

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA
ELECTRÓNICA



**MODERNIZACIÓN DE SISTEMA DE DETECCIÓN
DE GASES INFLAMABLES EN SALA DE BOMBAS,
A BORDO DEL BUQUE TANQUE HUASCARÁN –
NAVIERA TRANSOCEÁNICA**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO ELECTRÓNICO**

PRESENTADA POR:

Bach. CRISTÓBAL VELÁSQUEZ, LUIS ANDRÉS

Asesor: Ing. CHONG RODRÍGUEZ, HUMBERTO

LIMA – PERU

2019

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi esposa Desiré.

Gracias por tu eterna paciencia,
comprensión y compañía en mi camino
hasta el día de hoy,

A nuestra amada hija Andrea, el motor
principal de nuestras vidas, con su alegría,
inteligencia, fuerza e inocencia naturales,

A mis padres y hermanos, quienes con su
sacrificio me dieron la oportunidad de
adquirir el conocimiento profesional,

A mis compañeros de trabajo y colegas,
quienes han aportado con su experiencia y
calidades en mi carrera,

Y a todos mis maestros por sus enseñanzas.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1 Formulación del problema y justificación del estudio	2
1.2 Importancia del estudio	2
1.2.1 SOLAS (Safety Of Life At Sea)	2
1.2.2 Código ISM (International Safety Management)	4
1.3 Limitaciones del estudio	5
1.3.1 Naviera Transoceánica.....	5
1.3.2 Política de seguridad, calidad y medio ambiente.....	6
1.3.3 Buque tanque Huascarán	6
1.3.3.1 Sala de bombas.....	7
1.3.3.2 Seguridad en sala de bombas	8
a. Ventilación.....	8
b. Detección de gases inflamables	8
1.3.4 Equipamiento estándar.....	9
1.3.4.1 Descripción del sistema de detección de gases inflamables en el buque tanque Huascarán	10
1.4 Objetivos generales y específicos	14
1.4.1 Objetivo general.....	14
1.4.2 Objetivos específicos	14
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	15
2.1 Definición de términos básicos	15
2.1.1 Espacios confinados.....	15
2.1.1.1 Riesgos en un espacio confinado	16
2.1.2 Combustión.....	18
2.1.3 Triángulo del fuego.....	18
2.1.4 Límites de inflamabilidad	19
2.2 Antecedentes y marco histórico	25
2.2.1 Ejemplos de aplicaciones recientes similares	30

2.3	Estructura teórica	33
2.3.1	Estudio de la tecnología de detección por combustión catalítica	33
2.3.1.1	Principio de operación.....	34
2.3.1.2	Evolución y construcción	36
2.3.1.3	Características de operación.....	40
2.3.1.4	Factores importantes de funcionamiento	41
a.	Envenenamiento.....	41
•	Inhibición	43
b.	Contaminación	43
c.	Cracking.....	44
d.	Factor de corrección.....	45
e.	Mezclas de gases.....	48
f.	Seguridad en falla (Fail-Safe) / seguridad en cero.....	49
g.	Requerimiento de oxígeno	50
h.	Envejecimiento	51
2.3.2	Estudio de la tecnología de detección por absorción infrarroja.....	51
2.3.2.1	Principio de operación.....	53
a.	Onda.....	53
b.	Frecuencia	54
c.	Longitud de onda	54
d.	Número de onda.....	54
e.	Micrón.....	55
f.	Transmitancia.....	55
g.	Absorbancia	55
•	Huella única de absorción de gas	56
h.	Frecuencias naturales de las moléculas de gas	58
i.	Formas de detección IR	59
2.3.2.2	Componentes principales para el análisis y detección	60
a.	El detector	60
•	Termoeléctrico	60
•	Termistor bolómetro.....	61
•	Detector piroeléctrico.....	61
•	Detector de fotones	62

•	Detector luft	62
•	Detector fotoacústico	64
b.	La fuente IR	65
•	Modulación	65
c.	El filtro óptico	66
d.	La celda de gas.....	67
2.3.2.3	Configuración.....	68
2.3.2.4	Características de operación.....	70
a.	Temperatura	70
b.	Humedad.....	71
c.	Sensibilidad.....	71
d.	Esperanza de vida	72
e.	Respuesta a la concentración de gases.....	72
2.3.2.5	Características prácticas de aplicación.....	73
2.3.2.6	Factores importantes de funcionamiento	75
a.	Envenenamiento.....	75
b.	Cracking.....	76
c.	Tiempo de vida	76
d.	Calibración.....	76
e.	Seguridad en falla (Fail-Safe) / seguridad en cero.....	77
f.	Requerimiento de oxígeno	77
g.	Limitaciones en la detección.....	78
2.4	Hipótesis.....	78
2.4.1	Hipótesis general.....	78
2.4.2	Hipótesis específicas.....	79
CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA.....		80
3.1	Descripción del proyecto e ingeniería básica.....	80
3.2	Selección del equipamiento.....	83
3.2.1	Detectores de gases inflamables – Xgard IR	83
3.2.1.1	Descripción y construcción.....	84
3.2.1.2	Certificaciones para zonas explosivas.....	87
3.2.1.3	Señal de salida.....	88
3.2.1.4	Grado de protección	89

3.2.2	Panel de alarmas – Gasmaster	89
3.2.2.1	Descripción y construcción	90
3.2.2.2	Protecciones y certificaciones	94
3.2.2.3	Interfaces	96
3.2.2.4	Señalización	97
3.2.2.5	Alimentación	97
3.3	Instalación y configuración de equipos – ingeniería de detalle	98
3.3.1	Cableado entre detectores de gas y panel de alarmas	98
3.3.2	Cableado de alarmas visual / sonora externas	102
3.3.3	Detalle de conexionado del sistema de detección de gases inflamables modernizado	105
3.3.4	Configuración de detectores de gases inflamables	107
3.3.5	Configuración de panel de alarmas	108
3.3.5.1	Configuración por detectores a conectar	108
3.3.5.2	Programación	110
3.4	Puesta en marcha y operación del sistema	119
3.4.1	Arranque de detectores de gases inflamables – Xgard IR	119
3.4.1.1	Calibración de detectores de gases inflamables – Xgard IR	121
3.4.2	Arranque de panel de alarmas - Gasmaster	124
3.4.2.1	Invalidación o inhibición del sistema	125
3.4.2.2	Comprobación funcional	125
3.5	Mantenimiento	127
3.5.1	Mantenimiento de detectores de gases inflamables – Xgard IR	127
3.5.2	Mantenimiento del panel de alarmas – Gasmaster	128
3.5.2.1	Baterías de respaldo	129
3.6	Resultados	130
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTOS		132
4.1	Costos iniciales	132
4.2	Costo de mantenimiento	134
4.2.1	Sistema tradicional de detección catalítica	135
4.2.2	Sistema modernizado de detección IR	135
4.3	Costos acumulados	136
CONCLUSIONES		138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Estructura del Código ISM	4
Figura 2.	Buque tanque Huascarán	7
Figura 3.	Sistema de detección de gases inflamables existente - buque tanque Huascarán.....	11
Figura 4.	Diagramas de conexión típicos para diferentes clases de detectores con panel Gasmaster	12
Figura 5.	Triángulo del fuego.....	19
Figura 6.	Límites de inflamabilidad	20
Figura 7.	Monitor de LEL Model B (1927)	27
Figura 8.	Monitor de LEL Model C (1929)	27
Figura 9.	Explosímetro desarrollado por MSA (1935)	27
Figura 10.	Interferómetros desarrollados por Riken Keiki Co. Ltd. (1925).....	28
Figura 11.	Esquema de bolómetro empleado de 1896 a 1898	29
Figura 12.	Detector IR de gases inflamables Modelo GD100 - SIMRAD	29
Figura 13.	Ejemplos de sensores catalíticos de gases inflamables típicos.....	33
Figura 14.	Puente de Wheatstone para medición de señal de salida de sensor catalítico.....	35
Figura 15.	Estructura interna típica de un sensor catalítico	36
Figura 16.	Encapsulados típicos de sensores de gas catalíticos	37
Figura 17.	Conexión eléctrica de un detector de gas catalítico de 3 hilos	39
Figura 18.	Estructura y despiece típico de un detector de gas inflamable	40
Figura 19.	Señal de salida típica vs concentración de gas metano para un detector de gases catalítico	41
Figura 20.	Onda mecánica simple de 10 Hz.....	54
Figura 21.	Explicación del concepto de transmitancia.....	55
Figura 22.	Espectro electromagnético	56
Figura 23.	Análisis espectroscópico para gas metano.....	57
Figura 24.	Representación de molécula de agua	58
Figura 25.	Principio de detección por efecto piroeléctrico	61
Figura 26.	Esquema simplificado de detector luft.....	63

Figura 27.	Principio de detección fotoacústica	64
Figura 28.	Especificaciones típicas para un filtro óptico de gas metano	67
Figura 29.	Celda de gas	68
Figura 30.	Configuración básica de analizador de gas.....	69
Figura 31.	Configuración de analizador de gas con dos detectores	69
Figura 32.	Configuración de analizador de gas con dos celdas de medición.....	70
Figura 33.	Respuesta típica de un detector IR.....	73
Figura 34.	Diagrama de bloques de un sistema de detección típico de gases inflamables.....	80
Figura 35.	Diagrama de proceso de sistema de detección de gases inflamables – Buque tanque Huascarán	81
Figura 36.	Detector de gas inflamable Xgard IR	84
Figura 37.	Construcción y partes principales de detector Xgard IR	85
Figura 38.	Certificaciones de detector Xgard IR para zonas explosivas.....	87
Figura 39.	Conexión típica de detector Xgard IR con controlador / panel de alarmas	88
Figura 40.	Panel de control y alarmas Gasmaster (versión modernizada).....	90
Figura 41.	Características principales de controlador de gases Gasmaster.....	91
Figura 42.	Partes principales de panel de control y alarmas Gasmaster	93
Figura 43.	Esquema simplificado de conexión entre detectores de gas y panel de alarmas - Reemplazo en buque tanque Huascarán.....	100
Figura 44.	Detalle de conexión de detector de gas Xgard IR con panel de control Gasmaster	101
Figura 45.	Detalle de conexión de panel de control Gasmaster con Alarmas Visuales / Sonoras Existentes	103
Figura 46.	Diagrama de lazos de instrumentos de sistema de detección de gases inflamables modernizado – Buque tanque Huascarán.....	106
Figura 47.	Configuración de detector de gases inflamables Xgard IR.....	107
Figura 48.	Configuración de panel de alarmas Gasmaster por detectores a conectar – Ubicación de juegos de puentes para cada canal.....	109
Figura 49.	Ajuste de juego de puentes en Gasmaster por canal, según el tipo de detector a conectar	110
Figura 50.	Interfaz de operación de usuario – Controlador Gasmaster.....	111
Figura 51.	Pantalla de ingreso a menú principal - Controlador Gasmaster.....	112

Figura 52.	Estructura general de menús - Panel de alarmas Gasmaster.....	113
Figura 53.	Kit de calibración típico y detector de gases	121
Figura 54.	Puntos de ajuste y prueba para calibración - Detector de gases Xgard IR	122
Figura 55.	Localización de baterías de respaldo en controlador de gases Gasmaster.....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Estructura del SOLAS	3
Tabla 2.	Flota de buques tanque - Naviera Transoceánica	6
Tabla 3.	Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos	21
Tabla 4.	Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)	23
Tabla 5.	Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)	24
Tabla 6.	Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)	25
Tabla 7.	Factores de corrección para sensores de gas catalíticos. Calibración con pentano y metano	47
Tabla 8.	Correspondencia de conexión entre detector Xgard IR y panel Gasmaster.....	102
Tabla 9.	Asignación de ubicaciones para detectores Xgard IR - Buque tanque Huascarán.....	117
Tabla 10.	Costo inicial de sistema tradicional de detección de gases inflamables por combustión catalítica	133
Tabla 11.	Costo Inicial de sistema modernizado de detección de gases inflamables por absorción infrarroja.....	133
Tabla 12.	Costo de mantenimiento anual sistema tradicional de detección de gases inflamables	135
Tabla 13.	Costo de mantenimiento anual sistema modernizado de detección de gases inflamables	136
Tabla 14.	Comparación de costos acumulados anuales de sistemas de detección de gases inflamables	137

RESUMEN

En la presente investigación se ha realizado el análisis de un sistema tradicional de detección de gases inflamables en funcionamiento, a base de detectores de combustión catalítica, centrándose en sus ventajas y desventajas desde el punto de vista operativo y de seguridad. Se analizó así mismo, la tecnología de detección por absorción infrarroja, la cual ofrece mejoras importantes frente a la tecnología tradicional catalítica. La modernización del sistema de detección de gases inflamables de las salas de bombas, a bordo del buque tanque Huascarán, se efectuó principalmente mediante el reemplazo de los detectores y los controladores de gases, basados en el principio de detección por absorción infrarroja, lográndose mejoras operativas y de seguridad importantes en el funcionamiento general del sistema. Como factor decisivo adicional, se realizó así mismo, un análisis de los costos iniciales y acumulados de funcionamiento, del sistema tradicional frente al sistema modernizado. De los resultados obtenidos se llegó a la conclusión de la conveniencia de la modernización efectuada, desde el punto de vista de funcionamiento, de seguridad y de economía.

Palabras Claves: Detección de gases inflamables, sensores catalíticos, sensores infrarrojos NDIR, seguridad en buques tanque, límites de explosividad.

ABSTRACT

In the present research, the analysis of a traditional flammable gas detection system in operation, based on catalytic combustion detectors, has been carried out, focusing on its advantages and disadvantages from the operational and safety point of view. Infrared absorption detection technology which offers significant improvements over traditional catalytic technology, was also analyzed. The modernization of the pump rooms' flammable gas detection system, on board the Huascarán oil tanker, was mainly carried out by replacing the gas detectors and controllers, based in the infrared absorption detection principle, achieving important operational and safety improvements in the overall operation of the system. As an additional decisive factor, an analysis of the initial and accumulated operating costs of the traditional system versus the modernized system was also carried out. From the results obtained, the convenience of modernization carried out was concluded, from the point of view of operation, safety and economy.

Key Words: Flammable gas detection, catalytic sensors, NDIR infrared sensors, oil tankers safety, flammability limits.

INTRODUCCIÓN

Dentro del sector energético, la industria de hidrocarburos ocupa un campo especial, por las necesidades particulares que involucran el manejo de los mismos. Dentro de las operaciones que conllevan al manejo de hidrocarburos, desde los procesos de extracción, producción, almacenamiento, refinación hasta el transporte, es de suma importancia el tema de la seguridad, debido a que los hidrocarburos y sus derivados, presentan características de inflamabilidad y explosividad, las cuales pueden causar daños personales y materiales de consideración. En el caso de daños personales, estos pueden conducir incluso a la muerte. Es por ese motivo que el concepto de seguridad en el manejo de hidrocarburos debe ser de conocimiento obligatorio para todo aquel que se vea involucrado en esta actividad.

Debido a la importancia indicada, de forma particular, la seguridad en el transporte marítimo de líquidos combustibles se encuentra internacionalmente regulada mediante normas como el SOLAS (Safety Of Life At Sea, Sección 1.2.1), que deben seguir todos los operadores de buques tanque y que especifican, entre otras cosas, la obligatoriedad en el empleo de sistemas de detección de gases inflamables a bordo, de manera permanente y localizados en áreas específicas.

Para el trabajo seguro en ambientes explosivos, se cuenta con la existencia de instrumentos electrónicos para la detección de gases inflamables que pueden acumularse en espacios confinados. Esta instrumentación se ha basado tradicionalmente en el principio de detección por combustión catalítica que, por a su simplicidad y bajo costo, se ha estandarizado para la mayoría de aplicaciones industriales. Sin embargo, la necesidad de equipamiento más seguro y adecuado para el manejo de fluidos derivados del petróleo, requiere optar por otro tipo de tecnología más moderna, como la detección por absorción infrarroja, la cual trabaja de manera mucho más eficiente y es inmune a una serie de factores que merman la seguridad en los sistemas de detección tradicional.

Por otra parte, el sistema de detección infrarroja demuestra ser una solución con alto costo inicial, pero cuyos costos de mantenimiento reducidos, hacen que sea una opción conveniente a mediano plazo.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Formulación del problema y justificación del estudio

¿Por qué es necesario modernizar el sistema de detección de gases inflamables?

Una de las principales preocupaciones de la industria es la seguridad, tanto para resguardar la integridad de los bienes materiales como de las vidas humanas. Es por ello que se requiere contar con el equipamiento adecuado, capaz de medir con efectividad y seguridad, aquellos factores que puedan producir alguna catástrofe en una determinada actividad laboral.

Particularmente, la industria del petróleo y gas es una de las más peligrosas, debido a que maneja fluidos combustibles y con ello surge el peligro de la inflamabilidad y explosión por acumulación de gases inflamables, con las consecuencias negativas que ello puede acarrear. Es por ello que se hace necesario la revisión de los métodos tradicionales de detección de gases inflamables empleados, con el fin de encontrar sistemas más eficientes y seguros.

1.2 Importancia del estudio

La importancia de contar con un sistema de detección de gases inflamables confiable y seguro, radica en las consecuencias negativas que se darán de no tenerlo, lo que puede acarrear daños materiales y personales.

Es por ello que, para poder operar, las empresas que se dedican al transporte marítimo de combustibles deben seguir normas estrictas y regirse mediante estándares internacionales, tales como el SOLAS y el Código ISM.

1.2.1 SOLAS (Safety Of Life At Sea)

Conocido en español como el Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, el SOLAS es el tratado internacional más importante que existe sobre la seguridad de los buques.

La primera versión del SOLAS fue aprobada en 1914, en respuesta a la catástrofe mundialmente famosa del Titanic, dándose luego otras versiones en 1929, 1948,

1960 y 1974. La versión vigente fue adoptada el 1ro de noviembre de 1974 por la Conferencia internacional sobre vida humana en el mar, convocada por la Organización Marítima Internacional (OMI) y entró en vigencia en mayo de 1980.

El objetivo principal del Convenio SOLAS es especificar normas de construcción, equipamiento y explotación de los buques existentes para garantizar su seguridad y la de las personas que en ellos se embarcan. Para este fin, incluye artículos que establecen obligaciones generales y un anexo estructurado en 12 capítulos, según se listan en la Tabla 1 a continuación:

Tabla 1. Estructura del SOLAS

Capítulo I	Disposiciones Generales
Capítulo II-1	Construcción – Compartimentado y estabilidad, instalaciones de máquinas e instalaciones eléctricas
Capítulo II-2	Prevención, detección y extinción de incendios
Capítulo III	Dispositivos y medios de salvamento
Capítulo IV	Radiocomunicaciones
Capítulo V	Seguridad de la navegación
Capítulo VI	Transporte de cargas
Capítulo VII	Transporte de mercancías peligrosas
Capítulo VIII	Buques nucleares
Capítulo IX	Gestión de la seguridad operacional de los buques
Capítulo X	Medidas de seguridad aplicadas a las naves de gran velocidad
Capítulo XI-1	Medidas especiales para incrementar la seguridad marítima
Capítulo XI-2	Medidas especiales para incrementar la protección marítima
Capítulo XII	Medidas de seguridad aplicables a los graneleros

Fuente: Organización Marítima Internacional – OMI (2018)

Cada uno de los capítulos indicados trata de temas específicos para los diferentes tipos de buques comerciales existentes, tales como buques de pasajeros y de carga. Dentro de los tipos de buques de carga se hacen referencias especiales a los denominados buques tanqueros o buques tanque (tankers), debido a su función

particular de transporte a granel de cargamentos líquidos de naturaleza inflamable como, por ejemplo, productos de hidrocarburos; donde es necesario tomar medidas especiales adicionales para garantizar la seguridad a bordo.

1.2.2 Código ISM (International Safety Management)

Conocido también como Código IGS (Código Internacional de Gestión de la Seguridad), el Código ISM está definido en el Capítulo IX del SOLAS (Gestión de la seguridad operacional de los buques), Regla 1.1:

“Es el Código internacional de gestión de la seguridad operacional del buque y la prevención de la contaminación, aprobado por la Asamblea de la Organización en la resolución A.741(18)” (Organización Marítima Internacional, 2002).

Tal como se puede sintetizar en la Figura 1, mediante el Código ISM se busca regular la relación que conforman para la operación de un buque, el capitán, el fletador (carga) y el dueño u operador de la nave (manager).



Figura 1. Estructura del Código ISM
Fuente: García Seijas, N. (2011)

El Código ISM indica en esencia, la forma de cómo las empresas navieras implementan los diversos procedimientos, regulaciones y convenciones internacionales, nacionales o locales sobre seguridad marítima, incluyendo la contaminación.

Para obtener la certificación del Código ISM, es necesario tener previamente un conjunto de procedimientos de seguridad reales y definidos, que involucren todos los aspectos de operación en la nave involucrada, que tengan que ver con la

seguridad y medio ambiente. Estos procedimientos deben implementarse y seguirse a cabalidad, y siempre están sujetos a revisión, modificación o perfeccionamiento, por lo que la certificación es revisada cada cierto tiempo, con el fin de verificar que los lineamientos de gestión de seguridad se sigan cumpliendo.

1.3 Limitaciones del estudio

El presente estudio se limita particularmente al sector industrial del transporte marítimo de hidrocarburos líquidos, en el cual se presentan condiciones particulares de trabajo que hacen necesario equipamiento especializado.

El estudio se ha centrado en la aplicación particular de la detección de gases inflamables en sala de bombas para el buque tanque Huascarán, de propiedad de la empresa Naviera Transoceánica cuyos detalles se indican a continuación.

1.3.1 Naviera Transoceánica

Naviera Transoceánica es una empresa naviera peruana con una antigüedad de operación de más de 50 años en el transporte marítimo nacional, dedicada principalmente al transporte de hidrocarburos a lo largo de la costa peruana, el Caribe y los Estados Unidos de Norteamérica. También proporciona todo tipo de servicios relacionados con el negocio naviero, tanto en puerto como costa afuera (off shore), todo ello bajo los estándares de calidad y regulaciones internacionales para la satisfacción del cliente.

Para sus labores de transporte de hidrocarburos y otros productos, Naviera Transoceánica cuenta con naves propias de bandera peruana, así como naves arrendadas. En la Tabla 2 a continuación, se lista la flota de buques tanque con sus características principales.

El objetivo principal de Naviera Transoceánica es efectuar el transporte marítimo de hidrocarburos de sus clientes desde las refinerías y centros de producción hasta las diferentes plantas que lo requieran, rigiéndose por las más altas normas de calidad, seguridad y cuidado del medio ambiente.

Tabla 2. Flota de buques tanque - Naviera Transoceánica

Nombre B/T	Construcción	Tipo de Casco	LOA (Eslora Total)	Manga	Calado	Bandera	DWT (Tonelaje de Peso Muerto)
Amazonas	1999, Brodosplit Shipyard, Croacia	Casco Doble	183.40 m	32.00 m	12.00 m	Perú	44,881 Ton.
Camisea	1999 / Brodosplit Shipyard	Casco Doble	183.40 m	32.00 m	12.01 m	Perú	44,577 Ton.
Capahuari	1993 / Kherson / Ukraine	Casco Doble	178.96 m	25.30 m	12.30 m	Perú	32,539 Ton.
Chira	2005 / Hyundai Mipo, Ulsan / Korea	Casco Doble	182.55 m	27.34 m	16.70 m	Perú	37,269 Ton.
Eeklo	1995 / Kawasaki Heavy Industries / Kobe / Japan	Casco Doble	179.00 m	27.36 m	11.62 m	Bélgica	29,458 Ton.
Huascarán	1992 / Shin Kurushima / Japan	Fondo Doble	176.00 m	32.20 m	10.84 m	Perú	40,432 Ton.
Moquegua	2002 / Asakawa / Japan	Casco Doble	134.16 m	20.52 m	8.81 m	Perú	14,298 Ton.
Paracas	1990 / Boelwerf / Bélgica	Casco Doble	165.66 m	26.53 m	11.74 m	Perú	29,171 Ton.
Trompeteros I	2004 / GSI / China	Casco Doble	173.96 m	29.00 m	12.31 m	Perú	38,847 Ton.
Urubamba	Built 2005 / Shina Shipbuilding Co. Ltd / Corea	Casco Doble	175.98 m	31.00 m	11.115 m	Perú	40,158 Ton.

Fuente: Naviera Transoceánica S.A. (2012)

1.3.2 Política de seguridad, calidad y medio ambiente

Naviera Transoceánica orienta sus actividades a la operación segura, confiable y eficiente de su flota de buques y remolcadores, con la finalidad de lograr la completa satisfacción de los requerimientos de sus clientes. Para ello cuentan con un Sistema Integrado de Gestión de Seguridad, Calidad y Medio Ambiente, que se basa en normas internacionales, tales como el Código ISM y el SOLAS.

1.3.3 Buque tanque Huascarán

El buque tanque Huascarán o B/T Huascarán es uno de los miembros más antiguos de la flota que administra Naviera Transoceánica. Construido en 1992 en Japón, es el único buque tanque con fondo doble de la flota. De bandera peruana y con una capacidad de carga segura de 40,432 toneladas de peso muerto (DWT), está considerado como un buque tanque de rango medio (Medium Range Tanker).

La función básica de un buque tanque es el transporte de productos de hidrocarburos líquidos y para este fin, dentro de la nave se cuenta con sistemas de bombas para la carga y descarga de los productos que transporta. En la Figura 2 se puede apreciar al Buque Tanque Huascarán fondeado en aguas territoriales

peruanas, durante operaciones normales de carga y transporte de hidrocarburos líquidos.



Figura 2. Buque tanque Huascarán
Fuente: Foto propia tomada en territorio marítimo peruano (2012)

1.3.3.1 Sala de bombas

Se denomina como Sala de Bombas al ambiente donde están localizadas físicamente las bombas de carga / descarga de productos (Cargo Pump Room). Debido a su localización, diseño y operación especial, la sala de bombas es considerado un Espacio Confinado; y debido a que se requiere su visita frecuente por personal, constituye un riesgo particular; por ello requiere de consideraciones y procedimientos especiales para su manejo.

Una Sala de Bombas típica contiene una concentración grande de líneas de carga de diversos diámetros y, por lo tanto, la presencia de fugas potenciales de producto de hidrocarburos en cualquier punto puede generar rápidamente una atmósfera inflamable o tóxica. Una Sala de Bombas puede contener también un número de fuentes potenciales de ignición a menos que un procedimiento formal y estructurado de mantenimiento, inspección y monitoreo sea llevado a cabo para minimizar los riesgos que estas fuentes implican.

Se debe tener particular cuidado en el escape de líquidos o vapores de hidrocarburos en la Sala de Bombas. Por esta razón es importante que se dé un adecuado mantenimiento a las líneas y bombas de carga con el fin de detectar y

rectificar cualquier fuga en el menor tiempo posible. Las líneas deben ser inspeccionadas visualmente y sujetas a pruebas de presión rutinarias con el fin de verificar su condición. En general todo factor susceptible de presentar fuga debe ser revisado periódicamente, tales como pernos, filtros, válvulas, mamparos, etc.

1.3.3.2 Seguridad en sala de bombas

a. Ventilación

Debido a la permanente presencia potencial de gases inflamables de hidrocarburos en una Sala de Bombas, la normativa internacional SOLAS (Capítulo II-2, Regla 4, 5.4) establece la necesidad de empleo de sistemas de ventilación mecánicos con el fin de mantener la atmósfera en condiciones seguras.

La Sala de Bombas debe ser constantemente ventilada durante las operaciones de carga y antes del ingreso de cualquier persona. Además, debe comprobarse el contenido de oxígeno en la atmósfera, así como la presencia de gases inflamables y tóxicos. Esto último se lleva a cabo con instrumentos portátiles de detección multigases. La ventilación deberá ser continua hasta que ya no requiera el ingreso de personal o hasta que las operaciones de carga hayan concluido.

b. Detección de gases inflamables

A pesar de seguir todas las recomendaciones para el manejo adecuado de la seguridad en una sala de bombas, el riesgo de fuga y por lo tanto de acumulación de gases inflamables siempre está presente. Muchas veces el factor humano abre una brecha en la seguridad o los instrumentos portátiles pueden fallar, por lo que se hace necesario un sistema que sea capaz de monitorear permanentemente la concentración de gases inflamables en este ambiente de trabajo. Por este motivo es que se considera la necesidad de un Sistema de Detección de Gases Inflamables Fijo (que se encuentre instalado y funcionando permanentemente) en el interior de la sala de bombas.

Debido a lo expuesto, la recomendación internacional SOLAS considera y especifica la necesidad de emplear un Sistema de Detección de Gases Inflamables Fijo en la sala de bombas. Esto se encuentra descrito en el Capítulo II-2:

Construcción – Protección, detección, extinción de incendios, Regla 4, 5.10
Protección de sala de bombas de carga:

5.10.1 En los buques tanque:

.3 se instalará un sistema para vigilar de forma continua la concentración de gases de hidrocarburos. Habrá puntos de muestreo o cabezales detectores situados en lugares adecuados a fin de que se puedan detectar fácilmente las fugas potencialmente peligrosas. Cuando la concentración de gases de hidrocarburos alcance un nivel preestablecido, que no será superior al 10% del límite inferior de inflamabilidad (10% LEL), se activará automáticamente un alarma audible y visual continua en la cámara de bombas (sala de bombas), en la cámara de mando de las máquinas (sala de máquinas), en la cámara de control de la carga (sala de carga) y en el puente de navegación para avisar al personal de que existe un peligro potencial (Organización Marítima Internacional, 2002).

1.3.4 Equipamiento estándar

Los buques tanque construidos con cierta antigüedad, en particular el B/T Huascarán (construido en 1992), fueron armados con sistemas de instrumentación disponibles en la época y de acuerdo a los requerimientos mínimos según los acuerdos internacionales, tales como el SOLAS.

De esta manera, el B/T Huascarán incluye dentro de su equipamiento, un sistema de detección de gases inflamables fijo para sala de bombas, el cual consta básicamente de detectores localizados en sala de bombas y una central de visualización y alarmas localizado en la sala de carga conocido como también como controlador de gases inflamables.

1.3.4.1 Descripción del sistema de detección de gases inflamables en el buque tanque Huascarán

El sistema original de detección de gases inflamables fijo que se instaló en el B/T Huascarán, fue fabricado por CROWCON Detection Instruments, Ltd. Naviera Transoceánica requirió inicialmente la revisión, calibración y certificación de dicho sistema, con el fin de cumplir con los procedimientos rutinarios de seguridad y calidad que exigen sus operaciones comerciales.

Se procedió inicialmente a hacer una revisión del sistema que se encontró instalado y evaluar el funcionamiento del mismo, para luego realizar la calibración del sistema, una vez que el mismo se encuentre operativo al 100%.

El sistema que se encontró constaba de lo siguiente:

1. Cinco detectores fijos de gas inflamable, modelo Flamgard-EXE, localizados en sala de bombas de popa.
2. Un detector de gas inflamable, modelo Flamgard-EXE, localizado en sala de bombas de proa.
3. Dos paneles de alarma modelo Gasmaster localizados en sala de carga
4. Alarmas repetidoras en sala de bombas, sala de máquinas y puente de navegación (las alarmas requeridas en la sala de carga están incluidas y forman parte de los mismos paneles de alarmas).

El arreglo de conexiones que se encontró era básicamente como se representa mediante el diagrama en la Figura 3. Los detectores de gas inflamable eran de tipo catalítico y tenían salidas de voltaje, proporcionales a la concentración de gas inflamable presente en cada punto. Las señales de voltaje eran enviadas a los paneles de alarma en la sala de carga. Debido a que cada panel de alarma tenía una capacidad máxima de cuatro señales, cuatro de los detectores en sala de bombas de popa enviaban su señal a uno de los paneles y se consideró un panel

adicional para recibir la señal del detector adicional de sala de bombas de popa y el detector de sala de bombas de proa.

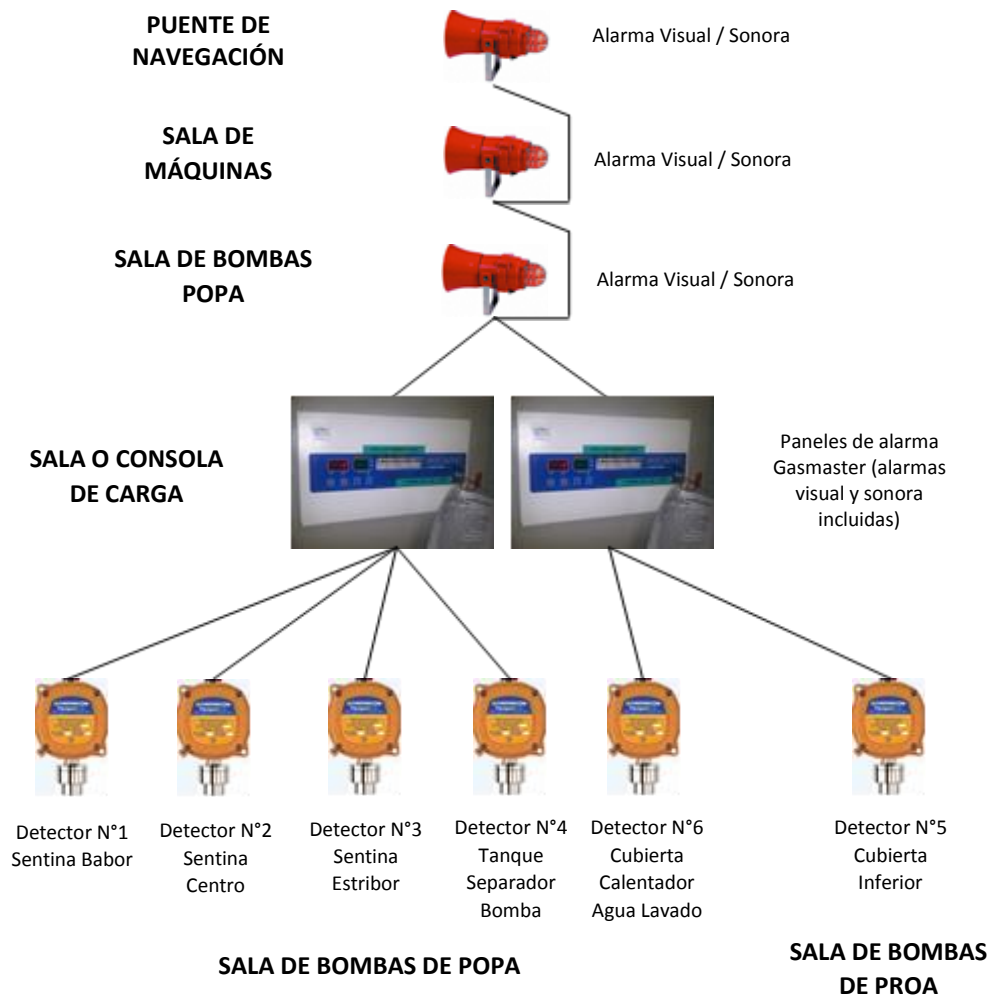


Figura 3. Sistema de detección de gases inflamables existente - buque tanque Huascarán
Fuente: Elaboración propia (Esquema general - 2010)

De acuerdo a las especificaciones del fabricante para operación segura, la conexión entre los detectores y el panel de alarmas fue realizada mediante barreras Zener, tal como se puede apreciar en la Figura 4, donde se muestra el diagrama típico de conexionado para diversas clases de detectores al panel de alarmas que se encontró instalado (Gasmaster).

DIAGRAM 3A - DETECTING HEAD CONNECTIONS (96HD, DI9, RGD90/TOXIC, OXYGEN)

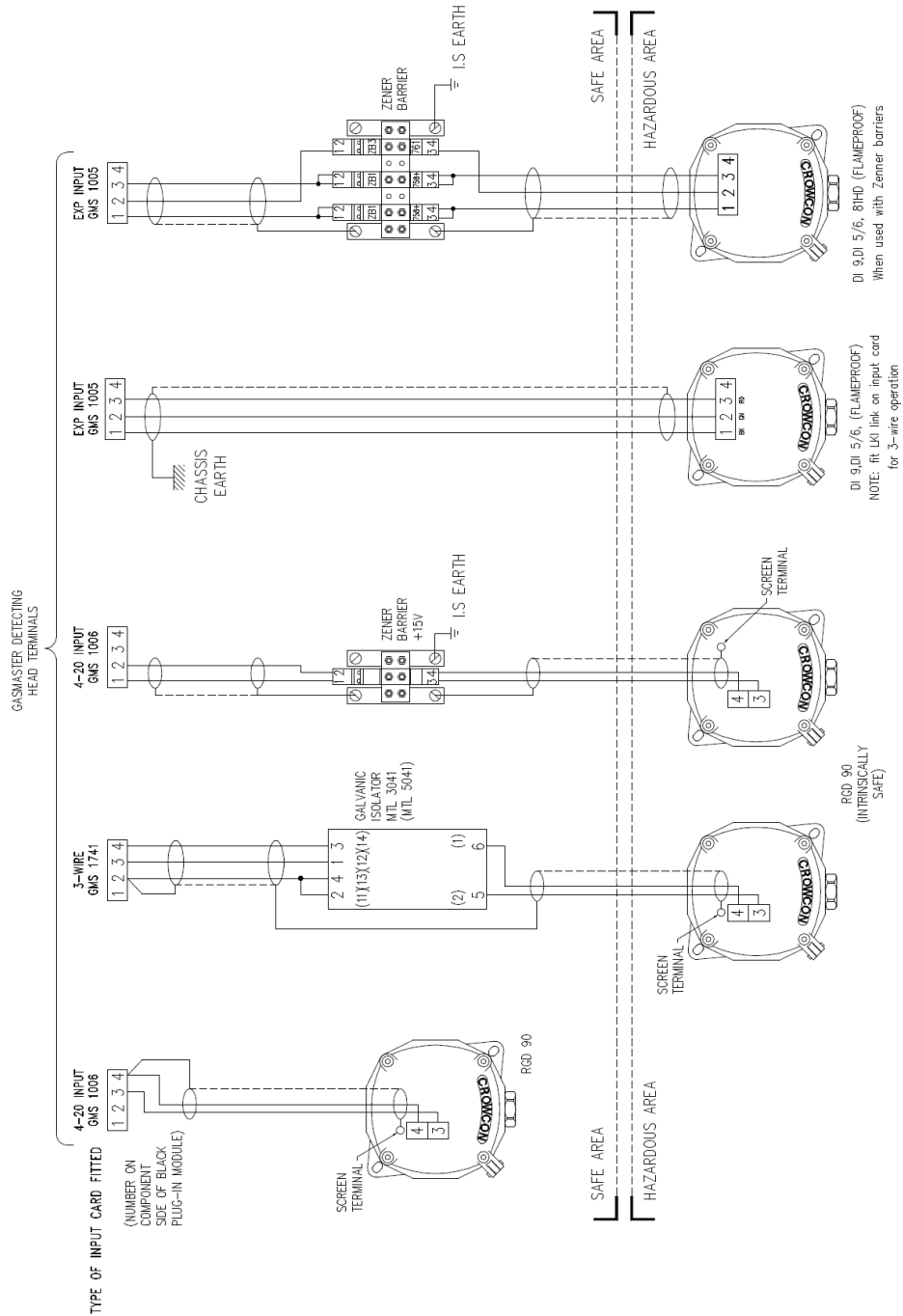


Figura 4. Diagramas de conexionado típicos para diferentes clases de detectores con panel Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2001). *Gasmaster Manual modified 071201.doc*

El primero de ellos corresponde al caso del detector que se encontró instalado a bordo (Flamgard-EXE), en el que se puede observar el uso de barreras Zener como interfaz entre el detector y el panel de alarma Gasmaster. Esto es necesario debido a que los detectores deben operar dentro de las salas de bomba, que son consideradas áreas peligrosas, mientras que el panel Gasmaster opera dentro de la sala de carga, que es un área segura.

El panel de alarmas Gasmaster era un sistema dedicado que ofrecía entre otras cosas, alarmas visuales y sonoras configurables, salidas tipo relé para el manejo de alarmas externas repetidoras, sistema de batería de respaldo en caso de corte de energía, test de funcionalidad, manejo de diversos tipos de sensores y señales de entrada, etc.

Durante el proceso de calibración del sistema, se presentaron dificultades debidas al tipo de señal de salida de los detectores empleados y a las características del controlador de gases. Debido a que los detectores empleados tienen salida de voltaje en el orden de los milivoltios, existe una pérdida producto de la caída de tensión a lo largo del cable que transporta la señal desde cada detector hasta el controlador de gases. Es por eso que, para la calibración de este sistema, se debe mantener comunicación entre el personal que manipula el detector en sala de bombas y el personal que realiza la lectura y ajuste la misma en el controlador, la cual se realiza normalmente con radios portátiles.

Se observó así mismo, que el empleo de las radios durante la calibración afectaba la lectura en el controlador, lo cual hacía muy difícil la calibración correcta, teniéndose que realizar varias comprobaciones bajo silencio de comunicaciones por radio. De hecho, se comprobó también, que cualquier comunicación por radio que se efectuaba cerca al controlador afectaba la lectura en el controlador, lo cual llegaba incluso a producir falsas alarmas, luego de haber calibrado el sistema.

Finalmente se determinó que el efecto de la variación en la lectura del controlador frente a las comunicaciones por radio, es producto de la interferencia electromagnética fuerte que causan las mismas, para lo cual el controlador no se encuentra debidamente preparado por ser de fabricación antigua.

1.4 Objetivos generales y específicos

1.4.1 Objetivo general

Modernizar el sistema tradicional de detección de gases inflamables a bordo del buque tanque Huascarán, para lo cual se efectuará el análisis de las tecnologías de detección disponibles y la selección de equipamiento, así como el planeamiento del reemplazo de los equipos existentes y la instalación, programación y puesta en marcha de los equipos que formarán parte del sistema moderno.

1.4.2 Objetivos específicos

- Determinar las condiciones inseguras de los detectores de gases inflamables por combustión catalítica y eliminar las mismas de ser posible, empleando detectores modernos, basados en el principio de absorción infrarroja.
- Eliminar los inconvenientes operativos del controlador de gases inflamables que forma parte del sistema de detección tradicional, empleando para ello, un controlador de fabricación moderna.
- Minimizar los costos de mantenimiento acumulados que presenta el sistema de detección tradicional por combustión catalítica, principalmente causados por el cambio frecuente de repuestos, empleando para ello, un sistema moderno de detección, basado en el principio por absorción infrarroja.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se ahonda en primer lugar, en la terminología y conceptos básicos que se emplean en el tema de explosividad que se manejarán en adelante y a continuación se revisarán los antecedentes históricos en la detección de gases inflamables.

Seguidamente, se revisarán a detalle las tecnologías de detección de gases inflamables por el principio de combustión catalítica y por el principio de absorción infrarroja. El estudio de estos principios es de suma importancia para entender y determinar las ventajas y desventajas que representan en el funcionamiento y seguridad del sistema de detección de gases inflamables.

Finalmente se determinará la hipótesis del presente estudio.

2.1 Definición de términos básicos

El desarrollo de toda la sección 2.1 está basada principalmente en la información tomada de HONEYWELL ANALYTICS (2013):

Es necesario conocer previamente, algunos conceptos básicos y preliminares involucrados con el tema de explosividad, con el fin de poder comprender mejor la necesidad del empleo de los equipos estudiados desde el punto de vista de la seguridad. Muchos de estos conceptos se manejan de forma rutinaria en la literatura y temas de seguridad laboral.

2.1.1 Espacios confinados

La definición de espacio confinado es de importancia para el caso que tratamos, pues estos tipos de ambientes abundan en un buque tanque, principalmente en las zonas de trabajo donde se requieren realizar la detección de gases inflamable, como son las salas de bombas.

Se define como espacio confinado a un espacio o ambiente cerrado con las siguientes características:

- En principio no está diseñado o no se pretende que sea ocupado normalmente por personas.
- Tiene una entrada o salida restringida según la ubicación, tamaño o medios disponibles.

Un espacio confinado puede representar un riesgo para la salud y seguridad de cualquier persona que entre debido a los siguientes factores:

- Su diseño, construcción, localización o atmósfera,
- Los materiales o sustancias que contiene,
- Las actividades de trabajo que se realizan en el espacio,
- Riesgos de seguridad, proceso y mecánicos presentes.

Se pueden encontrar espacios confinados en casi todos los ambientes de trabajo. Un espacio confinado no necesariamente puede ser pequeño, pese a lo que se indica en su nombre. Como ejemplos de espacios confinados tenemos a todo tipo de recinto tales como silos, tanques de almacenamiento de productos, cisternas, barriles, tolvas, bóvedas de seguridad, alcantarillas, tubos, pozos de acceso, camiones o carros tanque, alas de naves, etc. En general podría considerarse como espacio confinado cualquier ambiente cuyo acceso o salida se encuentren restringidos, como por ejemplo un dique o una zanja.

2.1.1.1 Riesgos en un espacio confinado

Los riesgos que se pueden encontrar dentro de un espacio confinado pueden incluir:

- Calidad de aire deficiente. Puede haber una cantidad insuficiente de oxígeno que lleve al trabajador finalmente a la muerte. La atmósfera puede contener, además, sustancias venenosas que produzcan enfermedades o pérdida del

conocimiento. En los espacios confinados la ventilación natural sola, muchas veces no es suficiente para mantener una calidad de aire respirable.

- Exposiciones químicas debido al contacto directo con la piel o por ingestión, así como la inhalación de aire contaminado.
- Riesgo de incendio o explosión. Es común encontrar atmósferas inflamables / explosivas debido al manejo de líquidos inflamables, gases o polvos combustibles que se acumulan en los espacios confinados, los cuales pueden llevar a un incendio o explosión si son encendidos.
- Procesos riesgosos, tales como el manejo de residuos químicos o la liberación de contenidos de una línea de suministros.
- Ruido.
- Partes mecánicas en movimiento tales como motores, ventiladores, brazos móviles, etc., riesgos estructurales, alambrados, etc.
- Radiación.
- Temperaturas altas, tanto atmosféricas como de superficies.
- Cambio o colapso de materiales a granel.
- Inundación producida por la falla de barreras de contención de productos.
- Energía no controlada que puede incluir shock eléctrico.
- Visibilidad.
- Riesgos biológicos.

Tal como se puede apreciar, los riesgos que se pueden encontrar en los espacios confinados son múltiples y casi siempre es necesario hacer un estudio de todos los factores que existen, con el fin de tomar las medidas adecuadas para mantener la seguridad de trabajo, sin embargo, para el caso que nos ocupa, nos centraremos en uno de los factores en particular: el riesgo de incendio o explosión.

2.1.2 Combustión

La combustión es una reacción química sencilla en la que intervienen el oxígeno y otra sustancia combustible, las cuales se combinan rápidamente y produce una liberación de energía. La energía que se produce durante esta reacción se da principalmente en forma de calor y a veces en forma de llamas o fuego. La sustancia de ignición o combustible es normalmente, aunque no siempre, un hidrocarburo o un derivado de éste, y puede presentarse en forma sólida, líquida o gaseosa. Como ejemplos tenemos las fibras textiles, carbón, papel, grasas, kerosene, alcohol, gas natural, acetileno, GNV, metano, etc.

Para el tema que tratamos en la presente exposición, nos centraremos principalmente en los gases y vapores derivados de hidrocarburos, debido a que son los que representan el mayor peligro latente en los espacios confinados dentro de las salas de bombeo en buques tanque, en donde suelen acumularse y por lo que representan un riesgo de explosión.

2.1.3 Triángulo del fuego

Un proceso de combustión se representa a menudo con el llamado triángulo del fuego. La razón de ello es que siempre se requieren tres factores para provocar una combustión, tal como se puede apreciar a continuación en la Figura 5:



Figura 5. Triángulo del fuego

Fuente: TEBMOR Formación en emergencias (2011). *Manual de naturaleza del fuego*

1. Una fuente de ignición o fuente de calor, que aporta la energía suficiente para disparar el proceso de combustión.
2. Oxígeno, el cual se encuentra presente permanentemente en la atmósfera o aire, salvo casos especiales donde se carezca del mismo.
3. Combustible, en este caso en forma de gas o de vapor. Como vimos antes, el combustible se refiere en este caso a hidrocarburos o sus derivados.

Determinados estos tres factores necesarios para que se produzca la combustión o fuego, es posible prevenir los riesgos de incendio teniendo como objetivo el eliminar al menos uno de estos tres elementos potencialmente peligrosos. Para el caso que nos ocupa, el objetivo será prevenir la presencia del elemento combustible, presente en la forma de gases inflamables.

2.1.4 Límites de inflamabilidad

Para el caso particular de los gases inflamables, el fuego o explosión sólo será posible cuando se produzca una concentración de gas / aire en una banda limitada. Esta banda es específica para cada tipo de gas y vapor combustible y está definida por dos límites: un límite explosivo superior (Upper Explosive Limit) o UEL; y un límite explosivo inferior (Lower Explosive Limit) o LEL.

La Figura 6 ilustra de manera gráfica el concepto de límites de inflamabilidad y señala la región donde hay peligro latente de que se produzca una explosión o incendio.

De acuerdo a la ilustración mencionada, cuando la concentración esté por debajo del LEL, no habrá suficiente gas combustible para producir una explosión (mezcla demasiado “pobre”); mientras que por encima del UEL, la mezcla no tendrá suficiente oxígeno (mezcla demasiado “rica”). De este modo, el peligro de explosión o fuego se da únicamente entre los límites del LEL y del UEL, para cualquier gas o mezcla de gas inflamable. Fuera de estos límites no es posible que se produzca la combustión.



Figura 6. Límites de inflamabilidad

Fuente: EMERSON Electric Co. (2017). *Tecnología de detección puntual de gas – Funcionamiento*

Es importante tener en cuenta que cada compuesto inflamable tiene sus propios valores límites de inflamabilidad, los cuales se deben tomar en cuenta al momento de seleccionar y calibrar el instrumento detector para conseguir una medición adecuada, así como para el ajuste conveniente de las alarmas.

Desde la Tabla 3 hasta la Tabla 6, se muestra una lista con los datos de gases y compuestos inflamables más conocidos y sus valores límites. Los valores indicados son para condiciones normales de presión y temperatura. El aumento de

la presión, temperatura o contenido de oxígeno puede ampliar el rango de inflamación.

Se debe tomar en cuenta que los valores de UEL y LEL se expresan en % de volumen con respecto al contenido de aire. Por ejemplo, para el caso del metano, el LEL (límite de inflamabilidad inferior) es de 5.3% en volumen, lo que significa que bastará que se encuentre presente una concentración de 5.3% de metano en volumen de aire para que la mezcla sea inflamable, lo que constituye un riesgo latente de explosión ante cualquier fuente posible de ignición, como una chispa, descarga eléctrica, etc.

Tabla 3. Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos

Compuesto	Fórmula	Límites de inflamabilidad [Vol. %]		
		inferior	superior	
Paraffin hydrocarbons	Hidrocarburos: Parafinas			
Methane	Metano	CH ₄	5,3	15
Ethane	Etano	C ₂ H ₆	3,0	12,5
Propane	Propano	C ₃ H ₈	2,2	9,5
Butane	Butano	C ₄ H ₁₀	1,9	8,5
Isobutane	Isobutano	C ₄ H ₁₀	1,8	8,4
Pentane	Pentano	C ₅ H ₁₂	1,5	7,8
Isopentane	Isopentano	C ₅ H ₁₂	1,4	7,6
2,2-Dimethylpropane	2,2 Dimetil propano	C ₅ H ₁₂	1,4	7,5
Hexane	Hexano	C ₆ H ₁₄	1,2	7,5
Heptane	Heptano	C ₇ H ₁₆	1,2	6,7
2,3-Dimethylpentane	2,3 Dimetil pentano	C ₇ H ₁₆	1,1	6,7
Octane	Octano	C ₈ H ₁₈	1,0	6,0
Nonane	Nonano	C ₉ H ₂₀	0,8	---
Decane	Decano	C ₁₀ H ₂₂	0,8	5,4
Olefins	Hidrocarburos: Olefinas			
Ethylene	Etileno	C ₂ H ₄	3,1	32,0
Propylene	Propileno	C ₃ H ₆	2,4	10,3
Butene-1	1-Butano	C ₄ H ₈	1,6	9,3
Butene-2	2-Butano	C ₄ H ₈	1,8	9,7
Amylene	Amileno	C ₅ H ₁₀	1,5	8,7

Acetylenes	Acetilenos			
Acetylene	Acetileno	C_2H_2	2,5	80,0
Aromatics	Hidrocarburos: Aromáticos			
Benzene	Benceno	C_6H_6	1,4	7,1
Toluene	Tolueno	C_7H_8	1,4	6,7
O-Xylene	Orto Xileno	C_8H_{10}	1,0	6,0
Turpentine	Turpentina	$C_{10}H_{16}$	0,8	---
Isoamyl alcohol	Alcohol isoamflico	$C_5H_{12}O$	1,2	---

Fuente: Corporación TEXCA, C.A. (1999). *Seguridad intrínseca*

Tabla 4. Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)

Compuesto	Fórmula	Límites de inflamabilidad [Vol. %]		
		inferior	superior	
Alcohols	Hidrocarburos: Alcoholes			
Methyl alcohol	Alcohol metílico	CH ₄ O	7,3	36,0
Ethyl alcohol	Alcohol etílico	C ₂ H ₆ O	4,3	19,0
Allyl alcohol	Alcohol alílico	C ₃ H ₆ O	2,5	18,0
n-Propyl alcohol	Alcohol n-propílico	C ₃ H ₈ O	2,1	13,5
Isopropyl alcohol	Alcohol isopropílico	C ₃ H ₈ O	2,0	12,0
n-Butyl alcohol	Alcohol n-butílico	C ₄ H ₁₀ O	1,4	11,2
Amyl alcohol	Alcohol amílico	C ₅ H ₁₂ O	1,2	---
Isoamyl alcohol	Alcohol isoamílico	C ₅ H ₁₂ O	1,2	---
Aldehydes	Aldehídos			
Acetaldehyde	Acetaldehído	C ₂ H ₄ O	4,1	57,0
Crotonic aldehyde	Crotón aldehído	C ₄ H ₆ O	2,1	15,5
Furfural	Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	2,1	---
Paraldehyde	Paracetaldehído	C ₆ H ₁₂ O ₃	1,3	---
Ethers	Éteres			
Diethyl ether	Dietyl éter	C ₄ H ₁₀ O	1,9	48,0
Divinyl ether	Divinil éter	C ₄ H ₆ O	1,7	27,0
Ketones	Cetonas			
Acetone	Acetona	C ₃ H ₆ O	3,0	13,0
Methylethyl Ketone	Metil etil cetona	C ₄ H ₈ O	1,8	10,0
Methylpropyl Ketone	Metil propil cetona	C ₅ H ₁₀ O	1,5	8,0
Methylbutyl Ketone	Metil butil cetona	C ₆ H ₁₂ O	1,3	8,0
Acids	Ácidos			
Acetic acid	Ácido Acético	C ₂ H ₄ O ₂	5,4	---
Hydrocyanic acid	Ácido Hidrociánico	HCN	5,6	40,0
Esters	Ésteres			
Methyl formate	Formiato de Metilo	C ₂ H ₄ O ₂	5,9	22,0
Ethyl formate	Formiato de etilo	C ₃ H ₆ O ₂	2,7	16,4
Methyl acetate	Acetato de Metilo	C ₃ H ₆ O ₂	3,1	16,0
Ethyl acetate	Acetato de Etilo	C ₄ H ₈ O ₂	2,5	9,0
Propyl acetate	Acetato de propilo	C ₅ H ₁₀ O ₂	2,0	8,0
Isopropyl acetate	Acetato de Isopropilo	C ₅ H ₁₀ O ₂	1,8	8,0
Butyl acetate	Acetato de butilo	C ₆ H ₁₂ O ₂	1,7	7,6
Amyl acetate	Acetato de Amilo	C ₇ H ₁₄ O ₂	1,1	---

Fuente: Corporación TEXCA, C.A. (1999). *Seguridad intrínseca*

Tabla 5. Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)

Compuesto	Fórmula	Límites de inflamabilidad [Vol. %]		
		inferior	superior	
<i>Inorganic</i>	<i>Inorgánicos</i>			
Hydrogen	Hidrógeno	H ₂	4,0	75,0
<i>Carbon monoxide+water</i>	<i>Monóxido de Carbono</i>			
vapor at 18 oC	+ vapor de agua (18 °C)	CO	12,5	74,0
Ammonia	Amoniaco	NH ₃	15,0	28,0
<i>Cyanogen</i>	<i>Cianógeno</i>			
		C ₂ N ₂	6,0	32,0
<i>Oxides</i>	<i>Óxidos</i>			
Ethylene oxide	Óxido de Etileno	C ₂ H ₄ O	3,0	80,0
Propylene oxide	Oxido de Propileno	C ₃ H ₆ O	2,0	22,0
Dioxan	Dioxano	C ₄ H ₈ O ₂	2,0	22,0
<i>Sulfides</i>	<i>Sulfuros</i>			
Carbon disulfide	Disulfuro de Carbono	CS ₂	1,2	44,0
Hydrogen sulfide	Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	4,3	45,0
Carbon oxysulfide		COS	12,0	29,0
<i>Chlorides</i>	<i>Cloruros</i>			
Methyl chloride	Cloruro de Metilo	CH ₃ CL	10,7	17,4
Ethyl chloride	Cloruro de Etilo	C ₂ H ₅ CL	3,8	14,8
Propyl choride	Cloruro de Propilo	C ₃ H ₇ CL	2,6	11,1
Butyl chloride	Cloruro de Butilo	C ₄ H ₉ CL	1,8	10,1
Isobutyl chloride	Cloruro de Isobutilo	C ₄ H ₉ CL	2,0	8,8
Allyl chloride	Cloruro de Alilo	C ₃ H ₅ CL	3,3	11,1
Amyl chloride	Cloruro de Amilo	C ₅ H ₁₁ CL	1,6	8,6
Vinyl chloride	Cloruro de Vinilo	C ₂ H ₃ CL	4,0	22,0
Ethylene dichloride	Dicloruro de Etileno	C ₂ H ₄ CL ₂	6,2	16,0
Propylene dichloride	Dicloruro de Propileno	C ₃ H ₆ CL ₂	3,4	14,5
<i>Bromides</i>	<i>Bromuros</i>			
Methyl bromide	Bromuro de Metilo	CH ₃ Br	13,5	14,5
Ethyl bromide	Bromuro de Etilo	C ₂ H ₆ Br	6,7	11,3
Allyl bromide	Bromuro de Alilo	C ₃ H ₅ Br	4,4	7,3

Fuente: Corporación TEXCA, C.A. (1999). *Seguridad Intrínseca*

Tabla 6. Límites de inflamabilidad típicos de compuestos químicos (continuación)

Compuesto	Fórmula	Límites de inflamabilidad [Vol. %]		
		inferior	superior	
<i>Amines</i>	<i>Aminas</i>			
Methyl amine	Metil amina	CH ₅ N	4,9	20,7
Ethyl amine	Etil amina	C ₂ H ₇ N	3,5	14,0
Dimethyl amine	Dimetil amina	C ₂ H ₇ N	2,8	14,4
Propyl amine	Propil amina	C ₃ H ₉ N	2,0	10,4
Diethyl amine	Dietil amina	C ₄ H ₁₁ N	1,8	10,1
Trimethyl amine	Trimetil amina	C ₃ H ₉ N	2,0	11,6
Triethyl amine	Trietil amina	C ₆ H ₁₅ N	1,2	8,0

Fuente: Corporación TEXCA, C.A. (1999). *Seguridad intrínseca*

En aplicaciones industriales promedio, las fugas de gas generalmente generan niveles pequeños de concentración en zonas circundantes debido a su característica volátil. Por ello, solo será necesario un sistema de detección precoz para rastrear límites desde cero hasta el límite explosivo inferior (LEL). De hecho, por cuestiones de seguridad debe evitarse llegar al LEL, que es cuando el peligro se encuentra inminente. Es por esta razón que, para la mayoría de sistemas de detección de gases inflamables, es suficiente que éstos puedan trabajar en el rango de 0 a 100% LEL. En términos de seguridad es preferible que la presencia de gases inflamables sea detectada muy por debajo del 100% LEL, en puntos tales donde puedan primero dar señales de alarma, y segundo tomar acciones de contingencia, tales como cierre de válvulas, ventilación de espacios confinados, evacuación, etc.

2.2 Antecedentes y marco histórico

Como se mencionó en el capítulo anterior, el concepto de seguridad a bordo de los transportes marítimos en general, nace a partir de la primera versión del SOLAS, que surgió en el año de 1914 a raíz de la catástrofe mundialmente conocida del trasatlántico RMS Titanic, que lamentablemente cobró muchas vidas humanas.

A partir de entonces, el SOLAS ha ido cambiando y adaptándose a lo largo de los años, incluyendo dentro de sus normas a los diferentes tipos de embarcaciones

existentes hasta la actualidad, entre los que se encuentran los buques tanque que transportan cargamentos inflamables.

Particularmente el SOLAS menciona la exigencia de un sistema de detección de gases inflamables a bordo, en su Capítulo II-2 – Construcción – Prevención, detección y extinción de incendios.

En la actualidad el SOLAS constituye un estándar de seguridad que siguen todos los operadores de transporte de combustibles líquidos en el mundo. Los cuales basan en dicho estándar sus políticas de seguridad y operación, como es el caso de Naviera Transoceánica.

Históricamente, los primeros métodos de detección de gases inflamables empleados se basaron en el empleo de animales como canarios, que son más sensibles que los humanos ante la presencia de metano, CO y bajos niveles de oxígeno. También eran usadas lámparas de seguridad, en las cuales, la magnitud de la llama observada indicaba la presencia de gas inflamable, mientras que una llama pequeña indicaba un nivel reducido de oxígeno.

El principio de combustión catalítica para la detección de gases inflamables fue desarrollado en la década de 1920 por el Dr. Oliver Johnson, ante la necesidad de un método para prevenir explosiones en tanques de almacenamiento de crudo y buques transportadores de gasolina. Luego de un modelo inicial de prueba, se crea el primer detector práctico de gases inflamables Model B (Figura 7), producido por Johnson cuando trabajaba en Standard Oil Co. de California (hoy Chevron). Posteriormente Johnson formó la compañía J-W Instruments y desarrollaron el Model C en 1929 (Figura 8), más ligero y compacto que su predecesor. A partir de entonces aparecieron otras compañías que desarrollaron modelos más modernos, tales como MSA (Figura 9) y la japonesa Riken Keiki Company Ltd., que desarrollo un detector basado en el principio de la difracción de la luz (1925 a 1927), conocido como interferómetro (Figura 10). Es así que, a partir de los desarrollos iniciales, el principio de combustión catalítica fue adoptado por diversos fabricantes para la mayoría de aplicaciones industriales, incluyendo la industria de petróleo y gas, en la que se sigue empleando hasta hoy, con instrumentos más compactos y que ofrecen otras ventajas producto de la electrónica usada.



Figura 7. Monitor de LEL Model B (1927)
Fuente: RKI Instruments (2006). *Gas detection history*



Figura 8. Monitor de LEL Model C (1929)
Fuente: RKI Instruments (2006). *Gas detection history*



Figura 9. Explosímetro desarrollado por MSA (1935)
Fuente: RKI Instruments (2006). *Gas detection history*

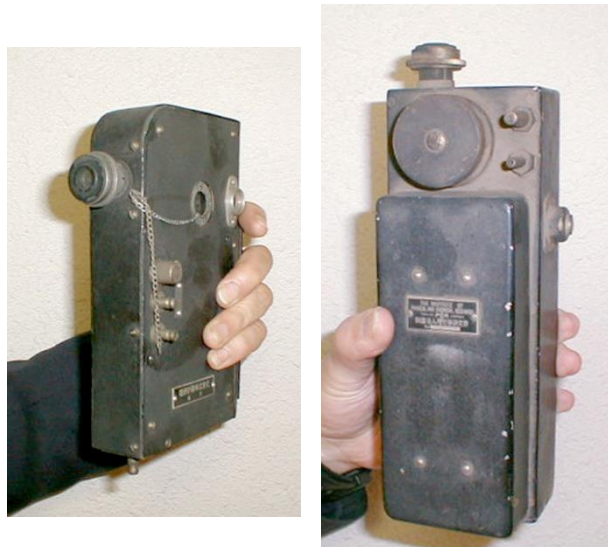


Figura 10. Interferómetros desarrollados por Riken Keiki Co. Ltd. (1925)
Fuente: RKI Instruments (2006). *Gas detection history*

La tecnología de detección por absorción infrarroja aparece a partir de la necesidad de métodos más eficientes para la medición de concentración de gases inflamables. Si bien en cierto que la radiación infrarroja fue descubierta por el año 1800, es recién en el 1878 que se inventa el primer detector de radiación infrarroja, conocido como bolómetro (Figura 11), que fue aplicado a la astronomía. La aplicación de la radiación infrarroja como método para determinar la concentración de determinados elementos químicos (espectrometría) es desarrollada recién hace unas pocas décadas, para lo cual el equipamiento era voluminoso y bastante caro. En paralelo con el constante desarrollo de los semiconductores, en 1984 sale al mercado el primer detector de gases inflamables por absorción infrarroja, diseñado y producido comercialmente por la firma noruega Simonsen Radio (SIMRAD) Optronics, especializada en optoelectrónica, el cual se muestra en la Figura 12. Precisamente, el empleo principal de estos detectores, fue destinado para aplicaciones petroleras, a bordo de embarcaciones de transporte de hidrocarburos y plataformas off-shore de extracción de crudo, para los cuales el equipo debía soportar las exigencias de funcionamiento y operación en ambientes hostiles que se dan normalmente en este tipo de usos. Por esa misma razón el diseño ofrecía el menor mantenimiento posible y alta garantía frente a otras tecnologías de detección tradicionales tales como la catalítica.

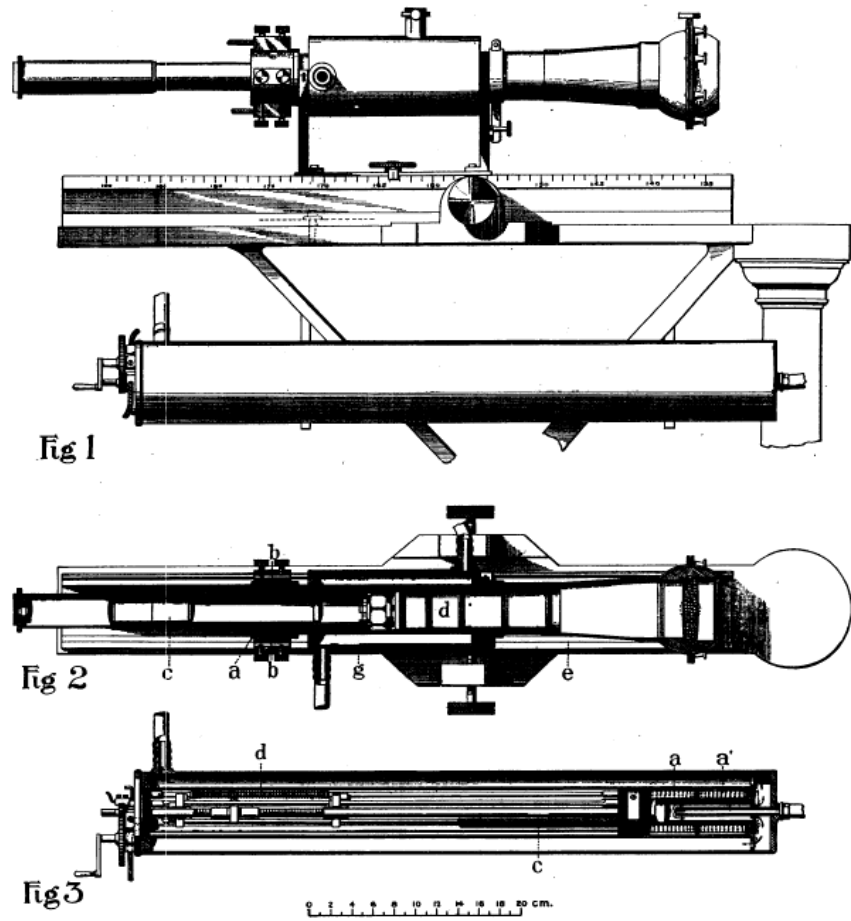


Figura 11. Esquema de bolómetro empleado de 1896 a 1898
 Fuente: Langley, S. P. (1900). *Annals of the astrophysical observatory of the Smithsonian Institution*



Figura 12. Detector IR de gases inflamables Modelo GD100 - SIMRAD
 Fuente: SIMRAD Optronics (2000). *SIMRAD IR point gas detector*

Los detectores de gases inflamables por absorción infrarroja se han seguido desarrollando a partir de entonces, mejorando las prestaciones de los equipos en cuanto a tamaño, simplicidad, comunicaciones, etc., así como disminuyendo sus costos, pero manteniendo el mismo principio de detección.

2.2.1 Ejemplos de aplicaciones recientes similares

La tecnología de detección de gases inflamables por absorción infrarroja se ha ido estandarizando en los últimos años en aplicaciones donde normalmente se presentan concentraciones muy altas de gases de hidrocarburos y donde se requiere el mínimo de atención por mantenimiento.

A continuación, se citan cinco ejemplos de aplicaciones cuyos equipos han sido suministrados por la compañía norteamericana Sensor Electronics Corporation.

Planta de Extracción y Producción de Crudo Alpine, Norte de Alaska – ConocoPhillips

(SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Publicaciones*. Recuperado de: https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=1646889485344537&id=208213815878785)

Como parte de sus sistemas de seguridad en planta, las operaciones de Alaska de ConocoPhillips han empleado medición de gases inflamables como estándar, con más de 300 puntos fijos de detección. Desde agosto del 2017, se han reemplazado los medidores existentes por detectores de tecnología infrarroja, calibrados para gas propano y metano.

El reemplazo de los nuevos detectores resultó en la reducción de frecuencia de cambio de los mismos, debido a su baja tasa de fallos en operación. Esto se tradujo además en un ahorro considerable de horas hombre y la disminución de pérdidas de tiempo valioso de producción de crudo.

Desde el reemplazo de los detectores infrarrojos de Sensor Electronics, ConocoPhillips ha tenido como resultado cero fallas o pérdidas de tiempo de producción por este factor operativo.

Instalaciones de Mantenimiento de Flota de Transporte por CNG, en Bolivia, Carolina del Norte – Waste Industries

(SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Press Release*. Recuperado de: https://www.sensorelectronics.com/news.php?news_id=42)

Los vehículos de transporte de Waste Industries operan a base de gas natural comprimido (CNG). Debido a ello, los reglamentos de seguridad requieren que los edificios donde se les dan mantenimiento, empleen detectores de gases combustibles, con el fin de monitorear y proteger al personal de las instalaciones en caso de presentarse fugas de CNG en los vehículos dentro de los garajes de mantenimiento.

En julio del 2018, Sensor Electronics suministró un sistema de detección de gases inflamables con sensores infrarrojos, el cual se calibró, probó y verificó para un correcto funcionamiento en caso de fugas de gas. Como ventaja frente a los sistemas convencionales de detección de gases inflamables, los detectores infrarrojos que se instalaron, sólo necesitan ser calibrados cada doce meses, frente a una frecuencia típica de tres meses necesarios para los detectores por combustión catalítica.

Áreas de Mantenimiento, Lavado y Almacenamiento de Flota de Vehículos a CNG, en Indiana, Pensilvania – IndiGO (Transporte Público de Indiana)

(SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Publicaciones*. Recuperado de: https://www.facebook.com/permalink.php?story_fbid=2048408148526000&id=208213815878785)

Sensor Electronics instaló en julio del 2018, un sistema para la detección de gases inflamables, el cual monitorea en catorce puntos, la presencia de gas metano para detectar posibles fugas de gas en los vehículos a CNG de la flota. Los detectores se instalaron en las áreas de mantenimiento, almacenamiento y lavado de las unidades de transporte, y se ha ajustado de manera que, a una concentración de 20% LEL se anuncie el evento mediante una alarma visual y sonora, se enciendan los extractores, se abran las puertas de las instalaciones y se llame por teléfono a la compañía de seguridad.

De manera similar, los compresores de CNG que forman parte la estación de servicio para los vehículos de IndiGO, están equipados con detectores infrarrojos de gas metano, para dar aviso en caso de posibles fugas.

La importancia de la seguridad contra posibles fugas de gases inflamables en ambientes peligrosos, hacen necesario que se emplee la tecnología robusta por absorción infrarroja para los detectores empleados.

Edificios de Almacenamiento y Mantenimiento Vehicular a CNG, en Allentown, Pensilvania – LANTA (Transporte Público de LEHIGH & NORTHAMPTON)

(SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Press Release*. Recuperado de: https://www.sensorelectronics.com/news.php?news_id=36)

LANTA requería instalar un sistema de detección de gases combustibles en sus edificios en Allentown, donde se realiza el almacenamiento y mantenimiento de su flota vehicular a CNG. En marzo del 2018, Sensor Electronics les suministra un sistema de 18 puntos por detección infrarroja, para posibles fugas de combustible en las unidades dentro de sus instalaciones. El sistema se configuró de manera que al detectarse concentraciones de 20% LEL se activan las alarmas visuales y audibles, se encienden los extractores, se abran las puertas y se llama a la compañía de seguridad. El edificio también tiene en su interior, cuatro compresores de CNG con sensores infrarrojos de metano para la detección de posibles fugas operativas.

Instalaciones de Servicio de Mantenimiento Vehicular a CNG, en Lynchburg, Virginia – Frito Lay

(SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Press Release*. Recuperado de: https://www.sensorelectronics.com/news.php?news_id=39)

Frito Lay ha convertido su flota de vehículos de transporte de combustible diésel a CNG. Por dicha razón, parte del edificio de mantenimiento para las unidades a CNG requiere una mejora en su equipamiento. Los sistemas de detección de gases combustibles en las instalaciones donde se maneja CNG deben cumplir con el estándar UL 2017 y los detectores deben cumplir con el estándar UL 2075.

El sistema electrónico de detección de gas metano suministrado por Sensor Electronics en marzo del 2018, cumple y excede todos los requisitos de las normas indicadas. Los detectores infrarrojos suministrados son compatibles con UL 2075 y el panel de control HMI SEC 3500 instalado cumple con la norma UL 2017.

2.3 Estructura teórica

2.3.1 Estudio de la tecnología de detección por combustión catalítica

El desarrollo de toda la sección 2.3.1 está basada principalmente en el trabajo de Chou (1999):

Los sensores catalíticos son usados para la detección de gases combustibles en general. Estos sensores tienen un diseño simple y son fáciles de fabricar, y consistían inicialmente en su forma más básica, de una bobina de platino; pero no eran adecuados para una operación prolongada, debido a que requerían un consumo elevado de energía y tenían una excesiva desviación del cero. Podemos observar un par de ejemplos de este tipo de sensores de gas a continuación, en la Figura 13:

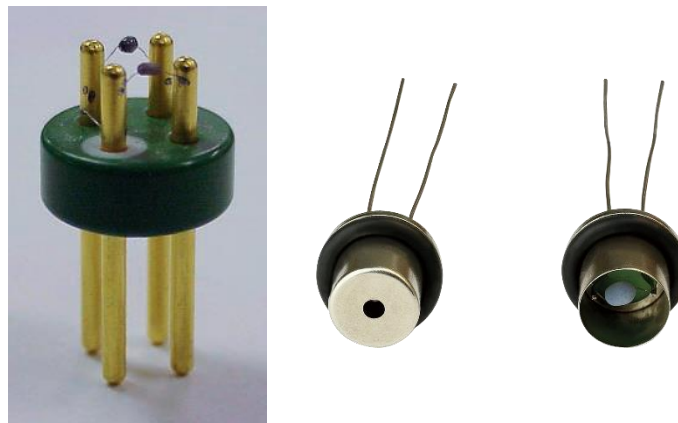


Figura 13. Ejemplos de sensores catalíticos de gases inflamables típicos

Fuente 1: Chou, J. (1999). Chapter 3 Catalytic combustible gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Fuente 2: PEWATRON AG (2018). *Gas sensor modules VQ21TB*

Los sensores catalíticos actualmente son producidos en todo el mundo por diferentes fabricantes, pero el desempeño y confiabilidad de ellos varía, según las

características particulares de cada tipo, de acuerdo al empleo al que van a estar destinados. Por ejemplo, existen sensores especiales, resistentes al envenenamiento, sensores de bajo consumo de energía, etc.

2.3.1.1 Principio de operación

Según el principio de la combustión, una mezcla de gas combustible no se encenderá mientras no alcance una temperatura de ignición, sin embargo, en presencia de cierto ambiente químico, el gas empezará a quemarse a temperaturas más bajas. Este fenómeno es lo que se conoce como combustión catalítica.

Cuando el sensor catalítico se encuentra en presencia de gas combustible, las moléculas de gas se oxidan (se queman) en la superficie del sensor a una temperatura mucho menor que la temperatura normal de ignición. A medida que se produce la combustión en el sensor, su temperatura varía y por lo tanto también su conductividad eléctrica. Todo material cambia su conductividad a medida que la temperatura cambia, y esto se representa con el coeficiente de temperatura de resistencia (Ct) y se expresa en el porcentaje de cambio por variación de grado de temperatura.

El platino tiene un Ct grande en comparación con otros metales. Además, su Ct es lineal entre 500°C a 1000°C, que es el rango de temperatura en el cual el sensor requiere operar. Ya que la señal producida por el sensor será lineal, podemos obtener una señal eléctrica directamente proporcional a la concentración del gas. Esto mejora la precisión y simplifica la electrónica adicional requerida para obtener la lectura de la concentración. Por otra parte, el platino posee excelentes propiedades mecánicas, es físicamente fuerte y puede ser transformado en hilos muy finos que pueden ser convertidos en sensores pequeños en forma de perlas o cápsulas (catalytic bead sensor, pellistor). El platino tiene, además, buenas propiedades químicas, es resistente a la corrosión y puede funcionar a temperaturas elevadas por periodos largos sin cambiar sus propiedades físicas, lo que lo hace capaz de producir una señal confiable en un periodo largo de tiempo.

Para poder medir la señal de salida que genera un sensor catalítico, se emplea el circuito eléctrico conocido como *punte de Wheatstone*, el cual es empleado en

muchos instrumentos de medición industrial para determinar la señal que es generada por sensores resistivos. De este modo y tal como se puede apreciar en la Figura 14, la fuente de energía se coloca entre dos esquinas opuestas y en las dos esquinas restantes opuestas se conecta el circuito de medición de salida.

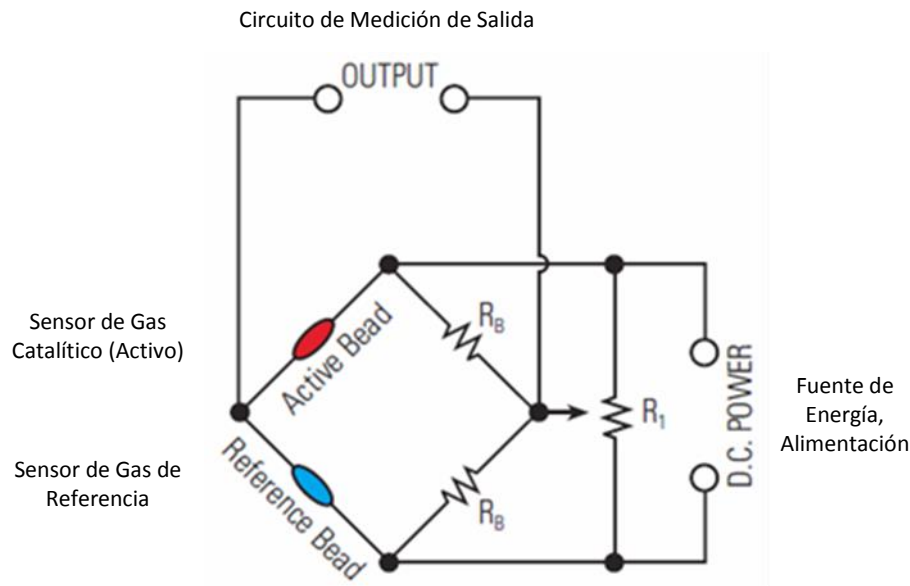


Figura 14. Puente de Wheatstone para medición de señal de salida de sensor catalítico
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 3 Catalytic combustible gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Para efectos de operación, R_1 es una resistencia variable que mantiene el puente balanceado, con lo cual no tiene señal de salida. Las resistencias R_B y R_1 se seleccionan con valores relativamente altos con el fin de asegurar el funcionamiento apropiado del circuito. Cuando el gas combustible se quema en la superficie activa del sensor, se produce un cambio en la resistencia del sensor. Mientras el puente está desbalanceado, la desviación de voltaje se mide como la señal en el circuito de medición. El empleo del sensor de referencia (sensor de compensación) provee la inmunidad a los cambios de temperatura y humedad del medio ambiente. Es de suma importancia que el sensor de referencia mantenga una resistencia constante durante la presencia del gas a medir, de otro modo la señal de salida será imprecisa.

2.3.1.2 Evolución y construcción

Los primeros sensores de gases inflamables eran filamentos de platino en forma de bobina que eran usados de ese modo para obtener un diseño compacto, eficiencia en el calentamiento y para producir una señal fuerte y funcionar como sensor de gas, sin embargo, este tipo de construcción era un catalizador pobre e inestable.

Una de las formas de mejorar la estabilidad del sensor es recubrir la bobina de platino con óxidos metálicos adecuados o catalizadores. Por lo tanto, en la etapa final se trata al sensor con un catalizador, tal como compuestos de platino, paladio u óxido de torio. El catalizador empleado es crítico para la precisión y vida útil del sensor, y determina el rango de gases combustibles que el sensor puede detectar. Como regla general, el área total del sensor no queda catalíticamente activa y por lo tanto la reacción de oxidación ocurre solo en ciertos puntos de la superficie. Para la fabricación de los sensores, se debe escoger y amoldar el material catalizador de tal manera que se maximice el número de puntos activos.

En la Figura 15 podemos observar una foto típica de un sensor de gases inflamables catalítico en el que se aprecia el pellistor como su parte central y a su derecha, en una vista ampliada, un esquema de la estructura interna del mismo en la que se indican sus partes principales, tales como el catalizador, el hilo de platino y el soporte de alúmina.

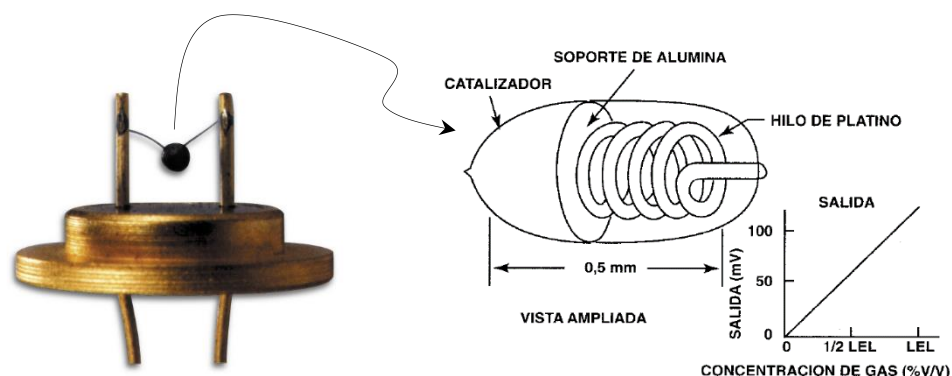


Figura 15. Estructura interna típica de un sensor catalítico

Fuente 1: HONEYWELL ANALYTICS (2009). Catalytic bead gas detectors, *Honeywell Gas Detection*

El uso de un diámetro fino para el filamento, no solo reduce el tamaño del sensor, sino que también permite incrementar la magnitud de la señal, ya que mientras más fino sea el filamento, más alta será la resistencia y por lo tanto la señal de salida aumentará. Esto reduce, además, el consumo de energía.

El sensor de referencia puede ser construido de la misma forma que el sensor activo, con la excepción que el químico catalizador es eliminado. Luego puede ser recubierto adicionalmente con químicos como el potasio, por ejemplo, para prevenir la reacción con el gas. De este modo se consigue un par de sensores casi perfectamente compensados. Mediante este procedimiento es posible lograr un sensor estable, confiable, preciso y resistente, que tiene un tiempo de vida útil relativamente largo. Su salida es lineal debido al platino, que tiene un buen coeficiente de resistencia térmica lineal.

En la Figura 16 podremos apreciar ejemplos de encapsulamientos típicos de sensores de gas catalíticos, así como la representación de un corte transversal de los mismos, donde se puede identificar el sensor activo y el sensor de referencia contenidos en el mismo encapsulado.



Figura 16. Encapsulados típicos de sensores de gas catalíticos

Fuente 1: ALPHASENSE The Sensor Technology Company (2013). *Products – Pellistors*

Debido a que los sensores catalíticos son dispositivos de alto consumo y a que operan a una temperatura que podría producir la ignición del gas combustible, requieren que estén sellados detrás de un dispositivo arrestallamas (flame arrestor, sinter). Típicamente se instalan dentro de un encerramiento de acero inoxidable, y se montan en una caja de paso certificada Exd (a prueba de explosión). El sensor es conectado de esta manera a la fuente de alimentación y circuito de medición, que por lo general están en un ambiente seguro, mediante 3 o 4 cables conductores.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo de conexión eléctrica de un detector de gases inflamables catalítico de 3 hilos a un circuito de medición que normalmente se encuentra en una sala de control. En el diagrama se aprecian el sensor activo y el sensor de referencia. Para el arreglo de conexión que se muestra es muy importante considerar la distancia del cableado entre el sensor de gas y el circuito de medición, el cual no conviene que sea muy extenso debido a la resistencia que representa los tres hilos conductores. Así mismo se hace necesario la calibración en el circuito de medición con el cableado final a fin de poder tener la mayor precisión posible en la lectura de concentración de gases inflamables.

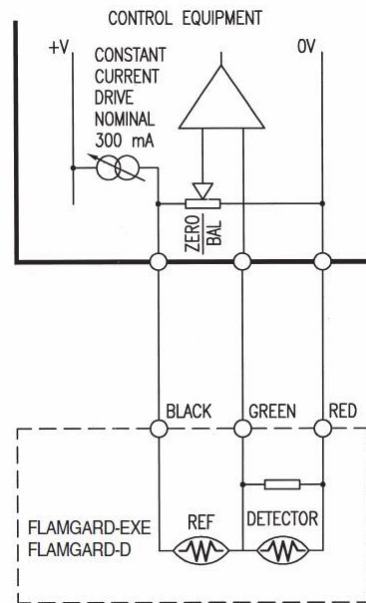


Figura 17. Conexión eléctrica de un detector de gas catalítico de 3 hilos
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2003). *Instructions Flamgard-EXE & Flamgard-D*

En la Figura 18 se muestra el diagrama constructivo del detector de gas inflamable encontrado a bordo del buque tanque Huascarán, en la revisión inicial realizada (Flamgard-EXE), así como el despiece la unidad principal, que incluye las partes típicas, como el pellistor, el cuerpo contenedor y el arrestallamas.

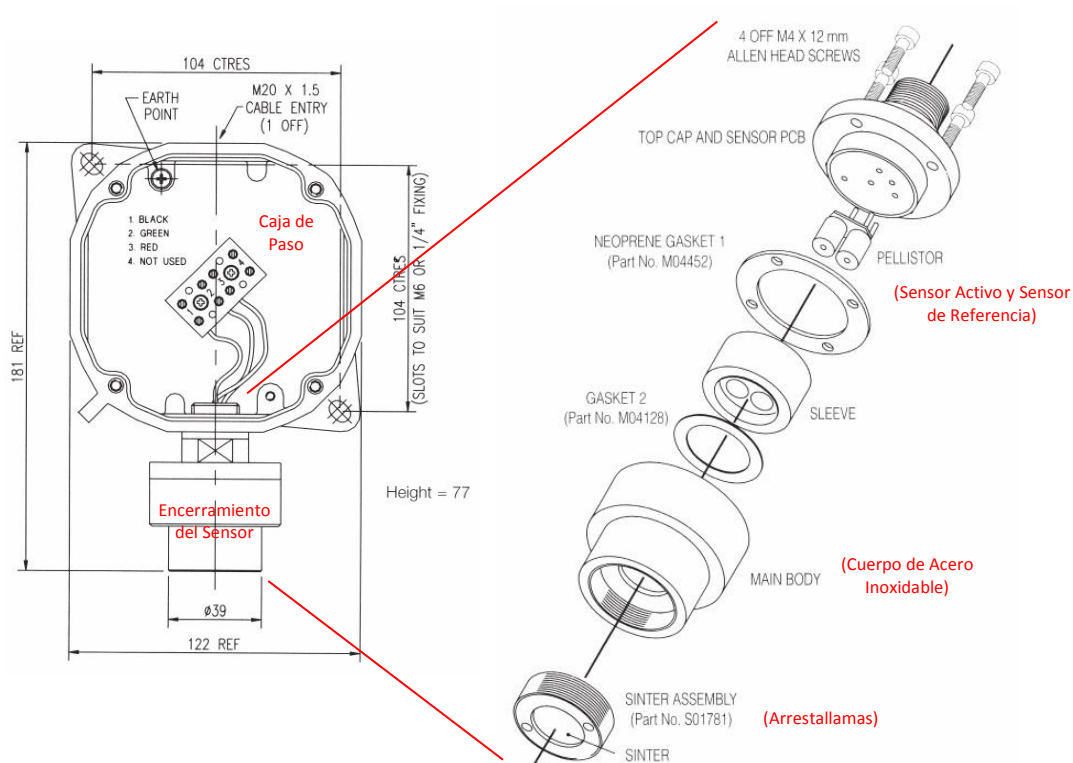


Figura 18. Estructura y despiece típico de un detector de gas inflamable
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2003). *Instructions Flamgard-EXE & Flamgard-D*

2.3.1.3 Características de operación

Como explicamos anteriormente, la señal de salida del instrumento es directamente proporcional a la tasa de oxidación que se produce en la superficie del sensor catalítico.

Para que un sensor catalítico detecte metano, su señal de salida deberá responder linealmente en el rango de 0 a 5% de concentración de metano en aire (lo cual corresponde al 100% LEL para el metano). A medida que la concentración alcanza el valor estequiométrico de 9%, la señal aumenta rápidamente y se maximiza alrededor del 10% de concentración. La señal entonces empieza a decaer lentamente a medida que la concentración pasa el valor de 20%, y luego cae en picada a un nivel de cero a medida que la concentración alcanza el 100%. Lo explicado se puede apreciar gráficamente a continuación en la Figura 19:

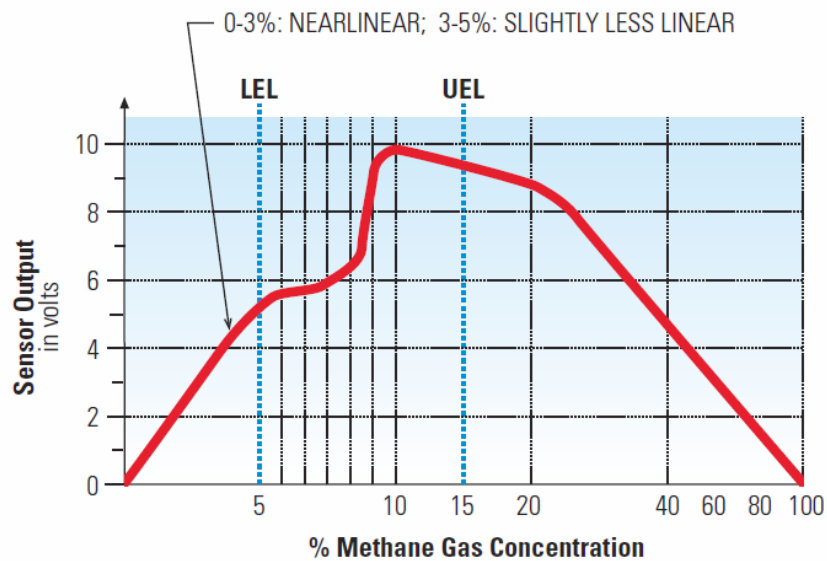


Figura 19. Señal de salida típica vs concentración de gas metano para un detector de gases catalítico
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 3 Catalytic combustible gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Del comportamiento descrito y observado se puede entender el por qué este tipo de tecnología es confiable solo en el rango de 0 a 5 % de concentración de gas metano (0 a 100% LEL). Más aun, las secciones de la curva que siguen caracterizan primero la no linealidad y luego el deterioro del sensor catalítico en el que éste pierde sensibilidad y finalmente se quema y queda inservible.

2.3.1.4 Factores importantes de funcionamiento

Hasta el momento hemos podido deducir y apreciar algunos factores importantes de funcionamiento de la tecnología de detección catalítica. En esta sección se mostrarán más a detalles los factores característicos de funcionamiento, que son muy importantes de conocer para aplicar este tipo de detectores de manera adecuada y segura.

a. Envenenamiento

Conocido también como envenenamiento catalítico, se refiere a la propiedad del sensor catalítico que tiene, de ser afectado por ciertos compuestos químicos que desactivan el sensor progresivamente, causando que el mismo vaya perdiendo sensibilidad y eventualmente deje de responder totalmente a la presencia de gases inflamables. La forma en que estos químicos envenenan al sensor se da cuando

poco a poco van cubriendo las regiones activas de la superficie catalítica del sensor. Los químicos más comunes que producen el envenenamiento de los sensores catalíticos son aquellos que contienen siliconas, tales como aceites y lubricantes comunes con aditivos de siliconas usados en ciertas maquinarias. Otros químicos que envenenan este tipo de sensores son los compuestos sulfurados que normalmente forman parte de algunos gases, metales pesados y cloruros.

La principal dificultad con esta característica operativa de los sensores catalíticos se da porque la causa exacta del envenenamiento normalmente es muy difícil de identificar. Algunos químicos en concentraciones reducidas pueden inclusive destruir totalmente el sensor, mientras que, en otros casos, el contenido de siliconas de compuestos tan comunes tales como lociones de manos o algunos aerosoles de pintura o limpieza, pueden causar problemas temporales en su funcionamiento.

Dentro de los compuestos que envenenan los sensores catalíticos tenemos también a los halógenos (Cl_2 , F_2 , Br_2) y compuestos polimerizadores tales como óxido de propileno y óxido de etileno. Estos normalmente limitan en gran medida, la vida útil del sensor, además de crear la necesidad de incrementar la frecuencia de las pruebas de funcionamiento y/o calibración, según se presente el riesgo de envenenamiento.

En la actualidad, muchos fabricantes producen sensores catalíticos con alta resistencia a la contaminación (poison resistant), que emplean elementos tales como filtros de carbón activado para impedir el paso de los agentes que producen el envenenamiento. Sin embargo, debe tenerse cuidado con el empleo de estos filtros, debido a que impiden la detección de muchos compuestos de hidrocarburos diferentes al metano y puede producir un incremento considerable en el tiempo de respuesta. Este tipo de filtros también puede verse afectado por la humedad atmosférica presente.

Otra técnica alternativa para reducir los efectos de envenenamiento es la operación eléctrica del sensor en modo intermitente, lo que se emplea más en los

detectores portátiles. Sin embargo, esto puede llevar consigo a que el sensor de una falsa respuesta, como por ejemplo al exponerse a una alta concentración de gases durante el apagado en el ciclo de operación. Por ello debe tenerse especial cuidado en la operación en estos casos particulares, en el modo de detección de fugas u operaciones similares.

Como norma siempre se deben revisar las especificaciones del fabricante con el fin de prevenir el envenenamiento en la operación del sistema de detección de gases inflamables. Así también debe tenerse en cuenta el ambiente donde se van a instalar y operar los detectores. Finalmente se debe capacitar al personal que realiza mantenimiento o que opera en las inmediaciones de los detectores con el fin de que minimicen las posibles causas de envenenamiento.

- **Inhibición**

Un caso particular del efecto de envenenamiento es lo que se conoce como inhibición, en el cual el sensor sufre una pérdida de su capacidad de forma temporal. El caso típico se da en la exposición del sensor a compuestos halógenos tales como los que se usan en los extintores de fuego o gas Freón usado en refrigerantes, en la que la sensibilidad completa del sensor se restablece al cabo de algunas horas (luego de 24 o 48 horas de exposición en aire fresco), si el agente extintor se remueve. En general, los compuestos de metales pesados y siliconas producen un envenenamiento permanente y en casos extremos hacen que deba reemplazarse el sensor. La única forma de identificar si un sensor está perdiendo sensibilidad debido al envenenamiento es mediante las pruebas de gas patrón y calibración periódica, que, debido a lo explicado anteriormente, se requerirán con mayor frecuencia de la normal.

Es importante entender, además, que se indican casos típicos de compuestos inhibidores, pero que no necesariamente se trata de todos los que pueden producir este efecto en los sensores catalíticos.

- b. Contaminación**

Aunque el envenenamiento a veces se puede interpretar como una contaminación del sensor, se prefiere diferenciar este término para el fenómeno descrito en que el

sensor pierde la sensibilidad por un fenómeno que ocurre directamente en el mismo.

De esta manera, la contaminación usualmente se refiere al bloqueo del arrestallamas, causado por diferentes agentes externos, dependiendo del ambiente donde se emplee el detector. Estos agentes contaminantes pueden ser tan simples como el polvo que se va quedando atrapado en el arrestallamas hasta bloquearlo completamente o inclusive pueden llegar hasta el sensor y depositarse en su superficie. En algunos ambientes marinos, los detectores pueden verse afectados por formaciones de salitre y otros minerales. Si el detector se expone a grasas pesadas, lacas, pinturas, barnices, etc., la contaminación puede hacer que el detector pierda sensibilidad. Es importante observar la respuesta del sensor durante su operación normal. Si el tiempo de respuesta, así como el tiempo de recuperación luego de verse expuesto a un gas de referencia (gas patrón) se incrementan, o si se observa una pérdida de sensibilidad, puede ser normalmente una indicación de contaminación del detector.

c. Cracking

Se conoce como cracking o rompimiento cuando el sensor catalítico es expuesto a una excesiva concentración de gases inflamables y/o calor excesivo, lo que favorece un proceso de oxidación masiva en la superficie catalizadora y eventualmente causa el deterioro el sensor. Normalmente este efecto hace necesario variar el cero y span del sistema de detección debido a que el sensor se descalibra, sin embargo, en casos extremos deja al sensor inutilizable en forma permanente.

Este efecto se entiende por la propiedad reactiva de este tipo de sensor, en el cual se produce una reacción química (combustión, oxidación), que desgasta paulatinamente el catalizador del sensor. Es por esta característica que estos sensores tienen un tiempo de vida de uso, aun cuando sean empleados en condiciones ideales (sin agentes contaminantes o que produzcan envenenamiento), que puede ser de 3 a 5 años. Luego de este periodo es necesario reemplazar el sensor. Cabe aclarar que en estos casos se reemplaza el elemento sensor conocido como pellistor, mas no necesariamente toda la electrónica

asociada; entendiéndose como sensor la parte activa del instrumento detector de gases inflamables, tal como pudimos apreciar anteriormente.

Es por esta característica también, que es necesario someter a los detectores a pruebas rutinarias de funcionamiento, cuya frecuencia dependerá de la forma en que estos equipos trabajen, siendo lo típico efectuar revisiones cada seis meses de operación. Las pruebas consisten en la exposición directa a un gas patrón para observar la respuesta del instrumento y la señal que generan.

Cabe recordar, además, que los sensores catalíticos son dispositivos diseñados para operar en concentraciones de 0 a 100% LEL, que para el caso de gas metano corresponde a una concentración de 5% de gas en volumen de aire, lo cual, como se puede apreciar, se trata de una concentración bastante pequeña. Esto puede ser muy crítico cuando se considera que, en las cercanías de una fuga de gas, por ejemplo, se produce una concentración altísima y normalmente los detectores catalíticos son saturados en estas condiciones. Por este motivo también es que los procedimientos para comprobar el funcionamiento de estos detectores incluyen la exposición a mezclas específicas de gas inflamable en concentraciones bajas (el gas patrón típico empleado para las pruebas de operación / calibración de detectores, tiene una concentración de 50% LEL, es decir 2.5% de volumen de metano en aire), en las que el sensor no se sature.

d. Factor de corrección

Los sensores de gas catalíticos en particular son calibrados en su mayoría con gas metano de referencia para el rango de 0 a 100% LEL de escala total, sin embargo, como sabemos, los sensores catalíticos son sensibles a varios tipos de gases inflamables.

Los fabricantes generalmente proveen una relación de factores de corrección que permiten al usuario medir diferentes tipos de gases de hidrocarburos, mediante la multiplicación de la lectura por el factor de corrección adecuado para obtener la lectura de diferentes tipos de gas. La razón de usar metano para la calibración inicial es porque el metano tiene una unión simple que requiere que el sensor opere en la temperatura más alta en comparación con otros gases de

hidrocarburos. De esta manera, un sensor catalítico típico requiere un voltaje de 2.5V para reaccionar al metano, con el fin de obtener una buena señal; mientras que el mismo sensor puede requerir sólo 2.3V para gas butano. Por lo tanto, si el sensor se ajusta (calibra) con gas butano, puede no reaccionar al gas metano apropiadamente.

Adicionalmente, el metano es un gas muy común y se encuentra frecuentemente en muchas aplicaciones industriales, es de fácil manejo y tiene la facilidad de mezclarse en diferentes concentraciones.

En la Tabla 7 se puede apreciar una relación típica de factores de corrección aproximados para sensores catalíticos calibrados con pentano y con metano:

Ejemplo

Si el detector es calibrado con n-pentano y el gas que se mide es hidrógeno, entonces como se aprecia en la lista, el factor a usar es de 0.6, por lo tanto, para una lectura de 65, la lectura corregida para hidrógeno es:

$$65 \times 0.6 = 39\% \text{ LEL hidrógeno}$$

De igual forma se debe considerar que para este ejemplo, las alarmas se activarán a un nivel más bajo. Para una alarma ajustada en 20% LEL de n-pentano, el nivel al cual se activará con hidrógeno es $20 \times 0.6 = 12\%$ LEL de hidrógeno. En algunos casos el factor de corrección puede ser mayor de la unidad. En esos casos el detector produce una lectura baja y la lectura tienes que ser incrementada para dar un valor apropiado, como en el caso del metano.

Tabla 7. Factores de corrección para sensores de gas catalíticos. Calibración con pentano y metano

	Detector Pentane	Calibration Methane		Detector Pentane	Calibration Methane
Acetaldehyde	0.8	1.6	Ethylene	0.7	1.2
Acetic Acid	0.8	1.6	Ethylene Dichloride	0.7	1.4
Acetic Anhydride	1.0	2.0	Ethylene Oxide	0.9	1.8
Acetone	0.9	1.6	N-Heptane	1.3	2.3
Acetylene	0.8	1.7	N-Hexane	1.3	2.0
Acrylonitrile	1.0	2.0	Hydrogen	0.6	1.2
Alkyl Alcohol	0.9	1.9	Kerosene	1.4	2.8
Ammonia	0.35	0.6	LPG	1.1	2.1
N-Amyl Alcohol	1.4	2.8	Methane (LNG)	0.5	1.0
Aniline	1.2	2.5	Methanol	0.5	1.2
Benzene	1.1	1.9	Methyl Chloride	4.0	8.0
1.3 Butadiene	0.8	1.3	Methyl Cyclohexane	1.0	2.0
N-Butane	0.8	1.6	Methylene Dichloride	0.5	1.0
Iso-Butane	0.9	1.8	Dimethyl Ether	0.7	1.4
Butene-1	1.0	2.0	Methyl Ethyl Ether	1.0	2.0
N-Butanol	1.4	2.9	Methyl Ethyl Ketone	1.1	2.2
I-Butanol	0.9	1.9	Methyl-N-Propyl-Ketone	1.6	3.2
Tert-Butanol	0.6	1.3	Naphthalene	1.3	2.8
Butyl Acetate	1.5	3.0	N-Nonane	1.4	2.8
N-Butyl Benzene	1.4	3.0	N-Octane	1.3	2.6
Iso-Butyl Benzene	1.4	3.0	N-Pentane	1.0	1.9
Carbon Monoxide	0.6	1.2	Iso-Pentane	1.0	1.9
Carbon Disulphide	4.0	8.0	Petrol	1.0	1.9
Carbon Oxysulphide	0.5	1.0	Propane	0.65	1.3
Cyclohexane	0.9	2.0	N-Propanol	1.0	2.0
Cyclopropane	0.8	1.6	I-Propanol	0.9	1.8
N-Decane	1.4	2.8	Propylene	0.9	1.8
Diethylamine	0.9	1.8	Propylene Oxide	1.0	2.0
Dimethylamine	0.8	1.6	Iso-Propyl Ether	1.0	2.0
2.3 Dimethylpentane	1.1	2.2	Propyne	1.1	2.2
2.2 Dimethylpropane	1.1	2.2	Styrene Monomer	4.0	8.0
Dimethyl Sulphide	1.1	2.2	Tetra Hydra Furan	1.0	2.1
Dioxane	1.0	2.0	Toluene	1.1	1.9
Ethane	0.7	1.4	Trimethylbenzene	1.5	3.0
Ethyl Acetate	0.9	1.8	White Spirit	1.5	3.0
Ethanol	0.6	1.85	o-Xylene	1.2	2.8
Ethyl Benzene	1.3	2.6	m-Xylene	1.1	2.2
Ethyl Bromide	0.5	1.0	p-Xylene	1.1	2.2
Ethyl Chloride	0.8	1.6			
Ethyl Cyclopentane	1.1	2.2			
Ethyl Ether	1.0	2.1			

Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2000). *Talking Gas!*

e. Mezclas de gases

Como estudiamos anteriormente, para que la combustión se lleve a cabo se requieren tres elementos: oxígeno, combustible y una fuente de ignición. Para el caso que nos ocupa particularmente, como combustible nos referimos al gas combustible o inflamable.

La mayoría de fabricantes de instrumentos detectores de gases inflamables tienen como referencia al gas metano, por las características que ya se mencionaron. De hecho, el metano es el gas de referencia en base al que se calibran este tipo de instrumentos, sin embargo, en la vida real, el proceso de combustión es mucho más complicado y el elemento combustible puede darse como una mezcla de gases. Las condiciones atmosféricas tales como presión, temperatura, temperatura de ignición e incluso la humedad pueden afectar también la concentración de la mezcla combustible.

Si dos o más químicos están involucrados, incluso no siempre es posible calcular y determinar el rango de combustión de la mezcla. Por este motivo lo mejor es considerar el peor escenario y calibrar el sensor de acuerdo a ello. Más aun, un sensor calibrado a un nivel de LEL para un determinado gas, puede no ser necesariamente usado para otros gases. Muchos instrumentos en el mercado tienen sus escalas con unidades de porcentaje de LEL, sin indicar si la unidad ha sido calibrada con metano u otro gas. Por lo tanto, si la unidad es usada para otro gas o mezcla de gases, la información que da el instrumento puede ser totalmente irrelevante.

Por ejemplo, un sensor catalítico calibrado con gas metano produce una lectura menor cuando se expone a gases de hidrocarburos con mayor contenido de carbono, mientras que un instrumento de tecnología infrarroja generará una lectura mucho más alta y correcta, dependiendo del contenido de carbono que tenga el gas o mezcla de gases. Este es un error muy común que se da en el uso de instrumentos detectores de gas combustible o inflamable, cuando se emplean la tecnología de combustión catalítica.

f. Seguridad en falla (Fail-Safe) / seguridad en cero

Un dispositivo o sistema se denomina “seguro en falla” si en para el evento de su mal funcionamiento o falla, éste responde de manera que no cause daño, o cause daños mínimos a otros dispositivos, o ponga en peligro vidas humanas.

Un dispositivo o sistema “seguro en falla” no significa que la falla sea imposible o improbable de darse, sino que éste está diseñado para prevenir o mitigar las consecuencias inseguras en el caso de un mal funcionamiento o falla; es decir cuando un dispositivo o sistema “seguro en falla” falla, es seguro o al menos no es menos seguro que cuando está operando correctamente.

Los dispositivos o sistemas “seguros en falla” pueden ser de tipo mecánicos o físicos, eléctricos o electrónicos, o pueden tratarse también de procedimientos. Un ejemplo típico de sistema eléctrico “seguro en falla” son los equipos protegidos con fusibles ante un corto circuito, en los cuales, la destrucción del fusible prevendrá la destrucción del equipo. Otros ejemplos son los sistemas redundantes, en los cuales, si uno de los sistemas falla, el otro entrará en línea para prevenir la parada o falla del sistema o proceso. Otro caso son las señales de alarmas que emplean contactos “normalmente cerrados”, que aseguran que en caso se produzca un corte del conductor de la señal, la alarma se disparará (si se usaran contactos “normalmente abiertos” el corte del conductor no podría ser detectado).

Debido a que se trata primordialmente de equipos de seguridad, debe tenerse muy presente que, debido a su funcionamiento, los detectores de gases inflamables catalíticos inherentemente son dispositivos “no seguros en falla”. Esto se entiende porque cuando un sensor catalítico se envenena, sigue operando eléctricamente, sin embargo, su capacidad para detectar la presencia de gas inflamable puede verse afectado e incluso anulado del todo, llegando a producir una lectura de cero a pesar de mantenerse el peligro de la presencia de gas inflamable. Esto de por sí es una condición insegura de operación, ya que da una información errónea que lleva a tomar una mala decisión en la operación dentro de un espacio confinado. Por ejemplo, un operador que desconozca que el sensor se encuentra envenenado y observa una lectura de cero en el panel de control, puede tomar la decisión de

realizar algún tipo de maniobra riesgosa dentro de la sala de bombas con el consiguiente peligro de explosión o incendio.

Debido a esta característica insegura que se presenta principalmente para una señal de cero, los sensores de gas inflamable catalíticos también se les conoce como “no seguros en cero”

Según lo explicado, para minimizar el riesgo de esta condición insegura, es necesario que el funcionamiento de los sensores catalíticos sea periódicamente revisado mediante un test, empleando gas patrón en baja concentración (menor a 100% LEL), de manera similar a lo que se realiza para el procedimiento de calibración. Esto deberá hacerse periódicamente y de forma obligatoria luego de cualquier evento en el que se sospeche que el detector haya sido envenenado. Esta será la única forma segura de operación de los sensores catalíticos.

g. Requerimiento de oxígeno

Según lo observado en el funcionamiento de este tipo de detectores, para que un sensor de gases inflamables catalítico opere correctamente, es necesario que se lleve a cabo el proceso de combustión en su superficie, y para ello es necesaria la presencia de oxígeno. Concretamente se requiere un mínimo de 12% de oxígeno en volumen.

En algunos procesos, sobre todo aquellos que involucran ambientes cerrados, tales como tanques, ductos cerrados, ambientes reducidos, etc., es posible que exista una concentración baja de oxígeno, menor del 12% en volumen, lo que reducirá la eficiencia en la medición de este tipo de sensores. Es importante tomar este factor en cuenta, sobre todo en aquellas aplicaciones donde se empleen sensores de tipo fijo, en donde la presencia constante de personal y por lo tanto de oxígeno, no sea un requerimiento.

Debe tenerse presente que los sensores de gas inflamable catalíticos no se pueden emplear en ambientes donde se carezca de oxígeno, tales como procesos de inertización o gasificación, los cuales también se llevan a cabo a bordo de un buque tanque. Emplearlos en estas condiciones supone un riesgo, ya que los

sensores no indicarían ninguna lectura a pesar de haber gas inflamable presente, ya que si no hay oxígeno en el ambiente no puede llevarse a cabo la reacción en el sensor y por lo tanto éste no producirá ninguna señal.

h. Envejecimiento

Tal como vimos anteriormente, los sensores de gas inflamable catalíticos, son sometidos a una reacción química (combustión), en la cual se produce la oxidación, que afecta al elemento catalizador del sensor durante su funcionamiento. Es necesario tener claro que, por la naturaleza reactiva de este tipo de sensores, tienen un tiempo de vida limitado, durante el cual, el elemento catalizador y el filamento de platino interno se van degradando hasta que finalmente dejan de funcionar (cracking). A medida que el sensor catalítico envejece, es necesario corregir la lectura que muestra el sistema de detección (calibración) y es importante considerar que su sensibilidad se degrada con el tiempo. Finalmente, cuando no se pueda ajustar más el span, será necesario reemplazar el sensor. El tiempo de vida típico de un sensor de gas inflamable catalítico es de 3 a 5 años, lo cual dependerá del uso al que se le someta (si es expuesto a concentraciones altas, envenenamiento, etc., el tiempo de vida puede verse reducido considerablemente).

2.3.2 Estudio de la tecnología de detección por absorción infrarroja

El desarrollo de toda la sección 2.3.2 está basada principalmente en el trabajo de Chou (1999):

Recordando las características de operación de los sensores de gas inflamables catalíticos, vemos que existen muchos factores que puede restar confiabilidad al sistema de detección en general, si es que el operario los desconoce, cosa que a menudo sucede.

Debemos tomar en cuenta además que, por tratarse de un sistema de seguridad, es necesario que dicho sistema sea lo más seguro posible ante cualquier eventualidad de error, sea humano o del propio sistema, por lo que siempre es conveniente evaluar otra tecnología alternativa que provea mayor seguridad y confiabilidad en el funcionamiento de este sistema de detección.

Los sensores de gas inflamables catalíticos siguen siendo empleados en la mayoría de instrumentos portátiles y en muchos sistemas fijos, debido básicamente a que se trata de una tecnología económica y probada a través de los años, sin embargo, desde su aparición y aplicación en la industria, se han descubierto y desarrollado paralelamente otras formas de detección con mejores características de operación.

En lo que respecta a la detección de gases inflamables, la detección por absorción infrarroja es una tecnología de medición bien desarrollada a la fecha. Comúnmente tiene la reputación de ser complicada, voluminosa y cara, sin embargo, con los recientes avances tecnológicos, que incluyen la disponibilidad de amplificadores potentes y componentes electrónicos asociados, se ha abierto una nueva frontera para sus aplicaciones. Estos avances han logrado un incremento en la demanda comercial, lo que a su vez fomenta el avance de esta tecnología.

A menudo, los gases a detectar que se presentan en la realidad contienen partes corrosivas y reactivas. En la mayoría de tecnologías para la detección de gases, el sensor en sí mismo es expuesto directamente al gas, lo que trae como consecuencia que el sensor se afecte en su funcionamiento, se descalibre o quede inservible prematuramente.

La principal ventaja de los detectores infrarrojos es que el sensor no interactúa directamente con el gas o gases a detectar. Los componentes principales de funcionamiento de este tipo de sensor son protegidas con partes ópticas. Dicho de otra forma, las moléculas de gas interactúan solamente con un haz de luz. Sólo una celda de muestreo y componentes anexos requieren estar expuestos directamente al gas. Por otra parte, estos componentes pueden ser tratados, haciéndose resistentes a la corrosión y pueden ser diseñados para ser fácilmente removidos para efectos de mantenimiento o reemplazo en caso de ser necesario.

Hoy en día, muchos detectores infrarrojos están disponibles para diferentes tipos de aplicaciones y la mayoría ofrecen un diseño simple, resistente y confiable. En general, para aplicaciones de detección de gases tóxicos y combustibles, los

sensores infrarrojos están entre los más amigables y que requieren mínimo mantenimiento. Las aplicaciones para el uso de la tecnología infrarroja son virtualmente ilimitadas. Aquellos gases con moléculas compuestas por dos o más átomos diferentes absorben la radiación infrarroja de una manera única y por lo tanto pueden ser detectados usando técnicas de radiación infrarroja.

Por otra parte, los sensores infrarrojos son altamente selectivos y ofrecen una amplia gama de sensibilidades, desde niveles de partes por millón hasta niveles de 100% en concentración.

2.3.2.1 Principio de operación

El principio de detección por absorción infrarroja incorpora sólo una pequeña porción del espectro electromagnético de la luz. El sector que se emplea en esta tecnología es aquella que se puede sentir como calor. Esta región del espectro está cercana la región visible que pueden ser percibidos mediante el ojo humano. La radiación electromagnética viaja a una velocidad cercana a 3×10^8 metros por segundo y tiene un perfil de onda. Con el fin de entender mejor esta tecnología revisemos las definiciones básicas de la física para la radiación electromagnética.

a. Onda

De forma similar a las olas del mar, las ondas de la radiación electromagnética oscilan, una onda seguida de otra. Existen ondas electromagnéticas y mecánicas, teniendo estas últimas una longitud de onda mucho mayor.

En la Figura 20 se ilustra un ejemplo de una onda mecánica simple que tiene 10 ciclos por centímetro. Aquí se puede apreciar que la onda tiene una longitud de onda de 0.1 cm y 10 Hz de frecuencia.

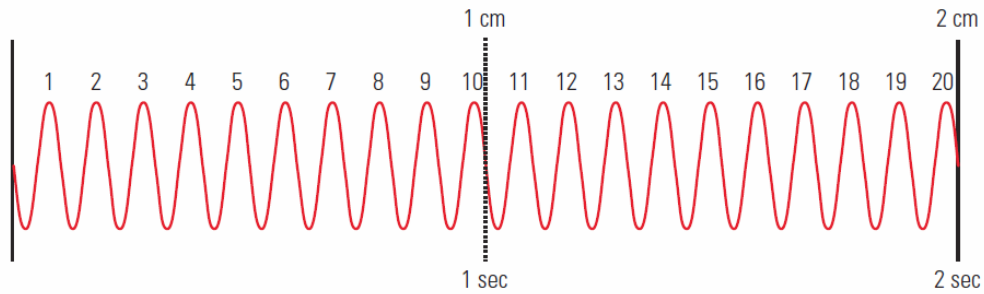


Figura 20. Onda mecánica simple de 10 Hz
 Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

b. Frecuencia

Se define como el número de ondas por segundo que pasan a través de un punto. Una onda electromagnética viaja a la velocidad de la luz que es de 300 millones de metros por segundo o 3×10^8 m/s. Por lo tanto, la frecuencia será la velocidad de la luz dividida entre la longitud de onda, lo cual es expresado en unidades de número de ondas por segundo, hercios o Hertz (Hz).

c. Longitud de onda

Es la distancia entre dos picos consecutivos de la onda o el espacio entre dos ondas consecutivas. Se expresa comúnmente en micrones. Es un término bastante usado en la representación de las bandas de absorción molecular de gases, así como de las características de los componentes ópticos.

d. Número de onda

Es el número de ondas en un centímetro. Es el recíproco de la longitud de onda. Ya que 1 micrón es igual a 10^{-6} m e igual a 10^{-4} cm, el recíproco de un micrón resulta ser $1/10^{-4}$ (10000 ondas por centímetro), y de la misma manera 2 micrones representan 5000 ondas por centímetro. La fórmula que representa el número de onda es:

$$\text{Número de onda} = 1 / \text{longitud de onda}$$

e. Micrón

Es la unidad comúnmente usada para expresar la longitud de onda en la región infrarroja del espectro y equivale a la millonésima parte de un metro (10^{-6} m) o micrómetro. Se representa y abrevia con la letra griega mu (μ).

f. Transmitancia

Se denomina transmitancia al ratio o razón de energía de radiación transmitida entre la energía incidente. La energía no transmitida es absorbida y reflejada. Se emplea para especificar componentes ópticos. En la Figura 21 se muestra una explicación gráfica de este concepto, donde se representa un valor de 65% de transmitancia.

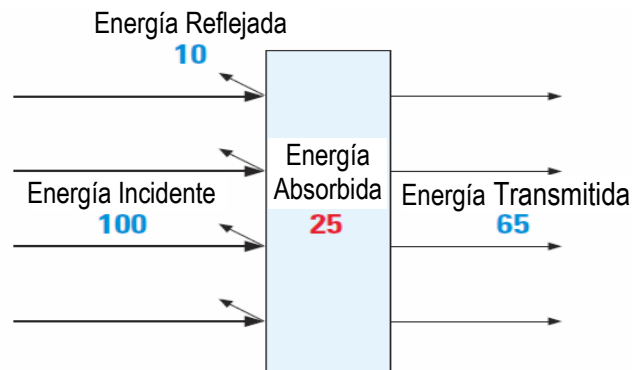


Figura 21. Explicación del concepto de transmitancia
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

g. Absorbancia

Es el opuesto de la transmitancia. Se usa para describir la magnitud de la energía absorbida por las moléculas de gas expuestas a la radiación. El porcentaje de absorción y el porcentaje de transmitancia son usados en el eje Y versus el número de onda o la longitud de onda del espectro infrarrojo, en el eje X.

El número de onda y la longitud de onda son términos comunes empleados para describir la región infrarroja usada para el análisis de gas ya que proporcionan un método conveniente para expresar la frecuencia de radiación y los mecanismos de interacción entre la radiación infrarroja y las moléculas de gas. Ambos son recíprocos entre sí. Por ejemplo, el gas metano tiene una longitud de onda de

absorción de 3.4 micrones, que equivale a un número de onda de 2941 cm^{-1} . (Ver análisis espectroscópico de la Figura 23.)

Las ondas electromagnéticas se propagan a través del espacio o la materia, mediante oscilaciones eléctricas y campos magnéticos. En el vacío, dichas ondas viajan a la velocidad de la luz. El rango completo de frecuencias de estas ondas se conoce como espectro electromagnético.

Estas frecuencias van desde los rayos gamma en 10^{20} Hz hasta las ondas de radio en 10^6 Hz, y son clasificadas desde altas a bajas frecuencias como rayos gama, rayos x, luz ultravioleta, luz visible, luz infrarroja, microondas y ondas de radio. En la Figura 22 a continuación, se puede apreciar el espectro electromagnético y sus regiones principales:

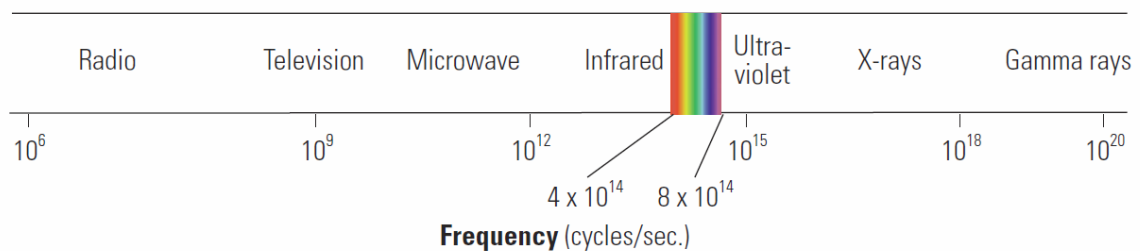


Figura 22. Espectro electromagnético
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Como podemos apreciar, la luz visible percibida por el ojo humano, se encuentra aproximadamente en 4×10^{14} Hz (o 0.4 a 0.7 micrones), de hecho, representa una porción estrecha del espectro. Por otra parte, la luz infrarroja está justo en la parte inferior de la luz visible y esto explica por qué “sentimos” pero no “vemos” la temperatura. La región infrarroja es mayormente usada en el análisis de gas debido a que la absorción de las moléculas de gas es única y selectiva en esta región del espectro electromagnético.

- **Huella única de absorción de gas**

La complejidad de las moléculas de gas determinará el número de picos de absorción. Mientras más átomos tengan la molécula de gas, mayor será el número

de bandas de absorción que aparecerán. La región en la cual la absorción ocurre, el monto de absorción y la característica específica de la curva de absorción es única para cada gas, lo que representa la huella de absorción del gas.

A continuación, se puede apreciar en la Figura 23, un análisis espectroscópico típico para gas metano.

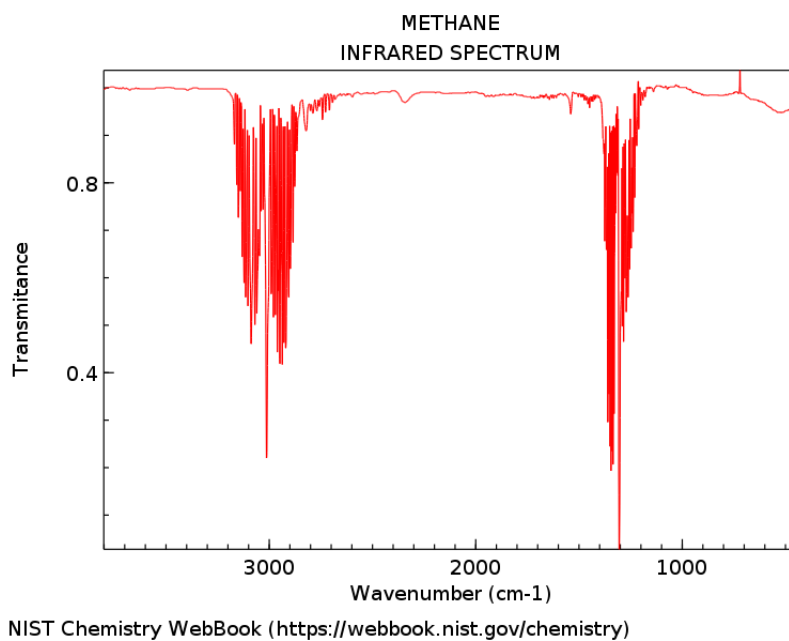


Figura 23. Análisis espectroscópico para gas metano
Fuente: NIST (2018). Methane, gas phase spectrum, *Libro del web de química del NIST*

De la manera indicada, las moléculas de gas pueden ser identificadas usando sus características de absorción y éstas pueden ser registradas para propósitos de análisis e identificación. Es posible guardar una librería de estas curvas características en la memoria de un instrumento y cuando dicho instrumento analice un gas particular, el gráfico resultante es comparado con las curvas almacenadas en la memoria para identificar las moléculas de gas. Este método de análisis de gas es el más popular en la química analítica.

En aplicaciones de monitoreo de gases para seguridad, sólo es empleada una región específica de absorción con el fin de determinar cuantitativamente la

concentración de un gas en particular. Las longitudes de onda en esta región están entre 2 y 15 micrones o números de onda de 5000 a 670 cm^{-1} .

El análisis espectroscópico del gas metano, muestra que tiene un pico alto de absorción a una longitud de onda de 3.4 micrones (aproximadamente un número de onda de 3000 cm^{-1}), el cual es la longitud de onda empleada para su detección. De hecho, la mayoría de gases de hidrocarburos presentan un pico de absorción alto en 3.4 micrones. Por otra parte, el dióxido de carbono se absorbe fuertemente a 4.26 micrones, mientras que con el monóxido de carbono esto sucede en 4.7 micrones.

h. Frecuencias naturales de las moléculas de gas

En la Figura 24 se ilustra como ejemplo, una molécula de agua que consta de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, en la cual las uniones vibran a una frecuencia determinada conocida como “frecuencia natural”.

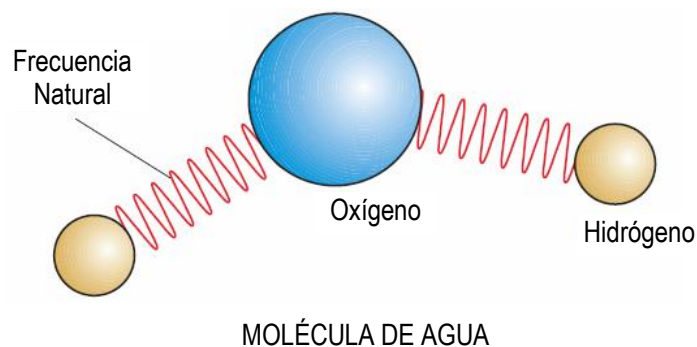


Figura 24. Representación de molécula de agua
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Toda materia posee una frecuencia natural. Un puente colgante posee una frecuencia natural y el balcón en un teatro tiene una frecuencia natural. Aun así, estas sean ondas mecánicas, en teoría son similares a las ondas electromagnéticas. Si el viento o un terremoto sacude el puente a la misma frecuencia que su frecuencia natural (o frecuencia de resonancia), puede causar una vibración mucho más violenta y de gran amplitud, con el resultado de daños severos. En el otro ejemplo, la gente que se mueve alrededor del balcón del teatro crea vibraciones de ciertas frecuencias, que pueden causar efectos similares. Tal como

se explica, la frecuencia natural de una estructura es un tema de vital importancia que concierne a la ingeniería estructural.

De manera similar, las moléculas de gas se componen de un número de átomos unidos entre sí. Las uniones interatómicas son similares a resortes, conectando átomos de varias masas juntos. Las moléculas de gas, por lo tanto, tienen un número de frecuencias naturales. Mientras más grande sean las moléculas, tendrán más modos de frecuencias naturales. Las frecuencias naturales están determinadas también por la estructura molecular de la composición química del gas. Estas frecuencias son siempre las mismas para una molécula y estructura de uniones determinada. De este modo, las propiedades particulares que exhibe el compuesto químico se convierten en su firma y proporcionan las claves para identificar la estructura molecular del mismo.

i. Formas de detección IR

La radiación infrarroja posee un contenido espectral amplio. Cuando esta radiación interactúa con las moléculas de gas, parte de la energía tiene la misma frecuencia que la frecuencia natural de la molécula de gas y es absorbida, mientras que el resto de la radiación es transmitida. A medida que las moléculas de gas absorben la radiación IR, ganan energía y vibran más fuerte.

Esta vibración produce un incremento en la temperatura de las moléculas. Dicho de otro modo, la temperatura se incrementa en proporción a la concentración del gas y de esta manera puede ser medido por un detector. Por otra parte, la radiación absorbida por las moléculas de gas a una longitud de onda particular producirá un decremento de la energía emitida originalmente por la fuente de radiación. Este decremento de energía puede ser también medido e interpretado como una señal proporcional a la concentración del gas.

De esta manera tenemos dos formas de detección y medida de la concentración de gases inflamables empleando la radiación infrarroja.

2.3.2.2 Componentes principales para el análisis y detección

Con el fin de conseguir una señal útil para el análisis y posterior detección del nivel de concentración de gases inflamables, existen varios componentes empleados en los distintos diseños de los detectores IR modernos. La configuración de componentes de estos instrumentos depende en gran medida de los resultados que se requieran lograr y de las características particulares del equipo o sistema. A continuación, se da una descripción de los componentes más importantes.

a. El detector

Los detectores IR convierten la energía de radiación electromagnética o cambios de temperatura, en señales eléctricas. De esta manera existen varios tipos de detectores IR y cada uno ofrece un amplio rango de características. Algunos de los tipos más importantes son:

- **Termoeléctrico**

El detector que convierte la temperatura en una señal eléctrica se conoce comúnmente como termocupla. El principio de este tipo de detectores se basa en que la unión de dos metales diferentes genera un voltaje, cuya magnitud es directamente proporcional a la temperatura a la que se encuentra. Esto se puede mejorar introduciendo múltiples uniones para incrementar la sensibilidad. Este tipo de configuración múltiple se le conoce también como termopila.

Empleando técnicas modernas de fabricación, varias uniones son conectadas en serie con el fin de multiplicar la magnitud del voltaje de salida y a la vez el detector se hace más compacto. El tamaño y peso del dispositivo son importantes para determinar su tiempo de respuesta y otras características operativas.

Este tipo de detector tiene, sin embargo, una respuesta relativamente lenta, pero ofrece la ventaja de estabilidad en corriente directa, por lo que no requiere polarización, y responde a todas las longitudes de onda. De esta manera resulta en la forma más sencilla de convertir la energía luminosa en una señal eléctrica.

- **Termistor bolómetro**

Se conoce como bolómetro al dispositivo que cambia su resistencia cuando una radiación IR incidente interactúa con el mismo. Este tipo de semiconductor térmicamente sensible, es fabricado de un óxido de metal sinterizado y tiene un alto coeficiente de resistencia de temperatura.

- **Detector piroeléctrico**

Los materiales piroeléctricos son cristales, tales como el tantalato de litio, que exhiben una polarización espontánea o una concentración de carga eléctrica que es dependiente de la temperatura. A medida que la radiación IR incide en la superficie de este tipo de material, el cambio de temperatura produce una corriente eléctrica, que es proporcional a la intensidad de la radiación. Esta clase de detector ofrece una buena sensibilidad y respuesta a un amplio rango de longitudes de onda y no requiere enfriamiento. En la Figura 25 se puede apreciar un esquema simple que representa el funcionamiento del detector piroeléctrico.

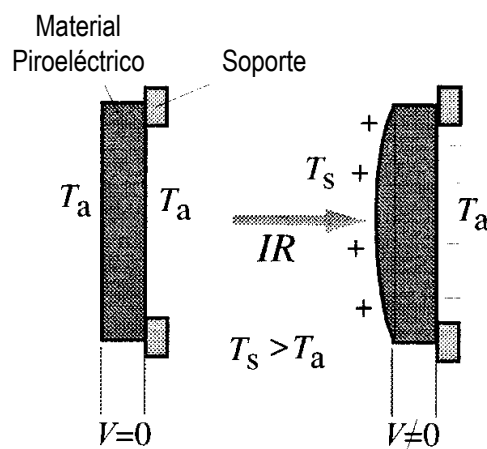


Figura 25. Principio de detección por efecto piroeléctrico

Fuente: Webster, J. G. (1999). 10.5 Occupancy detection, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*

En condiciones normales, el material piroeléctrico no recibe radiación IR y está estabilizado a temperatura ambiente uniforme (T_a). Cuando recibe radiación IR en una de sus superficies la temperatura en ésta cambia (T_s) y se expande, induciéndose una carga que será proporcional a la radiación recibida. El cambio de carga producirá una diferencia de potencial (V) entre las superficies del

material piroeléctrico que, mediante un circuito adecuado, puede ser acondicionado y medido como una señal de voltaje o corriente.

El detector piroeléctrico es el tipo más empleado en los sistemas de detección de gases por absorción infrarroja.

- **Detector de fotones**

Los fotones poseen energía basada en su longitud de onda e intensidad. Un detector de fotones detecta la interacción cuántica entre los fotones incidentes y el material semiconductor. Un fotón que golpea un electrón con suficiente energía puede elevar dicho electrón, de un estado no conductor a un estado conductor. La presencia de electrones en una banda conductora incrementará la conductividad del semiconductor, y la desviación de voltaje producido se podrá registrar finalmente como una señal.

La excitación de electrones requiere que los fotones tengan una cierta cantidad de energía. Las longitudes de onda más cortas requieren frecuencias altas y, por lo tanto, mayor energía. Este tipo de detectores funciona en una banda limitada del espectro, el cual depende del material que se use en el detector. Típicamente el detector debe ser enfriado con un sistema termoeléctrico o incluso empleando nitrógeno líquido para operar apropiadamente. Un ejemplo común de este tipo de detectores son los basados en sulfuro de plomo (PbS), usados en la región de 1 a 3 micrones, y los basados en seleniuro de plomo (PbSe), usados en la región de 1 a 5 micrones.

- **Detector luft**

“Luft” es la palabra en alemán que significa “aire” ya que efectivamente, el detector luft original fue diseñado en Alemania.

En la Figura 26 se puede apreciar un diagrama simplificado de un detector luft con sus elementos principales. El sistema consiste en dos cámaras, unidas por un sensor de flujo o divididos por un diafragma. Las cámaras están selladas con un gas a una presión baja. Se emplean ventanas transparentes de IR para sellar las

cámaras y una radiación infrarroja de la misma intensidad es recibida por las dos cámaras cuando no hay gas presente.

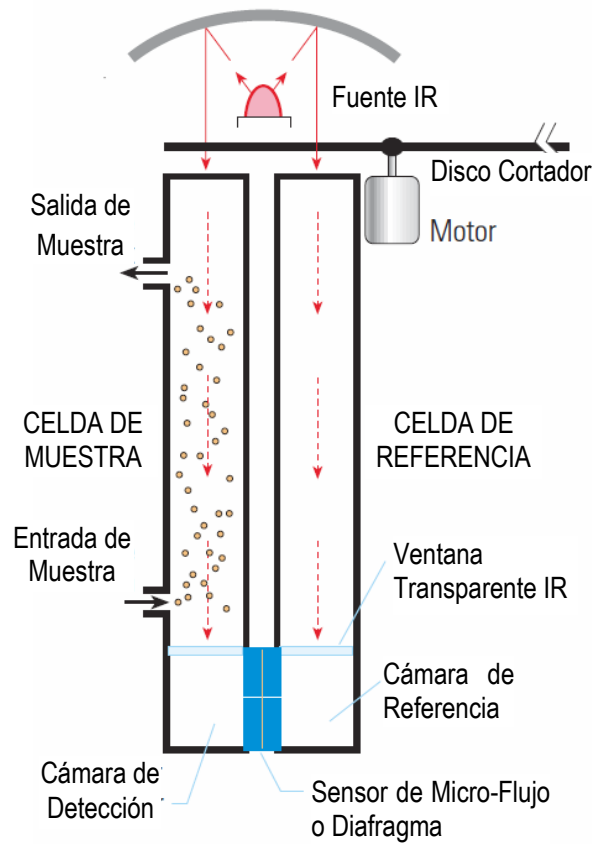


Figura 26. Esquema simplificado de detector luft
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Cuando la muestra que contiene el gas a detectar fluye a través de la celda de muestra, la cámara del detector recibe una disminución en la energía de la radiación, lo que causa una caída en la temperatura y presión en la cámara detectora. La magnitud de la disminución de temperatura o presión está en proporción directa a la concentración del gas. En el caso de emplear cámaras unidas, la presión diferencial entre ambas cámaras genera un flujo que se puede medir como una señal. En el caso de emplearse un diafragma que separa ambas cámaras, el movimiento de éste produce un cambio de la capacitancia que puede ser medido.

Este tipo de detector tiene muchas aplicaciones útiles como analizador y posee un buen potencial para futuros desarrollos.

- **Detector fotoacústico**

Este detector es similar a un detector luft, con la excepción que el cambio de presión es medido mediante un micrófono. El gas de muestra pasa a través de una cámara por un intervalo de tiempo determinado y la cámara luego es sellada con el volumen fijo de gas atrapado en su interior. Se incide pulsos de una radiación IR de longitud de onda específica a través de una ventana transparente, dentro de la cámara. El cambio de presión pulsante es medido entonces mediante el micrófono, como una variación de frecuencia que producirá la señal. En la Figura 27 se muestra un esquema simplificado del principio de detección fotoacústica.

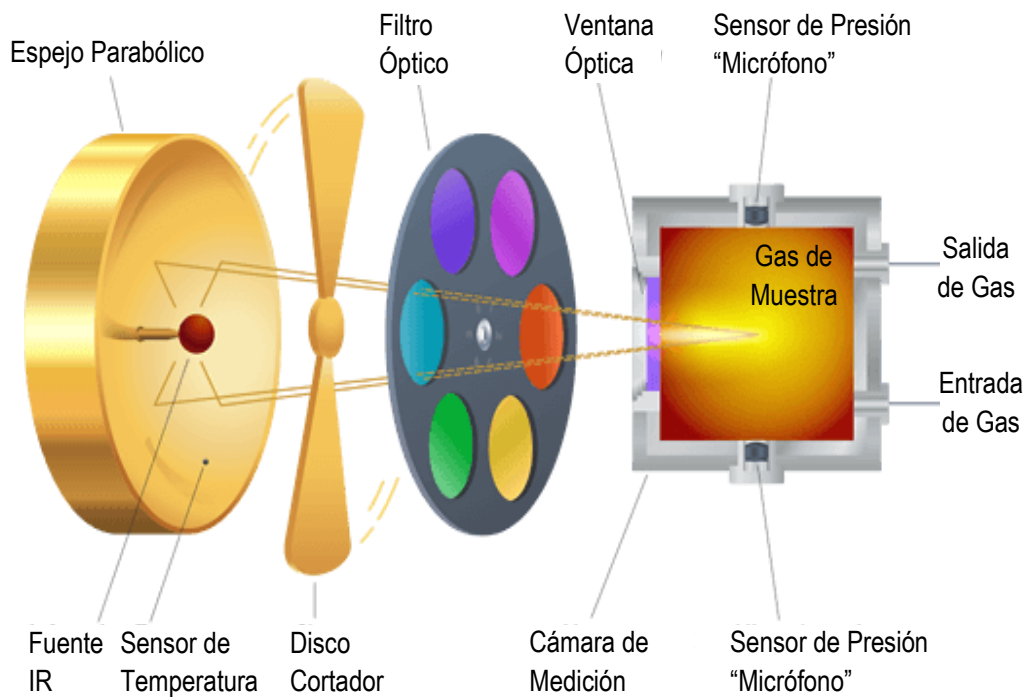


Figura 27. Principio de detección fotoacústica
Fuente: LUMASENSE Technologies, Inc. (2018). *Technology overview – Photoacoustic spectroscopy*

En el esquema se muestran los componentes principales, tales como la fuente de radiación infrarroja, el espejo parabólico que concentra el haz, el filtro óptico para seleccionar la gama de radiación en la que se va a trabajar, los sensores acústicos

o micrófonos y la cámara de medición que contiene el gas de muestra cuya concentración se va a medir.

b. La fuente IR

Un bulbo de luz incandescente regular es una buena fuente infrarroja. Un filamento calentado, similar al que se encuentra en una linterna del tamaño de un lápiz, irradia suficiente energía en el rango de 1 a 5 micrones para la detección de la mayoría de hidrocarburos, dióxido de carbón y monóxido de carbón. Esta fuente de energía simple y barata posee un largo tiempo de vida y estabilidad en el tiempo.

Cualquier fuente que genere suficiente radiación, con una longitud de onda de interés para propósito de detección de un gas específico, puede ser empleada. Existen muchas fuentes de luz disponibles, desde filamentos de diseños específicos hasta fuentes generadas electrónicamente.

- **Modulación**

Dependiendo del tipo de detector a emplear, puede ser necesario modular la fuente de luz, encendiendo y apagando la misma a una frecuencia específica, con el propósito de que el circuito respectivo funcione apropiadamente. Típicamente esto se lleva a cabo pasando la luz a través de un “disco cortador” similar a las aspas de un ventilador. Las aspas interrumpen el paso de la luz, creando una luz pulsante. La frecuencia es determinada por la velocidad del motor que controla el giro del disco cortador y el arreglo que exista en la transmisión entre ellos.

La ventaja del disco cortador es su simplicidad y que puede proveer una frecuencia alta, que no podría ser obtenida normalmente por una fuente de filamento pulsante. Esto se debe al hecho que una fuente de filamento común está limitada a qué tan rápido se puede calentar y enfriar. Los discos cortadores tienen, sin embargo, la característica de tener un tamaño considerable por requerir un motor y esto puede ser un factor limitante en aplicaciones que requieran un instrumento simple y robusto para uso en ambientes agresivos. Por ello las fuentes IR pulsantes son empleadas tanto como sea posible. Este tipo de fuentes provee una longitud de onda de 2 a 5 micrones, dependiendo de la temperatura de la

misma y el material del encapsulamiento del bulbo. Existen así mismo, diferentes fuentes de luz y técnicas de modulación disponibles.

c. El filtro óptico

Existen dos tipos de analizadores de gas: dispersivos y no dispersivos, que se diferencian en la forma en que la longitud de onda específica de interés es extraída.

Los analizadores dispersivos usan un dispositivo óptico tal como una parrilla o un prisma con el fin de esparcir el espectro de la luz sobre un área que contiene la longitud de onda de interés.

Los analizadores no dispersivos usan filtros pasa-banda ópticos, similar a los lentes para sol para la protección de los ojos, para excluir las radiaciones UV indeseadas. Este tipo de radiación es comúnmente conocido como infrarrojo no dispersiva (NDIR). La mayoría instrumentos de detección IR puntuales son del tipo no dispersivos. Más aun, el filtro pasa-banda es uno de los componentes más importantes en el diseño para el tipo de gas objetivo y selectividad del detector y generalmente producido por un fabricante de equipamiento óptico muy especializado. Las especificaciones típicas para un filtro no dispersivo para gas metano se pueden observar en la Figura 28.

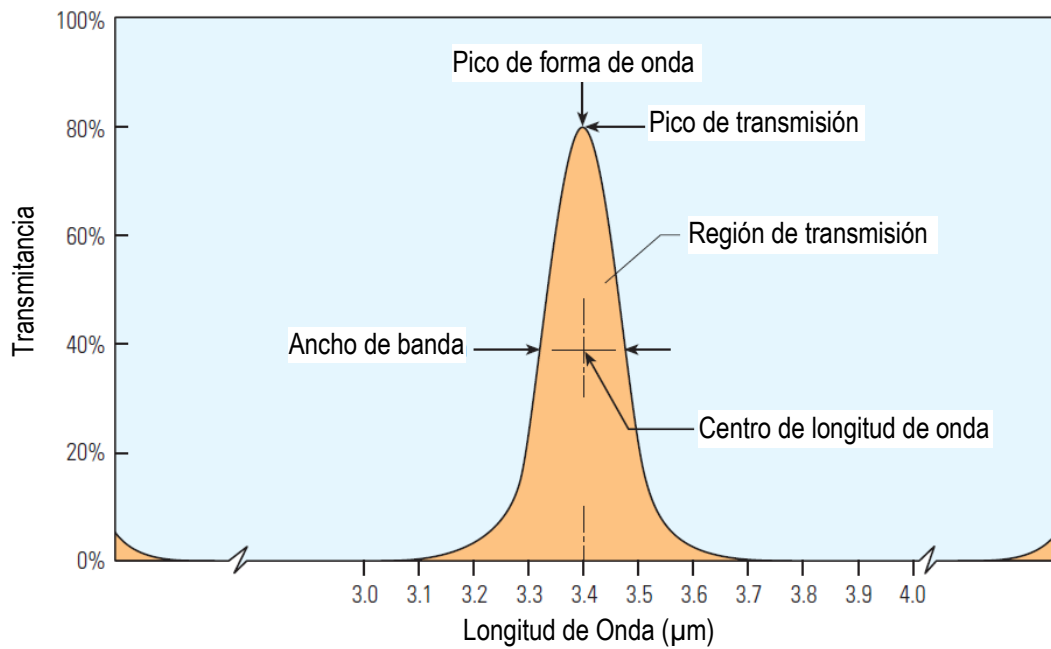


Figura 28. Especificaciones típicas para un filtro óptico de gas metano
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

El porcentaje de transmitancia especifica el radio de radiación transmitida sobre la radiación incidente. El ancho de banda se define como el rango de longitudes de onda que pasan a través del filtro a la mitad del punto pico de transmisión. El ancho de banda determina la selectividad del filtro y, por lo tanto, la selectividad del instrumento. El centro de longitud de onda determina el gas que será detectado. Existen ciertos diseños en los cuales se montan filtros de diferentes longitudes de onda en un arreglo de carrusel. Exponiendo una mezcla de gas a filtros diferentes, es posible detectar e identificar diferentes gases en la mezcla.

d. La celda de gas

Las celdas de gas son usualmente diseñadas de tal manera que permitan a la luz interactuar con la muestra de gas. Esto se logra normalmente mediante el uso de un tubo que permite a la luz entrar por un extremo y salir por el otro, en el cual se encontrará con el detector. El tubo posee puertos de entrada y salida que permiten que circule el gas de muestra a través del tubo.

En la Figura 29 a continuación, se muestra una representación típica de la celda de gas que forma parte del instrumento analizador de gases por absorción infrarroja.

En este esquema se puede apreciar la fuente IR y el detector a ambos extremos de la celda y los puertos por donde el gas ingresa y sale, localizados a lo largo de la longitud de la celda.

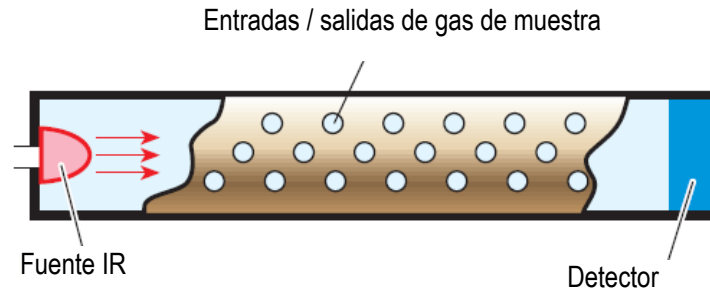


Figura 29. Celda de gas
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

La longitud del camino, o la distancia en la cual la luz pasa a través del gas es llamada la longitud de la celda de gas. Esta longitud es directamente proporcional a la cantidad de radiación absorbida; dicho de otro modo, mientras más larga sea la longitud del camino, mayor será la radiación absorbida. De este modo, una longitud de celda más larga resulta en una señal más fuerte empleando la misma cantidad de radiación. Ya que la celda de gas está en contacto directo con la muestra de gas, es preferible que sea construida empleando materiales químicamente inertes con el fin de asegurar un instrumento con una estabilidad y confiabilidad de larga duración.

2.3.2.3 Configuración

Existen varias formas en las que los diferentes componentes pueden ser ordenados para conformar un analizador de gas. El diseño puede ser relativamente simple o muy complicado, empleando diferentes componentes ópticos, dependiendo del tipo de analizador para una aplicación en particular. Para aplicaciones que requieren alta sensibilidad, selectividad y estabilidad, el diseño del analizador se hace más complejo. En aplicaciones donde la selectividad y la sensibilidad pueden verse comprometidos por la confiabilidad en un ambiente industrial y hostil, se puede implementar un diseño más simple.

En las figuras siguientes se ilustran algunas de las configuraciones básicas que puede presentar un analizador IR. En la Figura 30 se muestra un diseño básico que comprende una fuente IR, un filtro pasa-banda y la interacción con el gas de muestra y el detector. Dependiendo del detector que se use, el filtro pasa-banda puede ser colocado frente a la fuente de luz, en vez de ponerlo frente al detector.

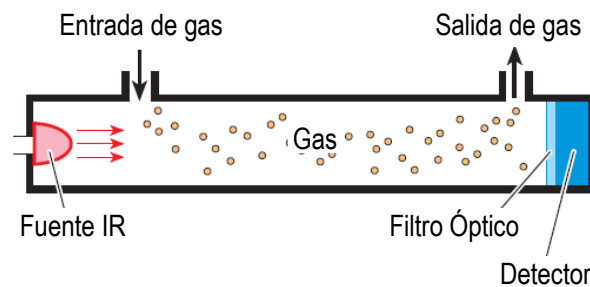


Figura 30. Configuración básica de analizador de gas
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Otra configuración común se muestra en la Figura 31, donde se puede ver un diseño similar, con la diferencia que se emplean dos detectores. Una fuente parpadeante y modulada IR se refleja para llegar a los detectores. El detector activo posee un filtro para el gas objetivo, mientras que el detector de referencia tiene un filtro con una longitud de onda diferente. Dicho de otro modo, el detector activo se emplea para detectar el gas objetivo y el detector de referencia se emplea para ignorar el gas objetivo. Durante la operación normal el detector de referencia provee un punto base o cero, mientras que el detector activo se emplea para suministrar la señal. La diferencia de señal producida entre los detectores provee el valor del span de corriente del instrumento.

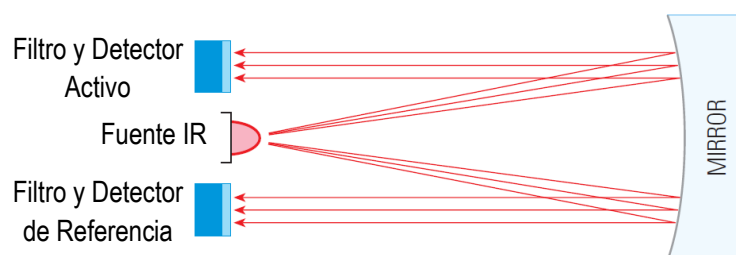


Figura 31. Configuración de analizador de gas con dos detectores
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Este arreglo ofrece la ventaja de compensar los cambios que ocurren en la sensibilidad del detector, a lo largo del tiempo. Por ejemplo, la intensidad de la fuente de luz puede cambiar con el tiempo debido a la contaminación, lo que creará una desviación de cero. El arreglo de dos detectores minimiza este tipo de desviación. Además, en este arreglo, la longitud del camino se duplica, lo cual hace que se tenga una potencia de señal más alta.

La Figura 32 muestra otro diseño popular, el cual consta de dos tubos o celdas. Una de ellas es la celda de referencia que se llena de gas de referencia puro, mientras que la otra es la celda de muestra, a través del cual pasa el gas de muestra.

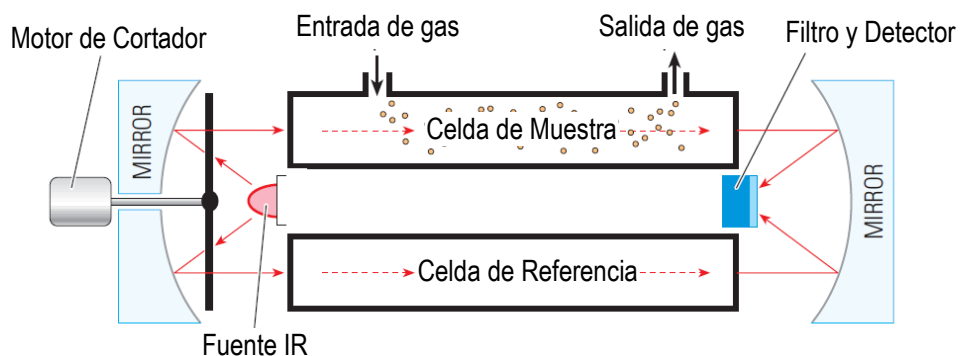


Figura 32. Configuración de analizador de gas con dos celdas de medición
Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

En este diseño se emplea además un dispositivo “cortador”, que es básicamente un disco ranurado giratorio. A medida que el cortador gira, permite que la fuente de luz pase alternadamente a través de las celdas de referencia y de muestra. La lectura base se obtiene de la celda de referencia, mientras que la señal de medición de gas se recibe de la celda de muestra.

2.3.2.4 Características de operación

a. Temperatura

Un detector IR es en esencia, un sensor de temperatura y por lo tanto es potencialmente, muy sensible a los cambios en la temperatura ambiente. Aun así, con un diseño apropiado, puede operar entre -40°C a 60°C sin ser susceptible a

fluctuaciones de temperatura ambiente. La mayoría de detectores de este tipo no reaccionan bien a cambios súbitos de temperatura, requiriendo típicamente de 10 a 20 minutos para alcanzar un equilibrio térmico. Para aplicaciones a la intemperie esto no suele ser un problema debido a que el cambio en la temperatura se da con relativa lentitud. Por otra parte, generalmente el detector IR es operado a una temperatura ligeramente superior a la temperatura circundante con el fin de prevenir la condensación. Esto es debido a que el vapor de agua que se condensa en la óptica y/o detector pueden afectar seriamente el desempeño del analizador.

b. Humedad

La humedad normal del ambiente prácticamente no produce ningún efecto. Sin embargo, niveles altos de humedad pueden producir corrosión y contaminación que lleven finalmente a la falla del analizador. Una humedad muy alta puede tornarse en un problema más serio aun, en presencia de gases corrosivos. El camino de la onda o cámara de muestra puede ser construido de cualquier material que no absorba la luz IR. Los materiales más comunes empleados son el acero inoxidable, aluminio o inclusive cobre, revestido con una capa resistente a la corrosión. Para algunas aplicaciones de humedad extrema, tales como ciertos espacios confinados, contenedores húmedos o drenajes y sumideros, la muestra de gas húmedo debe secarse primero antes de ser expuesto al detector.

c. Sensibilidad

Es necesario tener en consideración que la absorción de la energía IR es directamente proporcional a la estructura molecular del hidrocarburo, además de la concentración presente del mismo. De este modo, por ejemplo, un detector es menos sensible al metano (CH_4) que tiene un enlace simple, sin embargo, con compuestos como propano (C_3H_8) y butano (C_4H_{10}) la sensibilidad se incrementa dramáticamente. Un efecto de esta drástica diferencia de sensibilidad entre diferentes compuestos de hidrocarburos puede ser vista en el hecho de que un detector IR calibrado a 100% de metano puro, se saturará en su lectura con tan sólo un pequeño porcentaje de volumen de propano o butano. Debido a que la concentración de volumen de cada gas para alcanzar el 100% LEL es diferente y la curva de respuesta es no-lineal, es necesario que cada hidrocarburo tenga su propia curva programada en el instrumento. A diferencia de los sensores de tipo

catalíticos, que poseen una respuesta casi lineal a gases en el rango del 100% LEL, los sensores por absorción infrarroja requieren medios para hacer lineal la salida, lo cual se consigue mediante el procesamiento o acondicionamiento electrónico de la señal de medida.

d. Esperanza de vida

Debido a su construcción y principio de funcionamiento, por el que son básicamente dispositivos de estado sólido sellados dentro de un contenedor electrónico con un filtro óptico, los detectores de gases IR tienen por lo general un tiempo de vida útil grande, similar a la mayoría de dispositivos electrónicos. La fuente IR, que es el componente más susceptible de ser reemplazado, tiene una esperanza de vida típica de 3 a 5 años. Este tiempo se puede incrementar enormemente al operar la fuente IR a una energía menor de la diseñada. Por otra parte, el diseño del detector puede permitir que la fuente IR sea reemplazada fácilmente cuando se necesite, sin necesidad de reemplazar todo el instrumento.

e. Respuesta a la concentración de gases

Tal como se muestra en la Figura 33, un detector IR responde a la radiación generando una señal constante en ausencia del gas a detectar, la cual es considerada como nivel cero de la señal. Una vez que el cero es establecido y mantenido, la calibración del span puede llevarse a cabo. Esto es debido al hecho que la absorción de radiación por el gas se da siempre en la misma proporción, independientemente de la intensidad inicial de la fuente.

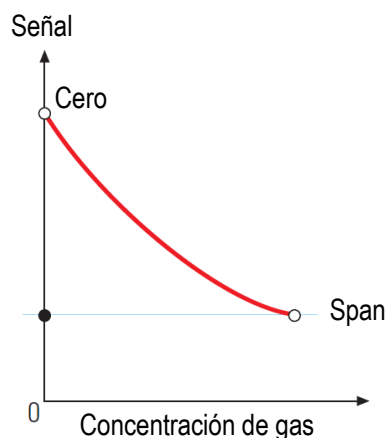


Figura 33. Respuesta típica de un detector IR
 Fuente: Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared gas sensors, *Hazardous Gas Monitors*

Por lo tanto, mientras el nivel cero sea mantenido, la precisión del detector permanece intacta. Esta es una de las ventajas más grandes de la tecnología IR. Aun así, debido a que se trata de instrumentos de seguridad, una rutina para la comprobación de la calibración resulta siempre de utilidad y no debería ser eliminada en un mantenimiento periódico.

De la característica anteriormente observada se puede apreciar por qué la tecnología infrarroja resulta ser altamente segura, ya que una lectura de cero en el instrumento, significa con certeza el valor indicado y no cabe la posibilidad de que el instrumento esté averiado. Esto es debido a que una lectura de cero representa una radiación conocida y constante. Si la fuente IR sufre una avería, el detector no recibe radiación y por lo tanto se interpreta como falla del instrumento.

2.3.2.5 Características prácticas de aplicación

Para aplicaciones en el monitoreo industrial de concentración de gases, el diseño de la unidad debe ser relativamente compacta. De este modo, el método de muestreo debe ser por difusión. Los métodos de muestreo que requieren una bomba para mover la muestra hacia el detector representan un problema potencial debido al tiempo de vida limitado del motor y el mantenimiento requerido de la bomba. Sin embargo, hoy en día existen en el mercado unidades compactas con un sistema de muestreo integrado por bomba interna, que puede ser desactivado

cuando se requiera. También existen unidades que emplean bombas manuales que no requieren motor eléctrico, sin embargo, no tienen tanto alcance como las unidades con bombas eléctricas. Este diseño se da principalmente en detectores portátiles.

El muestreo por aspiración por bomba eléctrica o manual es requerido en algunas aplicaciones donde se sospeche de fugas potenciales y se requiera inspeccionar previamente un área de trabajo, descartando los posibles puntos de fuga, antes que se produzca una concentración peligrosa.

Con el sistema de filtro óptico empleado para %LEL de gases combustibles, el centro del ancho de banda es típicamente de 3.4 micrones. Este es el ancho de banda de la mayoría de hidrocarburos y es también donde la mayoría de gases derivados de hidrocarburos tienen una fuerte absorción.

De este modo, la detección IR se puede aplicar a varios tipos de gases:

1. Alcanos o hidrocarburos saturados, tales como el metano, etano, propano, butano, pentano, hexano, heptano, etc.
2. Ciclo-alcanos, tales como ciclo-propano, ciclo-hexano, metil-ciclo-hexano, etc.
3. Alquenos o hidrocarburos no saturados, tales como el etileno, propileno, buteno, penteno, hexeno, octeno, etc. El acetileno posee absorción a 3.1 micrones lo cual resulta no detectable con el filtro indicado.
4. Ciclo-alquenos tales como el ciclo-hexeno y el pineno.
5. Aromáticos tales como el benceno, tolueno y el xileno.
6. Alcoholes tales como el metanol, etanol, propanol y el alcohol alílico.

7. Aminas tales como dimetil amina, trimetil amina, butanamina, ciclopropanamina y piridinas.
8. Éteres, tales como el dimetil éter, etil éter, n-propil éter, metil vinil éter, óxido de etileno, tetrahidrofurano, furano y 1,4-dioxano.
9. Cetonas, tales como la acetona, metil etil cetona, pentanona, metil isobutil cetona y heptanona.
10. Los aldehídos, que tienen un ancho de banda central mayormente en la región de 3.55 micrones y generalmente tienen una señal de detección muy débil a 3.4 micrones.

Por otra parte, hay que tener en cuenta que el dióxido de carbono en 4.3 micrones y el monóxido de carbono en 4.6 micrones tienen una interferencia muy pequeña por otros gases. Por lo tanto, para su detección es necesario emplear un instrumento con distintos filtros ópticos.

2.3.2.6 Factores importantes de funcionamiento

La detección de gases de hidrocarburos empleando la radiación IR es una tecnología que ha estado disponible desde hace pocos años, sin embargo, debido a las opciones de diseño que existen, las características e implementación de esta tecnología han variado enormemente entre diferentes fabricantes. No obstante, la detección por IR ha sido bien recibida en diferentes sectores industriales, incluyendo la industria de gas y petróleo, donde tiene muchas aplicaciones importantes.

Para propósitos de calidad de aire y aplicaciones de seguridad, se presentan los siguientes factores importantes a tener en cuenta cuando se compara con la tecnología tradicional de detección por combustión catalítica:

a. Envenenamiento

Tal como se explicó en el estudio de la tecnología de detección por combustión catalítica, el envenenamiento es uno de los principales problemas que presenta, en

la que algunos componentes pueden envenenar el compuesto catalítico en el sensor y causar una pérdida de sensibilidad. Los detectores IR en cambio, al no funcionar en base a un elemento catalizador, no tienen la posibilidad que se envenenen. Es decir, son inmunes a los compuestos que normalmente causan problemas en los sensores catalíticos. Es importante también mencionar que, debido al mismo principio de funcionamiento, los sensores IR no presentan tampoco el problema de inhibición.

b. Cracking

El efecto de descalibración o inclusive el deterioro permanente del sensor de gas de tipo catalítico cuando se somete a altas concentraciones de gas, no sucede con la tecnología por absorción infrarroja. La razón de ello es que, al no funcionar mediante un principio de reacción química, los sensores IR no se saturan, aunque sean sometidos a concentraciones de hasta 100% en volumen o gas puro. Esta característica hace que los sensores IR sean muy seguros en ambientes donde puedan ocurrir fugas en las que se liberen repentinamente altas concentraciones de gas. Normalmente esto lo detecta un sensor catalítico en el momento inicial que se empieza a dar la concentración, hasta llegar al 100% LEL, pero si la acumulación de gas persiste, el sensor catalítico es probable que se descalibre y finalmente sature, quedando inservible. Un sensor IR puede soportar esto y restablecerse para luego volver a funcionar sin ningún problema, inclusive sin descalibrarse.

c. Tiempo de vida

Debido al efecto de envejecimiento principalmente, los sensores catalíticos tradicionales, poseen un tiempo de vida de 1 a 2 años en condiciones ideales de operación. Los sensores IR, al no presentar un deterioro químico progresivo por su uso constante, típicamente pueden operar sin problemas por más de 10 años, dependiendo del buen diseño y uso del mismo. Si bien el costo inicial de un sensor IR es mayor que un sensor catalítico, a la larga, por el tema del tiempo de vida que ofrece, resulta siendo una buena inversión a mediano plazo.

d. Calibración

Como medida de seguridad, es recomendable realizar una rutina de prueba y calibración periódica en los sensores de gases de cualquier tecnología. Sin

embargo, los detectores IR aseguran casi siempre una buena respuesta y precisión del span. Los sensores IR al no verse afectados por envenenamiento, cracking, inhibición, etc., son seguros de operar y no presentan la necesidad de verificar frecuentemente su señal cada vez que ocurren incidentes que normalmente afectarían a un sensor catalítico.

e. Seguridad en falla (Fail-Safe) / seguridad en cero

La característica de seguridad en falla para un detector IR está determinada en base al principio de operación del mismo. Recordemos que un detector IR opera en base a un emisor y receptor de luz IR. Básicamente si el receptor recibe la misma intensidad de luz que produce el emisor, significa que no hay presencia de gas. Esta intensidad de luz máxima viene a representar el cero del detector. A medida que la concentración de gas aumenta, los enlaces de hidrocarburo absorben parte de la luz, resultando que la intensidad de luz que recibe el receptor disminuye gradualmente, aunque no llega completamente a cero. Lo descrito hace que cuando el instrumento me dé una lectura de 0% LEL, se tenga la certeza de que el instrumento realmente está midiendo esta concentración de gas y que esta lectura no admita la posibilidad que el sensor esté averiado. Si el instrumento se encontrase averiado, la intensidad de la luz IR sería cero tanto la que sale del emisor y por supuesto, la que recibe el receptor. Por este motivo los detectores IR se consideran “seguros en falla” o “seguros en cero”. Además, muchos fabricantes incluyen en sus equipos una rutina de diagnóstico interno que avisa cuando el sensor se encuentra averiado con el fin de revisar las posibles causas y tomar las acciones necesarias.

f. Requerimiento de oxígeno

El funcionamiento de los detectores IR no requiere de la combustión como se da en el caso de los detectores catalíticos. Por este motivo tampoco es necesaria la presencia de oxígeno que produzca dicha combustión. Esta característica permite a los detectores IR que puedan operar sin problema en ambientes con cualquier concentración de oxígeno, inclusive con contenido nulo del mismo. Lo descrito hace que los detectores IR se puedan emplear en aplicaciones donde los detectores tradicionales catalíticos no funcionarían. Un ejemplo de esto es el monitoreo de procesos de gasificado e inertización de contenedores o líneas de transporte de

combustibles, que son necesarios cuando se requiere limpiar una línea o contenedor de hidrocarburo, donde se deben evacuar completamente los gases inflamables antes de realizar un ingreso seguro. Para desplazar cualquier contenido de gases de hidrocarburo existentes, se llena el contenedor o la línea con un gas inerte. Para monitorear que el proceso de inertizado se ha completado correctamente y ya no existan remanentes de hidrocarburos, es necesario emplear un instrumento que sea capaz de medir la concentración de gases inflamables, aun en ausencia de oxígeno, ya que el gas inerte desplaza todo contenido de oxígeno también. El proceso inverso se llama gasificado, cuando se llena nuevamente la línea o contenedor. Para este caso, además, es necesario que el instrumento de monitoreo sea capaz de operar en concentraciones que van más allá de la capacidad de un detector catalítico. Cuando la línea o contenedor están llenos, se produce una concentración de 100% en volumen de gas, lo cual es posible de medir empleando un detector IR.

g. Limitaciones en la detección

Es importante tener en cuenta que los sensores IR típicos no son capaces de detectar hidrógeno (H_2). Si en alguna aplicación se espera la acumulación de concentraciones de este gas, es necesario pensar en otra técnica de detección segura.

La efectividad de detección por IR está limitada a la capacidad de absorción del gas a detectar y el ancho de banda del filtro del sensor. Por esta razón, algunos gases combustibles son indetectables por este método, como los gases de acetileno, acrilonitrilo, anilina y disulfuro de carbono. Se hace necesario entonces, también tener precaución en el empleo de la tecnología de detección IR cuando se sospeche de la presencia de estos gases y en todo caso revisar las especificaciones del fabricante para los detectores que se piense emplear en la aplicación.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

Las características especiales de la actividad del transporte marítimo de hidrocarburos hacen necesario el replanteo de los métodos tradicionales de

detección de gases inflamables a bordo. Desde su creación, la detección de gases inflamables por combustión catalítica ha sido el método empleado por excelencia, sin embargo, a la actualidad este principio de detección puede ser modernizado presentando ventajas operativas y de seguridad.

La modernización del sistema de detección de gases inflamables por el principio de absorción infrarroja brinda un funcionamiento más seguro y adecuado para la industria de transporte de hidrocarburos. La modernización incluye el reemplazo de los detectores, así como del controlador de gases como parte del sistema de detección.

2.4.2 Hipótesis específicas

- La existencia de la tecnología de detección por absorción infrarroja puede ser empleada para la modernización del sistema tradicional de detección por combustión catalítica, aprovechando sus características operativas para la eliminación de las condiciones inseguras presentes en los sistemas de detección tradicionales.
- La existencia de controladores de gases inflamables más modernos, pueden ofrecer más seguridad en la operación en los sistemas de detección de gases inflamables, donde los controladores tradicionales empleados no resultan ser los más adecuados desde el punto de vista de seguridad.
- Los sistemas de detección de gases inflamables modernos, basados en la tecnología de detección por absorción infrarroja permite reducir los costos operativos, principalmente desde el punto de vista de mantenimiento, debido básicamente a la robustez operativa de los detectores infrarrojos.

CAPÍTULO III: DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

3.1 Descripción del proyecto e ingeniería básica

Este proyecto se encuentra enfocado en la modernización del sistema de detección de gases inflamables, existente a bordo del buque tanque Huascarán. Para ello se ha revisado el sistema indicado, basado en detectores que funcionan bajo el principio de combustión catalítica, los cuales están instalados en las salas de bombas, donde existe peligro de acumulación de gases inflamables, y por lo cual, las regulaciones internacionales ordenan el funcionamiento de un sistema de medición de explosividad. Los detectores se conectan al controlador de gases localizado en la sala de carga, desde el cual reciben la alimentación para funcionar y a donde envían sus señales. En la Figura 34 a continuación se puede apreciar el diagrama de bloques simplificado del sistema de detección de gases inflamables y sus partes principales.

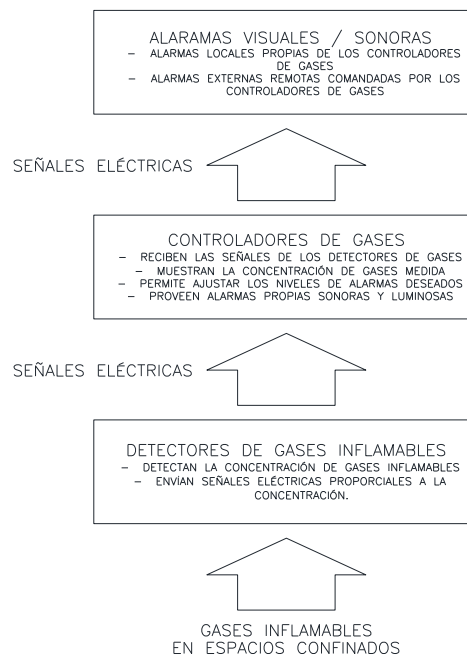


Figura 34. Diagrama de bloques de un sistema de detección típico de gases inflamables
Fuente: Elaboración propia (Representación en bloques - 2010)

La revisión del sistema de detección existente se puede resumir también, en el diagrama de procesos que se aprecia en la Figura 35.

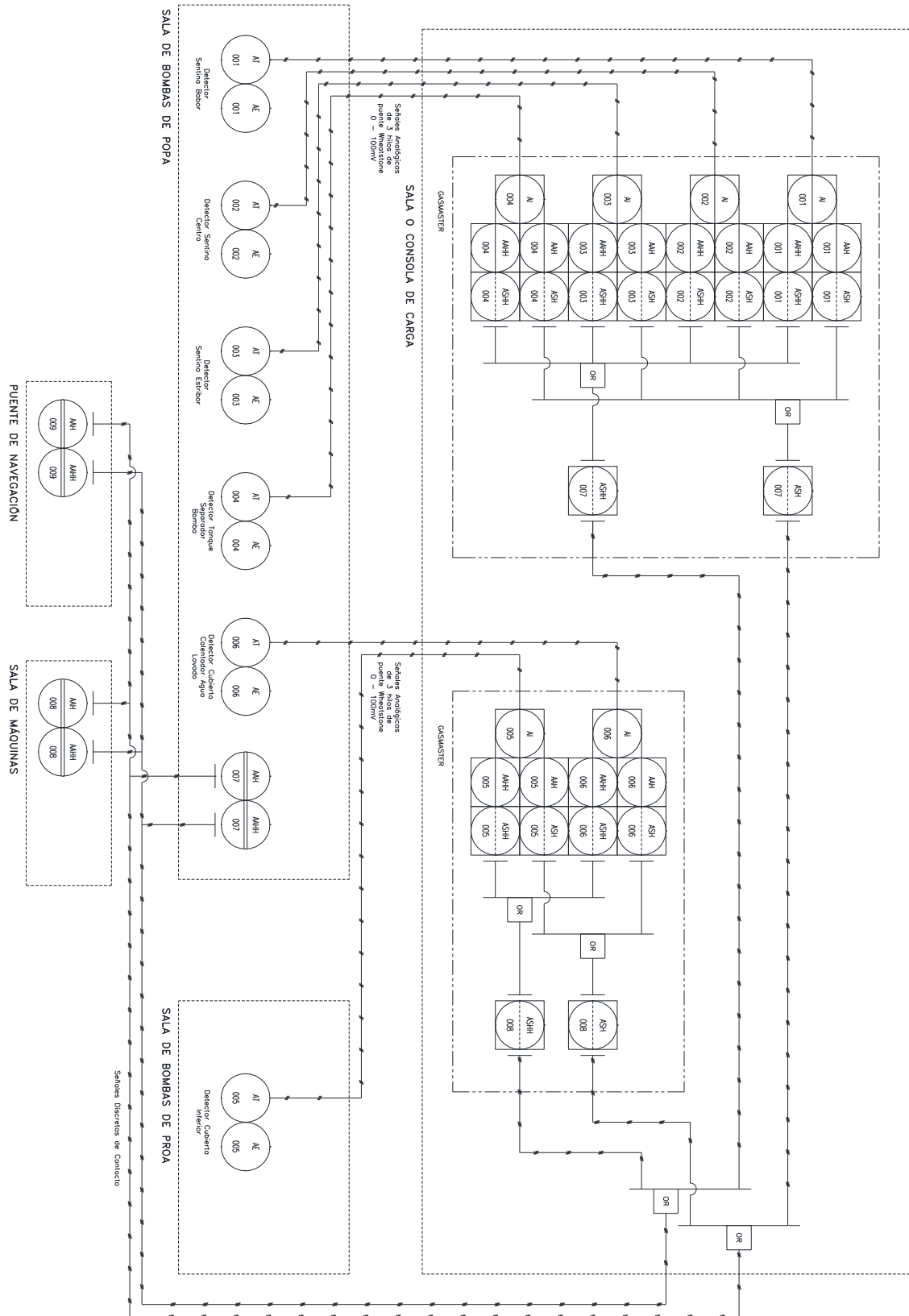


Figura 35. Diagrama de proceso de sistema de detección de gases inflamables – Buque tanque Huascarán
Fuente: Elaboración propia (Representación de proceso P&ID - 2010)

Existen cinco detectores de gases inflamables localizados en la sala de bombas de popa y un detector localizado en la sala de bombas de proa. Cada uno de los detectores opera independientemente como transmisor de señal de concentración para la zona a la cual ha sido asignada y envía su señal respectiva a la consola de carga, a un canal particular del controlador de gases inflamables (Gasmaster). Como cada controlador tiene un máximo de cuatro canales, se ha dispuesto de un controlador adicional para manejar dos canales adicionales, tal como se aprecia en la Figura 35, según el requerimiento particular de la aplicación.

Cada uno de los canales de cada controlador posee su propio indicador de concentración en unidades de %LEL, así como su propia alarma de nivel alto y alto-alto, además de contactos asociados a cada alarma (ASH y ASHH). Como se aprecia de este modo, en la consola de carga se tiene a la mano el detalle de cada uno de los puntos de medición de concentración de gases inflamables.

Internamente en cada controlador, existe un contacto común a todos los contactos independientes de alarmas de nivel alto y de nivel alto-alto (ASH / ASHH 007 y ASH / ASHH 008), que se activan respectivamente cuando cualquiera de los contactos independientes de cada controlador es activado, de ahí la función interna de OR indicada en el diagrama para cada controlador de gases.

Para manejar las alarmas repetidoras en la sala de bombas de popa, sala de máquinas y puente de navegación, se hace un arreglo cableado OR con ambas salidas comunes de los controladores de gases para avisar en caso cualquiera de los puntos de medición llegue a un nivel de concentración peligroso tanto en nivel alto como en nivel alto-alto. La información de la localización exacta del punto o puntos de concentración peligrosa de gases inflamables se podrá apreciar siempre en la consola de carga, directamente en los controladores.

La modernización consiste en reemplazar los detectores existentes por detectores que funcionan por el principio de absorción infrarroja, basados en las ventajas en funcionamiento y seguridad que ofrecen. Como parte de la modernización también se ha considerado el reemplazo del controlador de gases, debido a los

inconvenientes operativos que presenta el modelo existente que se encontró instalado.

El reemplazo de equipamiento del sistema se realizó bajo la premisa de influir lo menos posible en la infraestructura ya instalada, así como en los costos que se incurrirán en el procedimiento, los cuales se analizarán a detalle más adelante como costos iniciales y acumulados a lo largo del tiempo.

3.2 Selección del equipamiento

Como se recordará, el equipamiento estándar para la detección de gases inflamables, constaba de detectores de tecnología catalítica. El objetivo primario es reemplazar los detectores catalíticos por detectores infrarrojos (IR), con el fin de mejorar la confiabilidad y desempeño del sistema de detección. Sin embargo, como parte de la modernización del sistema, se decidió también reemplazar el controlador o panel de alarma, localizado en la sala de carga. Como se verá más adelante, el reemplazo del controlador también aportará en el desempeño del sistema global.

Una consideración solicitada por el propietario del sistema, Naviera Transoceánica, era que los equipos a reemplazar fueran del mismo fabricante (CROWCON Detection Instruments, Ltd.), debido a la trayectoria y especialización que tiene en el área de fabricación de instrumentos y sistemas de seguridad.

3.2.1 Detectores de gases inflamables – Xgard IR

Se revisó las alternativas de detectores disponibles por el fabricante en ese entonces y se decidió que el modelo más adecuado a emplear era el Xgard IR, que es la versión IR de la línea de detectores de CROWCON empleados para la mayoría de aplicaciones industriales. Esta decisión se hizo debido a que el Xgard IR era el modelo con mayor similitud al que empleaban, lo que haría que el proceso de migración sea lo más simple posible desde el punto de vista de instalación y puesta en marcha.

En la Figura 36 se presenta el instrumento indicado, así como un despiece del mismo con sus partes principales. Aparte de emplear la tecnología IR para la detección de gases inflamables con las ventajas que ello supone, los detectores Xgard IR seleccionados poseen otras características que introducen mejoras frente al sistema tradicional de detección de gases inflamables.

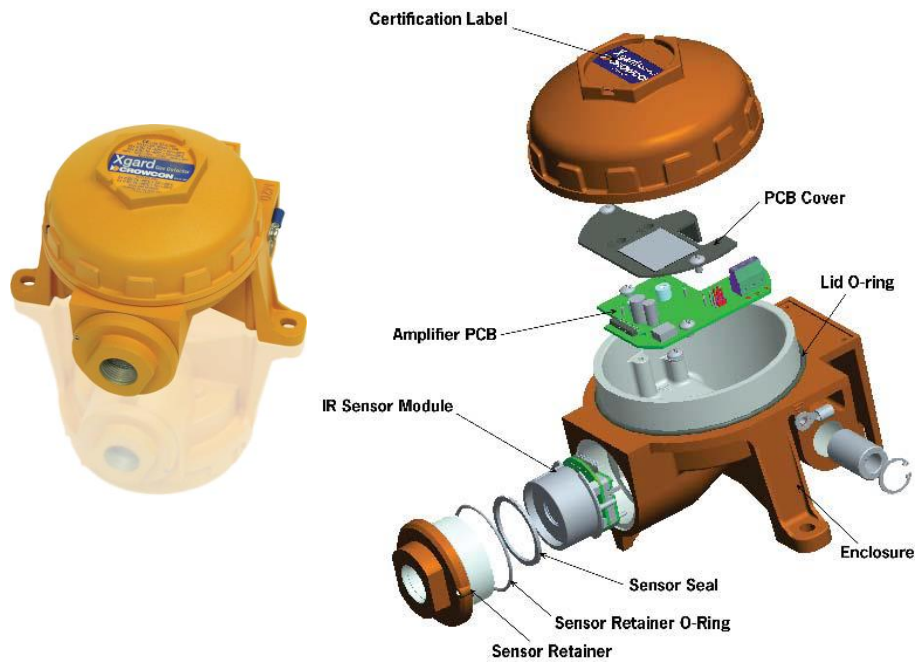


Figura 36. Detector de gas inflamable Xgard IR

Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2007). *Xgard IR Infrared gas detector – Launch pack*

3.2.1.1 Descripción y construcción

El detector Xgard IR se compone de un ensamble universal que aloja el sensor IR, que puede ser de dos tipos: para gases de hidrocarburos o para gas CO₂. De acuerdo a lo indicado y como puede apreciarse en el esquema de la Figura 37, el ensamble del detector Xgard IR consta de cinco partes principales: la caja de conexiones, la tapa de la caja de conexiones, la tarjeta electrónica amplificadora / de conexiones, el módulo electrónico del sensor y el retenedor de sensor.

La caja de conexiones y su tapa, son los elementos que protegen al resto de partes, de los agentes externos y logran dar la garantía de operación en ambientes

explosivos y contra polvo, humedad, etc. Así también, muestran en su exterior la información del detector, datos de fabricación, certificaciones, parámetros de funcionamiento, etc. Su fabricación es de aluminio de grado marino con recubrimiento epóxico en forma estándar, pero se puede solicitar también en acero inoxidable.

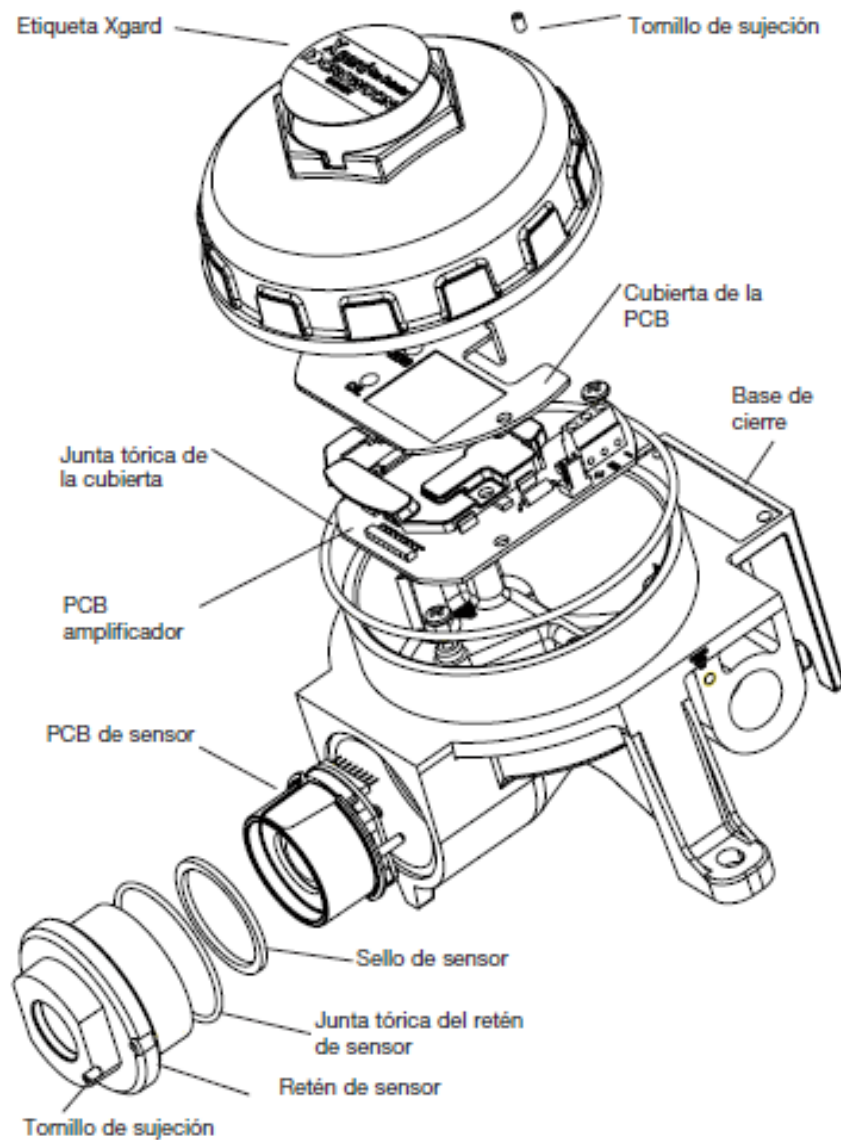


Figura 37. Construcción y partes principales de detector Xgard IR
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2015). *Xgard – Detectores de gas, Instrucciones de instalación, funcionamiento y mantenimiento*

La caja de conexiones provee además de un ingreso lateral derecho para la entrada del cableado correspondiente, mediante prensaestopas. La caja de conexiones

también es la que permitirá el montaje del detector sobre una superficie vertical como una pared o en el techo, mediante unos orificios de fijación que posee.

Los componentes electrónicos internos están ensamblados de modo que permitan realizar mediciones y ajustes cuando se retire la tapa de la caja de conexiones, así también permite acceder a los terminales de conexión. Para ello se dispone de una pieza de plástico (tapa de PCB) que cubre la tarjeta amplificadora, dando acceso sólo a las partes necesarias para el conexión y mantenimiento.

Las partes indicadas hasta este punto son básicamente las mismas que se emplean para otros tipos de gases a detectar y tecnologías a emplear: oxígeno, gases tóxicos o gases inflamables con tecnología de detección catalítica. La diferencia está en el tipo de sensor a emplear. En el diagrama constructivo se aprecia el módulo del sensor denominado como “PCB de sensor”, que en el caso de los detectores IR que describimos, consta de un alojamiento a prueba de llamas en cuyo interior se encuentran situados dos LEDs emisores de IR con diferente longitud de onda, de 3.0 y 3.3 μm , que apuntan a un espejo común y cuyos haces rebotan a un fotorreceptor común. El fotorreceptor se encarga de recibir la intensidad que rebota de ambos haces y en presencia de gases inflamables, detecta la disminución de la intensidad que rebota en el haz de 3.3 μm . El haz de 3.0 μm no sufre disminución de intensidad ante presencia de gases inflamables, tal como se explicó en el estudio de la tecnología de detección por IR y servirá como señal de referencia. Los fotoemisores y fotorreceptores, así como la electrónica asociada está contenida en el módulo del sensor y requiere de energía para funcionar, la cual toma mediante los pines de conexión por enchufe que posee. La señal de medición también se envía al módulo amplificador mediante esta conexión.

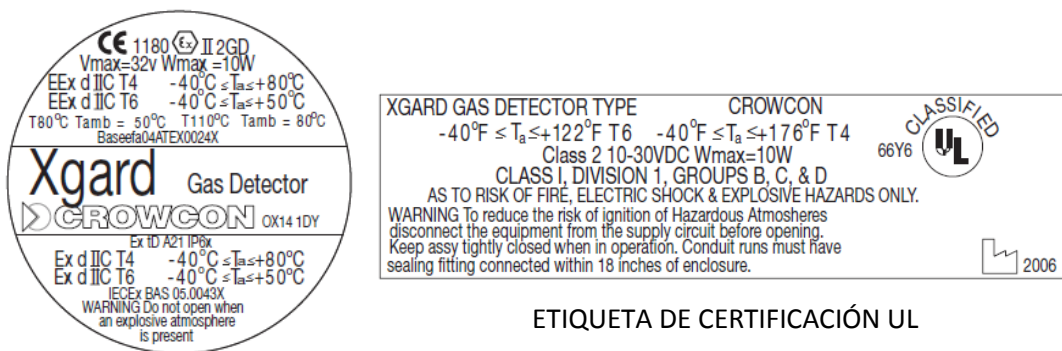
El diseño del detector permite, además, que el módulo del sensor pueda retirarse sin tenerse que abrir la tapa principal de la caja de conexiones. Como se aprecia en el diagrama, el acceso al sensor se da mediante el retén del mismo, que se rosca al cuerpo del detector y contiene además elementos extras de protección y sellado para asegurar la hermeticidad y certificaciones de funcionamiento. Como elemento adicional de protección, el retenedor del sensor contiene un filtro

sinterizado por donde ingresa el gas a detectar para finalmente llegar al módulo del sensor.

3.2.1.2 Certificaciones para zonas explosivas

Es importante destacar que los detectores Xgard IR cuentan con certificaciones internacionales de operación para zonas explosivas. De este modo, cuentan con la codificación EEX d IIC T6, que indica que el instrumento cumple con la certificación europea ATEX y posee carcasa a prueba de fuego, para uso en aplicaciones superficiales, probado con gases volátiles tales como hidrógeno, etileno, propano e inclusive acetileno que es altamente volátil.

La certificación asegura así mismo, que su empleo es adecuado para zonas peligrosas, clasificadas Zona 1 o Zona 2 (con presencia ocasional o intermitente de gases inflamables) y Zona 21/22 (con presencia ocasional o intermitente de polvos volátiles). También tiene certificación norteamericana IECEx, con descripciones de zonificación equivalente (certificación UL). Las certificaciones están debidamente documentadas e indicadas en las etiquetas de los mismos detectores, tal como se puede apreciar en la Figura 38.



ETIQUETA DE CERTIFICACIÓN ATEX

ETIQUETA DE CERTIFICACIÓN UL

Figura 38. Certificaciones de detector Xgard IR para zonas explosivas
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2011). *Xgard IR – Gas detector, Installation, operating and maintenance instructions (multilingual)*

La certificación de operación en áreas explosivas que posee este modelo de detector, hace posible, además, que ya no se tengan que emplear barreras de

seguridad, disminuyendo el costo de implementación total del sistema. De este modo, la conexión eléctrica entre el detector y el controlador o panel de alarmas, se simplifica según se puede observar en la Figura 39 a continuación:

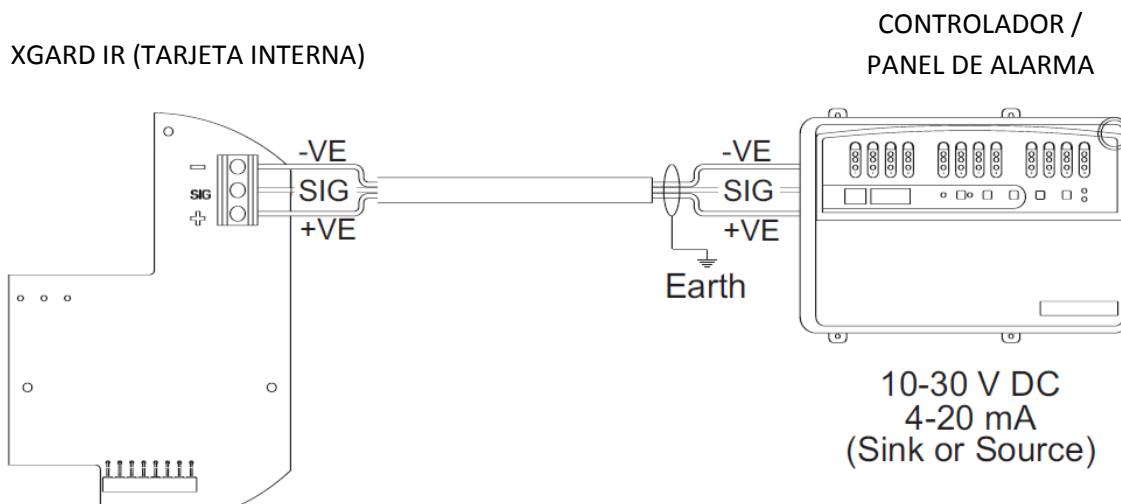


Figura 39. Conexión típica de detector Xgard IR con controlador / panel de alarmas
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2011). *Xgard IR – Gas detector, Installation, operating and maintenance instructions (multilingual)*

3.2.1.3 Señal de salida

Otra característica importante del modelo seleccionado es el tipo de señal de salida, que es de 4-20 mA, a diferencia del modelo que se ha venido empleando (salida en milivoltios). El empleo de señal de 4-20 mA ofrece una ventaja significativa en la confiabilidad del sistema, debido a que se minimiza la interferencia por ruido en la señal que se transporta desde el sensor hasta el controlador / panel de alarmas, lo cual se incrementa proporcionalmente a la longitud del cable de señal empleado.

El empleo de la señal de 4-20 mA facilita, además, la calibración de los detectores. Esto es debido a que, a diferencia de los detectores con señal de salida de mV, no es necesario realizar la calibración con el sensor instalado en el punto final de operación. Los sensores con salida de mV requieren que el ajuste de la lectura correcta se realice en el controlador de gases y se requerirá de un nuevo ajuste en caso se cambie su ubicación (y por tanto la longitud de cable de señal).

En contraparte, los detectores Xgard IR son factibles de calibrarse en el mismo detector, pues la señal de corriente es la misma tanto a la salida del detector como a la llegada en el controlador / panel de alarmas, y la longitud del cable no influye en la señal que llega al mismo.

3.2.1.4 Grado de protección

Aunque se trata de una característica que estos detectores tienen por defecto, es importante mencionar que cumplen con un grado de protección IP65 por lo que, de acuerdo al estándar internacional, son resistentes contra ingreso de polvo y agua. Específicamente, está protegido contra proyecciones (chorros) de agua en todas las direcciones, lo cual lo hace muy conveniente en este caso, pues habitualmente se limpian las instalaciones de la sala de bombas empleando agua a presión.

Así mismo, en la selección del instrumento se tomó en cuenta el material de construcción del cuerpo del detector (caja que contiene la electrónica y los puntos de conexión), el cual es de una aleación resistente a la corrosión con una capa de poliéster. Esto lo hace favorable en aplicaciones marinas, donde la corrosión por humedad daña rápidamente los equipos, lo que trae la necesidad de cambiarlos frecuentemente y el gasto asociado a ello.

3.2.2 Panel de alarmas – Gasmaster

Siguiendo el esquema previamente establecido de detección de gases explosivos, es necesario contar, además de los detectores de gases, de un panel de alarmas que ofrezca la señalización adecuada y permita el manejo de elementos de señalización externas remotas las diferentes áreas donde el buque tanque los requiera, de acuerdo con los estándares de seguridad establecidos.

Como se mencionó en la descripción del sistema de detección estándar, cada detector envía su señal individual de medición de concentración de gases al panel de alarmas y control, lo cual se mantendrá en el esquema propuesto modernizado.

Para la modernización del sistema se ha considerado también un nuevo panel de control y alarmas. Para ello se evaluaron las posibles alternativas que ofrecía el

fabricante, siendo elegido por razones técnicas y de precio, el modelo Gasmaster en su versión modernizada y actualizada, la cual posee ventajas operativas y funcionales que la versión empleada en los sistemas de detección antiguos. La versión modernizada del controlador de gases Gasmaster se puede apreciar en la Figura 40:



Figura 40. Panel de control y alarmas Gasmaster (versión modernizada)
Fuente 1: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2007). *Gasmaster datasheet*

Fuente 2: HALMA PLC (2008). *Crowcon news, Crowcon's equipment on-call to alert own workers to CO danger (April 2008)*

3.2.2.1 Descripción y construcción

El panel de alarmas seleccionado Gasmaster, es una versión modernizada del antiguo panel de alarmas que se venía empleando en sistemas de detección antiguo. En la Figura 41 se muestra un resumen gráfico de las características principales de esta nueva versión del controlador.

Su construcción es completamente a base de circuitos electrónicos digitales o discretos, lo cual mejora su desempeño en el procesamiento de las señales proveniente de los detectores de gas inflamable, así como de las salidas para el control de las diferentes interfaces que ofrece.

El Gasmaster es un panel de control autónomo, flexible y fácil de usar, diseñado para la localización de peligros relacionados con gases e incendios. Aunque para la aplicación descrita se emplea para la detección de gases inflamables, tiene capacidad para ser usado en la detección de gases tóxicos, oxígeno y también permite integrar su uso con detectores de humo con el fin de localizar incendios. El Gasmaster también puede supervisar detectores de llamas y manejar un dispositivo de muestreo ambiental dependiendo de lo que requiera la aplicación.

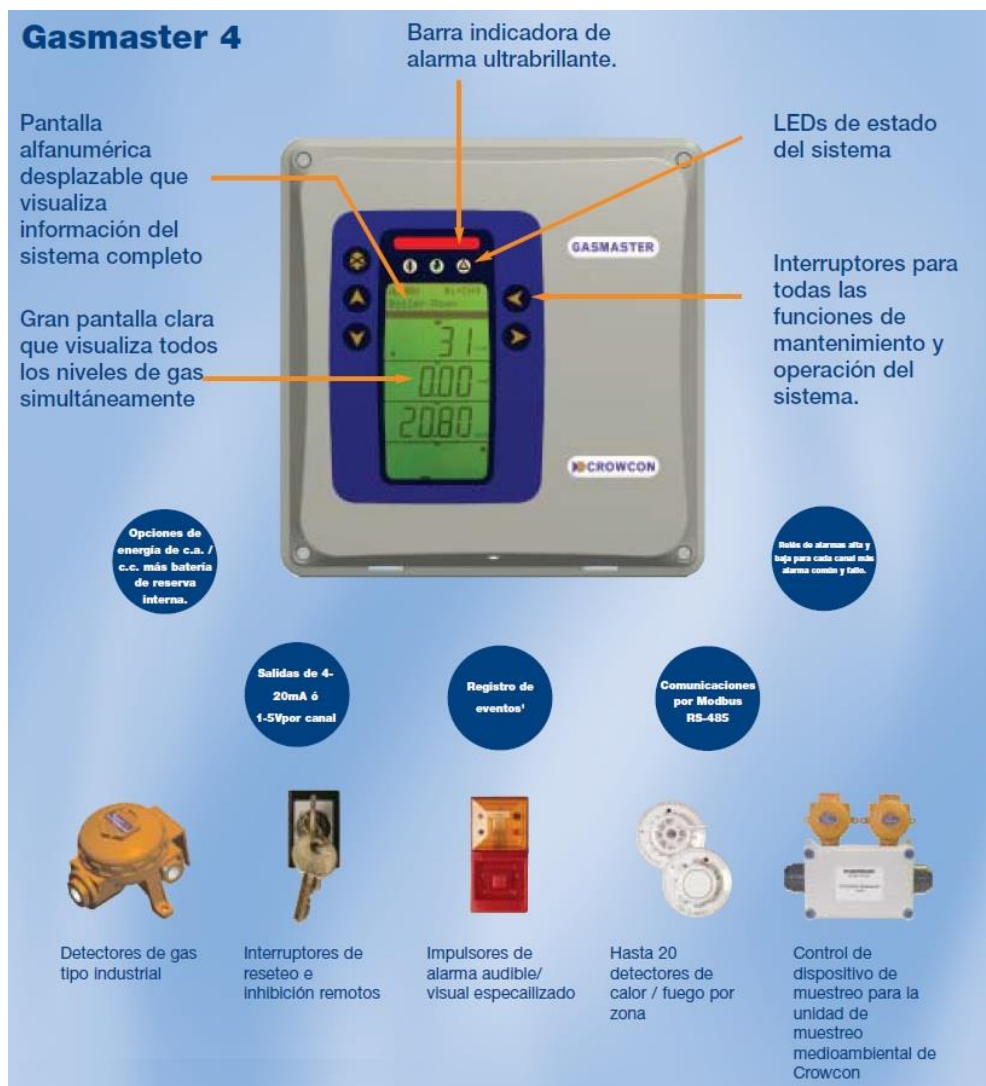


Figura 41. Características principales de controlador de gases Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2006). *Gasmaster datasheet (spanish)*

El Gasmaster tiene una interfaz amigable con el usuario que consta de una pantalla de cristal líquido transparente grande, en la que se muestran hasta un total

de 4 puntos de detección o canales en forma simultánea. Además, indica las alarmas o fallos mediante diodos luminosos transparentes y un indicador acústico integrado. Para el manejo de dispositivos externos, el Gasmaster posee salidas de relé o contacto programables, las cuales funcionan básicamente como repetidores de las alarmas internas y serán empleados en este caso para la activación de alarmas visuales sonoras remotas. Una característica especial de esta nueva versión de Gasmaster es que tiene disponible una salida de comunicación Modbus RS-485 en dos hilos en caso se requiera hacer una interfaz con un sistema de control / monitoreo más grande, tal como un SCADA o un DCS, por ejemplo.

El Gasmaster es un equipo diseñado para su operación en zonas seguras, sin embargo, se puede conectar con detectores y sensores operando en zonas explosivas si dichos equipos están clasificados para ello, tal como los detectores Xgard. Para otros tipos de detectores es posible que se requiera el empleo de barreras o protecciones adicionales, según sea indicado en las especificaciones del fabricante.

Constructivamente, se puede apreciar el controlador Gasmaster en la Figura 42 donde se indican las partes principales del mismo. La caja contiene las diferentes tarjetas electrónicas y el sistema de alimentación de respaldo (baterías). La cubierta frontal delantera se puede remover extrayendo los cuatros tornillos de las esquinas y desconectando con cuidado el conector del indicador sonoro integrado. Como se aprecia, la cubierta frontal cumple la función protectora de la interfaz con el usuario, es decir protege los botones y los indicadores del sistema.

Retirada la cubierta frontal, se tiene acceso a la placa de chasis, que soporta a la tarjeta PCI de la pantalla y que contiene a toda la interfaz con el usuario, es decir la pantalla, indicadores luminosos, así como los botones para la programación y manejo del operador. La placa de chasis también soporta a las baterías internas.

Debajo de la placa de chasis se ubica la tarjeta PCI de los terminales, en la cual se ubican todos los puntos de conexión de los canales de entrada, las salidas y alimentación eléctrica del sistema. La PCI de la pantalla se conecta al PCI de los terminales mediante un conector plano flexible ubicado en la parte izquierda con

el fin de poder acceder a los terminales de conexión. Para un mejor acceso a la PCI de los terminales es posible retirar la PCI de la pantalla, las baterías y también el chasis, desenchufando con cuidado los conectores planos y retirando los cuatro tornillos que lo sujetan a la caja contenedora.

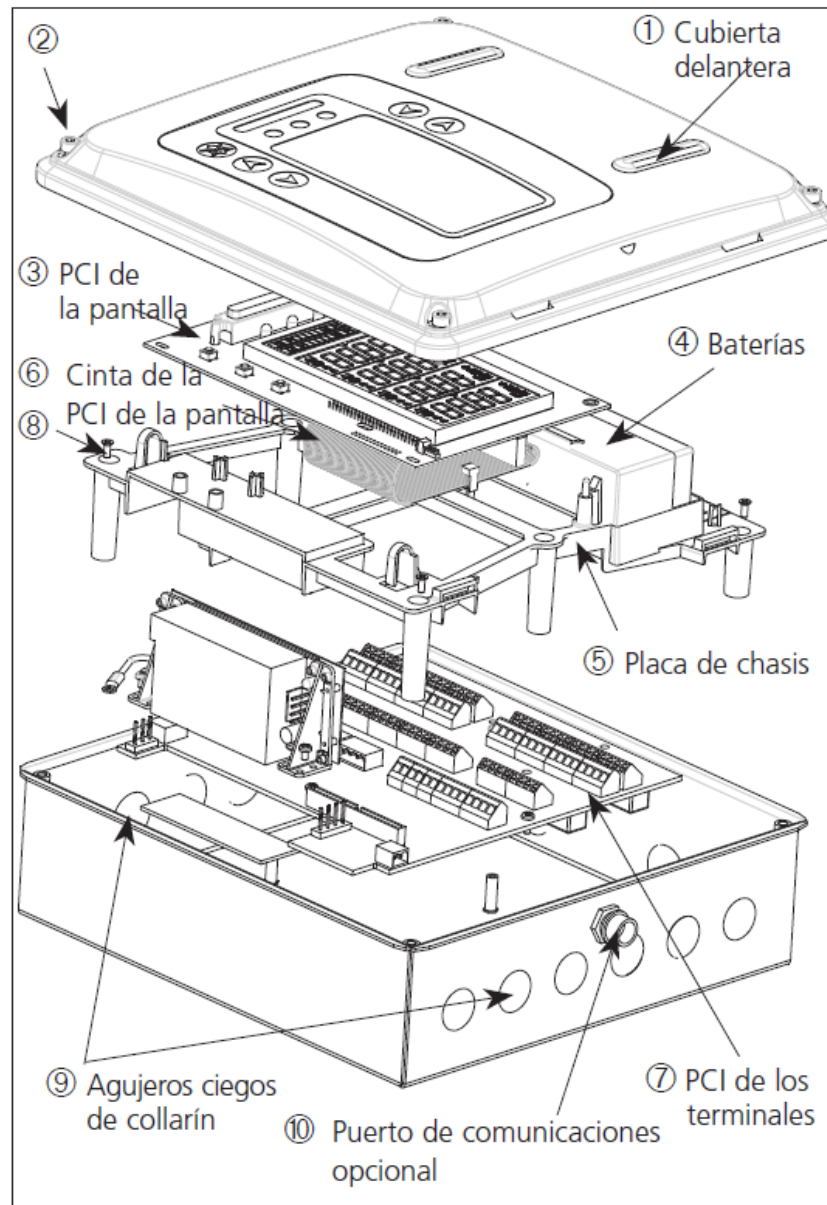


Figura 42. Partes principales de panel de control y alarmas Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

La caja contenedora dispone de 6 orificios ciegos en la parte superior e inferior para el ingreso / salida de cables mediante prensaestopas M20, ½” NPT o PG

13.5. Los orificios se abren golpeando sobre los bordes de cada uno, con lo cual las tapas se desprenderán fácilmente. Esta operación es recomendable que se haga antes de instalar el controlador de gases para no dañar los componentes internos.

3.2.2.2 Protecciones y certificaciones

Como ya se mencionó anteriormente, el panel de alarmas Gasmaster está diseñado para operar en ambientes seguros, no explosivos, por lo que es necesario que se instale y opere en una zona con clasificación segura, tal como es la sala de carga.

El Gasmaster puede, sin embargo, recibir y manejar las señales de equipos que están instalados en zonas explosivas y peligrosas, tal como detectores de gases inflamables, detectores de humo, etc.

Para el funcionamiento seguro de todo el sistema de detección es recomendable que se sigan las especificaciones del fabricante en cuanto al conexionado de equipamiento y el uso, de ser necesario, de elementos de protección adicionales, tales como barreras Zener o aisladores galvánicos.

Un factor importante a tomar en cuenta es el avance que se ha efectuado en la tecnología de fabricación, logrando hacer el sistema de detección y principalmente el panel de alarmas, resistente a las interferencias electromagnéticas. Para esto, el controlador cumple con el estándar especializado de compatibilidad electromagnética (EMC) europeo EN 50270: Compatibilidad Electromagnética para la Detección y Medida de Gases Combustibles, Gases Tóxico o de Oxígeno.

El modelo antiguo de Gasmaster cumplía estándares EMC con menores prestaciones: EN 50081-1 y EN 50082-1 que son estándares que norman la emisión e inmunidad genérica para aplicaciones residenciales, comerciales y de industria ligera.

Ya que los primeros diseños de sistemas de detección de gases eran para aplicaciones que no requerían mayor robustez ante ambientes industriales, el cumplimiento de normas genéricas era más que suficiente. Sin embargo, la diversificación de las aplicaciones industriales, entre ellas, la detección de gases

inflamables en el transporte de hidrocarburos, ha requerido que se cumplan nuevos estándares de funcionamiento que regulen la emisión e inmunidad electromagnética.

Particularmente, en este caso se observó que, durante el uso de los modelos antiguos del controlador, se producían lecturas de concentración de gases que no coincidían con la operación normal a bordo del buque tanque. Así mismo, el proceso de calibración de los detectores de gases, una vez instalados y conectados al panel de alarmas, no se podía realizar con la confiabilidad debida, ya que los detectores mostraban lecturas erráticas durante y luego de la calibración efectuada.

El análisis de causas efectuado, evidenció que estos problemas eran ocasionados por la interferencia electromagnética que se presentaban en los alrededores del panel de alarmas. Concretamente se producía lecturas incorrectas cuando se operaban equipos de radios a bordo del buque tanque. Estos sistemas de radios, sin embargo, son necesarias para la comunicación del personal a bordo, así como para la comunicación con el exterior. Más aún, el proceso de calibración de los detectores de tecnología catalítica requería la comunicación constante por radios entre el personal que ajusta cada uno de los detectores en la sala de bombas y el personal que comprueba la lectura en la sala de carga. La comunicación y por lo tanto la operación frecuente de las radios, producía falsas lecturas en el panel de alarmas, lo que hacía muy difícil lograr una calibración correcta.

Los factores mencionados sumados a otras fuentes de interferencia electromagnética a bordo, hacían disminuir la confiabilidad del sistema de detección antiguo, ya que un sistema de seguridad requiere una lectura segura y lo más inmune posible a factores externos propios de la operación del proceso. Por ello, el diseño moderno de los detectores de gases y principalmente del panel de alarmas cumplen con normas más especializadas de funcionamiento y ofrecen mayor inmunidad a interferencias electromagnéticas, con lo que pueden emplearse de forma segura en ambientes con alta presencia de emisiones de radiofrecuencia, como lo es habitualmente un buque tanque.

En cuanto a la protección contra agentes externos y debido a las características de funcionamiento, puesto que se trata de un equipo de visualización, el panel Gasmaster cumple con una protección de ingreso estándar de IP54, con opción de IP66 en caso se requiera mediante protecciones especiales.

3.2.2.3 Interfaces

Como se mencionó anteriormente, el controlador de gases Gasmaster posee versatilidad en el manejo de diferentes tipos de entradas y salidas, según la aplicación que se requiera:

- Detectores de Gases: Tiene la capacidad de recibir la señal de uno a cuatro detectores de gases, de 2 o 3 hilos, con salida de 4-20 mA, tipo sink o source. Con un adaptador opcional, se puede recibir señales de detectores tipo puente con señal de salida en milivoltios si fuera necesario.
- Detectores de Incendio: Tiene la capacidad de manejar de uno a cuatro lazos (un lazo por canal), cada uno de hasta 20 detectores de calor / humo convencionales o puntos de llamada manuales; o de uno a cuatro detectores de llama, con señal de contacto digital o de 4-20 mA.
- Control de Unidad de Muestreo Ambiental: Puede usarse con uno a cuatro dispositivos de muestreo de medio ambiente propios del fabricante.
- Inhibición Remota: Por medio de una entrada de contacto normalmente abierto.
- Reseteo Remoto: Por medio de una entrada de contacto normalmente abierto.
- Salidas de Contacto: Tipo DPCO, con capacidad de 250 VAC @ 8A no inductivo, dos por cada canal configurables como alarmas de alta y baja; adicionalmente dos alarmas de alta y baja comunes y una señal de falla común. El funcionamiento de estas salidas es configurable de acuerdo a lo que se requiera en la aplicación.

- Salida de Alarma: Dedicada para el manejo de un dispositivo externo de alarma visual / audible, de 24 VDC @ 650 mA de capacidad máxima (dos dispositivos típicos como máximo, conectados en paralelo).
- Salidas Analógicas: Hasta un total de cuatro salidas de 4-20 mA / 0-5 VDC, una por cada canal
- Comunicación Digital: Mediante protocolo Modbus RTU, RS-485 para vigilancia y control mediante sistemas SCADA, DCS o comunicación con un controlador lógico programable (PLC).
- Puerto de Comunicaciones: Dedicado para programación por PC y descarga de registro de eventos internos.

3.2.2.4 Señalización

El panel de alarmas seleccionado Gasmaster, soporta indicadores básicos de señalización local en el mismo panel: Una pantalla de visualización de cristal líquido con retroiluminación, que tiene indicadores digitales del nivel de señal en diferentes unidades configurables (ppm, ppb, % de volumen o % LEL), para cada canal, así como indicación de estado alfanumérico por desplazamiento, LEDs de alarma, fallo, alimentación, además de indicador sonoro integrado de 85 dB.

3.2.2.5 Alimentación

El controlador de gases Gasmaster requiere de una alimentación principal de 90 a 264 VAC @ 50/60 Hz, sin embargo, también puede alimentarse mediante una fuente de 20 a 30 VDC @ 65W como máximo.

Debido a que se trata de un equipo de seguridad, el panel Gasmaster cuenta con un sistema de alimentación ininterrumpida, para lo cual tiene un banco interno de baterías de 1,2 Ah que se carga con la energía principal y brindan alimentación de respaldo, en caso se presente un corte de la misma. Dependiendo de cuantos canales se empleen y el tipo detectores a usar, el sistema de alimentación de respaldo tiene un tiempo de autonomía diferente. Para el caso del manejo de

cuatro detectores de gases IR, el tiempo de autonomía aproximado es de 25 minutos con carga completa.

3.3 Instalación y configuración de equipos – ingeniería de detalle

La idea general de este desarrollo, es la modernización del sistema existente antiguo, lo cual se pretende lograr con el reemplazo de los equipos principales: Detectores de Gases Inflamables y Panel de Alarmas. Como se recordará, el sistema antiguo consta de equipamiento adicional que no se reemplazará o dejará de usarse:

- Alarmas repetidoras en sala de bombas, sala de máquinas y puente de navegación. Las alarmas externas existentes no serán reemplazadas debido a que pueden emplearse perfectamente con el equipamiento a reemplazar. Así mismo, el nuevo panel de alarmas Gasmaster tiene una alarma visual y sonora propia que serán las que se emplearán en la sala de carga o consola.
- Barreras Zener como interfaces entre los detectores de gases inflamables tipo catalíticos con salida en mV y el panel de alarmas. Debido a la característica de operación segura de los detectores de gases inflamables IR, las barreras mencionadas ya no serán necesarias y la conexión de los nuevos detectores se hará directamente con los nuevos paneles de alarmas.
- Cableado de señal entre detectores de gases y paneles de alarmas. El cableado de los detectores antiguos era de tres hilos apantallados, en los cuales se tenía alimentación, señal de voltaje y tierra, mientras que, de manera similar, los detectores a reemplazar requieren tres hilos apantallados, por lo tanto, es posible emplear el mismo cableado de conexión para los nuevos detectores.

3.3.1 Cableado entre detectores de gas y panel de alarmas

De acuerdo a lo explicado anteriormente, será necesario reemplazar los seis detectores de gas y los dos paneles de alarma existentes (ver 1.3.4.1).

Ya que el número de canales que soporta cada panel de alarmas o controlador de gases es cuatro como máximo, se requiere dos controladores para poder manejar la cantidad de detectores requerida, de modo que la distribución de los detectores será igual al sistema originalmente encontrado a bordo. Entonces, el arreglo de conexión entre los equipos del sistema de detección de gases inflamables modernizado propuesto, quedará de acuerdo al esquema que se muestra en la Figura 43.

El esquema indicado muestra que la cantidad y disposición de detectores no cambia, pero si el tipo de detector empleado, los cuales se reemplazan por detectores de tecnología infrarroja. El tipo de señal que envía cada uno de los detectores al controlador de gases tampoco es de 0 a 100 mV empleado originalmente, pues los detectores IR propuestos tienen señal de salida de 4-20 mA. El cableado a emplear para los detectores IR requiere tres hilos por detector de manera similar a los detectores originales, por lo que se puede mantener el cableado original.

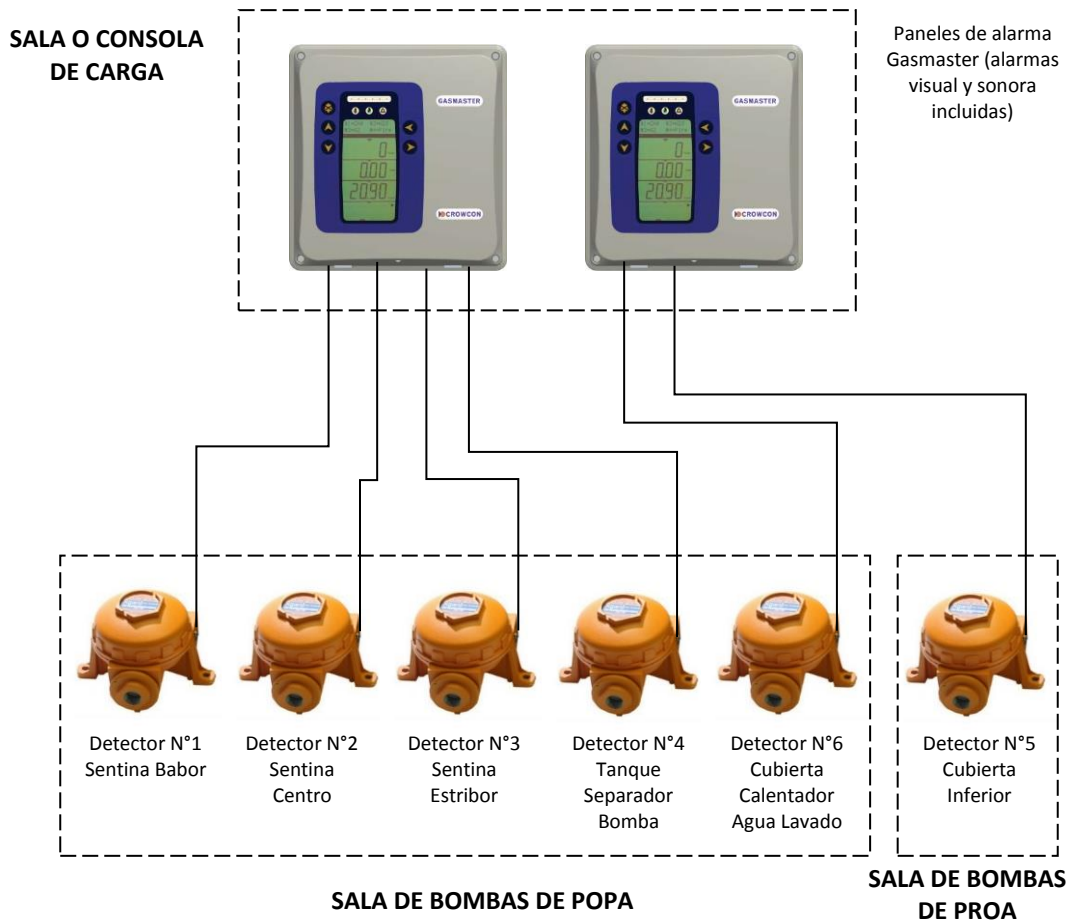
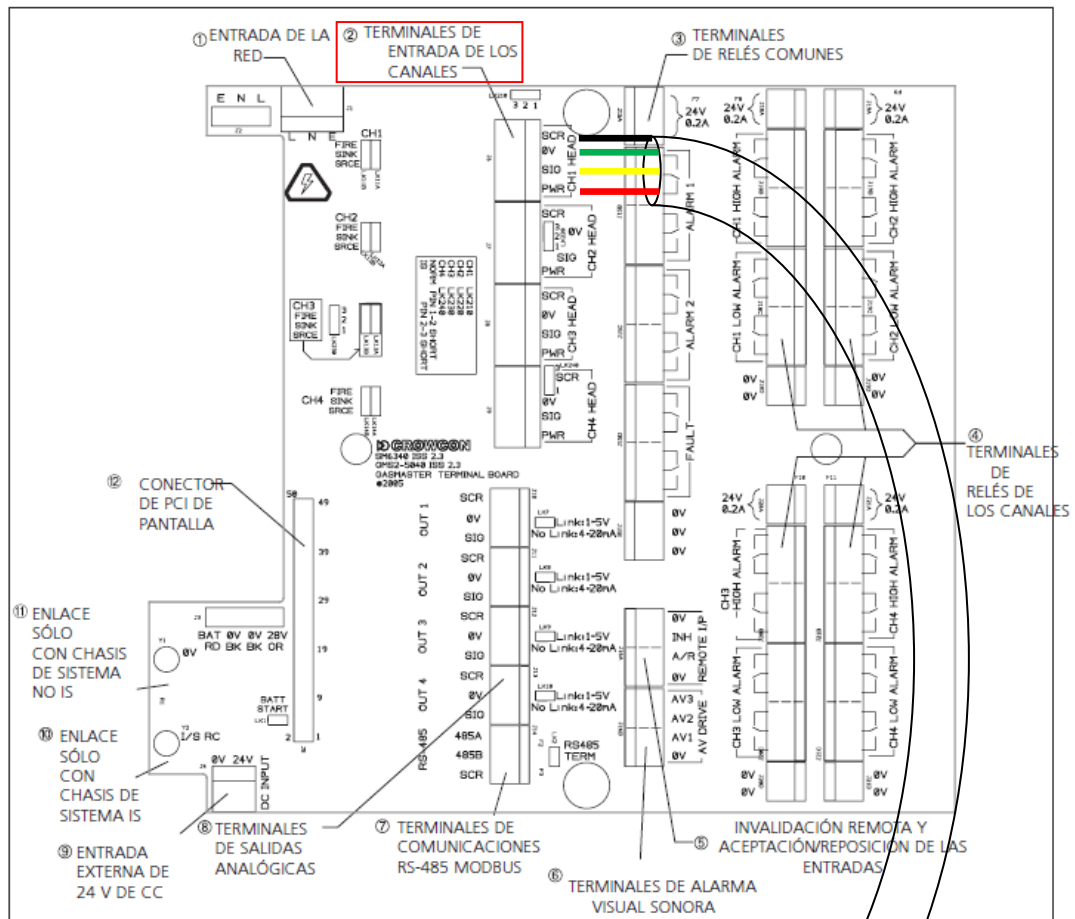
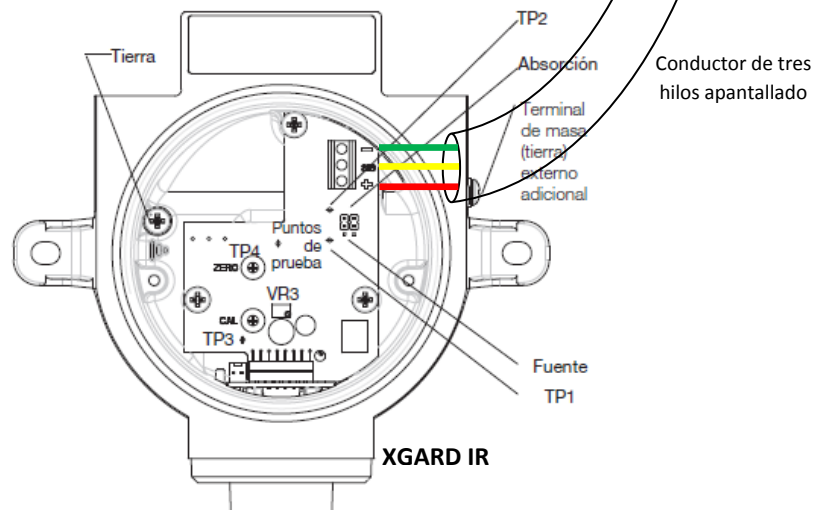


Figura 43. Esquema simplificado de conexión entre detectores de gas y panel de alarmas - Reemplazo en buque tanque Huascarán
 Fuente: Elaboración propia (Esquema general - 2012)

El cableado empleado originalmente era de tres hilos apantallados, que se mantendrá para los nuevos detectores infrarrojos. De este modo, el detalle de conexionado para cada uno de los detectores IR con los paneles controladores de gases, se representa en la Figura 44. Si bien el esquema muestra el detalle de conexión para un solo detector, los otros cinco instrumentos se conectarán de manera similar a los canales 2, 3 y 4 del primer controlador y los canales 1 y 2 del segundo controlador.



GASMASTER



XGARD IR

Figura 44. Detalle de conexión de detector de gas Xgard IR con panel de control Gasmaster
Fuente 1: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

Fuente 2: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2015). *Xgard – Detectores de gas, Instrucciones de instalación, funcionamiento y mantenimiento*

Como se puede apreciar, el conexionado se da mediante un cable de tres hilos apantallado. La pantalla se conecta al terminal SCR del canal correspondiente en el Gasmaster y los tres hilos se conectan según se indica en el gráfico y la Tabla 8 de correspondencia.

Tabla 8. Correspondencia de conexión entre detector Xgard IR y panel Gasmaster

Gasmaster	Xgard IR
SCR (se conecta a la pantalla del cable)	
0V	-
SIG	SIG
PWR	+

Fuente: Elaboración propia (2012)

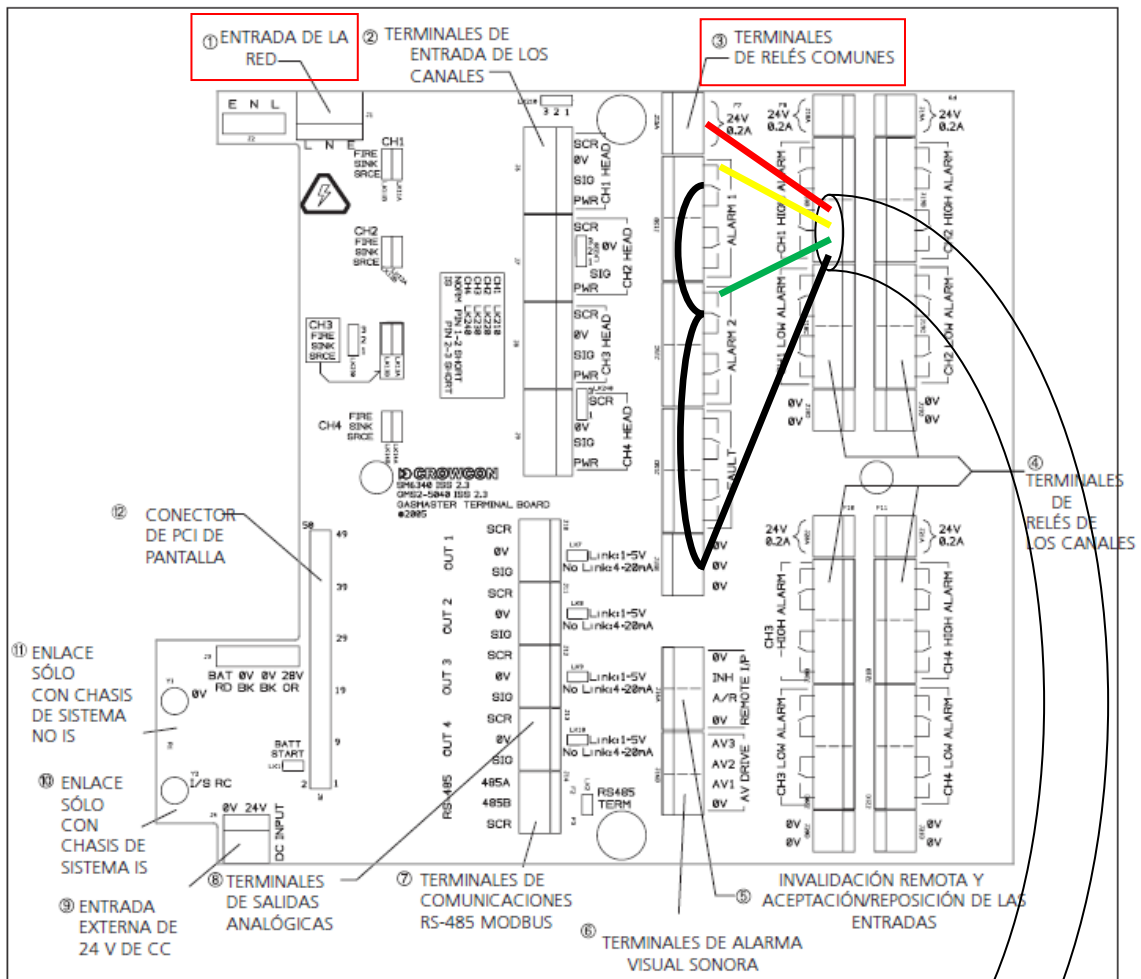
La tabla indicada muestra la correspondencia de conexionado para un detector Xgard IR, sin embargo, se aplica a todos los detectores, que se conectarán de la misma manera en cada uno de los canales disponibles en los controladores, según se explicó anteriormente.

3.3.2 Cableado de alarmas visual / sonora externas

Las unidades de alarmas visuales / sonoras externas se mantendrán de acuerdo con el diseño original y se activarán de forma paralela en la sala de carga, sala de bombas, sala de máquinas y puente de navegación de acuerdo a lo especificado inicialmente en las directivas de seguridad.

De este modo, se adaptarán las alarmas externas existentes a los nuevos controladores de gases Gasmaster a instalar. El detalle de conexionado se muestra a continuación en la Figura 45.

Tal como se explicó anteriormente, el panel de alarmas Gasmaster posee señales de contacto por canal y además un grupo de señales de contacto común a todos los canales, el cual se activa en caso de que cualquiera de las alarmas respectivas de los otros canales se active.



GASMMASTER

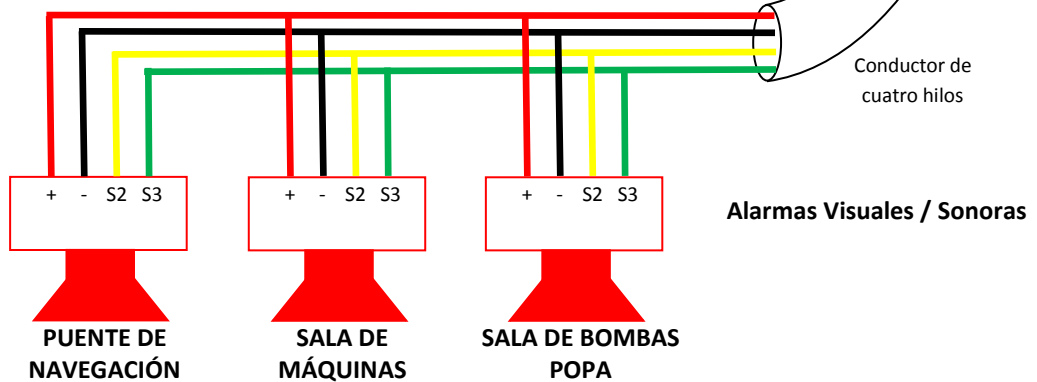


Figura 45. Detalle de conexión de panel de control Gasmaster con Alarmas Visuales / Sonoras Existentes
 Fuente 1: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

Fuente 2: E2S Warning Signals (2006). *A100 – 32 Tone ‘AlertAlarm’, Installation instructions*

Para el caso particular y siguiendo la configuración estándar que se da para esta aplicación, se empleará el juego de contactos comunes de salida para activar las alarmas externas en paralelo. La Alarma 1 y Alarma 2 se activarán cuando el nivel de gas inflamable llegue a los límites configurados respectivos. Normalmente se ajusta un límite inferior de LEL como advertencia y un límite superior como alarma de evacuación.

El cableado de las señales de contacto a los dispositivos señalizadores externos dependerá en gran parte del funcionamiento de estos últimos. Para el caso particular se emplearán dispositivos señalizadores o alarmas acústicas / visuales (sirenas / balizas) con doble entrada, capaces de generar dos tipos de patrones de sonido distintos que diferenciarán las Alarmas 1 y 2. Los dispositivos señalizadores pueden conectarse en paralelo de modo que permitan activarse a la vez con una sola señal de contacto y alimentación de 24 VDC común, lo cual también simplifica el conexionado de los mismos.

El esquema de la Figura 45 muestra el conexionado de un cable de cuatro hilos, de acuerdo con lo explicado, desde el Gasmaster hacia los dispositivos señalizadores. Internamente se efectuarán en el Gasmaster, los puentes indicados, de modo que se unan los terminales comunes de los contactos de salida comunes y el polo negativo (0V) respectivo. Otro de los hilos se conectará al polo positivo (24 VDC) de los contactos de salida comunes. Los puntos no comunes de ambos contactos (Alarma 1 y Alarma 2) se llevarán independientemente hacia cada una de las entradas diferenciadas de los dispositivos señalizadores (S2 y S3 respectivamente).

Hay que recordar así mismo que se van a emplear dos paneles de alarma debido a la cantidad de detectores de gas inflamables que se requieren para los puntos de monitoreo. Por este motivo y para que se mantenga la propiedad de activación común de los dispositivo señalizadores, es necesario conectar los contactos de salida correspondientes en paralelo de ambos paneles de alarma. De esta manera, del conjunto de dos paneles de alarma saldrá un solo grupo de 4 hilos a conectarse con los dispositivos señalizadores según se muestra en el esquema. Por consideraciones de energía se prefiere emplear los puntos 24 VDC y 0V del panel

de alarmas que cuente con menor número de sensores de gas inflamable con el fin de que se equilibre el consumo de energía de ambos paneles de alarmas, en especial en el momento en que puedan entrar en operación las baterías de respaldo.

En el esquema mostrado también se indica el conexionado adicional necesario de alimentación general de 220 VAC, mediante (1) ENTRADA DE LA RED, para lo cual se debe conectar la tensión de 220 VAC monofásica en los terminales L y N. El terminal E es para conexión de aterrizaje de fuerza.

3.3.3 Detalle de conexionado del sistema de detección de gases inflamables modernizado

En los dos primeros puntos del apartado 3.3 se ha revisado el detalle del conexionado de los equipos seleccionados, tanto de los detectores de gases inflamables IR, como del controlador de gases Gasmaster, así como de las alarmas repetidoras externas localizadas en los ambientes requeridos.

Podemos sintetizar de esta manera, el conexionado de todos los elementos del sistema, en un diagrama de lazos de instrumentos, tal como se muestra a continuación en la Figura 46. En dicho diagrama se puede apreciar la ingeniería de detalle del conexionado de los equipos involucrados en el proyecto, la naturaleza de las señales de proceso involucradas y las conexiones particulares de cada uno de los equipos.

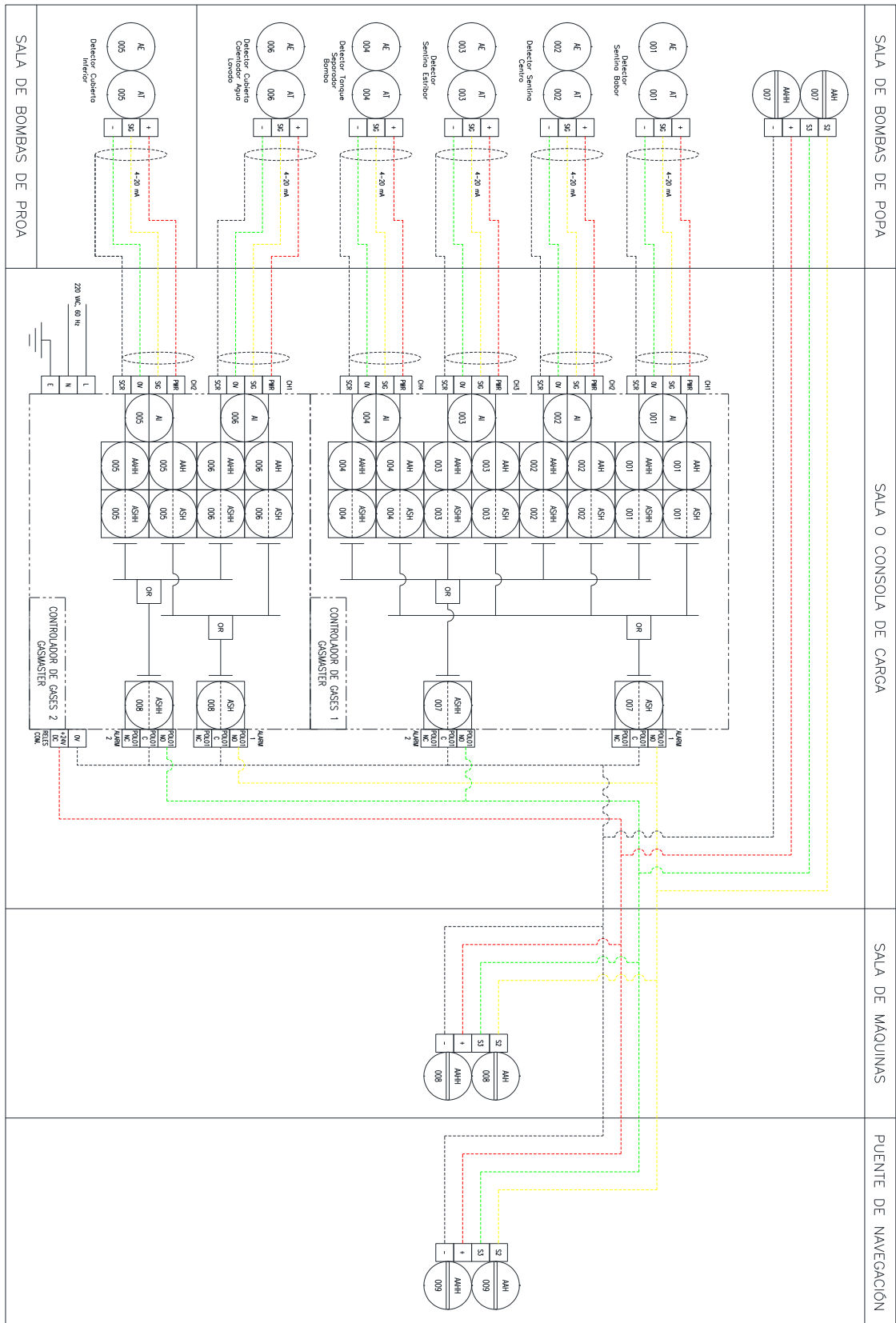


Figura 46. Diagrama de lazos de instrumentos de sistema de detección de gases inflamables modernizado – Buque tanque Huascarán
Fuente: Elaboración propia (Representación de proceso P&ID - 2012)

3.3.4 Configuración de detectores de gases inflamables

La configuración de los detectores de gases IR va de la mano con el tipo de conexión que se requiera realizar. Para el caso de estos equipos, la configuración es relativamente simple pues sólo se tiene que decidir si su conexión al panel de alarmas será tipo sink o source.

Según lo que se elija, se deberá conmutar los puentes selectores internos, de acuerdo con lo que se muestra en la Figura 47.

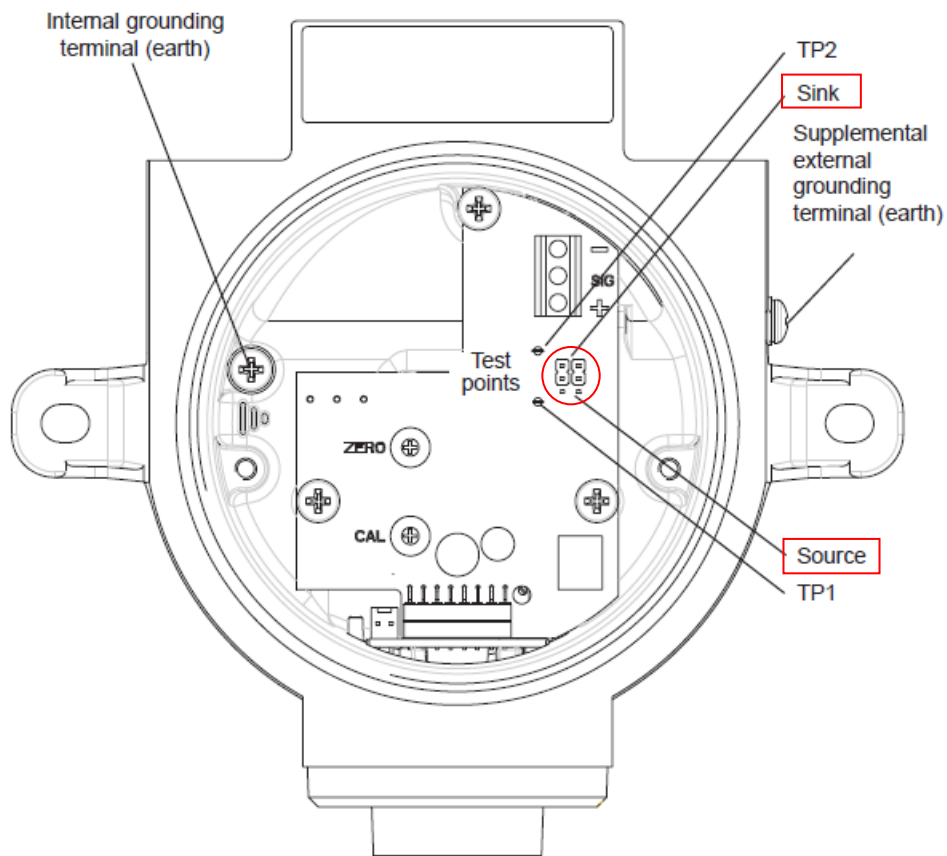


Figura 47. Configuración de detector de gases inflamables Xgard IR
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2011). *Xgard IR – Gas detector, Installation, operating and maintenance instructions (multilingual)*

En la tarjeta electrónica del detector se debe identificar dos puentes que están cerrando un circuito para emplear la señal de salida de corriente como sumidero (sink). Esta configuración viene por defecto de fábrica, sin embargo, si fuese

necesario se puede seleccionar la configuración como fuente de corriente (source) cambiando de posición los puentes hacia la posición inferior.

3.3.5 Configuración de panel de alarmas

En el panel de alarmas o controlador de gases, deberá realizarse una operación similar para cada uno de los canales que reciban la señal de los detectores de gas. Además, deberá realizarse ajustes adicionales dependiendo de la función de la señal de contacto de salida que se requiera. Como se mencionó en la selección del equipamiento, el panel de alarmas Gasmaster es un equipo que se puede emplear para diferentes aplicaciones de seguridad e inclusive posee funciones de control para las salidas que posee, sin embargo, para nuestro estudio, su configuración se realizará de manera que se adapte a la función de generación de alarmas de nivel de gases inflamables, tal como se detalla en los siguientes puntos:

3.3.5.1 Configuración por detectores a conectar

Lo primero que se debe tener en cuenta al configurar el panel de alarmas es el tipo de detectores a conectar, así como la cantidad y a qué canales se van a conectar cada uno de ellos.

Para nuestra aplicación, como ya establecimos, vamos a conectar detectores de gases inflamables Xgard IR, que son dispositivos de tres hilos, con señal de salida de corriente de 4-20 mA.

De acuerdo a lo indicado en el manual de operación, se debe seguir el conexionado visto ya anteriormente y además es necesario que se defina si el detector es tipo sink o source, según lo cual se ajustará el puente selector respectivo en la tarjeta electrónica de los terminales de conexión, según se aprecia en la Figura 48.

Como puede apreciarse en el esquema, cada uno de los canales de entrada tiene asociado dos juegos de puentes según el dispositivo de entrada y el conexionado que se requiera emplear.

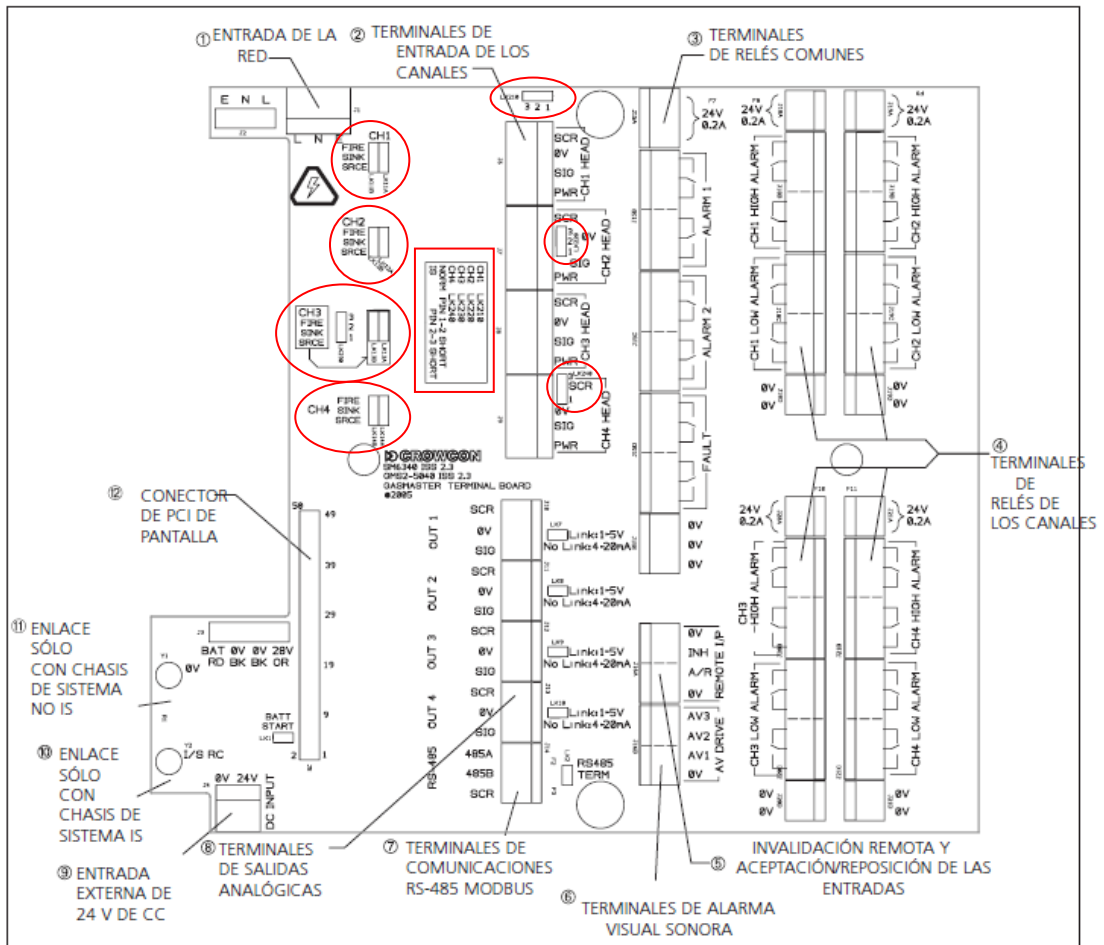


Figura 48. Configuración de panel de alarmas Gasmaster por detectores a conectar – Ubicación de juegos de puentes para cada canal
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

Uno de los juegos de puente se empleará para seleccionar si el detector que se conecta tiene la configuración sink o source, mientras que el otro juego se ajustará dependiendo si el detector se conecta mediante barreras Zener o no.

El detalle de los posibles ajustes para cada canal se puede observar en un ejemplo, en la Figura 49 que se muestra a continuación. En este ejemplo observamos la conexión típica de un detector de 3 hilos a uno de los canales del panel de alarmas, tal como vimos anteriormente.

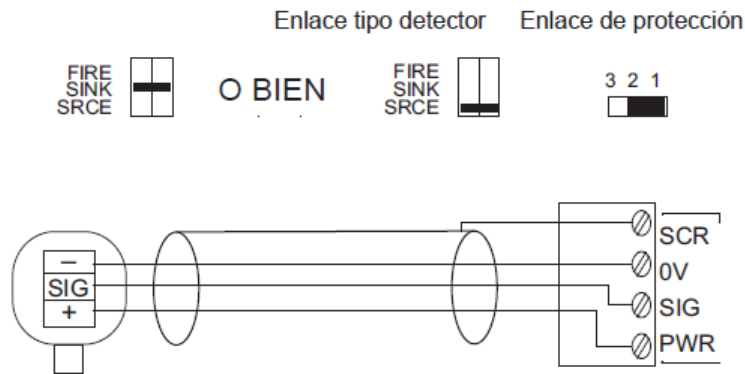


Figura 49. Ajuste de juego de puentes en Gasmaster por canal, según el tipo de detector a conectar
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

Además, en la parte superior se muestra el primer juego de puente (Enlace tipo detector), que deberá ajustarse de acuerdo al tipo de señal que llegue del detector: sink o source. Para nuestro caso, deberá ajustarse de igual forma a lo seleccionado para el detector de gases inflamables (ver 3.3.4), que sería sink por defecto.

Se observa que hay una tercera alternativa que se indica como “fire”, la cual se selecciona cuando se conectan cadenas de detectores de humo al canal respectivo, lo cual no es nuestro caso.

El segundo juego de puente (Enlace de protección) se debe colocar en 1-2 cuando el detector se conecta directamente al canal respectivo o cuando se emplea un aislador galvánico, que corresponde a nuestro caso. En el caso que se emplee una barrera Zener se deberá colocar el puente en 2-3.

Este ajuste debe realizarse para cada uno de los canales que se empleen del panel de alarmas, con el fin de que los detectores de gas funcionen correctamente con el panel de alarmas al que se conectan.

3.3.5.2 Programación

Una vez realizado el conexionado adecuado de los detectores y alarmas externas al panel de alarmas, así como haber realizado las configuraciones previas

indicadas, en necesario realizar algunos ajustes adicionales mediante la programación del panel de alarmas, los cuales requieren que el mismo sea alimentado y encendido.

Una vez que el equipo sea energizado (220 VAC), se puede realizar la programación del mismo mediante un software de programación externo o directamente mediante los botones y la pantalla de interfaz que posee el controlador de gases.

En la Figura 50 se aprecia la interfaz de operación de usuario, donde se pueden identificar los botones, indicadores y zona de visualización de canales y mensajes.

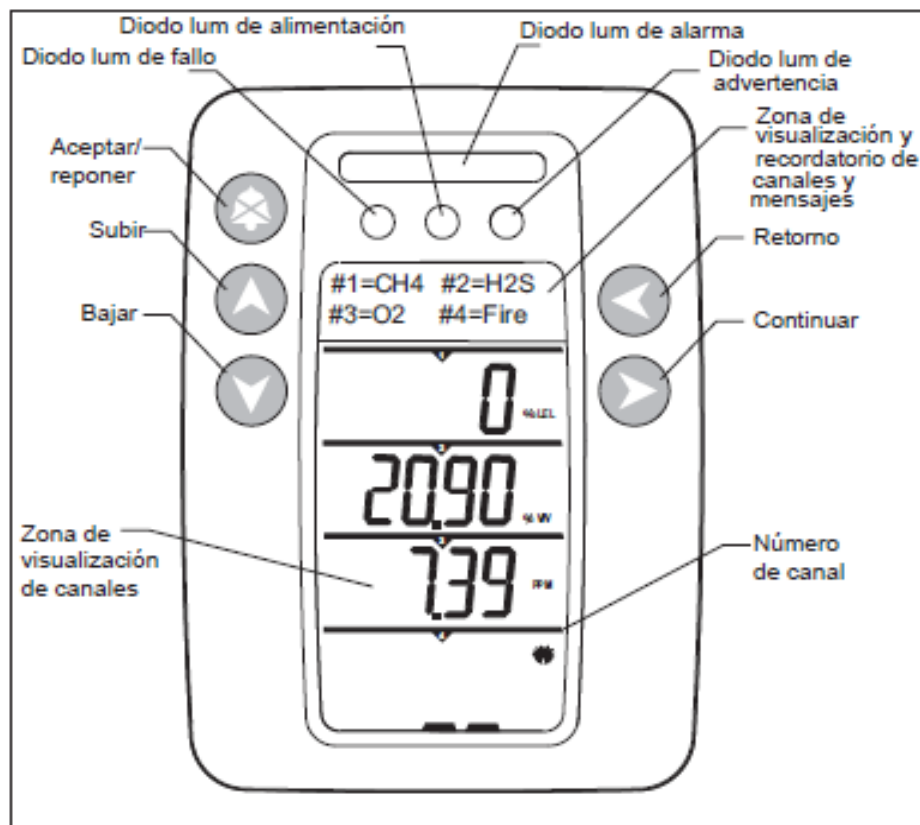


Figura 50. Interfaz de operación de usuario – Controlador Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – manual de instalación, utilización y mantenimiento*

Mediante la interfaz de operación de usuario se realizarán los ajustes de programación necesarios, en conjunto con los botones de subir, bajar, retorno, continuar y aceptar.

En el modo normal de funcionamiento de monitoreo, la zona de visualización de mensajes muestra cada uno de los cuatro canales empleados, el número de identificación de cada uno y el tipo de detector por canal.

Para tener acceso a la programación, es necesario ingresar al menú principal, lo cual se logra mediante la tecla continuar. Cuando se logra el acceso, en la zona de visualización de mensajes aparecerá lo siguiente, según la Figura 51:



Figura 51. Pantalla de ingreso a menú principal - Controlador Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

La segunda línea mostrará el último ítem del menú que se haya visto. En este estado se puede navegar entre los diferentes ítems del menú con las teclas subir y bajar. Para salir del menú se debe mantener pulsada la tecla aceptar o pulsar la tecla retorno tantas veces como sea necesario.

Una vez que se ubique el ítem del menú al que se desea acceder, se selecciona el mismo usando la tecla continuar.

En la Figura 52, se muestra una vista general de la estructura de menús mediante la cual se acceden a todas las opciones que el panel de alarmas Gasmaster puede ofrecer, así como a las funciones adicionales de mantenimiento, diagnóstico, etc.

El manual de operación del panel de alarmas Gasmaster da un detalle más específico de cada uno de los menús y submenús, sin embargo, haremos una

revisión básica de los menús principales y ahondaremos en aquellos que son de especial utilidad para el desarrollo que se está exponiendo.

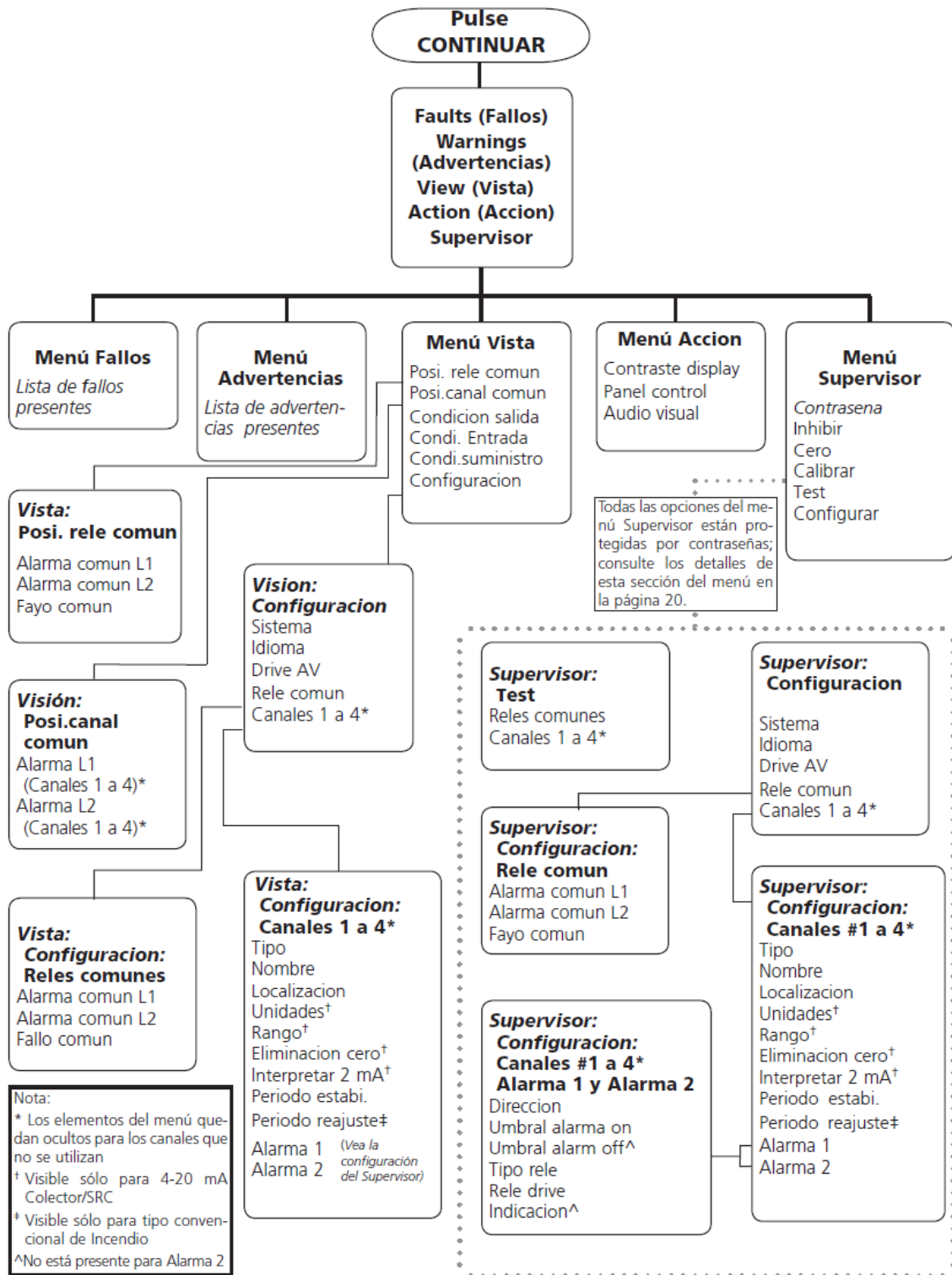


Figura 52. Estructura general de menús - Panel de alarmas Gasmaster
 Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

El sistema de menú del panel de alarma se subdivide en los siguientes submenús principales:

1. Menú de advertencias, mediante el cual se puede acceder a una serie de mensajes de advertencias de estados presentes en el sistema, tales como inhibición de las salidas, estado del periodo de calibración, estado de los relés de salida, fallo de suministro de energía principal, estado de los detectores, etc.
2. Menú Vista, mediante el cual se puede revisar el estado actual y la configuración del panel de alarmas, pero no permite la modificación de ningún parámetro. Entre la información disponible que se muestra en este menú están los estados de los relés de salida, estados de las salidas analógicas, estados de entradas (4 a 20mA), nivel de voltaje de suministro de corriente continua, y los parámetros de configuración del sistema, de los canales (tipo, nombre, localización, unidades, rango, etc.) y de los relés de salida.
3. Menú Acción, mediante el cual se permite efectuar comprobaciones y ajustes básicos, tales como prueba de los elementos audiovisuales del panel de alarmas (indicadores luminosos y bocina), prueba de la pantalla de cristal líquido LCD y diodos luminosos y ajuste del contraste de la pantalla de visualización de mensajes.
4. Menú Supervisor, que permite realizar comprobaciones importantes del sistema, así como realizar cambios en la configuración del mismo. Debido a que el funcionamiento correcto del panel es sensible a los cambios que se efectúen mediante este menú, se requiere una contraseña para poder acceder al mismo y realizar los cambios respectivos.

Particularmente nos interesa realizar algunos ajustes mediante el menú de supervisión con el fin de configurar el panel de alarmas para nuestra aplicación en particular.

Una vez que se ingresa al menú, se selecciona Supervisor y se pulsa continuar, el sistema solicita una contraseña para proseguir. La contraseña por defecto de fábrica es ZZZ. Con las teclas subir y bajar seleccionamos la letra o número deseado y con la tecla continuar seleccionamos al siguiente carácter. Cuando se haya terminado con todos los caracteres se debe pulsar continuar dos veces.

Al ingresar la contraseña correcta y activarse el modo Supervisor, se encenderá el diodo luminoso de advertencia.

Dentro del menú de supervisión será necesario revisar y ajustar según sea necesario, los siguientes ítems, para adecuarlos de acuerdo con nuestra aplicación:

a) Identidad

Este parámetro se encuentra en dentro del ítem Sistema y permite poner una identificación alfanumérica de hasta 16 caracteres al sistema que se mostrará en la pantalla de mensajes durante el funcionamiento normal de monitoreo y en situación de alarma o fallo. Para nuestro caso ingresaremos GAS SALA BOMBAS, para identificar que el controlador de gases mostrará los niveles de % LEL de los detectores ubicados en la sala de bombas.

b) Idioma

Mediante este parámetro podremos cambiar el menú en otros idiomas si estuvieran disponibles. Por defecto de fábrica tiene el valor English (UK), pero si se solicita, el panel de alarmas puede disponer de la opción de menús en español, el cual es el que se considera, para este caso en particular.

c) Relé común

Mediante este submenú podemos determinar el funcionamiento de los relés de fallo y alarmas comunes. El submenú permite configurar las alarmas comunes L1, L2 y fallo asociadas a los relés de salidas comunes empleados (ver apartado 3.3.2). Para nuestro caso particular será necesario realizar los siguientes ajustes tanto para L1 como para L2:

- Tipo: Acept. Enclavam. Que significa que, en situación de alarma o fallo, el relé se repondrá cuando se pulse el botón de Aceptar / Reponer.
- Drive: Desactivado. Que significa que la bobina del relé no se activa en un estado sin alarma (normalmente desactivado). Cabe notar que esta selección va de la mano con el empleo del contacto normalmente abierto de los relés de alarma comunes.

d) Canales #1 a #4

Mediante estos submenús se permite ajustar el tipo de entrada para cada uno de los canales, los nombres y ubicaciones, unidades, etc. Para nuestro caso y tomando en cuenta que estos ajustes deben coincidir con la configuración de los detectores y los puentes hechos previamente en la tarjeta de conexión del panel de alarmas, se debe ajustar lo siguiente para todos los canales:

- Tipo: DET 4-20 SINK, que corresponde cuando se conecta un detector de gas con señal de 4 a 20 mA en conexión de sumidero de corriente.
- Nombre: CH4, que corresponde a una cadena de 4 caracteres para identificar el detector. Para nuestro caso CH4 indica que son detectores de gases inflamables.
- Ubicación. Correspondiente a una cadena de hasta 32 caracteres que es opcional para identificar donde se ubica el detector. Esta

información aparecerá en la pantalla de mensajes en el evento de alarma. Para nuestro caso, todos los detectores tienen ubicaciones distintas, y según lo indicado en el capítulo 3.3.1, se asignarán las ubicaciones de acuerdo a lo indicado en la Tabla 9.

Tabla 9. Asignación de ubicaciones para detectores Xgard IR - Buque tanque Huascarán

Panel de Alarmas	Canal #	Ubicación
Gasmaster #1	1	Sentina Babor Popa
Gasmaster #1	2	Sentina Centro Popa
Gasmaster #1	3	Sentina Estribor Popa
Gasmaster #1	4	Separador Bomba Popa
Gasmaster #2	1	Calentador Agua Popa
Gasmaster #2	2	Cubierta Inferior Proa

Fuente: Elaboración propia (2012)

- Unidades: %LEL, que seleccionaremos para todos los canales empleado ya que en todos los casos se va a detectar gas inflamable.
- Rango: 100, que seleccionamos para todos los canales pues se va a medir de 0 a 100% LEL.
- Eliminación cero (ZFS): Activado, que se elige para todos los canales para aplicar la supresión al primer 3% de la escala con el fin de impedir que aparezcan desviaciones de cero.
- Interpretar 2 mA: Fallo, ajustado en todos los canales con el fin de que se produzca un estado de falla cuando la señal del detector sea igual o menor a 2mA.
- Periodo estabi.: 10 segundos, ajustado en todos los sensores de la misma manera, que es el tiempo que se invalida la entrada tras el encendido del Gasmaster, con el fin de impedir falsas alarmas mientras el detector se está estabilizando.

- Alarma L1 #1, #2, #3, #4. Mediante estos submenús se configuran las alarmas L1 o de nivel bajo para los canales #1, #2, #3 y #4 independientemente. La configuración de cada alarma se hace mediante los siguientes parámetros:
 - Dirección: Para nuestro caso se elegirá “Por subida”, que se emplea para aplicaciones donde normalmente no hay gas. Las alarmas descendentes “Por bajada” se usan en aplicaciones donde normalmente hay gas, como la detección de oxígeno, por ejemplo.
 - Umbral alarma on: Para nuestro caso será de 10, pues se requiere que se active una alarma de bajo nivel de 10% LEL. Los valores posibles que acepta son de 0.1 hasta el valor del rango configurado para el canal respectivo.
 - Umbral alarma off: Para nuestro caso será de 9, debido a que se requiere que a 9% LEL se normalice la alarma de bajo nivel. Este valor permite ajustar una histéresis de modo que se evite que la alarma oscile para valores cercanos a L1. El valor posible de ajuste es de 0.1 hasta el umbral alarma on, para alarmas ascendentes como en nuestro caso.
 - Tipo rele y Rele drive: Son parámetros de funcionamiento de relé similares a los ajustados para el Relé común pero aplicados a los relés particulares de cada canal. Como para nuestra aplicación no se van a emplear, pueden quedar sin una configuración específica.
 - Indicación: Para nuestro caso se ajusta como Visible, con lo cual la alarma disparará la barra de luminosa del panel de alarmas, así como la bocina interna y se presentará el mensaje de alarma respectivo en la pantalla de mensajes.

- Alarma L2 #1, #2, #3, #4. Mediante estos submenús se configura las alarmas L2 o de nivel alto para los canales #1, #2, #3 y #4 independientemente. La configuración de cada alarma se hace mediante los mismos parámetros que se vieron para L1, con la diferencia que no existen los valores de Umbral alarma off ni de Indicación (L2 siempre será visible). Para nuestro caso, Umbral de alarma se ajustará con un valor de 20 para todos los canales, con el fin que se detecte una alarma de 20% LEL y avise de forma visual y sonora.

3.4 Puesta en marcha y operación del sistema

Una vez que ya se tienen configurado el equipamiento, es deseable realizar pruebas previas a la puesta en marcha del sistema. El objetivo de estas pruebas es comprobar que todos los elementos están funcionando correctamente y detectar cualquier anomalía que lleve a un error de detección de gases y/o generación de alarmas y, por lo tanto, a un defecto en la función de seguridad del sistema. La importancia de las pruebas previas entonces se justifica para mantener la seguridad en el sistema de detección de gases inflamables y en la generación de avisos y alarmas correctamente de acuerdo con la configuración establecida.

3.4.1 Arranque de detectores de gases inflamables – Xgard IR

Recordemos que los detectores de gases inflamables a emplear, funcionan como transmisores de 4-20 mA de salida, proporcional a la concentración de gases inflamables en unidades de % LEL. De fábrica los detectores de gases inflamables vienen ajustados en un rango de 0 a 100% LEL y es así como se ha ajustado también los canales de entrada del panel de alarmas.

Como parte del arranque inicial de cada uno de los detectores es aconsejable entonces, comprobar el ajuste de fábrica indicado, con el fin de evitar errores en la interpretación de los valores recibidos por el panel de alarmas y, por lo tanto, en la generación de las alarmas configuradas.

La comprobación del ajuste se lleva a cabo aplicando una mezcla de gas patrón en el detector con el fin de someterlo a una concentración conocida de gas inflamable

y comprobar el correcto ajuste de la corriente de salida respectiva a dicha concentración.

El gas patrón es una mezcla de gases con una concentración de gases inflamables conocida y certificada previamente. Para nuestro caso emplearemos una mezcla estándar de 2.5% en volumen de gas metano en aire (en realidad, la composición puede contener otros gases, pero lo importante es que la concentración de gas inflamable en volumen sea conocida). Como sabemos una concentración de 2.5% de gas metano corresponde a un nivel de 50% LEL (ya que el 100% LEL para gas metano equivale a una concentración aproximada de 5.3% en aire).

La concentración indicada es segura para las pruebas ya que está por debajo del nivel mínimo de explosividad y por otro lado su magnitud es conveniente ya que está a la mitad de la escala de ajuste del instrumento (50%).

La recomendación del fabricante para este tipo de detectores, indica que para el proceso de comprobación (y calibración de ser necesario) debe aplicarse el gas patrón sobre el instrumento detector a una razón de 0.5 a 1 litro por segundo. Esto se consigue empleando kits de calibración comerciales que constan de una botella con contenido de gas patrón, previamente certificado y presurizado, que incluyen un manómetro para la medición de la presión del gas, así como un regulador de caudal a la salida con el fin de controlar el flujo de gas según lo requerido. El kit se completa por lo general con un accesorio que se ajusta a la toma de ingreso del detector y una manguera que permite el transporte del gas, similar lo que se puede apreciar en la Figura 53.

Empleando el kit de gas patrón, se aplica la mezcla de 50% LEL al detector y alimentando el mismo, se mide la señal de corriente de salida. De acuerdo a la calibración de fábrica, se debe comprobar que la señal de salida medida sea 12 mA, que corresponde al 50% de la escala de corriente. En la práctica se debe aplicar el gas patrón por un periodo de 30 a 60 segundos aproximadamente, que es lo que tardará la señal del transmisor en estabilizarse, antes de la medición de la señal. Estos parámetros pueden variar dependiendo de lo que indique el fabricante del instrumento de detección de gas inflamable, según sea la tecnología de

detección empleada. Por este motivo se recomienda que se revise la información técnica de funcionamiento y mantenimiento de los equipos para referencias concretas acerca del manejo adecuado en la calibración del detector particular.



Figura 53. Kit de calibración típico y detector de gases
Fuente: PEM-TECH, Inc. (2018). *Calibration accessories – Disposable gas cylinders*

3.4.1.1 Calibración de detectores de gases inflamables – Xgard IR

Si se detecta una diferencia importante entre el valor medido y el valor esperado de corriente en el transmisor, será necesario calibrar el instrumento detector, con el fin de evitar errores significativos de lectura en el controlador de gases.

Para realizar la comprobación de funcionamiento o calibración del detector de gases Xgard IR, es necesario tener en cuenta que el mismo debe estar previamente alimentado con una tensión mínima de operación de 10 VDC, aunque se entiende que ya estará conectado al panel de alarmas desde donde recibirá su alimentación, de modo que el voltaje a medir en realidad debería ser de 24 VDC que es el nominal.

Una vez alimentado, el detector debe estabilizarse por unos 45 minutos aproximadamente, luego de lo cual podrá realizarse el procedimiento, valiéndose de los puntos de prueba TP1 y TP2 que se ubican en la tarjeta electrónica amplificadora, tal como se puede apreciar en la Figura 54, y entre los cuales se podrá medir el voltaje proporcional a la salida de corriente de 4-20 mA del instrumento.

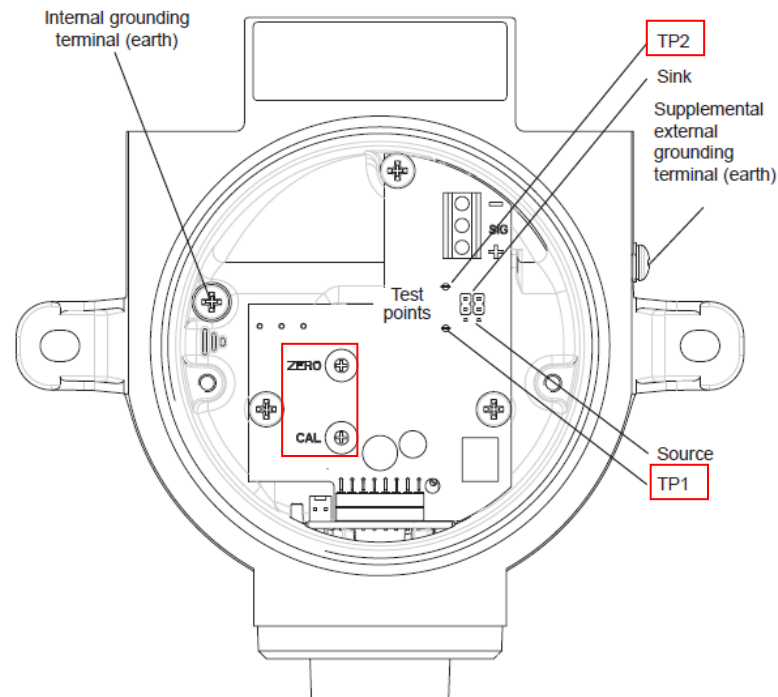


Figura 54. Puntos de ajuste y prueba para calibración - Detector de gases Xgard IR
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2011). *Xgard IR – Gas detector, Installation, operating and maintenance instructions (multilingual)*

De este modo, un voltaje medido entre los puntos de prueba de 40 mV significará que la señal de salida es de 4 mA, mientras que un voltaje de 200 mV significará que la señal de salida es de 20 mA.

Otra forma de realizar el contraste es medir directamente la corriente de salida del instrumento, instalando un medidor de corriente en serie con la señal de salida del mismo. También es posible emplear el panel de alarmas Gasmaster como instrumento de medición de la señal del detector, teniendo en cuenta la configuración previa que debe realizarse en el controlador.

Es preferible, sin embargo, realizar el contraste mediante la medición directa de voltaje en TP1 y TP2 para realizar los ajustes que sean necesarios, ya que de ese modo evitamos la mayor cantidad posible de fuentes de error. Además, de esta forma no dependemos del panel de alarmas, que realizaría sólo la función de alimentación para estas pruebas.

Es importante que el procedimiento de prueba descrito, sea realizado por un personal calificado a fin de no causar daños irreparables por una conexión mal hecha o un corto circuito de la tarjeta electrónica amplificadora. Así también, es importante que se realice en un ambiente seguro y libre de peligros de explosión, ya que es necesario abrir la caja contenedora universal durante el procedimiento.

El procedimiento de calibración entonces consistirá en realizar dos contrastes y ajustes respectivos si fuera necesario, en dos puntos de la escala de medición como mínimo. Para nuestro caso, los puntos serán los valores de concentración de 0% LEL y 50% LEL, este último proporcionado con la ayuda del gas patrón.

- a) Para el ajuste de 0% LEL se dejará el detector a atmosfera o aire puro, que corresponde a una concentración de 0% de gas metano en aire. Si no se tiene certeza de la ausencia de gas inflamable en el punto, puede aplicarse también una mezcla presurizada y certificada de gas que no tenga metano u otro gas inflamable. Para esta concentración, la corriente de salida debe ser de 4 mA (0% del rango de medición) y debe medirse 40 mV en los puntos de prueba. Si se observa que el resultado de la medición difiere mucho de 40 mV será necesario ajustar el cero, mediante el potenciómetro de ajuste ubicado en la tarjeta amplificadora (ver en la Figura 54 la ubicación del potenciómetro ZERO). Una vez ajustado el cero del instrumento debe comprobarse también, que en el panel de alarmas se lea el valor de 0% LEL, de no ser así será necesario revisar la configuración del panel de alarmas y hacer en el mismo los ajustes que sean necesarios.
- b) Para el ajuste del otro punto de calibración, que en nuestro caso es 50% LEL, es necesario aplicar el gas patrón con 2.5% de volumen de metano, según el procedimiento anteriormente indicado. Cuando el resultado de la medición se

estabilice, debe comprobarse que el voltaje entre los puntos de prueba sea de 120 mV que equivale a una corriente de salida de 12 mA, es decir, la mitad de la escala completa. Si se observa que el resultado de la medición difiere mucho de 120 mV será necesario ajustar el valor, mediante el potenciómetro de ajuste ubicado en la tarjeta amplificadora (ver en la Figura 54 la ubicación del potenciómetro CAL). Una vez ajustado el instrumento debe comprobarse también que en el panel de alarmas se lea el valor de 50% LEL, de no ser así será necesario revisar la configuración del panel de alarmas y hacer en el mismo los ajustes que sean necesarios. Adicionalmente, si el gas patrón tiene una concentración diferente a 50% LEL, puede emplearse la siguiente fórmula para calcular la lectura:

$$((160 / \text{intervalo}) \times \text{gas}) + 40 = \text{ajuste de mV}$$

Donde “intervalo” es el máximo valor de %LEL que corresponde al valor de 20 mA, “gas” es el valor de %LEL del gas patrón empleado; y “ajuste de mV” es el valor en milivoltios que debe obtenerse en la medición.

Por ejemplo, para comprobar el mismo detector de 0 a 100% LEL, empleando un gas patrón con 20% LEL, tendríamos que obtener la siguiente medición:

$$((160 / 100) \times 20) + 40 = 72 \text{ mV}$$

Una vez comprobados y ajustados de ser necesario los dos puntos de la escala, se debe retirar el gas patrón y permitir que el detector se estabilice completamente antes de volver a comprobar el ajuste del cero en ausencia de gases inflamables o de otro punto de contraste si se requiere. El proceso concluye con el cierre y aseguramiento de la caja del detector, de modo que el instrumento quede listo para su conexión al panel de alarmas y empleo en campo.

3.4.2 Arranque de panel de alarmas - Gasmaster

Una vez que se tiene la certeza de que los detectores de gas inflamable se encuentran operativos y listos para trabajar, podemos concentrarnos en el funcionamiento del panel de alarmas.

Durante el procedimiento de comprobación / calibración de los detectores se ha podido constatar también la llegada de la señal de 4-20 mA en cada uno de los canales del panel de alarmas y como consecuencia la lectura proporcional de concentración de gas inflamable. Es posible también que se haya recibido alarmas visuales y sonoras cuando el nivel de explosividad haya superado alguno de los límites previamente configurados.

La idea de las pruebas previas con el panel de alarmas es comprobar que éste, como unidad de control de alarmas, se encuentre operando correctamente, independientemente de que estén o no operativos los detectores de gas inflamable. Para ello el panel de alarmas posee una serie de herramientas que se revisarán a continuación.

3.4.2.1 Invalidación o inhibición del sistema

Durante las pruebas previas a la puesta en marcha del panel de alarmas, es deseable que las entradas se encuentren inhibidas temporalmente con a fin de que no se generen falsas alarmas y procedimientos de emergencia innecesarios. Esta funcionalidad se requiere para realizar la calibración de los detectores o cuando se realizan trabajos que van a ocasionar un disparo inusual de las alarmas. De este modo los canales de entrada pueden invalidarse individualmente o todos a la vez.

La opción de invalidación se encuentra disponible en el menú de Supervisor, bajo el ítem “Inhibir”. Ingresando a este submenú se tendrán las opciones de inhibir todo o realizar una inhibición de cada uno de los canales de entrada independientemente. La inhibición total persiste sólo mientras se encuentre en el menú de Supervisor, mientras que la inhibición por canales persiste aun fuera del menú de Supervisor.

3.4.2.2 Comprobación funcional

Mediante el panel de alarmas es posible comprobar el funcionamiento de los relés de salida, forzar las entradas a un estado de alarmas y forzar las entradas analógicas para verificar el funcionamiento correcto y sus interfaces con los equipos externos conectados, es decir en nuestro caso, con las alarmas remotas.

Lo indicado se logra mediante el submenú “Test” que se encuentra bajo el menú de Supervisor.

Es necesario que el personal esté al tanto que se van a realizar pruebas del sistema, ya que se pueden iniciar procedimiento de emergencia innecesarios ante las alarmas forzadas que se pueden interpretar como reales.

Ingresando al submenú “Test” tenemos la opción de forzar los relés de nivel común L1 y L2, así como el relé común de Fallo. Una vez seleccionado el relé que se quiere forzar el estado, se podrá cambiar el mismo empleando los botones de subir y bajar. Con la tecla de retroceso se sale del menú y el relé vuelve a su estado normal.

De manera similar, pueden forzarse si fuese necesario, los relés de salida individuales para cada canal, ingresando a la opción Canal #1, #2, #3 y #4, opciones Alarma de relé L1 y Alarma de relé L2.

Mediante la opción de forzado individual por canal también puede simularse los valores de entrada para cada uno de los canales. Para ello se selecciona en el menú Entrada sim #1 correspondiente al Canal #1 y aparecerá el nivel de entrada simulado respectivo en el rango de 0.0 a 25.5 mA (para detectores con señal de 4-20 mA). Con las teclas Subir y Bajar se cambia el valor simulado de entrada hasta el nivel requerido. Con ello la lectura de pantalla del canal respectivo cambiará en las unidades prefijadas, según la configuración realizada previamente. Para nuestro caso los valores a mostrar serán de 0 a 100% LEL para una simulación de señal de 4 a 20 mA. Con esta función también se activarán las alarmas de acuerdo con la configuración que se haya efectuado en las mismas.

Con la opción de forzado por canal también se puede forzar las salidas analógicas respectivas si se requieren, en valores que van de 0.0 a 25.5 mA. Esta función de forzado no activará ninguna alarma.

Cuando un canal en particular se queda forzado tanto en sus relés, como en la señal de entrada o salida, la pantalla mostrará el símbolo de un triángulo como

advertencia para el canal correspondiente, indicando que el canal se encuentra en una condición de prueba.

Comprobadas tanto los canales de entrada como las salidas relé que se están empleando en el panel de alarmas, es necesario asegurar que se elimine la condición de prueba para que nuevamente el sistema entre en funcionamiento normal. También es necesario quitar la invalidación o inhibición del sistema, si hubiese sido activado. Es entonces que el sistema de detección de gases inflamables en conjunto (detectores + panel de alarmas + alarmas remotas) queda listo para su funcionamiento y se considera arrancado y listo para su puesta en servicio. A partir de este momento, el sistema de detección de gases inflamables está listo para monitorear en tiempo real las concentraciones de gases inflamables que se midan en cada uno de los puntos donde se ubican los detectores IR. Así también el sistema generará alarmas en dos concentraciones: 10 y 20% LEL, las cuales serán avisadas por el mismo panel de alarmas Gasmaster, como por las alarmas repetidoras (visuales y sonoras) localizadas de acuerdo al planeamiento y normas de seguridad a bordo del buque tanque.

3.5 Mantenimiento

Para nuestro caso, el mantenimiento del sistema engloba a todos los procedimientos que sean necesarios para asegurar el funcionamiento óptimo del sistema de detección, los cuales involucran a las partes principales que lo conforman.

3.5.1 Mantenimiento de detectores de gases inflamables – Xgard IR

Recordando la naturaleza de funcionamiento de los detectores de gases empleados, esta clase de detectores reaccionan a la presencia de gases inflamables por absorción de energía y no sufren de degradación electroquímica, por lo que su funcionamiento en el tiempo es bastante más seguro que la tecnología tradicional de detección por combustión catalítica.

El fabricante recomienda, sin embargo, que los detectores IR sean probados con gas patrón cada seis meses con el fin de asegurar su correcto funcionamiento y

corregir desviaciones en la corriente de salida del transmisor, que puedan causar errores de activación de las alarmas, si fuera necesario.

En la práctica, siguiendo las recomendaciones de instalación y limpieza de los detectores, se ha comprobado que éstos no han sufrido desviaciones considerables en la medición ni en la corriente de salida en periodos de más de un año.

Dependiendo del lugar de instalación, es importante así mismo, que se asegure una limpieza periódica sobre todo en los cabezales de los detectores, los cuales pueden obstruirse por suciedad y cambiar si fuese necesario, el retenedor del sensor que contiene el filtro sinterizado.

El sensor en sí, no sufre un deterioro considerable por uso constante debido a la naturaleza de funcionamiento que posee, lo cual se puede comprobar con su sometimiento a la prueba con gas patrón; incluso si el sensor ha sido expuesto a concentraciones tan altas de gas inflamable como 100% LEL o incluso 100% de gas inflamable en volumen.

Aparte de lo indicado y sólo si fuese necesario, se realizará un ajuste de los controles de zero y span del detector (calibración) y se llevará un control de la última fecha en que se ha realizado el test con gas patrón y la rutina de calibración si hubiese sido necesario, mediante el etiquetado en cada uno de los detectores.

3.5.2 Mantenimiento del panel de alarmas – Gasmaster

De manera similar a los detectores de gases inflamables, el fabricante recomienda realizar una comprobación funcional periódica del panel de alarmas cada seis meses.

Adicionalmente a la comprobación funcional que vimos a detalle en el apartado 3.4.2.2, es necesario revisar periódicamente otro punto importante en el panel de alarmas, referido a la capacidad de autonomía de operación en ausencia de alimentación principal por 220 VAC.

3.5.2.1 Baterías de respaldo

El panel de alarmas Gasmaster se suministra con un sistema de respaldo de energía conformado por dos baterías de plomo de 12 VDC, 1.2 Ah conectadas en serie (banco de 24 VDC), las cuales permiten el funcionamiento del sistema de detección de forma ininterrumpida en caso se corte la energía principal de 220 VAC que alimenta al panel. Las baterías se localizan en el interior del panel de alarmas, según se puede apreciar en la Figura 55.

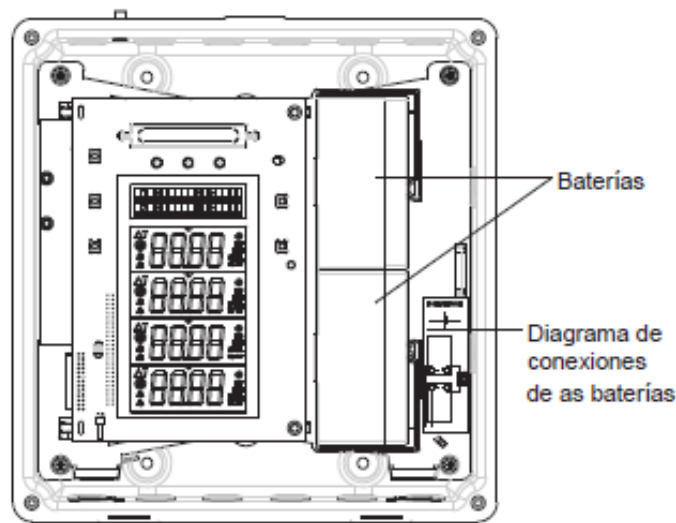


Figura 55. Localización de baterías de respaldo en controlador de gases Gasmaster
Fuente: CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de instalación, utilización y mantenimiento*

La autonomía de respaldo depende básicamente del tipo y número de detectores que estén conectados al panel de alarmas. Como ya se indicó en la descripción la autonomía típica es de 25 minutos cuando se tienen los cuatro canales de entradas conectados a detectores de gases infrarrojos.

Durante la rutina de mantenimiento del panel de alarmas, se debe cortar la energía principal de 220 VAC y comprobar que el sistema de detección sigue funcionando con la energía suministrada por las baterías, confirmándose su operatividad.

Las baterías deben cambiarse por pares cada dos años por recomendación del fabricante. Para el efecto, se dispone de un fusible de 10 A y un diagrama de

conexión en el mismo panel, el cual debe revisarse cuidadosamente con el fin de reinstalar las baterías de manera correcta, de lo contrario podría ocasionar un incendio en el controlador.

Las baterías deben revisarse con mayor frecuencia si el sistema se encuentra trabajando en temperaturas que superan los 40°C, en cuyo caso la vida útil de las mismas disminuye.

Se recomienda, así mismo, que las actividades de mantenimiento que se lleven a cabo en el panel de alarmas sean registradas con fecha en la tarjeta de servicio que viene incluida con el panel o en otro medio si fuese necesario.

3.6 Resultados

Durante el desarrollo de la metodología se ha podido observar la importancia de seleccionar el equipamiento adecuado, realizando un análisis previo de las tecnologías de detección disponibles, lográndose finalmente mejorar el desempeño general del sistema de detección de gases inflamables.

Con el cambio de los detectores de gas catalíticos convencionales por detectores de gas infrarrojos, se consiguió que los nuevos sensores no sufrieran degradación con el tiempo o uso, y no se requirió su mantenimiento por periodos de más de un año en adelante. A diferencia de los detectores catalíticos que, dependiendo del uso, los elementos sensores tenían que ser reemplazados con frecuencia dos veces por año o incluso cada mes según las incidencias que se presentaran.

Se observó así mismo que, con el empleo de detectores de gas por absorción infrarroja, se pudo simplificar el proceso de calibración para la puesta en marcha del sistema, así como las pruebas y calibraciones periódicas que son requeridas como parte de la certificación de seguridad, necesaria para la ejecución de operaciones de manejo de carga y descarga de los fluidos combustibles.

Con el reemplazo del controlador de gases por una versión moderna del mismo, se logró también contribuir a la simplificación del proceso de calibración y ajuste de las lecturas correctas y confiables de concentración de gases inflamables. Se logró

suprimir, además, las falsas lecturas y alarmas, producidas por las interferencias electromagnéticas cercanas al controlador.

Con la modernización del sistema de detección de gases inflamables, inicialmente se tuvo que invertir tiempo en la capacitación y aprendizaje para el manejo de los nuevos equipos, siendo el más complicado el controlador de gases. El controlador moderno, sin embargo, ofrece ventajas operativas adicionales y opciones para posibles mejoras futuras, tales como la comunicación a sistemas de supervisión (SCADA), configuración avanzada de salidas (programables), posibilidad de empleo con otro tipo de detectores (humo, fuego, etc.) sin necesidad de cambiar el hardware, etc.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTOS

Un factor muy importante al momento de decidir el cambio de tecnología de detección a emplear, es el costo que implica dicho cambio, el cual debe ser analizado no solo a corto sino también a mediano plazo y tomando en cuenta los aspectos y factores que influirán en la determinación de dicho costo.

De este modo, un primer análisis comparativo indica que, el costo de un detector de gas inflamable de tecnología catalítica es menor que el de un detector de tecnología infrarroja. De manera similar, la versión moderna del panel de alarmas Gasmaster es más económica que la antigua, que se ha venido empleando tradicionalmente, debido a que se trata de un sistema ya obsoleto, que es difícil de conseguir en el mercado. Aun así, la diferencia de costos totales hace más caro el sistema moderno frente al sistema tradicional.

Esta diferencia de precios supone una desventaja aparente a favor del sistema antiguo tradicional, sin embargo, el costo inicial superior del sistema nuevo propuesto se ve compensado a lo largo del tiempo, principalmente debido a los costos de mantenimiento y repuestos requeridos por ambas tecnologías.

Ya que no hay equipamiento adicional que sea necesario reemplazar en el sistema de detección de gases inflamables, los costos variarán dependiendo de los factores principales que se explican en los siguientes apartados.

4.1 Costos iniciales

Como adelantamos, el precio de un detector de gases inflamables catalítico es menor que un detector similar con tecnología infrarroja, mientras que los paneles de alarma del sistema moderno y mejorado resultan ser más económicos que los paneles del sistema tradicional. Concretamente los costos comparativos por unidad se pueden apreciar a continuación en la Tabla 10 y la Tabla 11:

Tabla 10. Costo inicial de sistema tradicional de detección de gases inflamables por combustión catalítica

Equipo	Costo Unitario (US\$)	Cantidad Requerida	Costo Total (US\$)
Detector de Gas Inflamable Catalítico Flamgard – EXE	594.00	6	3564.00
Panel de Alarmas Gasmaster de 4 canales (versión antigua)	2782.00	1	2782.00
Panel de Alarmas Gasmaster de 2 canales (versión antigua)	3650.00	1	3650.00
		TOTAL (US\$)	9996.00

Fuente: Elaboración propia (2010)

Tabla 11. Costo Inicial de sistema modernizado de detección de gases inflamables por absorción infrarroja

Equipo	Costo Unitario (US\$)	Cantidad Requerida	Costo Total (US\$)
Detector de Gas Inflamable Infrarrojo Xgard IR	1134.00	6	6804.00
Panel de Alarmas Gasmaster (versión moderna)	2169.00	2	4338.00
		TOTAL (US\$)	11142.00

Fuente: Elaboración propia (2012)

Cabe aclarar que las cifras indicadas son referenciales, en dólares norteamericanos, basadas en precios puestos en fábrica, no nacionalizados; sin embargo, son válidas para los fines comparativos requeridos en este caso.

Debido a que se requieren reemplazar todos los detectores de gas inflamable, deberá considerarse un factor de seis al costo de un detector, para la comparación global.

Se debe notar también que el Gasmaster soporta hasta 4 canales de entrada o puntos de detección. Para lograr soportar los 6 puntos de detección con el sistema antiguo se considera una unidad de Gasmaster para 4 canales y otra de 2 canales. Para el caso del sistema moderno, se consideran dos unidades de Gasmaster de 4 canales, pues la versión moderna del Gasmaster no tiene una versión para 2 canales. De esta manera el sistema modernizado ofrece 2 canales de reserva o para la implementación de puntos de medición adicionales a futuro si se requiriese.

Se observa finalmente, que el costo total de equipamiento para el sistema de detección modernizado, resulta ser mayor que el costo total del sistema tradicional, básicamente por la marcada diferencia de precios de los detectores tradicionales de tecnología catalítica frente a los detectores infrarrojos. Esta diferencia de precios a favor de los detectores catalíticos se puede comprobar para cualquier fabricante, ya que depende principalmente de la tecnología empleada, por lo cual, como vimos anteriormente, los detectores catalíticos resultan siempre ser más económicos.

4.2 Costo de mantenimiento

Otro factor a tomar en cuenta son los costos de mantenimiento que sean necesarios de efectuar a lo largo del tiempo de uso del sistema.

A su vez, el mantenimiento indicado está asociado principalmente, a dos factores principales: costos de servicios y costos de repuestos.

Ya que ambos sistemas requieren casi la misma periodicidad de revisiones en el tiempo (el fabricante recomienda revisiones y/o calibraciones periódicas cada 6 meses), el costo de servicios de mantenimiento es prácticamente el mismo para ambos sistemas.

Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los costos de repuestos requeridos, normalmente son distintos para cada tipo de sistema. Esto es debido a factores tales como la tecnología de detección que se emplea en cada caso, la naturaleza de la aplicación, frecuencia de uso, etc.

4.2.1 Sistema tradicional de detección catalítica

Ya que el sistema de tradicional de detección emplea detectores de tecnología catalítica y estos son propensos a sufrir daños por saturación, envenenamiento, etc., es claro y de hecho se ha observado, que se requiere la compra de repuestos de los sensores con cierta frecuencia. En la práctica generalmente se requiere reemplazar un promedio de 3 sensores al año. El reemplazo de los sensores se realiza normalmente durante la visita semestral, ya que es necesario realizar un procedimiento de calibración luego de la instalación. También es usual que se requiera cambiar uno o dos módulos de entrada y módulos de alarma del Gasmaster de versión antigua, que se averían por fallas eléctricas, cruce en los sensores, etc. De esta manera se puede establecer un resumen de costos de mantenimiento por año tal como se puede ver en la Tabla 12:

Tabla 12. Costo de mantenimiento anual sistema tradicional de detección de gases inflamables

Repuesto	Costo Unitario (US\$)	Cantidad Requerida por Año	Costo Total (US\$)
Sensor de Gas Inflamable con Celda de Detección Catalítica (Pellistor)	212.00	3	636.00
Módulo de Entrada para Sensor de Gas Inflamable Catalítico	210.00	2	420.00
Módulo de Alarmas por Canal	275.00	2	550.00
		TOTAL ANUAL (US\$)	1606.00

Fuente: Elaboración propia (2010)

4.2.2 Sistema modernizado de detección IR

Los detectores infrarrojos, como se han estudiado anteriormente, son mucho más robustos que sus pares catalíticos y no tienen los mismos problemas operativos. De ese modo no se requiere el cambio de sensores con frecuencia. Debido a que igual puede presentarse eventualmente algún problema con estos, se considera el costo de un sensor IR, así como de una tarjeta amplificadora al año para su

reemplazo, en caso sea necesario. Por otra parte, la versión moderna del Gasmaster no emplea módulos de entrada especiales para este caso, debido a que las entradas son universales de 4 a 20 mA. De acuerdo con lo indicado entonces, para este sistema también podemos establecer un costo de mantenimiento anual, tal como es mostrado en la Tabla 13:

Tabla 13. Costo de mantenimiento anual sistema modernizado de detección de gases inflamables

Repuesto	Costo Unitario (US\$)	Cantidad Requerida por Año	Costo Total (US\$)
Ensamble de Sensor de Gas Inflamable con Celda IR	819.00	1	819.00
Tarjeta amplificadora para Sensor de Gases 4-20 mA	468.00	1	468.00
		TOTAL ANUAL (US\$)	1287.00

Fuente: Elaboración propia (2012)

4.3 Costos acumulados

Una vez establecidos los costos iniciales y los costos anuales típicos requeridos, basados en la necesidad de mantenimiento de acuerdo a las características operativas de cada una de las tecnologías, podemos establecer un análisis comparativo de los costos acumulados de ambos sistemas en el tiempo.

De este modo podemos apreciar los resultados que tenemos según se muestran en la Tabla 14.

Como resultado se puede ver entonces que, a pesar de que los costos iniciales favorecen la opción del sistema tradicional de detección por sensores catalíticos, la diferencia de costos anuales de repuestos requeridos a favor del sistema modernizado de detección IR, hace que podamos observar que, a partir del cuarto año de operación, la comparación de costos acumulados favorezca al sistema de detección modernizado IR en adelante. Esto se da principalmente por que el sistema modernizado de detección por IR requiere de menor cantidad de repuestos para mantenimiento, en comparación con el sistema tradicional de detección catalítica.

Tabla 14. Comparación de costos acumulados anuales de sistemas de detección de gases inflamables

	Sistema Tradicional de Detección Catalítica	Sistema Modernizado de Detección IR
Costo Inicial	9996.00	11142.00
Costo Acumulado al 1er Año de Operación	+ 1606.00 = 11602.00	+ 1287.00 = 12429.00
Costo Acumulado al 2do Año de Operación	+ 1606.00 = 13208.00	+ 1287.00 = 13716.00
Costo Acumulado al 3er Año de Operación	+ 1606.00 = 14814.00	+ 1287.00 = 15003.00
Costo Acumulado al 4to Año de Operación	+ 1606.00 = 16420.00	+ 1287.00 = 16290.00
Costo Acumulado al 5to Año de Operación	+ 1606.00 = 18026.00	+ 1287.00 = 17577.00
Costo Acumulado al 6to Año de Operación	+ 1606.00 = 19632.00	+ 1287.00 = 18864.00

Fuente: Elaboración propia (2012)

CONCLUSIONES

A continuación, se enumeran de acuerdo al desarrollo del presente trabajo, las conclusiones a las que se han llegado, según los objetivos planteados:

1. La revisión y estudio de la tecnología de detección catalítica de gases inflamables ha permitido conocer las características que son limitantes para la operación en procesos de transporte de hidrocarburos, algunas de las cuales representan condiciones inseguras, tales como la seguridad en falla, cracking o envejecimiento. La aplicación de la tecnología de detección infrarroja ha permitido eliminar estas condiciones riesgosas, así como mejorar el desempeño de otros aspectos operativos, tales como efectos de envenenamiento y contaminación de los sensores, requerimiento de oxígeno, etc.; aunque es necesario tomar en cuenta algunas condiciones propias de la nueva tecnología a emplear. Esta conclusión se ha alcanzado principalmente, producto de lo explicado en la Estructura Teórica, resumido en las secciones 2.3.1.4 y 2.3.2.6, correspondientes a los Factores Importantes de Funcionamiento para ambas tecnologías de detección de gases inflamables expuestas.
2. Dentro del proceso de modernización del sistema de detección de gases inflamables, se ha incluido, además de los detectores, al controlador de gases, el cual ha eliminado el problema de falsas alarmas que se presentaba persistentemente en el sistema antiguo. El controlador antiguo presentaba problemas de interferencia de las señales de entrada, las cuales variaban por efecto de las comunicaciones radioeléctricas sostenidas en su proximidad. Esto generaba falsas lecturas y alarmas, durante operaciones normales. Además, este efecto dificultaba bastante el proceso de calibración inicial de los detectores, que a menudo se ajustaban incorrectamente debido a este factor. El cambio por un controlador más moderno a base de circuitos digitales, ha eliminado completamente las interferencias EMI y por lo tanto ha suprimido las falsas lecturas y simplificado el proceso de calibración. Mayores detalles se pueden encontrar en las secciones 1.3.4.1 y 3.2.2.2.

3. La aplicación de detectores de gases inflamables infrarrojos y las ventajas operativas que ofrecen por su principio de funcionamiento, han permitido mejorar sustancialmente el proceso de mantenimiento del sistema de detección. Tanto por la necesidad de calibraciones menos frecuentes, como del reemplazo mínimo de repuestos, los cuales eran más necesarios con el sistema de detección catalítica tradicional. Al respecto se ha comprobado que los detectores infrarrojos, al no envejecer con el uso y no verse afectado por concentraciones altas de gases inflamables (cracking), requieren menos intervenciones para la comprobación y calibración de los mismos, así como menor cantidad de repuestos internos a cambiar. A pesar que el costo inicial del sistema moderno de detección de gases inflamables es alto, los costos de mantenimiento a mediano plazo hacen que dicho sistema sea económicamente viable a partir del cuarto año de funcionamiento. El análisis respectivo de esta conclusión se encuentra debidamente detallado en el CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE COSTOS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALPHASENSE The Sensor Technology Company (2013). *Products – Pellistors*. Recuperado de <http://www.alphasense.com/index.php/products/pellistors/>
- Chou, J. (1999). Chapter 3 Catalytic Combustible Gas Sensors, *Hazardous Gas Monitors – A Practical Guide to Selection, Operation and Applications*. Estados Unidos: McGraw-Hill Professional
- Chou, J. (1999). Chapter 5 Infrared Gas Sensors, *Hazardous Gas Monitors – A Practical Guide to Selection, Operation and Applications*. Estados Unidos: McGraw-Hill Professional
- Corporación TEXCA, C.A. (1999). *Seguridad Intrínseca*. Recuperado de <http://www.texca.com/si.htm>
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2000). Section 8 Pellistor sensors, Correction factors for pellistors, *Talking Gas! – Gas Detection Principles, Stock No: P08004, Issue 2 – 9/2000*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2001). *Gasmaster Manual modified 071201.doc, Issue 1, 7 December 2001*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2003). *Instructions Flamgard-EXE & Flamgard-D Flammable Gas Detectors*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2006). *Gasmaster Datasheet (spanish). P05007E Edición 3 08/06*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2007). *Gasmaster Datasheet. P05007 Issue 5 02/07*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.

- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2007). Product description, *Xgard IR Infrared gas detector – Launch pack*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2008). *Gasmaster – Manual de Instalación, Utilización y Mantenimiento. M07700 Versión 6, Julio de 2008*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2011). *Xgard IR – Gas Detector, Installation, Operating and Maintenance Instructions (Multilingual). M07692 Issue 4 February 2011*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- CROWCON Detection Instruments Ltd. (2015). *Xgard – Detectores de Gas, Instrucciones de Instalación, Funcionamiento y Mantenimiento. M07252 11 edición, enero de 2015*. Reino Unido: Crowcon Detection Instruments Ltd.
- E2S Warning Signals (2006). *A100 – 32 Tone ‘AlertAlarm’, Installation Instructions. ISN0101-B*. Reino Unido: E2S Warning Signals
- EMERSON Electric Co. (2017). *Tecnología de detección puntual de gas – Funcionamiento – Detección de gases combustibles*. Recuperado de <http://www.emerson.com/es-mx/automation/measurement-instrumentation/flame-gas-detection/about-point-gas-detection-technology#>
- García Seijas, N. (2011). *¿QUÉ ES EL ISM CODE? – Código Internacional de Gestión de la Seguridad, International Safety Management Code*. Venezuela: Grupo Naviero Rassi
- GENERAL MONITORS (2001). Chapter 2 Detection technologies – Electrocatalytic detectors, *Fundamentals of combustible gas detection*. California, Estados Unidos: General Monitors

HALMA PLC (2008). *Crowcon News, Crowcon's equipment on-call to alert own workers to CO danger (April 2008)*. Recuperado de <http://halmapr.com/news/crowcon/2008/04/10/crowcons-equipment-on-call-to-alert-own-workers-to-co-danger/>

HONEYWELL ANALYTICS (2009). Catalytic bead gas detectors – Detection of flammable gases, *Honeywell Gas Detection*. Bélgica: Honeywell Analytics

HONEYWELL ANALYTICS (2013). *El Libro del Gas – Detección de Gas Honeywell, H_Gasbook_V5_ES, 04/13*. Suiza: Honeywell Analytics

Langley, S. P. (1900). Volume I – Plate XI – The bolometer and special rheostat, *Annals of the astrophysical observatory of the Smithsonian Institution*. Washington, Estados Unidos: U.S. Government Printing Office

LUMASENSE Technologies, Inc. (2018). *Technology overview – Photoacoustic spectroscopy (PAS), Measurement principle of photoacoustic gas monitoring*. Recuperado de <https://www.lumasenseinc.com/EN/products/technology-overview/our-technologies/pas/photoacoustic-spectroscopy.html>

NIST (2018). Methane, gas phase spectrum, *Libro del web de química del NIST*. Recuperado de <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74828&Units=SI&Type=IR-SPEC&Index=1#IR-SPEC>

ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL – OMI (2018). *Convenio Internacional para la Seguridad de la Vida Humana en el Mar, 1974 (Convenio SOLAS)*. Recuperado de [http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/es/About/Conventions/ListOfConventions/Paginas/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx)

ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, IMO (2002). Cap. II-2 Construcción – Prevención, detección y extinción de incendios, *SOLAS (Safety of Life at Sea) – Edición Refundida, 2002*. Londres, Reino Unido: Organización Marítima Internacional

ORGANIZACIÓN MARÍTIMA INTERNACIONAL, IMO (2002). Cap. IX Gestión de la seguridad operacional de los buques, *SOLAS (Safety of Life at Sea) – Edición Refundida, 2002*. Londres, Reino Unido: Organización Marítima Internacional

PEM-TECH, Inc. (2018). *Calibration accessories – Disposable gas cylinders*. Recuperado de <http://www.pem-tech.com/calibration-accessories/calibration-gas-bottles.html>

PEWATRON AG (2018). *Gas sensor modules VQ21TB*. Recuperado de <https://www.pewatron.com/en/products/gas-sensors-gas-sensor-modules/product/vq21tb/>

RKI Instruments (2006). *Gas Detection History*. California, Estados Unidos: RKI Instruments

SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Press Release*. Recuperado de: <https://www.sensorelectronics.com/news.php>

SEC, Sensor Electronics Corporation (2019). *Publicaciones*. Recuperado de: https://www.facebook.com/pg/Sensor-Electronics-Corporation-208213815878785/posts/?ref=page_internal

SIMRAD Optronics (2000). *SIMRAD IR Point Gas Detector – First line service on Simrad IR-point gas detector, GD10 and GD100*. Noruega: SIMRAD Optronics

TEBMOR Formación en Emergencias (2011). *Manual de Naturaleza del Fuego*. Recuperado de <http://cursosememergencias.blogspot.pe/2011/12/naturaleza-del-fuego.html>

Webster, J. G. (1999). 10.5 Occupancy detection, *The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook*. Florida, Estados Unidos: CRC Press LLC

Zdankiewicz, E. M. (2000). Parte I Tecnologías en Sensores Químicos, *Detección de Gases, Teoría y Práctica. Cuaderno Profesional N° 12*. Buenos Aires, Argentina: Asociación Argentina de Control Automático AADECA