo, para evaluar el puesto de trabajo.

La medición se basa en la difusión del aire a medir en la célula (cámara de medición). A este fin hay una abertura en la célula que está protegida por una malla metálica para impedir la penetración de polvo y otras partículas.

Durante la medición se ha de tener en cuenta lo siguiente:

El polvo fino influye sobre el camino óptico y por consiguiente sobre la medición.

La condensación influye sobre el camino óptico y por consiguiente sobre la medición.

El aire expirado contiene aproximadamente 40.000 ppm de CO₂ y por ello no se debe exhalar directamente sobre la sonda o en su dirección. Se recomienda sujetar la sonda en un soporte y alejarse unos pasos.

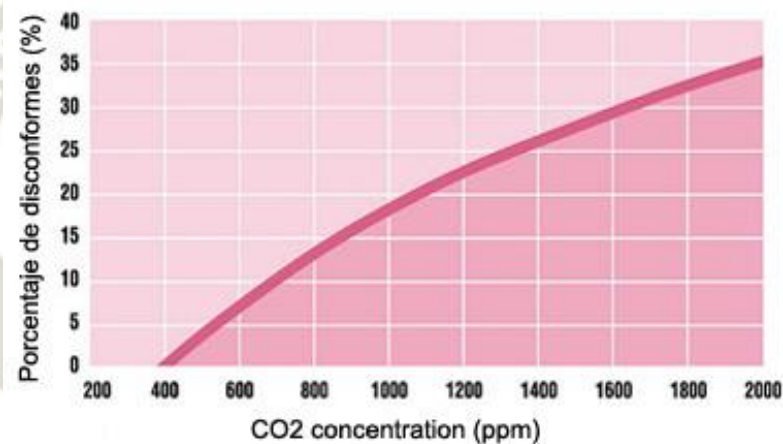
El movimiento normal del aire normalmente es suficiente para mezclar el gas CO₂ con los demás componentes del aire. Cuando se realizan medidas en el puesto de trabajo, el aire debe medirse, no obstante, a la altura de la cabeza.

Medición del CO₂ Véase "control personal" de los gases de combustión
Concentración de CO₂, valores básicos.

CO ₂ % en Vol.	CO ₂ en ppm	
0.033...0.04	330...400	Aire puro en el campo
0.07	700	Aire urbano
0.1	1	Valor limite en oficinas, valor máximo según pettenkofer
0.5	5	Valor limite umbral

0.7	7	Valores máximos en cines después de una sesión
2	20	Valor de tolerancia fisiológica frecuente a corto plazo
2...4	20.000...40.000	Respiración más rápida, aumento de la frecuencia cardiaca
4.0...5.2	40.000.52.000	Aire espirado
4...8	40.000.80000	Dolores de cabeza, mareos
8...10	80.00...100.00	Convulsiones, pérdidas rápida de la consciencia
20	200	Fatal en pocos segundos

Relación entre la concentración de CO₂ y el recinto





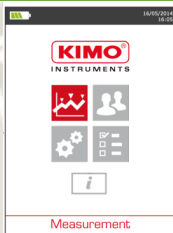
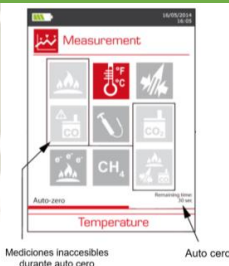


El gráfico muestra el porcentaje de personas que no están conformes con la calidad del aire ambiental a una concentración de CO₂ determinada.

III.- ELEMENTOS A UTILIZAR



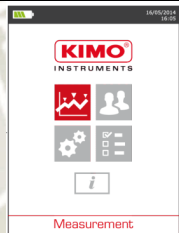

- *Analizador KIMO Kigas 310PRO
- *Sonda de medición
- *Guía de prácticas

IV.- PROCEDIMIENTO DE EJECUCION

Realizar Medición de CO ambiental

Medición de CO ambiental	
Pasos para realizar la medición	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conecte la sonda de humos al analizador. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Encienda el analizador. ➤ Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione medición y Pulse "OK" 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se mostrará todas las mediciones disponibles. ➤ Esperar que termine el auto cero. 	 <p>Mediciones inaccesibles durante auto cero</p> <p>Auto cero</p>
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione CO ambiental. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se iniciará la medición del CO ambiental. 	

Realizar Medición de CO_2 ambiental

Medición de CO_2 ambiental	
Pasos para realizar la medición	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conecte la sonda de humos al analizador. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Encienda el analizador. ➤ Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione medición y Pulse "OK" 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione medición de CO_2 ambiental y Pulse "OK" y realice medición 	

COMPLETAR LAS TABLAS

- Monóxido de carbono ambiental

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO				

- Dióxido de carbono ambiental

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO ₂				

**COMPLETAR RANGOS DE MEDICIÓN DEL EQUIPO KIGAS
310PRO**

	VALORES	UNIDADES
O ₂ LV	0 a 21	%
CO (Compensado en H ₂)		
CH ₄		
NO		
NO Bajo rango		
NO ₂		
SO ₂		
NO _x		
CO ₂		
Temp. De humos	-100 a 1250	°C
Temp. Ambiental NTC		
Temp. Ambiental Pt100		
Punto de rocío		
Temp. Termopar (ACS)		
Tiro		
Presión diferencial		
Pérdidas		
Velocidad de humos		
Exceso de aire		
Eficiencia		
Índice de opacidad		

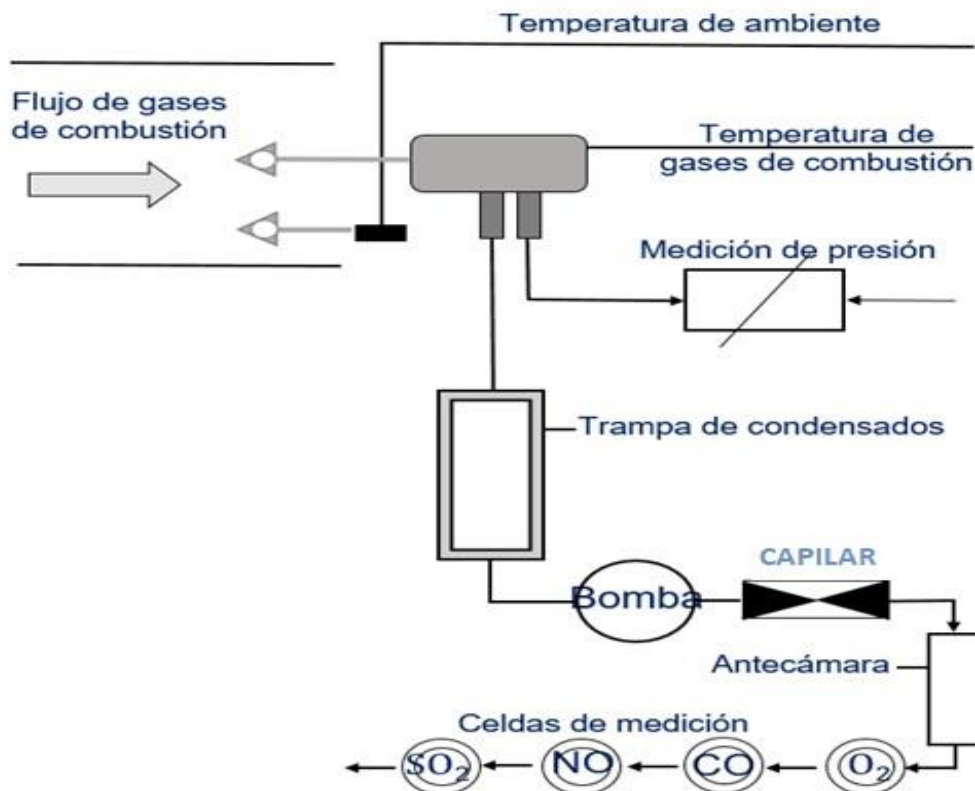


Identifica sensores electroquímicos instalados en el equipo KIGAS 310 PRO

- *
- *
- *
- *



Complete el esquema de realización del análisis de gases de combustión



V.- CUESTIONARIO


1. ¿Qué es un analizador de gases de combustión?
2. ¿Cuáles son los tipos de analizadores?
3. ¿Qué es un sensor electroquímico?
4. ¿Cuál es el principio de funcionamiento de un analizador de gases?
5. ¿Cómo se puede saber en qué condiciones está el ambiente donde se realizó las mediciones?
6. ¿Cuál es la concentración máxima permitida de monóxido de carbono (CO) en el aire inhalado en el puesto de trabajo?
7. ¿En qué consiste la medición del CO_2 y porque es importante realizarla?
8. ¿Qué se debe de hacer después de cada medición con el equipo medido? ¿Explique con detalle porque es necesario realizarlo?

VI.-OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Hacer las observaciones y conclusiones en forma clara

VII.-BIBLIOGRAFÍA.

Indique la bibliografía o página Web utilizada.

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA	
	FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES	
	ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA- ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA	
	LABORATORIO DE TERMOFUIDOS	
GUÍA DE ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN		Código:
Apellidos y Nombres:		Semestre:
		Grupo:
Apellidos y Nombres:		FECHA:
		Guía. N.º:

SESIÓN: MEDICIÓN DE LOS GASES DE COMBUSTIÓN Y TEMPERATURAS

I.- OBJETIVOS:

- Realizar mediciones de gases de combustión con el equipo analizador de gases de combustión KIMO KIGAZ 310 PRO.
- Realizar una interpretación y análisis de gases de combustión medidos.
- Familiarizarse con las unidades de concentración.

II.- MARCO TEÓRICO:

Gases de combustión

Debido al creciente uso de la combustión en todas sus formas, el medio ambiente está siendo expuesto a cantidades cada vez mayores de contaminantes. Una vez han emitido su calor a las superficies de calefacción de un generador de calor, se denominan gases de combustión. La formación de smog, la producción de lluvia ácida y la creciente incidencia de alergias son consecuencias directas de esta tendencia.

La forma de recuperar la energía respetuosamente con el medio ambiente debe ser, por consiguiente, limitando los contaminantes. Los gases de combustión contaminantes solo se pueden limitar con efectividad si las instalaciones existentes se operan con la mayor eficiencia posible o si se cierran las instalaciones de combustión contaminantes. Se determinan las concentraciones de contaminantes y las instalaciones de calefacción se ajustan a los valores mejores posibles por medio del análisis de los gases de combustión.

Constituyentes de los gases de combustión

Los elementos encontrados en los gases de combustión se listan a continuación en orden de importancia de sus concentraciones en los gases de combustión.

Nitrógeno (N₂)

El nitrógeno (N₂) es el elemento principal en el aire que respiramos (79 % vol.). Este gas incoloro, inodoro e insípido, no toma parte en la combustión. Pasa por la instalación de combustión como inerte y se conduce, calentado, a la chimenea.

Valores típicos en los gases de combustión: Instalaciones de combustión de petróleo / gas: 78% - 80%

Anhídrido carbónico (CO₂)

El anhídrido carbónico es un gas incoloro e insípido con un ligero gusto ácido. Bajo el efecto de la luz del sol y el pigmento de las hojas verdes, la clorofila, las plantas convierten el anhídrido carbónico (CO₂) a oxígeno (O₂).

La respiración de las personas y animales vuelve a convertir el oxígeno (O₂) en anhídrido carbónico (CO₂). Esto sería un equilibrio, pero es perturbado por los gases de combustión.

Esta perturbación incrementa el efecto invernadero. La concentración máxima permitida de anhídrido carbónico (CO₂) en el puesto de trabajo es de 5000 ppm.

Se produce inmediatamente la pérdida de consciencia tan pronto como la concentración en el aire inhalado supera el 15 % en volumen (150.000 ppm).

Valores típicos en los gases de combustión: Instalaciones de combustión de petróleo: 12,5%-14% Instalaciones de combustión de gas: 8% - 11%.

Vapor de agua (humedad)

El hidrógeno contenido en el combustible se une con oxígeno para formar agua (H₂O). Dependiendo de la temperatura de los gases de combustión (FT), luego aparece conjuntamente con el agua del combustible y el aire de la combustión o como humedad de los gases de combustión (a FT alta) o como condensado (a FT baja).

Oxígeno (O₂)

El resto del oxígeno no utilizado en el proceso de combustión si hay exceso de aire aparece como parte gaseosa de los gases de combustión y es una medida de la efectividad de la combustión. Se utiliza para calcular las pérdidas en los gases de combustión y el contenido en anhídrido carbónico.

Valores típicos en los gases de combustión: Instalaciones de combustión de petróleo: 2% - 5%

Instalaciones de combustión de gas: 2% - 6%

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es un veneno respiratorio, incoloro e inodoro, y producto de la combustión incompleta. Si la concentración supera un nivel determinado, impide la absorción de oxígeno por la sangre. Si, por ejemplo, el aire inhalado en un recinto contiene 700 ppm de CO, el que inhale el aire morirá en menos de 3 horas. La concentración máxima permitida de monóxido de carbono (CO) en el puesto de trabajo es 50 ppm.

Valores típicos en los gases de combustión:

Instalaciones de combustión de petróleo: 80 ppm - 150 ppm

Instalaciones de combustión de gas: 80 ppm - 100 ppm

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

A temperaturas elevadas (combustión), el nitrógeno (N₂) en el combustible y en el aire ambiente se une con el oxígeno del aire (O₂) para formar óxido nítrico (NO). Después de un cierto tiempo, este gas incoloro se oxida combinándose con oxígeno (O₂) para formar dióxido de nitrógeno (NO₂). El NO₂ es un veneno respiratorio soluble en agua que si se inhala produce graves daños a los pulmones y que combinado con la radiación ultravioleta (luz solar) contribuye a la formación de ozono. La suma de los componentes NO y NO₂ se denomina como óxidos de nitrógeno (NO_x).

Valores típicos en los gases de combustión

Instalaciones de combustión de petróleo / gas: 50 ppm -100 ppm

Anhídrido sulfuroso (SO₂)

El anhídrido sulfuroso (SO₂) es un gas incoloro y tóxico con un olor picante. Es producido por el azufre contenido en el combustible. La concentración máxima permitida en el lugar de trabajo es 5 ppm. En combinación con agua (H₂O) o condensado, genera ácido sulfuroso (H₂SO₃).

Valor típico en los gases de combustión de las instalaciones de combustión de petróleo: 180 ppm -220 ppm

Hidrocarburos inquemados (C_xH_y)

Los hidrocarburos inquemados (C_xH_y) se producen en caso de combustión incompleta y contribuyen al efecto invernadero. Este grupo de sustancias incluye el metano (CH₄), butano (C₄H₁₀) y benceno (C₆H₆).

Valor típico en los gases de combustión de instalaciones de combustión de petróleo: inferior a 50 ppm

Hollín

El hollín está compuesto, casi exclusivamente, por carbono (C) puro y se produce en caso de combustión incompleta.

Valor típico en los gases de combustión de instalaciones de combustión de petróleo: Índice de humo 0 o 1

Polvo

El polvo hace referencia a los materiales sólidos diminutos distribuidos en el aire, que pueden estar presentes en cualquier forma y densidad. El polvo se produce a partir de las cenizas y de los constituyentes minerales de los combustibles sólidos.

Unidades de medida

La concentración de los constituyentes del gas es un indicador de la presencia de contaminantes en los humos. Generalmente se utilizan las siguientes unidades:

Ppm (partes por millón)

Al igual que el "porcentaje (%)", la unidad ppm representa una relación. Porcentaje significa "un número determinado de partes por cada cien partes"; ppm significa

"un número determinado de partes por millón de partes". Si, por ejemplo, una botella de gas contiene 250 ppm de monóxido de carbono (CO), esto significa que, si se extraen de esta botella un millón de moléculas de gas, 250 de ellas serán moléculas de monóxido de carbono. El resto de las 999.750 moléculas son moléculas de dióxido de nitrógeno (N₂) y de oxígeno (O₂). La unidad ppm no depende de la presión ni de la temperatura y se utiliza para concentraciones más bajas. Si están presentes concentraciones mayores, éstas se especifican en porcentaje (%). Los porcentajes se convierten como sigue:

$$10.000 \text{ ppm} = 1\%$$

$$1.000 \text{ ppm} = 0,1\%$$

$$100 \text{ ppm} = 0,01\%$$

$$10 \text{ ppm} = 0,001\%$$

$$1 \text{ ppm} = 0,0001\%$$

Una concentración de oxígeno de 21% vol. correspondería a una concentración de 210.000 ppm de O₂.

mg/Nm³ (miligramos por metro cúbico)

Con la unidad mg/Nm³, se utiliza como variable de referencia el volumen normal (metros cúbicos normales, Nm³) y la masa del gas nocivo se especifica en miligramos (mg). Como esta unidad depende de la presión y de la temperatura, se utiliza como referencia el volumen en condiciones normales; estos se definen como sigue:

Temperatura: 0 °C

Presión: 1013 mbar (hPa)

No obstante, esta especificación sola no es definitiva ya que las proporciones en volumen en los gases de combustión cambian según el contenido de oxígeno (dilución de los gases de combustión con el aire ambiente). Por consiguiente, las lecturas se deben convertir a un determinado volumen de oxígeno, el contenido de oxígeno de referencia (O₂ de referencia). Solamente las especificaciones con el mismo oxígeno de referencia son comparables directamente. El contenido de oxígeno (O₂) medido en los gases de combustión también se requiere para la conversión de ppm a mg/Nm³. Las conversiones para monóxido de carbono (CO), óxido nítrico (NO_x) y anhídrido sulfuroso (SO₂) se describen a continuación.

Los factores contenidos en las fórmulas corresponden a la densidad normal de los gases en mg/m^3 .

Conversión

Cuadro: Equivalencia de Unidades

GAS	EQUIVALENCIA DE CONCENTRACION SEGÚN GAS
CO	1ppm equivale a $1.25 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
NO	1ppm equivale a $1.34 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
NO _x	1ppm equivale a $2.05 \text{ mg}/\text{Nm}^3$
SO ₂	1ppm equivale a $2.86 \text{ mg}/\text{Nm}^3$

Fuente: NTP-350301-2009

mg/kWh (miligramos por kilovatio hora de energía usada)

Para determinar las concentraciones de gases nocivos en la unidad basada en la energía, mg/kWh , los cálculos se realizan usando datos específicos del combustible. Por consiguiente, hay factores de conversión diferentes dependiendo del combustible. Los factores de conversión para ppm y mg/m^3 en la unidad basada en la energía, mg/kWh , se muestran a continuación. No obstante, antes de la conversión a mg/kWh , las concentraciones de los valores de las emisiones medidas se deben convertir a gases de combustión sin diluir (0% de contenido de oxígeno de referencia).

En el caso de los combustibles sólidos, los factores de conversión también dependen de la forma en la que está presente el combustible (en forma de trozos, astillas, polvo, virutas, etc.).

III.- ELEMENTOS A UTILIZAR

Analizador de gases KIMO Kigas 310PRO

Caldera o motor de combustión

Guía de prácticas

IV.- PROCEDIMIENTO DE EJECUCIÓN

Pasos para realizar la medición:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conecte la sonda de humos al analizador. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Encienda el analizador. ➤ Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inserte la sonda en la chimenea como se muestra en la figura. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione medición y Pulse "OK" 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se mostrará todas las mediciones disponibles. ➤ Esperar que termine el auto cero. 	

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccionar análisis de gases de combustión. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione el tipo de combustible 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se iniciará la medición de gases ➤ Realice la medición durante al menos 3 minutos. 	

❖ COMPLETAR LAS TABLAS

- Oxígeno

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
O ₂				

- Monóxido de carbono

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO				

- Temperatura de Ambiente

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Ta				

- Temperatura de gases

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Tf				

- Monóxido de nitrógeno

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
NO				

- Dióxido de carbono

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO ₂				

- Exceso de aire

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
λ				

- Variación de temperatura

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
ΔT				

- Baja eficiencia

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
ηs				

- Alta eficiencia

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
ηt				

- Pérdidas

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Qs				

- Óxido de nitrógeno

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
NO _x				

❖ REALIZAR LOS SIGUIENTES CÁLCULOS Y COMPARAR CON LOS OBTENIDOS

Exceso de aire

$$EA = 1 + \frac{O_2 \text{ medido}}{21 - O_2 \text{ medido}}$$

	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
EA			

Tabla 7
CO₂máximo de los combustibles

Dióxido de carbono

$$CO_2 = \frac{(21 - O_2med)}{21} * CO_{2max}$$

TIPO	CO _{2max} (%)	CO _{2max} (ppm)
RESIDUALES	15.8	158000
DESTILADOS	15.5	155000
GLP	13.8	138000
GAS NATURAL	11.9	119000

Fuente: NTP 350.300.2008

Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO ₂			

CO Corregido

$$CO_{corr} = EA * CO_{medido}$$

Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO _{corr}		

❖ **COMPLETE LOS CUADROS**

Parámetros	Unidad (%)	Unidad (ppm)	Unidad (ppb)
O ₂	21		
CO ₂		60000	
Exceso de aire			1600000000

Parámetros	Unidad (ppm)	Unidad (mg/m ³)	Unidad (%)	Unidad (ppb)
CO		125		
SO ₂	300			
NO _x			0.032	320000

- ❖ Interprete los resultados del análisis de gases de una caldera de condensación y determine cuál de los casos es el más óptimo

Caso A)

Combustible:	GLP
O_2 :	1%
CO:	1993ppm
Amb.T:	25 °C
Gas. T:	90.7 °C
NO:	25 ppm
SO_2 :	0 ppm
CO_2 :	13.14%
EA:	1.05
Diff. T:	65.7°C
Rendimiento:	96.99%
Pérdidas qA:	3.01%
NO_x :	27 ppm

Caso B)

Combustible:	GLP
O_2 :	5.4%
CO:	42ppm
Amb.T:	25 °C
Gas. T:	85.8 °C
NO:	29 ppm
SO_2 :	0 ppm
CO_2 :	10.25%
EA:	1.35
Diff. T:	60.8°C
Rendimiento:	97.32%
Pérdidas qA:	2.68%
NO_x :	31 ppm

Caso C)

Combustible:	GLP
O_2 :	15.3%
CO:	39ppm
Amb.T:	25 °C
Gas. T:	132.4 °C
NO:	50 ppm
SO_2 :	0 ppm
CO_2 :	3.18%
EA:	3.68
Diff. T:	65.7°C
Rendimiento:	85.5%
Perdidas qA:	14.5%
NO_x :	53 ppm

V.- CUESTIONARIO FINAL


1. ¿En qué consiste el análisis de gases de combustión?
2. ¿Cuáles son los gases con más importancia en análisis de gases de combustión en calderas?
3. ¿En Arequipa cuales son las principales fuentes de gases contaminantes?
4. ¿Qué es la temperatura de inflamación del combustible?
5. ¿Cuándo deben realizarse exactamente las mediciones de control de gases?
6. ¿Por qué tiene que realizarse un ajuste de punto cero después de cada medición el instrumento de medición?
7. ¿Cómo es posible determinar si un gas es más pesado o más ligero que el aire?
8. ¿Cuáles son los límites de emisión de gases en parque automotor?
9. ¿Qué valor de oxígeno es peligroso para los seres humanos?
10. ¿Qué normas Euro están en vigencia en Perú para emisiones en el parque automotor?
11. ¿Qué entidad fiscaliza la emisión de gases en el parque automotor?
12. ¿Cuál son las normas técnicas peruana para calderas industriales?
13. ¿Cómo puedo convertir % vol. a ppm o ppb?

VI.- OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Hacer las observaciones y conclusiones en forma clara y empleando el menor número de palabras.

VII.- BIBLIOGRAFÍA

Indique la bibliografía utilizada o la página web.

	UNIVERSIDAD CATOLICA DE SANTA MARIA			
	FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS FÍSICAS Y FORMALES			
	ESCUELA PROFESIONAL INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA-ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA		Docente:	
	LABORATORIO DE TERMOFLUIDOS			
	GUÍA DE ANALIZADOR DE GASES DE COMBUSTIÓN		Código:	
Apellidos y Nombres:		Semestre:		
		Grupo:	FECHA:	
		Guía. N.º:	03	

SESIÓN ANÁLISIS DE RESULTADOS ENCONTRADOS OBTENCION DE EFICIENCIA

I.- OBJETIVOS:

- Familiarizar al alumno con la importancia de los parámetros medidos en un análisis de gases y el uso de estos parámetros en el cálculo de la eficiencia.
- Realizar un análisis de los resultados encontrados en el proceso de medición de gases de combustión.
- Calcular la eficiencia de la máquina térmica

II.- MARCO TEÓRICO

EFICIENCIA DE UNA CALDERA

MÉTODO DIRECTO:

Conocido como el Método de Entrada y Salida de la caldera debido al hecho que esto necesita solo la salida útil de calor contenida en el vapor y la entrada o suministro de calor a través de una fuente de energía primaria como el combustible, para evaluar la eficiencia.

Como su nombre lo indica consiste básicamente en medir directamente los flujos de ingreso y salida de calor del sistema, obteniendo directamente los valores de Q_u y Q_s .

Esta eficiencia puede ser evaluada usando la fórmula:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} * 100 = \frac{\text{Energía o Potencia Calorífica Útil}}{\text{Energía o Potencia Calorífica suministrada}} * 100$$

METODO INDIRECTO:

Llamado también como el método de las pérdidas de calor. Las desventajas del método directo pueden ser vencidas por este método, que calcula varias pérdidas de calor asociadas con la caldera. La eficiencia puede ser llegada, restando las fracciones de pérdida de calor de 100. Una ventaja importante de este método consiste en que los errores en la medida no hacen el cambio significativo de la eficiencia

La aplicación de este método se basa sobre todo en el análisis de gases de chimenea, y no requiere la medición del vapor generado.

SEGÚN NORMA TECNICA PERUANA: 350.300.2008

- $\eta = 100 - \sum_{i=1}^6 P_i$
- $\eta = 100 - (p_1+p_2+p_3+p_4+p_5+p_6)$

Pérdida por la entalpía de los gases de escape secos

Es la pérdida porcentual de calor debida a la entalpía en los gases de escape, en base seca, se calcula mediante:

$$P_1 = K \cdot \frac{T_G - T_A}{CO_2}$$

Dónde:

- T_G = Temperatura de los gases a la salida de la chimenea °C.
- T_A = Temperatura ambiental o del ingreso al quemador, °C.
- CO_2 = Concentración volumétrica de CO_2 en los gases de escape, base seca.
- K = Constante de Siegert para el Combustible.

Tabla 1

Propiedades de los Combustibles

TIPO	CTE DE SIEGERT (k)	CONSTANTE (K ₁)	CO ₂ MAX %
RESIDUALES	0.53	54	15.8
DESTILADOS	0.48	53	15.5
GLP	0.4	48	13.8

GAS NATURAL	0.35	40	11.9
-------------	------	----	------

Fuente: NTP 350.300.2008

Pérdida por la entalpía del vapor de agua en los gases

La pérdida porcentual de calor debida a la entalpía del vapor de agua en los gases de escape, se calcula mediante:

$$P_2 = \frac{(\%H_2O + 9 * \%H) * (2488 - 4.2T_A + 2.1T_G)}{PCS}$$

Dónde:

- % H₂O: Porcentaje en peso de H₂O contenido en el combustible.
- %H: Porcentaje en peso de H contenido en el combustible.
- PCS = Poder calorífico superior del combustible en kJ/kg.

Pérdida por Inquemados Gaseosos

La pérdida porcentual de calor bebido a los inquemados gaseosos, se calcula mediante:

$$P_3 = K_1 \cdot \frac{\%Vol CO}{\%VolCO_2 + \%Vol CO}$$

Dónde:

- K₁= es la constante de inquemados del combustible.
- %Vol CO= es la concentración volumétrica de CO en los gases de escape en base seca.
- %VolCO₂= es la concentración volumétrica de CO₂ en los gases de escape en base seca.

Pérdida por inquemados sólidos

La pérdida porcentual de calor bebida a los inquemados sólidos, se calcula mediante:

$$P_4 = 0.14*B^2 + 0.08*B + 0.07$$

Dónde:

- B = Índice de Bacharach, mediante el cual se evalúa la opacidad de los gases de la combustión.

Tabla 2
Índice de Bacharach

INDICE DE BACHARACH	Calificación	Efectos
1	Excelente	No hay hollín
2	Buena	Hollín muy reducido
3	Regular	Cierta cant. De hollín
4	Pobre	Hollín visible
5	Muy pobre	Hollín muy visible
6 a 9	Pobrísimas	Hollín muy muy visible

Fuente: NTP 350.300.2008

Pérdida por convección

La pérdida porcentual de calor debida a la convección, se obtiene sumando las pérdidas porcentuales por convección para cada tipo de superficie exterior, mediante:

$$P_g = 80 \cdot \frac{Q_{P5}}{WC}$$

Dónde:

- $h_{cf} = (1.973 \cdot 10^{-3}) \cdot (T_{sf} - T_a)^{0.25} \cdot (2.857 \cdot v + 1)^{0.5}$
- $h_{cg} = (1.973 \cdot 10^{-3}) \cdot (T_{sg} - T_a)^{0.25} \cdot (2.857 \cdot v + 1)^{0.5}$
- $Q_{p5} = h_{cf} \cdot A_f \cdot (T_{sf} - T_a) + h_{cg} \cdot A_g \cdot (T_{sg} - T_a)$
- $W_c = 9.81 \cdot BHP$

Dónde:

- h_{cf} = Coeficiente de convección de la superficie exterior de la caldera, que cubre al fluido de trabajo, kW/m²°C
- h_{cg} = Coeficiente de convección de la superficie exterior de la caldera, que cubre a los gases de la combustión, kW/m²°C
- Q_{p5} = Calor perdido por convección, por unidad de tiempo kW.

- T_{sf} = Temperatura de superficie exterior de la caldera, que cubre al fluido de trabajo, °C (se asume la temperatura exterior del tambor o cilindro del caldero).
- T_{sg} = Temperatura exterior de la caldera, que cubre a los gases de la combustión, °C (se asume la temperatura exterior de la chimenea).
- A_f = Superficie de la superficie exterior de la caldera, que cubre al fluido de trabajo, m^2 (se asume la superficie exterior del caldero)
- A_g = Superficie de la superficie exterior que cubre los gases de escape, m^2 (se asume la superficie exterior de la chimenea).
- v = Velocidad del viento alrededor de la caldera, m/s.
- W_c = Potencia de la caldera, kW.

Pérdida por radiación

La pérdida porcentual de calor debida a la radiación, se obtiene sumando las pérdidas porcentuales por radiación para cada tipo de superficie exterior, mediante:

$$P_6 = 80 \cdot \frac{Q_{P6}}{W_C}$$

Donde:

- $I_f = 5.763 \cdot 10^{-11} \cdot e \cdot [(T_{sf} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$
- $I_g = 5.763 \cdot 10^{-11} \cdot e \cdot [(T_{sg} + 273)^4 - (T_a + 273)^4]$
- $Q_{p6} = I_f \cdot A_f + I_g \cdot A_g$
- $w_c = 9,81 \cdot BHP$

Dónde:

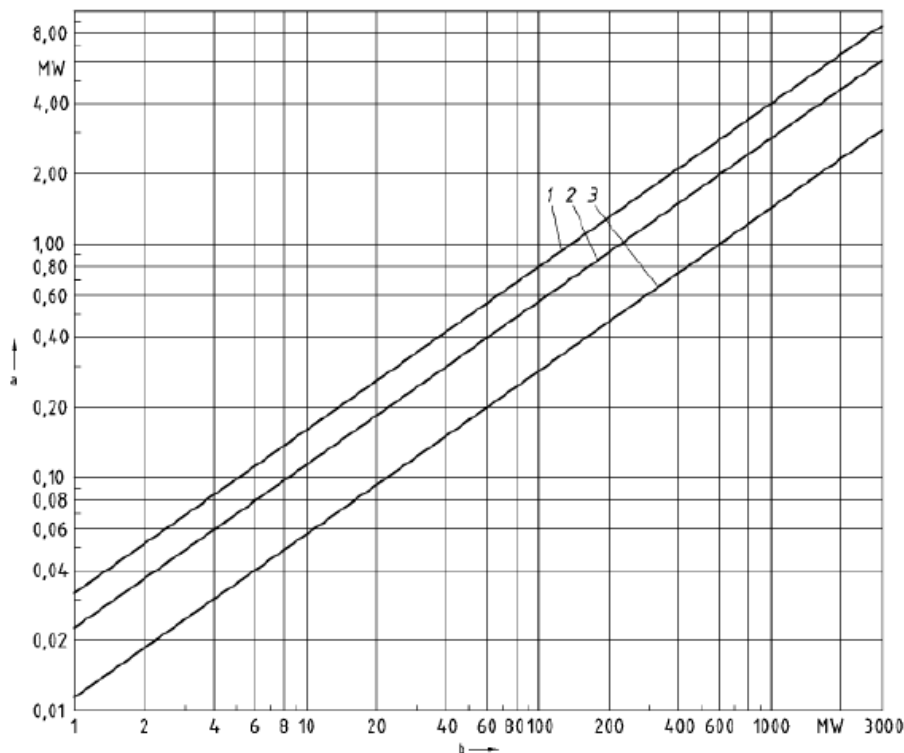
- I_f = Flujo de calor radiante en la superficie exterior de la caldera, que cubre el fluido de trabajo, kW/m^2
- I_g = Flujo de calor radiante en la superficie exterior de la caldera, que cubre los gases de la combustión, kW/m^2
- e = Emisividad del material que cubre al caldero.

Método alternativo para el cálculo de las pérdidas por radiación y convección

Dado que es difícil determinar las pérdidas por radiación y convección se puede utilizar esta gráfica para encontrar dichas pérdidas, este método se basa en el tipo de combustible usado por la caldera y su capacidad máxima.

Grafica 1

Pérdidas por Convección y Radiación en Generadores de Vapor



Fuente: Métodos para determinar las pérdidas y eficiencia en generadores de vapor-2019

Entonces:

- a= Indica las pérdidas por radiación y convección de una caldera.
- b= Indica la potencia térmica útil de la caldera en MW.
- La curva 1 es para calderas que queman lignitos
- La curva 2 es para calderas que queman hulla.
- La curva 3 es para calderas que queman combustibles líquidos y gas natural.

III.- ELEMENTOS A UTILIZAR

- Analizador de gases KIMO Kigas 310PRO
- Caldera del laboratorio
- Guía de laboratorio

IV.- PROCEDIMIENTO DE EJECUCION

1. Se realizará la puesta en marcha de la caldera hasta su estado en régimen permanente.
2. Seguir los pasos para encender y conectar el analizador a la chimenea
3. Realizar la medición de gases de combustión

Pasos para realizar la medición:	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Conecte la sonda de humos al analizador. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Encienda el analizador. ➤ Aparecerá la pantalla de inicio con el menú de medición seleccionado. 	
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Inserte la sonda en la chimenea como se muestra en la figura. 	

<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione medición y Pulse "OK" 																													
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se mostrará todas las mediciones disponibles. ➤ Esperar que termine el auto cero. 																													
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccionar análisis de gases de combustión. 																													
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Seleccione el tipo de combustible 																													
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Se iniciará la medición de gases ➤ Realice la medición durante al menos 3 minutos. 	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Parameter</th> <th>Value</th> <th>Unit</th> <th>Scale</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>O₂ %</td> <td>33</td> <td>%</td> <td>994</td> </tr> <tr> <td>CO ppm</td> <td>0</td> <td>ppm</td> <td>1071</td> </tr> <tr> <td>CO₂ %</td> <td>99</td> <td>%</td> <td>06</td> </tr> <tr> <td>Ta °C</td> <td>281</td> <td>°C</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Tt °C</td> <td>402</td> <td>°C</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>λ</td> <td>123</td> <td>ppm</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	Parameter	Value	Unit	Scale	O ₂ %	33	%	994	CO ppm	0	ppm	1071	CO ₂ %	99	%	06	Ta °C	281	°C	0	Tt °C	402	°C	0	λ	123	ppm	0
Parameter	Value	Unit	Scale																										
O ₂ %	33	%	994																										
CO ppm	0	ppm	1071																										
CO ₂ %	99	%	06																										
Ta °C	281	°C	0																										
Tt °C	402	°C	0																										
λ	123	ppm	0																										

4. COMPLETAR LA TABLA

➤ DATOS DE PLACA:

Descripción	Caldera
Marca	DISTRAL
Tipo	Piro tubular
Potencia	900 BHP
Modelo	D3B-900-150
Eficiencia Nominal	86%
Presión Nominal	Residual 500
Año de fabricación	1998

5. COMPLETAR LA TABLAS

➤ DATOS DE MEDICIÓN:

- Oxígeno

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
O ₂				

- Monóxido de carbono

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO				

- Temperatura de Ambiente

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Ta				

- Temperatura de gases

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Tf				

- Dióxido de carbono

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
CO ₂				

- Exceso de aire

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
--	--------	-------------	-------------	-------------

λ				
-----------	--	--	--	--

- Variación de temperatura

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
ΔT				

- Eficiencia

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
η_t				

- Pérdidas

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
Q_s				

- Óxido de nitrógeno

	Unidad	Medida N° 1	Medida N° 2	Medida N° 3
NO_x				

Completar cuadro consolidado

Parámetros	Unidad	Medición N.º 1	Medición N.º 2	Medición N.º 3	Promedio
O_2	%	8.65	9	9.35	9
CO	ppm	489	501	510	500
°T de Ambiente	M	20	20	20	20
°T de Humos	°C	213	221	226	220
CO_2	%	9.29	9.03	8.77	9.03
Exceso de aire		1.7	1.75	1.8	1.75
°T Diferencial	°C	193	201	206	200
Pérdidas	%	11.37	12.1	12.76	12.07
Eficiencia	%	88.63	87.9	87.24	87.92
NO_x	ppm	0	0.02	0.04	0.02

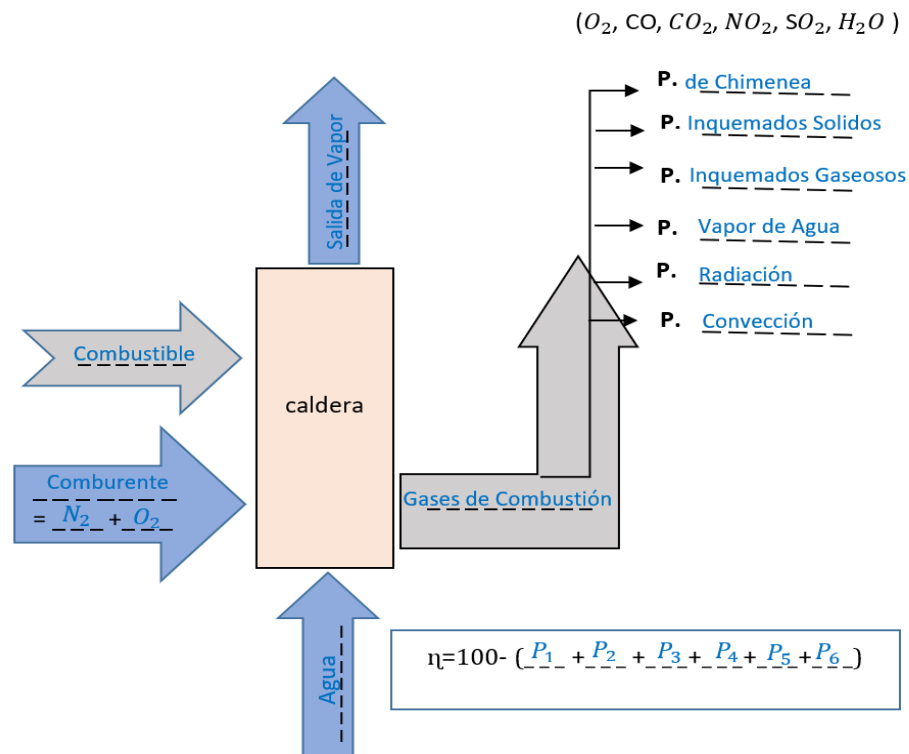
6. COMPLETAR LA TABLA

➤ PÉRDIDAS CALCULADAS: (usar fórmulas de marco teórico)

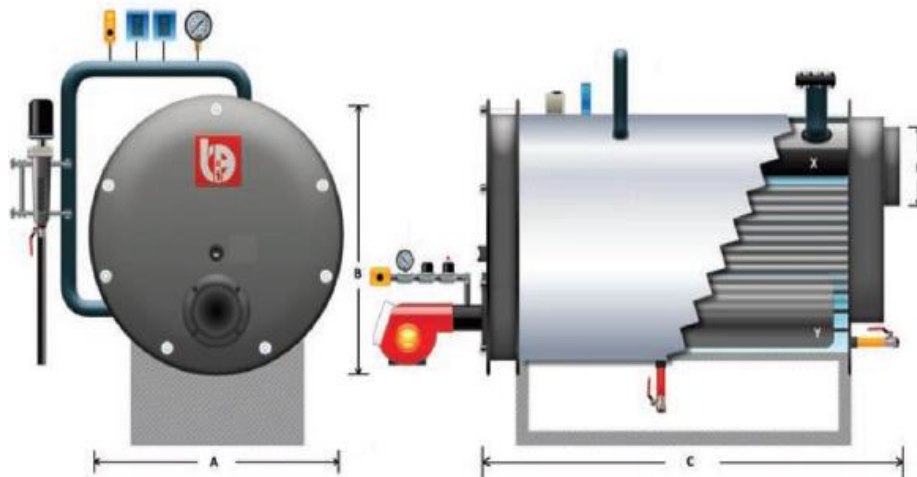
Pérdidas	Unidad	Medición N.º 1	Medición N.º 2	Medición N.º 3	Promedio
P_1	%	11.01	11.8	12.46	11.75
P_2	%	0.07	0.07	0.07	0.07
P_3	%	0.28	0.30	0.31	10.53
P_4	%	0.29	0.29	0.29	0.29
$\sum_{i=1}^4 P_i$	%	11.65	12.45	13.12	12.41
$100 - \sum_{i=1}^4 P_i$	%	88.35	87.57	86.88	87.6

V.- CUESTIONARIO

1. Complete el esquema de eficiencia de calderas según el método indirecto de la NTP 350.300-2008



2. Calcule las pérdidas por radiación y convección para la siguiente caldera por el método indirecto según la NTP 350.300.2008



Datos

- *Largo del cuerpo (C)=10.8m*
- *Diámetro del cuerpo (A=B) =2.2m*
- *Altura de chimenea= 7m*

- *Diámetro de la chimenea (E)=1.3m*
- $T_{sf}=210\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $T_{sg}=70\text{ }^{\circ}\text{C}$
- *Velocidad del viento= 1.1m/s*
- *Emisividad de material de la superficie y chimenea= 0.60*

➤ **Pérdida por convección**

➤ **Calculando los coeficientes convectivos para cada superficie**

$$h_{cf} = (1.973 \cdot 10^{-3}) \cdot (T_{sf} - T_a)^{0.25} \cdot (2.857 \cdot v + 1)^{0.5}$$

$$h_{cf} = 1.973 \cdot 10^{-3} (210 - 20)^{0.25} (2.857 \cdot 1.1 + 1)^{0.5}$$

$$h_{cf} = 0.01067 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$h_{cg} = (1.973 \cdot 10^{-3}) \cdot (T_{sg} - T_a)^{0.25} \cdot (2.857 \cdot v + 1)^{0.5}$$

$$h_{cg} = 1.973 \cdot 10^{-3} (70 - 20)^{0.25} (2.857 \cdot 1.1 + 1)^{0.5}$$

$$h_{cg} = 0.014909 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

Calculando calor perdido por convección

$$Q_{\text{conv}} = (T_{sf} - T_a) \cdot h_{cf} \cdot A_g + (T_{sg} - T_a) \cdot h_{cg} \cdot A_g$$

$$Q_{\text{conv}} = (210 - 20) \cdot 0.01067 \cdot 1.64 + (70 - 20) \cdot 0.014909 \cdot 1.64$$

$$Q_{\text{conv}} = 120.84 \text{ Kw}$$

Convirtiendo la potencia en BHP a kW

➤ **Pérdida por Radiación**

- **Calculando los coeficientes convectivos para cada superficie**

- **Calculando los coeficientes convectivos para cada superficie**

- **Convirtiendo la potencia en BHP a kW**

$$N_c = 100 \text{ BHP} \cdot \frac{0.81 \text{ kW}}{1 \text{ BHP}}$$

$$N_c = 81 \text{ kW}$$

$$\eta = 80 \cdot \frac{22}{8129} = 0.57\%$$

3. **¿Qué parámetros influyen en la eficiencia de una caldera?**

- Temperatura de la caldera
- Carga de la caldera
- Temperatura de gases de combustión
- Exceso de aire
- Mantenimiento de la caldera

4. **En una caldera es posible obtener una eficiencia superior al 100%?**

El generador de vapor tiene tecnología de

5. **¿De los parámetros medidos cual es el indicador de la calidad de la combustión?**

- a) El dióxido de carbono
- b) El monóxido de carbono
- c) Los óxidos de nitrógeno
- d) El oxígeno

6. **¿Cómo debe ser una combustión eficiente?**

- a) Limpia
- b) Estable
- c) Económica
- d) Limpia estable y económica

7. **Si se tiene una medición con O₂ muy alto que indica?**

- a) Alta eficiencia

- b) Baja eficiencia
- c) Eficiencia normal
- d) Ninguna de las anteriores respuestas

8. De los parámetros medidos si tenemos un aumento del CO₂ y disminución de la temperatura de humos, que pasaría con la eficiencia

- a) La eficiencia de la caldera aumenta y el CO disminuye
- b) La eficiencia de caldera disminuye y el CO aumenta
- c) La eficiencia de la caldera se mantiene igual y el CO se mantiene igual
- d) La eficiencia de la caldera aumenta y el CO aumenta

VI.- OBSERVACIONES Y CONCLUSIONES

Hacer las observaciones y conclusiones en forma clara y empleando el menor número de palabras.

VII.- BIBLIOGRAFÍA

Indique la bibliografía utilizada o la página web.

