



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**SISTEMAS CONTRA INCENDIO PARA CUARTOS DE CONTROL DE
PLANTAS DE PROCESO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

ANDRÉS RAMOS PAULINO



CIUDAD DE MÉXICO, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: PROFESOR: ISAÍAS ALEJANDRO ANAYA DURAND

VOCAL: PROFESOR: JOSÉ ANTONIO ORTIZ RAMÍREZ

SECRETARIO: PROFESOR: JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA

1ER. SUPLENTE: PROFESOR: ALMA DELIA ROJAS RODRÍGUEZ

2° SUPLENTE: PROFESOR: LUIS ÁNGEL MORENO AVENDAÑO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

ASESOR DEL TEMA:

JOSÉ AGUSTÍN TEXTA MENA

SUPERVISOR TÉCNICO:

VÍCTOR HUGO GARCÍA MORALES

SUSTENTANTE:

ANDRÉS RAMOS PAULINO



**SISTEMAS CONTRA INCENDIO
PARA CUARTOS DE CONTROL
DE PLANTAS DE PROCESO**



CONTENIDO

Contenido _____	1
Introducción _____	3
Objetivos _____	5
1 Antecedentes _____	6
1.1 La naturaleza de los accidentes en la industria _____	6
1.2 Los accidentes industriales _____	8
1.3 Efecto domino y la pirámide de accidentes _____	11
1.4 Las pérdidas por incendios _____	12
1.5 El análisis de riesgos _____	13
1.6 Aplicación de los estudios de seguridad en la Ingeniería de Proyectos _____	17
1.7 Breve historia de la ingeniería contra incendios _____	19
1.8 Zonas industriales en México _____	20
2 Marco teórico del fuego _____	22
2.1 Aspectos Generales _____	22
2.2 Teoría del fuego _____	22
2.3 Combustión _____	23
2.4 Características de Inflamabilidad _____	23
2.5 Productos de la combustión y sus peligros _____	25
2.5.1 Productos asfixiantes del fuego _____	26
2.5.2 Productos irritantes del fuego _____	27
2.5.3 Calor _____	27
2.6 Transferencia de calor _____	27
2.7 Clasificación de incendios _____	29
2.8 Dinámica del fuego _____	30
2.9 Desarrollo de incendios en recintos cerrados _____	31
2.9.1 Ignición _____	32
2.9.2 Crecimiento _____	32
2.9.3 Flashover _____	32
2.9.4 Desarrollo _____	33
2.9.5 Disminución _____	34
2.9.6 Flameover/Rollover _____	34
2.9.7 Capas térmicas de los gases _____	34
2.9.8 Explosión de humo _____	35
2.10 Extinción del fuego _____	35
2.11 Incendios en edificaciones _____	36
2.12 Protección contra incendios en edificios _____	37
2.13 Evacuación de los ocupantes _____	38
2.14 La protección contra incendio dentro de la Ingeniería de Proyectos _____	39
3 Cuartos de Control _____	41

3.1	Clasificación _____	41
3.2	Parámetros de diseño _____	42
3.3	Requisitos _____	42
3.4	Sistemas requeridos _____	43
	3.4.1 Sistema de Presurización y aire acondicionado _____	43
	3.4.2 Servicios _____	43
3.5	Ubicación del Cuarto de Control _____	45
3.6	Requerimientos del edificio _____	48
3.7	Aspectos ergonómicos del cuarto de control _____	49
3.8	Riesgos de incendio en los cuartos de control _____	51
4	Sistemas contra incendio para cuartos de control _____	53
	4.1 Tipos de sistemas _____	53
	4.2 Agentes extintores sustitutos de los Halones: Agentes limpios _____	55
	4.3 Propiedades del CO ₂ _____	58
	4.4 Normas y Códigos _____	59
	4.4.1 Normatividad extranjera _____	60
	4.4.2 Normatividad Nacional _____	61
5	Sistemas de detección y alarma _____	62
	5.1 El Tablero central de control _____	62
	5.2 Detectores de Incendio _____	62
	5.2.1 Detectores de Humo _____	62
	5.2.2 Detector de calor _____	64
	5.2.3 Detectores de llama _____	65
	5.2.4 Ubicación de los detectores de humo y calor _____	66
	5.3 Alarmas audibles y visibles _____	66
	5.4 Estaciones manuales de alarma _____	67
6	Diseño de los sistemas contra incendio con agente limpio _____	68
	6.1 Criterios de Diseño _____	70
	6.2 Filosofía de operación _____	76
7	Desarrollo del diseño de un sistema de inundación total _____	78
8	Resultados _____	94
9	Conclusiones _____	95
10	Glosario _____	97
11	Bibliografía _____	100
Anexos	_____	102
	Anexo 1. Plano arquitectónico y fachada del cuarto de control a proteger _____	102
	Anexo 2. Arquitectura del sistema contra incendio del cuarto de control _____	105

INTRODUCCIÓN

En términos generales podemos decir que el fuego en la historia del hombre fue el elemento que abrió el camino para el desarrollo de la humanidad, pues cuando el hombre logró producirlo y mantenerlo por largos periodos de tiempo; sin duda, supuso el inicio del control de la naturaleza; amplió los territorios que podía habitar, pudo protegerse del frío y adquirió una fuente de luz, logró conservar los alimentos, encontró una herramienta de defensa frente a los animales, mejoró la salud pública y más adelante, el fuego le permitió moldear y fundir los metales para la fabricación de herramientas. Con la posesión del fuego comenzó el progreso cultural pues comenzaron las primeras comunicaciones a distancia.

Conforme las civilizaciones se desarrollaron, el hombre inventó herramientas e introdujo técnicas de trabajo; aunque la manera de producir fue prácticamente la misma por un largo periodo de tiempo, el trabajo era de tipo artesanal y los artículos se producían por el trabajo de una sola persona de principio a fin. Esta forma tradicional comenzó a cambiar durante la Revolución Industrial, pues en lugar de que un solo trabajador hiciera todo o la mayor parte del producto, la tarea fue dividida en procesos pequeños y cada uno de ellos realizado por un trabajador diferente. Esta forma de organización propició que en 1915 el Dr. Arthur D. Little creara lo que sería el primer pilar fundamental de la Ingeniería Química, las Operaciones Unitarias “Cualquier proceso químico, a cualquier escala, puede ser comprendido a través de una serie de lo que podemos llamar Operaciones Unitarias; como pulverización, secado, cristalización, filtración, evaporación y otras. El número de Operaciones Unitarias no es muy grande y relativamente pocas de ellas se encuentran en un proceso particular”.

La industria ha sido fundamental en la economía del mundo, según Robert M. Solow, Premio Nobel de Economía en 1987, su crecimiento depende de los avances tecnológicos desarrollados; mismos que evolucionan en forma más rápida, se ven reflejados y son más palpables en algunas industrias que en otras; ejemplo de ello es la industria electrónica, la cual ha evolucionado de forma tal que existe una creciente tendencia de reducción de ciclos de productos. El tiempo promedio de lanzamiento de nuevos modelos de computadoras es de tres meses y en electrónica de consumo es seis meses.

Con el desarrollo tecnológico ha sido posible convertir la materia prima en un producto final con mayor calidad, en menor tiempo y con menores costos de producción; buscando últimamente la seguridad del trabajador y un equilibrio con el medio ambiente; estos dos últimos rubros son la base de la ISO 14000 “Gestión ambiental” e ISO 18000 “Gestión de la seguridad y salud ocupacional”.

En la industria de procesos la materia prima se transforma química y/o físicamente con el fin de crear un producto que cubra las necesidades de la población. Ejemplos típicos de las industrias de proceso son las de papel, generación de electricidad, gas y petróleo, farmacéutica y de alimentos, los mercados para el comercio de energía y la obtención de los recursos naturales son, en cierto modo, tipos de industrias de proceso. El uso de computadoras, así como de tecnologías de la información (TI) son un factor importante que se suma a esta conceptualización mucho más amplia de industrias de proceso.

Desde hace varios años la automatización de procesos es una realidad, sin ella no sería posible visualizar la industria del presente y del futuro, pues ofrece beneficios económicos traducidos en la reducción de tiempos muertos en las operaciones industriales, reducción de costos de operación, aumento en la productividad, incremento en las capacidades de producción y calidad de los productos, etc., sobre todo en aquellas en

donde la intervención de las manos del hombre puede “contaminar” la materia prima o el producto final como es el caso de la industria alimentaria o farmacéutica o en aquellas en donde se pone en riesgo la salud del trabajador por existir condiciones de exposición a sustancias peligrosas.

Los riesgos en la industria se vuelven cada día más complejos, por lo cual las empresas requieren proporcionar mayores condiciones de seguridad; aunque por desgracia muchos industriales creen que la inversión en seguridad es en realidad una restricción en el crecimiento del negocio pues genera gastos considerados como innecesarios. Hoy en día se entiende que la seguridad en los centros de trabajo es tan importante como la producción misma, ya que tiene como principal alcance la protección del trabajador; por lo cual, las empresas han desarrollado normas y reglamentos que han ayudado a reducir las pérdidas humanas y materiales en las instalaciones industriales. Recientemente el término "seguridad" ha sido sustituido por la "prevención de pérdidas" e incluye la identificación de riesgos y el diseño de nuevas prácticas de ingeniería para evitar las pérdidas.

Con la automatización es posible fusionar el control de la operación de varias unidades de proceso en una sola unidad, es así como se crea el término “cuarto de control” o “bunker”, desde el cual todas las variables de operación como temperatura, presión, flujo y nivel pueden ser manipuladas a larga distancia por medios como la fibra óptica, a través de estaciones de trabajo y poder mantener en óptimas condiciones los procesos de producción.

El cuarto de control opera las 24 horas del día los 365 días del año y está ocupado con por lo menos una persona, razón por la cual es fundamental protegerlo de aquellos peligros que pueden interrumpir su funcionalidad como es el caso de incendios producidos en el interior o por explosiones externas que dependiendo de su magnitud pueden dañar su estructura; la protección del cuarto de control debe incluir a los ocupantes del mismo.

El concepto de cuarto de control se ha extendido en muchas áreas; por ejemplo, en la industria de procesamiento de alimentos, en la cual existen muchas ventajas obvias para hacer de esta industria, una industria automatizada. En los últimos años han aumentado notablemente las empresas que han introducido los centros de control como parte fundamental del control de su operación; como ejemplo están los centros de control de vigilancia y seguridad, así como los llamados “data centers” o centros de datos que en México han ganado terreno y que se esperan grandes inversiones para su construcción.

En este trabajo se tomará en cuenta sólo la protección contra incendios de los cuartos de control de las plantas de proceso; sin embargo, cabe señalar que los criterios para diseñar los sistemas de protección de este tipo, son básicamente los mismos para cualquier recinto cerrado que se quiera proteger con agente limpio.

El diseño propuesto que se desarrolla en el capítulo 7 considera la protección de un cuarto de control central con agente limpio pues se encontrará ocupado todo el tiempo por personal operativo.

OBJETIVOS

Los capítulos planteados en esta tesis tienen como objetivo cubrir los aspectos más importantes y principales del diseño e implementación de los sistemas contra incendio para proteger los cuartos de control de las plantas de proceso; partiendo de los principios básicos como la teoría del fuego, fisicoquímica, clasificación y dinámica del fuego; así mismo se explica brevemente la seguridad contra incendios en edificaciones ya que una buena parte de los criterios utilizados en la protección de los cuartos de control son adaptaciones de la protección general de edificios.

A fin de cumplir con los objetivos del presente trabajo, se describe la función e importancia de los cuartos de control como una parte neurálgica en la operación de las plantas de proceso y los riesgos de incendio que tienen asociados debido a su operación.

Una parte fundamental en el diseño de sistemas contra incendio en cuartos de control, es la normatividad internacional y nacional vigente que debe ser implementada para desarrollar un diseño efectivo y adecuado del sistema de protección; los sistemas pueden ser a base de dióxido de carbono (CO_2) para cuartos de control satélite, los cuales normalmente no se encuentran ocupados por personal; o sistemas de agentes limpios como el comercialmente denominado FM-200 utilizado en cuartos de control central, los cuales se encuentran ocupados las 24 horas del día.

Finalmente se desarrolla el diseño de un sistema contra incendios para la protección de un cuarto de control de una instalación industrial definida, mediante un sistema de inundación total con agente limpio, aplicando los criterios técnicos, la filosofía del diseño seguro, normatividad vigente, reglas heurísticas, etc., a un diseño real en la industria.

Para tal fin se desarrolla una simulación con software especializado para determinar los requerimientos de agente limpio necesarios para la protección total del recinto y el arreglo del sistema que cumpla con la concentración y tiempo de descarga establecidos por normatividad.

Cabe mencionar que en este trabajo no se desarrollan los modelos matemáticos que describen el comportamiento del agente limpio en dos fases a través del sistema de tuberías; ya que el software utilizado tiene cargado todos los parámetros de diseño de la normatividad aplicable.

1 ANTECEDENTES

1.1 LA NATURALEZA DE LOS ACCIDENTES EN LA INDUSTRIA

La rápida evolución tecnológica que ha experimentado la industria en general y en particular la industria de proceso, ha dado como resultado entre muchas otras cosas, el incremento de inventarios de sustancias químicas necesarias en la elaboración de productos que permiten satisfacer las necesidades habituales de una creciente población; ello sin duda ha generado una mayor probabilidad de ocurrencia de accidentes con un notable impacto sobre la población, el medio ambiente y los equipos de proceso.

Los accidentes en la industria siguen patrones típicos, lo cual ha permitido estudiarlos y analizarlos con profundidad a fin de anticiparlos, eliminarlos o en su defecto minimizar las pérdidas asociadas a los mismos. Los accidentes “mayores” están asociados con fenómenos térmicos (radiación térmica), mecánicos (ondas de sobrepresión y expulsión de fragmentos) y químicos (fugas de material tóxico). Una explosión puede causar un incendio, un incendio puede desencadenar una explosión y esta puede ocasionar la dispersión de una nube tóxica. Estos accidentes pueden afectar a las personas, los bienes materiales y el medio ambiente.

Los daños provocados al ser humano pueden ser físicos (muertes o lesiones) o psicológicos y puede afectar tanto a los empleados del establecimiento en que ocurre el accidente como a la población externa. Las consecuencias sobre la propiedad son por lo general la destrucción de equipos o edificios dentro de la instalación o fuera de ella. Las consecuencias Ambientales pueden ser inmediatas o retardadas e incluyen la liberación de material peligroso en la atmósfera, suelo o agua. Además; los accidentes graves generalmente causan daños indirectos como la pérdida de beneficios por la empresa en cuestión o la pérdida de la confianza de la población. Dentro de los eventos que pueden presentarse en las instalaciones industriales, se encuentran los siguientes: incendios, explosiones y liberación de material tóxico.

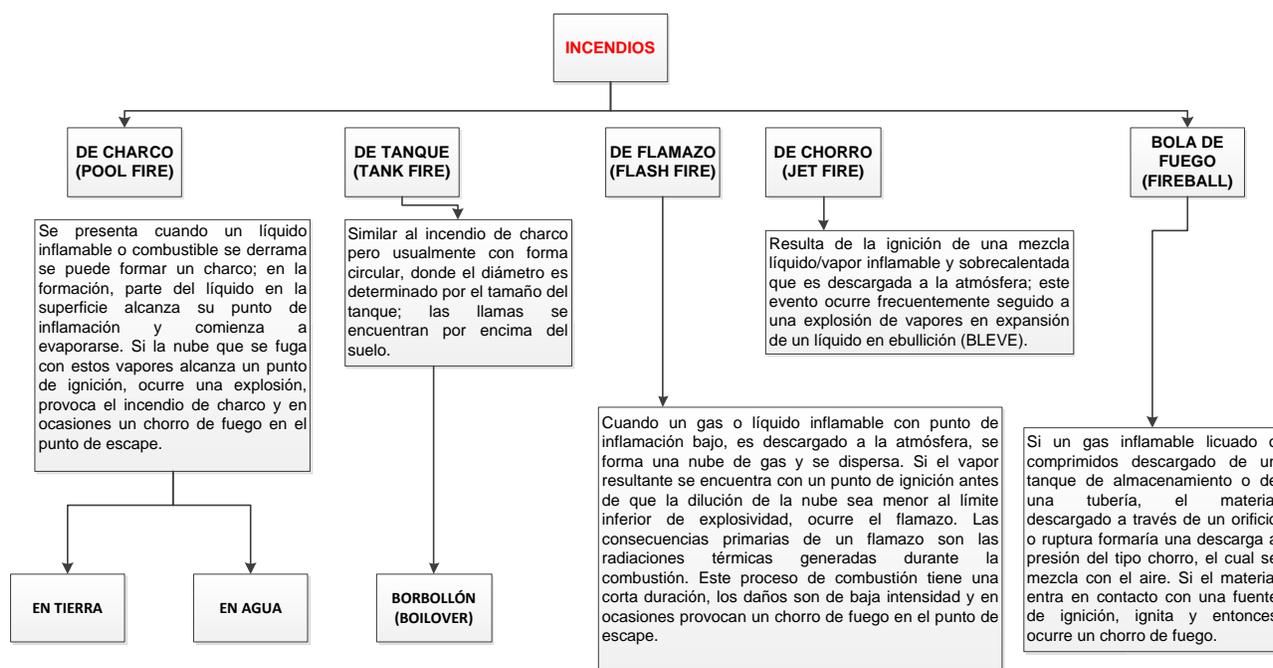


Fig. 1. Tipos de incendios

Las explosiones están asociadas a los mayores accidentes producidos por fenómenos mecánicos, ocurren cuando hay una rápida liberación de energía causando un cambio transitorio en la densidad, presión y velocidad del aire alrededor del punto de descarga de energía. Existen explosiones físicas, que son aquellas que se originan de un fenómeno estrictamente físico como una ruptura de un tanque presurizado o una explosión de vapor en expansión de un líquido en ebullición (BLEVE). El otro tipo de explosiones se denominan confinadas, las cuales tienen su origen en reacciones químicas en el interior de recipientes y edificios; a continuación se describen las siguientes:

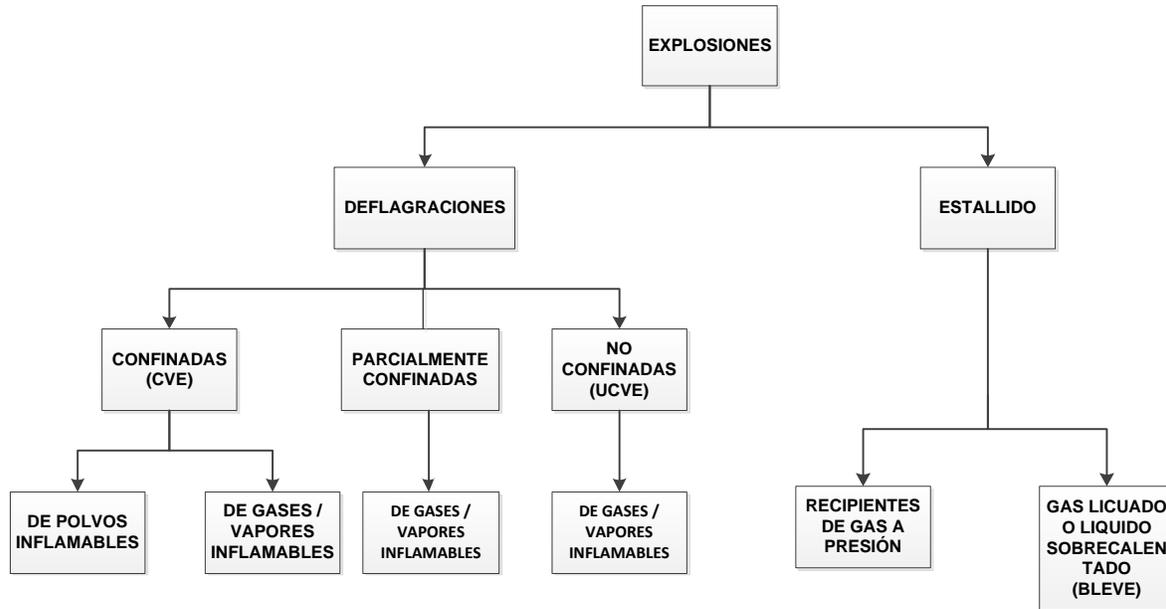


Fig. 2. Tipos de explosiones

Explosión por una nube de vapor (VCE-UVCE, Confined/Unconfined vapor cloud explosion). Comienza con una descarga de una gran cantidad de líquido que se evapora o gas inflamable de un tanque o tubería y se dispersa en la atmósfera, de toda la masa de gas que se dispersa, solo una parte de esta se encuentra dentro de los límites superior e inferior de explosividad. Esa masa es la que después de encontrar una fuente de ignición genera sobrepresiones por la explosión. Este puede ocurrir tanto en lugares confinados como en no confinados.

Explosión por polvos inflamables (dust explosion). Los productos sólidos divididos finamente (partículas del orden de 0.1 mm o menores), si son oxidables y están en suspensión en el aire, pueden dar lugar a explosiones con gran poder destructor; esto suele ocurrir no en el exterior sino en el interior de un equipo. Sólidos aparentemente inofensivos como el corcho, harina, azúcar, aluminio, etc., han originado fuertes explosiones en silos, ciclones, líneas de transporte neumático, etc.¹

Explosiones de recipientes. Se puede producir simplemente por tener un defecto de construcción o por la pérdida de resistencia debido a la corrosión. Otro caso es cuando el recipiente se calienta desde el exterior, de manera que la presión en el interior aumenta y debilita su resistencia debido al aumento de temperatura.

¹ De acuerdo con la Chemical Safety Board (CSB), hubo más de 280 explosiones de polvo desde 1980 hasta 2005 en Estados Unidos, que provocaron 119 muertes y 118 heridos.

Explosión de vapor en expansión de un líquido en ebullición (BLEVE, *boiling liquid expanding vapor explosion*). Ocurre cuando en forma repentina se pierde el confinamiento de un recipiente que contiene un líquido combustible sobrecalentado. La causa inicial de un BLEVE es usualmente un fuego externo impactando sobre las paredes del recipiente sobre el nivel del líquido, lo que provoca la ruptura repentina de las paredes del tanque. Si el material líquido vapor descargado es inflamable, la ignición de la mezcla puede resultar en una bola de fuego (*fire ball*).

En los casos en que una fuga de material tóxico no es detectada y controlada a tiempo, se corre el riesgo de la formación de una nube de gas tóxico que se dispersará en la dirección del viento. Su concentración variará en función inversa a la distancia que recorra. Los efectos tóxicos por exposición a estos materiales, depende de la concentración del material en el aire y su toxicidad. Según la emisión del fenómeno en el tiempo, las emisiones pueden clasificarse en instantáneas, continuas y régimen transitorio. ⁽¹⁾⁽²⁾

1.2 LOS ACCIDENTES INDUSTRIALES

La industria ha experimentado grandes cambios en los últimos años, los avances tecnológicos, la creciente demanda de nuevos productos y materiales, la aparición de nuevos procesos y sustancias químicas han permitido un desarrollo prácticamente sin límites. Aunado a ello, ha aumentado del mismo modo el personal que labora en las plantas de proceso y la población que vive a los alrededores que está expuesta a los daños provocados por un accidente industrial. Lo anterior ha dado como resultado acciones técnicas y administrativas de las empresas para en principio evitar eventos catastróficos de índole industrial o disminuir las consecuencias de ese tipo de eventos.

Resulta de suma importancia la elaboración de análisis de accidentes ocurridos en las diferentes ramas de la industria, pues conforman ejercicios útiles y poderosos para obtener ideas sobre las razones por las que se producen los accidentes, su secuencia y sus consecuencias. Esta técnica se basa en la recopilación de accidentes en forma de base de datos; ha permitido en algunos casos la acumulación de datos concretos sobre una determinada situación, equipo u operación. En la fig. 3 se muestra la distribución de eventos no deseados ocurridos en la industria, en donde las explosiones por nube de vapor son las más frecuentes, seguida de los incendios. Los porcentajes de distribución pueden variar dependiendo de la fuente consultada;

sin embargo en casi todos los reportes, se ve la misma tendencia que se indica en este documento.

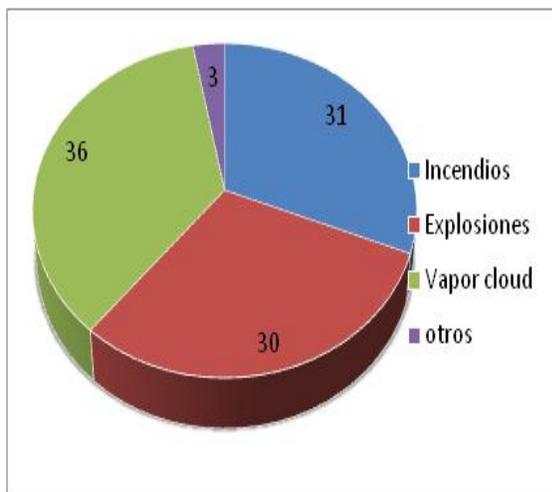


Fig. 3. Accidentes en la industria de procesos

Los accidentes ocurridos en la industria proporcionan una especie de datos experimentales muy valiosos, pero que se han obtenido, lamentablemente a muy alto costo por las pérdidas humanas, económicas y daño al medio ambiente que han dejado a su paso; relativos a un campo en el que resulta casi imposible la experimentación a escala real. Por otro lado estos desafortunados eventos han detonado la aparición de nuevas medidas de seguridad en el diseño de los procesos industriales.

El estudio y conocimiento de las condiciones en las que se ha producido un accidente determinado y sus consecuencias han permitido comparar, validar o modificar

los modelos teóricos de predicción de efectos de este tipo de accidentes. En otros casos, simplemente es posible identificar un cierto número de situaciones, operaciones o errores que han favorecido el inicio de un accidente en un tipo de instalación determinada. La importancia de un análisis histórico de accidentes radica en implementar las “lecciones aprendidas” en los nuevos procesos o en la modificación de los ya existentes.

A lo largo de los años empresas especializadas han creado bases de datos que registran los accidentes mayores ocurridos en la industria, mismas que se han ido actualizando constantemente tras la ocurrencia de accidentes en la industria; de entre las más completas se encuentran las siguientes:

♣ *Major Hazard Incident Data Service (MHIDAS)* distribuido por AEA Technology a través de Health and Safety Executive (HSE) de Inglaterra y GEMS; cuenta con más de 11,000 registros de accidentes de todo el mundo al 2003, en más de 95 países, particularmente Estados Unidos, Inglaterra, Canada, Alemania, Francia e India, ocurridos durante el transporte, procesamiento o almacenamiento de materiales peligrosos que dieron como resultado o se consideraron como la causa potencial de impactos en sitio.

♣ *Major Accident Reporting System (MARS)*, fue creado en 1982 como previsión a la comunidad para el control de los Accidentes Industriales Mayores (derivado del accidente famoso en Seveso²) y cuenta con un promedio de 450 registros de accidentes.

♣ *Chemical Safety Board (CSB)*: Comisión de Seguridad e Investigación de Peligros Químicos de los Estados Unidos; es una agencia federal independiente encargada de investigación de accidentes y peligros químicos industriales.

♣ *SONATA ENI (Summary of Notable Accidents in Technical Activities)*: Banco de datos de accidentes italiano elaborado por el ENI (Ente Nazionale Idrocarburi) que recaba un total de 2,500 accidentes en la industria química, petroquímica y del transporte de mercancías peligrosas desde 1930 hasta 1985.

♣ *IChemE-Responsible Care (Instituto de Ingenieros Químicos) The Accident Database V. 4.1*: Base de datos de accidentes que contiene aproximadamente 13,000 accidentes, incidentes y pérdidas cercanas, 30,0 % de ellos incluyen las lecciones aprendidas.

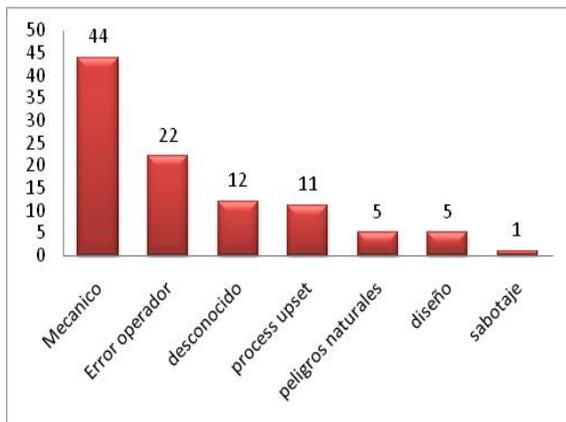


Fig. 4. Causas de accidentes

♣ *UNEP. APPELL. Disasters Data Base. 2003*: Esta base de datos brinda una visualización de accidentes desde 1970 a 1998. La base Disaster cuenta con la categoría de desastres naturales y desastres tecnológicos por lo que en uno de sus apartados describe desastres que involucran sustancias peligrosas, algunos de estos accidentes son la base del desarrollo del programa de APPELL.

♣ *Loss Prevention in the Process Industries, LEES, F. P., Londres, Butterworths, 1980, 2 vols. 1316 págs.* Recapitula brevemente algunos de los principales accidentes que ocurrieron entre 1926-1997 en industrias

² Accidente ocurrido en Seveso Italia, en 1976, en una fábrica productora de herbicidas; en el que se produjo la liberación de cantidades de la dioxina TCDD (2,3,7,8-tetraclorodibenzo-p-dioxina) que se producía como subproducto, formando una nube que se extendió 18 km alrededor de la fábrica.

de procesamiento químico. El análisis de sus casos se efectúa con la finalidad de comprender el potencial de daño de varias clases de accidentes, y las causas comunes o los errores que han generado los desastres.

♣ key dates in fire history (National Fire Protection Association): Sus datos se compilaron originalmente en 1996 en la celebración del centenario de la NFPA. Clasifica el incidente más sobresaliente por día de acuerdo con un análisis histórico. (3)

A nivel nacional se puede recurrir a las bases de datos de las siguientes entidades:

♣ Reporte de accidentes/incidentes ocurridos en instalaciones de PEMEX; Bases de datos estadísticos de accidentes de PEMEX Refinación.

♣ PROFEPA (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente), Subprocuraduría de Inspección Industrial, Dirección General de Inspección de Fuentes de Contaminación, Dirección de Emergencias Ambientales.

♣ CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres).

Dentro de los accidentes ocurridos en la industria, los incendios son los más comunes³, seguidos de explosiones y fugas de sustancias tóxicas; tal y como se muestra en la fig. 5, la cual también incluye fenómenos naturales como huracanes⁴, terremotos, etc. en el título de “otros”. De acuerdo a estudios realizados en base a las investigaciones realizadas (4), se ha concluido que la principal causa de accidentes se

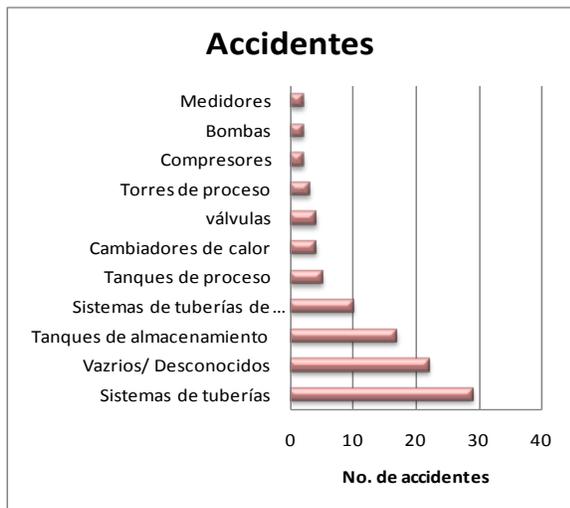


Fig. 5. Equipos de proceso involucrados en accidentes

debe a fallas mecánicas, generalmente derivadas por el nulo o pobre mantenimiento de los equipos y líneas de proceso, aunado a la utilización de materiales no adecuados en componentes de equipos, tuberías y accesorios; la segunda causa es el resultado del error del operador (error humano) y en tercer lugar se encuentran las fallas propias del proceso; derivado generalmente de un pobre diseño en términos técnicos.

De lo anterior, las fallas en los sistemas de tuberías son las más recurrentes, seguido de fallas en tanques de almacenamiento y sistemas de reactores. De acuerdo al estudio que generó este análisis, los componentes mecánicos complejos como bombas y compresores son los elementos con menor frecuencia de responsabilidad en los accidentes mayores.

Lamentablemente muchos han sido los accidentes que han dejado incalculables pérdidas humanas, ambientales y económicas en el mundo; como el caso de las catástrofes de Bhopal, India en 1984 que dejó a más de 5 mil personas sin vida o la explosión en ese mismo año en la planta de almacenamiento y distribución

³ Se incluyen los incendios provocados por relámpagos; los cuales a pesar de no ser frecuentes, deben ser considerados pues pueden provocar considerables pérdidas; como el caso ocurrido en Ras Gharib, Egipto en 1998, cuando un relámpago cayó sobre un tanque de almacenamiento de crudo provocando un incendio que se extendió a 16 tanques más. Se estima que el costo de destrucción fue de \$38 MM de dólares. (41).

⁴ El huracán Katrina suscitado en el año 2005 en Nueva Orleans, E.U.A., catalogado como el huracán que dejó mayores daños económicos y el más mortífero en la historia de E.U.A., destruyó total o parcialmente treinta plataformas petrolíferas y nueve refinerías sufrieron daños y/o cerraron durante semanas después del paso de este huracán. Durante los seis meses posteriores al paso de los huracanes Katrina y Rita, quedó paralizada el 24 % de las extracciones de petróleo y el 18 % de las de gas. (40)

de GLP en San Juan Ixhuatepec, que dejó según cifras oficiales a 600 personas muertas y más de 2,000 heridos; sin olvidar la catástrofe en la planta nuclear de Chernóbil, Ucrania en 1986.

En lo que respecta a daños ambientales, solo por dar un ejemplo, los derivados de derrames petroleros (cuyas causas pueden obedecer o no a fallas técnicas o errores humanos), tienen lamentablemente un papel importante en la historia de los grandes desastres ambientales por su impacto a corto y largo plazo. El más reciente ocurrió en el 2010 en la plataforma “Deep Water Horizon” ubicada en el Golfo de México, propiedad de British Petroleum, la cual colapsó en el lecho marino tras una explosión, provocando el derrame de aprox. 4.9 millones de barriles de petróleo⁵ por lo que es considerada como el segundo mayor derrame petrolero de la historia.

1.3 EFECTO DOMINO Y LA PIRÁMIDE DE ACCIDENTES

El efecto domino se define como la serie de eventos en los cuales las consecuencias de un accidente previo incrementan las probabilidades de que ocurran accidentes posteriores de mayores consecuencias. El efecto implica un evento primario con efectos en una instalación primaria, los cuales inducen a uno o más accidentes secundarios que afectan otras instalaciones. Las instalaciones que frecuentemente son afectadas por el efecto domino son: tanques de almacenamiento sujetos a presión, tanques atmosféricos o criogénicos, equipo de proceso y tuberías. ^{(5) (6)}

La investigación rigurosa de los accidentes e incidentes resulta de suma importancia para la Política de Seguridad y Medio Ambiente de las empresas, ya que permite tomar acciones necesarias para corregir y prevenir accidentes futuros con causas similares. En la mayoría de los ambientes de trabajo se relaciona la causalidad con la culpa o asignación de responsabilidad, por lo que las investigaciones sobre accidentes se perciben por el lesionado más como una búsqueda de culpables que como un esfuerzo positivo hacia la comprensión de las causas; cuanto mayor número de incidentes se investiguen, existirá un mayor nivel de prevención dentro de la empresa.

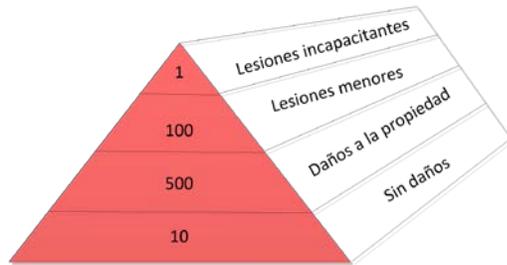


Fig. 6. Pirámide de Accidentes

Se ha demostrado que antes de que ocurra un accidente de gran magnitud ocurren los llamados “conatos de accidentes” o “near misses” en los cuales no hay daños que lamentar, más sin embargo son esa serie de incidentes en donde las compañías tienen la oportunidad de tomar las medidas necesarias para darse cuenta de la existencia de problemas, corregirlos y evitar accidentes mayores. Lo anteriormente expuesto se puede ejemplificar con la pirámide de accidentes, la cual indica que cuantos más incidentes se detecten y se controlen las causas que los generaron, habrá mayor probabilidad de reducir los

accidentes graves. Las cifras varían dependiendo del tipo de industria, ubicación y evidentemente el tiempo en el que se realizan los estudios que arrojan estos datos ⁽⁷⁾. Con frecuencia se dice que la causa de un accidente es visible el día antes de que ocurra.

⁵ En México, el 3 de junio de 1979, el pozo de exploración Ixtoc I, explotó en la Bahía de Ciudad del Carmen, Campeche, se estima que 3.9 millones de barriles de petróleo fueron derramados hasta marzo de 1980, cuando el pozo fue controlado. El derrame de Ixtoc I es actualmente el número 3 en la lista de los mayores derrames petroleros de todos los tiempos; solo por debajo de los derrames del Golfo Árabe en 1991 (900 millones de barriles) y del derrame del Golfo de México en 2010.

La pirámide de accidentes desarrollada en 1969 por Frank Bird. Jr. en un estudio con más 1,750,000 accidentes reportados por 297 compañías en 21 grupos industriales diferentes, reveló como una de sus conclusiones más destacadas que: por cada accidente con consecuencias graves o mortales, se produjeron 10 lesiones leves que sólo requirieron primeros auxilios, 30 accidentes que sólo produjeron daños materiales y 600 incidentes sin lesión ni daños materiales.

1.4 LAS PÉRDIDAS POR INCENDIOS

Generalmente las pérdidas por incendio se clasifican en pérdidas directas e indirectas a la vida y a la propiedad. Las pérdidas directas incluyen los equipos incendiados, además de materiales y edificios consumidos y dañados. Las pérdidas indirectas que se producen principalmente en propiedades industriales y comerciales, incluyen los costos del tiempo perdido de la producción, interrupción del negocio, pérdida de reputación y confiabilidad de la empresa, etc.; estas pérdidas son el resultado indirecto del incendio, pero frecuentemente son ignorados cuando se calculan las pérdidas reales provocadas por los mismos ⁽⁸⁾.

De los 100 accidentes mayores con daños a la propiedad (pérdidas mayores a 10 millones de dólares) ocurridos en el periodo de 1970 al 2009, en refinerías, plantas petroquímicas, plantas de gas, terminales y plataformas marinas, se estima que las pérdidas ascienden a 30 billones de dólares; sin incluir pérdidas por interrupción de la actividad empresarial, heridas de los empleados, víctimas y las reclamaciones de responsabilidad. En la tabla 1 se muestran los 20 accidentes de mayor magnitud en el periodo señalado; en donde se puede ver la magnitud de los incendios: ⁽⁹⁾

Año	Tipo de industria	Tipo de evento	País	MM USD
1987	Petroquímica	Explosión de nube de vapor	USA	430
1988	Extracción de petróleo	Incendio/Explosión	UK	1,600
1988	Extracción de petróleo	Incendio	Brasil	640
1988	Petroquímica	Explosión	USA	580
1988	Refinería	Explosión de nube de vapor	USA	560
1989	Petroquímica	Explosión de nube de vapor	USA	1,300
1989	Extracción de petróleo	Incendio / Explosión	USA	750
1989	Extracción de petróleo	Blowout Perforación	Noruega	410
1991	Extracción de petróleo	Falla estructural	Noruega	720
1992	Extracción de petróleo	Daño mecánico	Australia	470
1997	Procesamiento de gas	Incendio / Explosión	Malasia	430
1998	Procesamiento de gas	Explosión de nube de vapor	Australia	680
2000	Refinería	Explosión de nube de vapor	Kuwait	600
2001	Extracción de petróleo	Explosión / Incendio / hundimiento	Brasil	710
2001	Petroquímica	Explosión	Francia	610

Año	Tipo de industria	Tipo de evento	País	MM USD
2003	Extracción de petróleo	Explosión	Nigeria	650
2004	Procesamiento de gas	Incendio / Explosión	Argelia	580
2005	Extracción de petróleo	Incendio / Explosión	India	430
2008	Refinería	Huracán	USA	750
2009	Extracción de petróleo	Colusión	Noruega	750
Total				13,650

Tabla 1. Los 20 accidentes con mayores pérdidas a la propiedad en el periodo 1970-2009.

Las cifras anteriores indican que del total de las pérdidas señaladas en la tabla, alrededor del 37 % ocurrieron en el periodo 2000-2009, lo que representa casi la cuarta parte del periodo 1970-2009. Estos accidentes confirman la importancia de utilizar un enfoque sistemático para hacer frente a los riesgos de incendio en la industria.

Los accidentes catastróficos en la industria de procesos son eventos poco comunes y son cada vez menos frecuentes, pero no por ello ocasionan pérdidas menores. La probabilidad de que ocurran eventos severos que involucren materiales peligrosos, pueden ser y han sido reducidos por la aplicación de gestiones de seguridad en los centros de trabajo.

Los sistemas de gestión de procesos de seguridad tienen como objetivo asegurar que el diseño, construcción, operación y mantenimiento de las instalaciones industriales sean los apropiados para prevenir accidentes de gran magnitud.

1.5 EL ANÁLISIS DE RIESGOS

Es interesante diferenciar entre riesgo y peligro. Puede definirse el peligro como aquello que puede producir un accidente o un daño. El riesgo, sin embargo, está asociado a la probabilidad de que un peligro se convierta realmente en un accidente con unas consecuencias determinadas.

$$\text{Riesgo} = \text{Frecuencia} * \text{Magnitud de Consecuencias}$$

Esta forma de definir el riesgo presenta realmente dificultades e inconvenientes. En primer lugar las unidades: la magnitud de las consecuencias de un accidente no se mide únicamente en fallecimientos o en dinero; existe también la posibilidad de que se produzcan heridos o secuelas a largo plazo en la población, de difícil o imposible estimación, o de contaminación de áreas más o menos extensas. En segundo lugar, no resulta fácil calcular los dos parámetros que intervienen en la definición, la frecuencia y la magnitud de las consecuencias. Como se verá más adelante, existen metodologías que permiten estudiar estos parámetros, no de forma exacta pero sí con una precisión razonable para poder estimar el riesgo.

El riesgo cero no existe, cualquier individuo es consciente de este hecho y acepta periódicamente, si no constantemente, un cierto número de riesgos a cambio de determinadas compensaciones. Incluso se aceptan riesgos con una tasa de mortalidad relativamente alta (fumar, ejercer determinados oficios o practicar ciertos deportes) sin preocuparse demasiado. Así pues, en muchos casos el riesgo se acepta voluntariamente; es decir, el individuo piensa que de alguna forma lo controla, de manera que cuando quiera lo podrá eliminar; por otra parte, se trata generalmente de riesgos bien conocidos o, por lo menos, con los que se está familiarizado, como por ejemplo viajar en avión o en carretera.

La situación se complica cuando el riesgo no es voluntario y cuando además es desconocido. No obstante, implícitamente los miembros de una sociedad industrializada como la nuestra son conscientes de las ventajas que representa la industria química, la generación de energía, etc.; esto presuponen que paralelamente, están dispuestos a tolerar un cierto riesgo adicional a cambio de disfrutar de determinadas ventajas de la vida moderna.

Desde el punto de vista más concreto de las actividades industriales, los riesgos pueden clasificarse en tres categorías:

- Riesgos convencionales: Relacionados con la actividad y el equipo existentes en cualquier sector.
- Riesgos específicos: asociados a la utilización o manipulación de productos que, por su naturaleza, pueden ocasionar daños (productos tóxicos o radiactivos).
- Riesgos mayores: Relacionados con accidentes y situaciones excepcionales. Sus consecuencias pueden presentar especial gravedad ya que la rápida expulsión de productos peligrosos o de energía podrían afectar áreas considerables (incendios, explosiones, etc.).

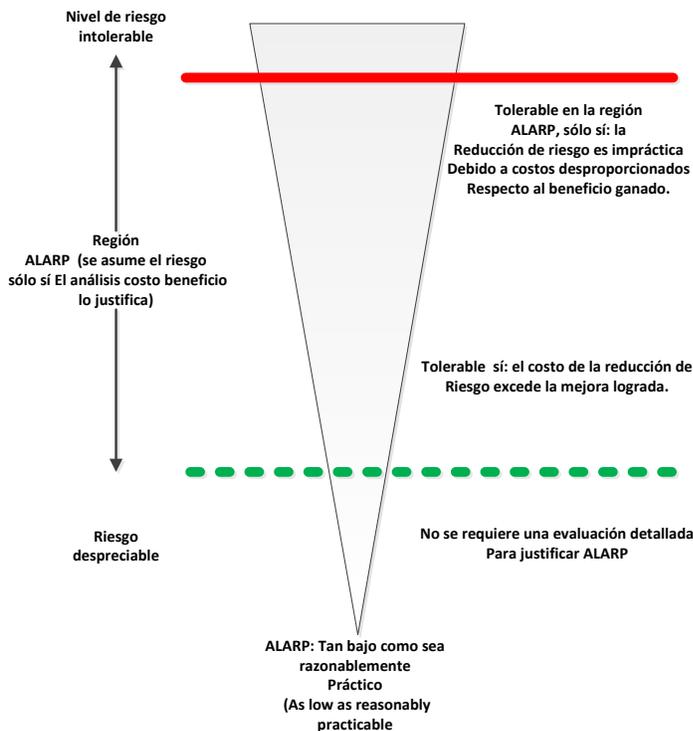


Fig. 7 Principio ALARP

El problema surge cuando el riesgo es realmente demasiado elevado o cuando un determinado sector de la sociedad considera que la cuota de riesgo que le corresponde es demasiado alta. Es evidente, pues, que el control del riesgo y su mantenimiento dentro de límites “tolerables” tiene que ser forzosamente uno de los objetivos principales tanto de la industria como del gobierno de cualquier país. Es necesario tener en mente que no es posible tener instalaciones industriales sin aceptar un margen de riesgo ya que finalmente siempre quedan algunos factores de difícil o imposible control.

Existen riesgos que son tolerables y otros riesgos que no lo son. El principio ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*), “Tan bajo como sea razonablemente práctico”, se encuentra precisamente entre los riesgos que se toleran y los que no. Esta idea se explica con el diagrama que ilustra el principio (fig. 7), en ella se explica que para que un riesgo se

encuentre dentro de la región ALARP, debe demostrarse que el costo relacionado con la reducción del riesgo (frecuencia y/o consecuencias) es desproporcionado con respecto al beneficio que se obtiene.

El principio ALARP, surge del hecho de que sería imposible emplear una gran cantidad de tiempo, dinero y esfuerzo al tratar de reducir los niveles de riesgo a un valor de cero, lo cual en la práctica no es costeable ni posible ⁽¹⁰⁾.

La evaluación de los diversos riesgos asociadas a una determinada instalación industrial se lleva a cabo mediante el análisis de riesgos. Antiguamente en la industria en general, para responder a la pregunta ¿Qué es lo que puede salir mal? (*What went wrong?*), el método consistía en diseñar y construir la instalación lo mejor posible con ayuda de ciertas reglas y criterios o normatividad conocida en ese momento, poner en marcha la planta de proceso y esperar que no sucedieran los eventos peligrosos.

Los argumentos para diluir responsabilidades asociadas a los accidentes generalmente son: “no sabía que esto podría pasar”, “esto nunca había pasado”, así como que si se hubieran conocido las consecuencias se habrían tomado las medidas necesarias.

El análisis de riesgos es un conjunto de metodologías que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos e internos de la planta; por ejemplo, fallas en los sistemas de control, los sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias o daños al personal, a la población, al ambiente, a la producción y/o a las instalaciones. Involucra la identificación de los peligros presentes en el proceso bajo estudio, para posteriormente llevar el análisis y la evaluación de los riesgos asociados a esos peligros. ⁽¹¹⁾

Como ya se explicó anteriormente, no es posible eliminar totalmente los riesgos de las actividades industriales; sin embargo existen técnicas que permiten identificarlos y minimizarlos. Para la identificación del peligro potencial de los procesos industriales se han desarrollado técnicas de análisis cada vez más racionales y sistemáticas; mismas que se desarrollan en dos fases: la primera para detectar posibles accidentes y la segunda para la caracterización de sus causas; es decir, los sucesos o cadenas de sucesos (efecto domino) que provocan el incidente no deseado.

En la actualidad, las metodologías de análisis de riesgos conocidas generalmente como PHA (Process Hazard Analysis) son prácticamente un standard en la industria. Algunas metodologías se utilizan para identificar riesgos (métodos cualitativos) y otras para evaluar riesgos (métodos cuantitativos).

1. Ejemplos típicos de métodos cualitativos:

- ◆ Auditoria de seguridad (*Safety review*).
- ◆ Análisis históricos de accidentes.
- ◆ Listados de control (*check list*).
- ◆ ¿Qué pasa sí? (*What if?*).
- ◆ Estudios de peligros y operabilidad (*Hazard and operability study –HAZOP*⁶).
- ◆ Análisis preliminar de peligros (*Preliminary Hazard Analysis- PHA*).
- ◆ Análisis de Nodos y efectos de fallas (*Failure Modes and Effects Analysis -FMEA*).

2. Ejemplos típicos de métodos cuantitativos son:

- ◆ Árbol de eventos (*Event tree analysis –ETA*).
- ◆ Árbol de fallas (*Fault tree analysis –FTA*).
- ◆ Índices: Dow, Mond, SHI (*substance Hazard Index*) y MHI (*Material Hazard Index*).

⁶ La metodología Hazop fue desarrollada en la década de los 60's en la compañía Imperial Chemical Industries, en la cual trabajó el Dr. Trevor Kletz, (1922-2013), considerado como el padre del concepto “Tecnología de la Seguridad Inherente en los procesos”. Las otras metodologías mencionadas han surgido a partir del HAZOP.

- ◆ QRA (Quantitative risk assessment)
- ◆ LOPA. (Layer of protection analysis, Análisis de capas de protección).

Los métodos cualitativos más utilizados son: PHA, ¿Qué pasa sí? y HAZOP. La selección de una técnica depende de factores como la información disponible del proceso en ese momento o la complejidad de la instalación. Para desarrollar estas técnicas es fundamental contar con un grupo multidisciplinario con amplia experiencia en instalaciones similares objeto de estudio. ⁽¹²⁾

Dentro de los métodos cuantitativos, el LOPA es el más usado, y toma información de algún método cualitativo como el HAZOP; fue introducido en la década de los 90's, fue publicado por el Center of Chemical process Safety (CCPS). Permite determinar y valorar el riesgo de forma intuitiva y reproducible, a través de cada una de las capas de protección que la conforman, empezando por el diseño de proceso, sistema básico de control, pasando por alarmas de intervención manual, Sistema instrumentado de seguridad (SIS), protección activa, protección pasiva, concluyendo en la última capa de seguridad llamada respuesta de emergencia. A su vez, cada capa está compuesta de equipos y/o procedimientos de control que actúan conjuntamente con las otras capas de protección para controlar y/o mitigar los riesgos en los procesos. El término capa de protección fue definido en la Comisión Internacional Electrotécnica (IEC). Las fallas en las capas de diseño del proceso y sistemas de control básico de proceso normalmente son la causa o evento inicial considerado en cada escenario por lo cual estas capas quedan representadas dentro del valor de la frecuencia del evento inicial. Por otra parte, las capas de programas de respuesta Emergencias normalmente no se consideran en esta metodología, pues el objetivo es no llegar a necesitar estas capas de protección.

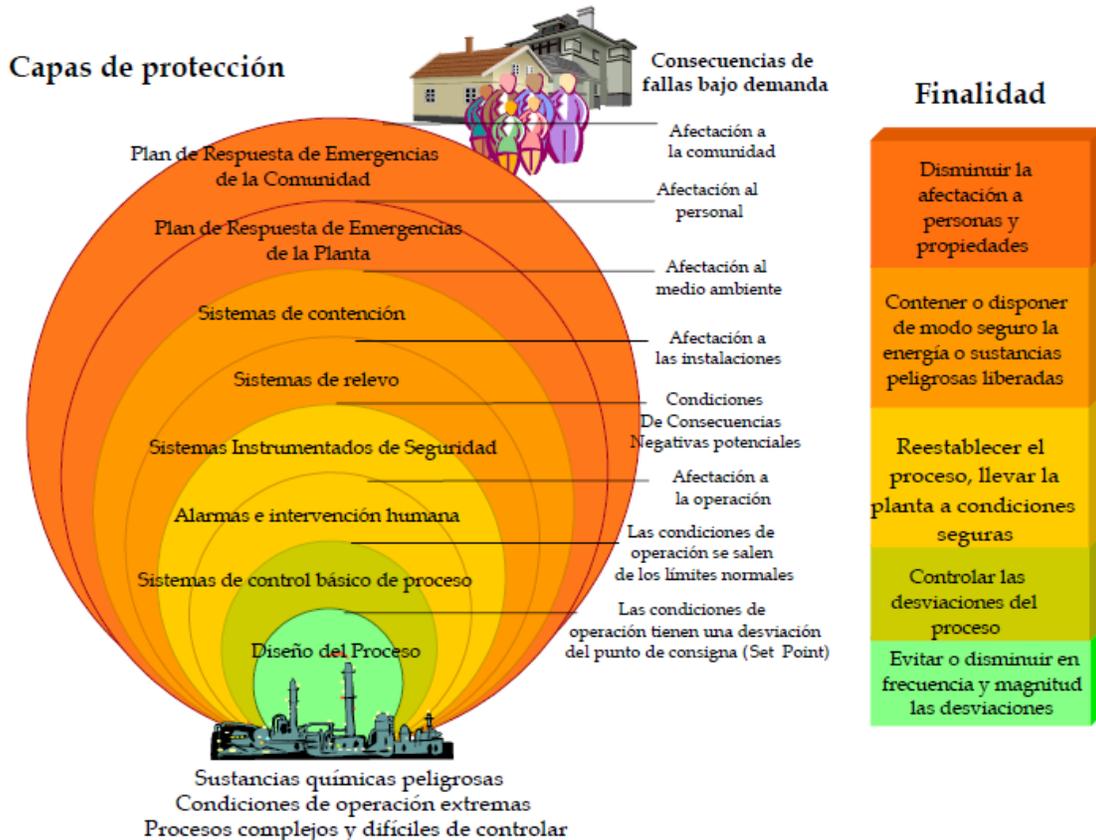


Fig. 7.1. Capas de protección

1.6 APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE SEGURIDAD EN LA INGENIERÍA DE PROYECTOS

Los criterios y metodología para los análisis cualitativos y cuantitativos de riesgos tienen aplicación en las instalaciones típicas de la Industria de proceso (química, petrolera y petroquímica) y especialmente en las que manejan materiales volátiles, inflamables, combustibles o tóxicos en cantidades y condiciones de proceso que determinan un alto potencial de generar explosiones, incendios o nubes tóxicas.

Los Estudios de Seguridad deben formar parte del análisis técnico, toma de decisiones y documentación generada durante el proceso de gestación, desarrollo y aprobación de proyectos. A continuación se describen los requerimientos y estudios de seguridad para las etapas sucesivas en la vida de la instalación: Visualización, Conceptualización, Ingeniería (Básica y de Detalle), Construcción y Operación, incluyendo la fase final de Abandono y Desmantelamiento.

Visualización: En esta etapa se debe considerar la selección de procesos y/o tecnologías que ofrezcan el menor nivel de riesgo. Para ello, el método más adecuado para llevar a cabo la evaluación es el Análisis Preliminar de Peligros (APP) considerando aspectos tales como: Toxicidad, inflamabilidad y reactividad de las sustancias, inventario, condición de operación, impacto ambiental, historia de accidentes e incidentes en el caso de tecnologías conocidas, filosofías de operación de los sistemas de protección.

Conceptualización: En esta fase del diseño la información disponible está limitada al tipo de proceso, equipos mayores, volúmenes manejados, condiciones de operación y diagramas de flujo del proceso (DFP's). En esta etapa deben emplearse los métodos Análisis Preliminar de Peligros, (APP), Cálculos Preliminares de Consecuencias (CPC) y Lista de verificación para identificar escenarios potenciales de accidentes con consecuencias mayores.

Los escenarios identificados deben ser cuantificados a fin de establecer medidas preliminares, lineamientos para el diseño posterior y determinar la factibilidad de continuar con el diseño de la instalación, tal y como está propuesto. Las limitaciones de información en esta fase, le confieren un carácter preliminar a los resultados de los diferentes métodos. No obstante, estos pueden ser determinantes para efectos de decidir o justificar la localización del proyecto, examinar posibles cambios en el proceso y/o materiales utilizados y determinar áreas de interés donde deben profundizarse los estudios posteriores de un Análisis Cuantitativo de Riesgo (ACR).

Ingeniería Básica: Durante esta fase y previo al diseño detallado de equipos, cuando se dispone de información más precisa, tal como diagramas de flujo de proceso y de tuberías e instrumentación (DFP y DTI), variables de operación, especificaciones preliminares y arreglos de equipos (plot plan), etc., se puede llevar a cabo un estudio What if? o HAZOP.

Adicionalmente, en esta etapa un ACR debe ser llevado a cabo para determinar el riesgo individual (a operadores y terceros) y social de la instalación de manera de poder ser comparado con los criterios de tolerancia de riesgo. Así mismo, podrá realizarse un Estudio cualitativo del Nivel de Integridad de Seguridad (SIL), para determinar el requerimiento y/o robustez del sistema instrumentado de seguridad SIS. Las opciones para la instalación de sistemas de seguridad y mitigación generadas hasta e incluyendo esta etapa, deberán ser sometidas a un análisis costo–beneficio para seleccionar aquellas medidas que permitan alcanzar un nivel de riesgo tolerable o mínimo a un costo razonable.

Por último, se debe realizar una Revisión de Seguridad (RS) de la Ingeniería a fin de verificar que las normativas de seguridad hayan sido consideradas.

Ingeniería de Detalle: En esta etapa se realizará un nuevo ACR únicamente si han ocurrido cambios en el diseño original. De lo contrario, los estudios de seguridad en esta etapa, estarán limitados a:

- a) Asegurar la implantación de las medidas acordadas en las etapas previas.
- b) Elaboración de los planes de respuesta a emergencia y contingencias.
- c) Elaboración de los procedimientos de trabajo seguro.

Construcción: Se deberá contar con un plan para el control y seguimiento de ejecución de las medidas de seguridad identificadas en las fases de Visualización, Conceptualización e Ingeniería. En la etapa de construcción se deberán efectuar inspecciones, evaluaciones técnicas y auditorías de seguridad, con el fin de verificar lo siguiente:

- a) Cumplimiento de las recomendaciones aceptadas, provenientes de los estudios previos;
- b) La existencia de medidas administrativas de control de riesgos tales como manuales de operación y mantenimiento, planes de emergencia y contingencias; adecuados y debidamente actualizados.

Pre-arranque/arranque: Durante esta etapa deberán efectuarse pruebas, inspecciones y auditorías con el fin de asegurar que los sistemas de seguridad y mitigación están instalados y funcionando en forma adecuada.

Operación: Los métodos más aplicables en esta etapa incluyen HAZOP, FTA, ETA e inspecciones evaluaciones técnicas. Aquellas instalaciones existentes, cuyo proceso de diseño y construcción no fue sometido a un ACR, deberán ser analizadas bajo esta metodología a fin de determinar su nivel de riesgo y evaluar su cumplimiento con los criterios de tolerancia de riesgos.

Cambios y Modificaciones: Todo cambio o modificación, ya sea a instalaciones existentes o proyectos en ejecución, deberá ser objeto a un análisis de riesgos. Todos los métodos son aceptados, por lo que los especialistas responsables, aplicarán su criterio y experiencia en la selección del estudio requerido dada la naturaleza y complejidad del cambio.

Aseguramiento de calidad: Para asegurar la ejecución y calidad de los requerimientos establecidos para cada una de las etapas de la vida de una instalación, se debe establecer un sistema de auditoría con participación de personal externo a la organización que ejecuta el proyecto.

Abandono y desmantelamiento: En ocasiones se debe analizar la posibilidad de sacar fuera de servicio una instalación y dejarla protegida en estado latente "*mothballing*" hasta el momento oportuno de su reactivación. Esta decisión debe analizarse con un criterio costo–efectivo en comparación con la posibilidad de venta o cierre definitivo y desmantelamiento. En todo caso, una vez que cumplida la vida útil de una instalación, los riesgos remanentes o pasivos de seguridad deben ser evaluados y minimizados. Todos los métodos descritos anteriormente son aplicables, en especial el ¿Que Pasa sí?, HAZOP, FTA, ETA e inspecciones / evaluaciones técnicas.

Cabe señalar que durante el diseño, construcción, arranque y operación de una planta de proceso, es necesario verificar y asegurar la correcta aplicación de criterios de seguridad establecidos; ya que en ocasiones, factores como los indicados a continuación son la causa de accidentes:

Diseño inadecuado: Ocurre cuando en los sistemas de seguridad se subestiman los escenarios potenciales de riesgos (no se considera el peor caso), o bien, cuando se diseña la planta considerando sólo operabilidad y dejando a un lado los aspectos de seguridad por desconocimiento u otros factores.

La construcción no se realizó conforme al diseño establecido en ingeniería básica: Ocurre cuando se utilizan elementos y materiales de menor calidad, se sustituyen o eliminan sistemas de seguridad o instrumentación.

- Mantenimiento inadecuado: No se da mantenimiento preventivo con la frecuencia adecuada, no hay programas de mantenimiento predictivo, no hay refaccionamiento adecuado, el personal no está adecuadamente capacitado en el mantenimiento de algún equipo (equipos de alta tecnología), errores al instalar un equipo después de dar mantenimiento, etc.
- Inspección deficiente y falta de pruebas de los equipos de seguridad.
- Falta de capacitación para operación de sistemas de seguridad
- Inhabilitación sistemática de las capas de seguridad por problemas operativos
- Cambio en los procesos: Condiciones de operación, materias primas, especificaciones de los productos; sin realizar los estudios pertinentes para asegurar una operación estable y segura de la planta de proceso.

1.7 BREVE HISTORIA DE LA INGENIERÍA CONTRA INCENDIOS

La *Society of fire protection Engineers* (SFPE) define a la "Ingeniería de protección contra incendios", como la aplicación de los principios de la ciencia y la ingeniería para proteger a las personas y su medio ambiente del fuego destructivo.

Quizás el primer ejemplo registrado de la utilización práctica de la ingeniería de protección contra incendios, fue el del Emperador Nerón, cuando la ciudad de Roma se incendió en el 64 D.C, pues para la reconstrucción de la ciudad se adoptaron reglamentos como el de utilizar materiales refractarios en las paredes exteriores de las edificaciones.

No fue hasta el siglo XVII, durante el Renacimiento, que un enfoque técnico de protección contra incendios volvió a surgir. Después del gran Incendio de Londres de 1666, que destruyó más del 80 por ciento de la ciudad, se aprobó el primer reglamento para construir edificios, en el cual los materiales debían ser piedra y ladrillo (anteriormente se utilizaba principalmente madera); así como separaciones entre edificios y calles más anchas para poder llevar a cabo las maniobras para sofocar los incendios. El incendio de Londres también estimuló el interés en el desarrollo de los equipos de extinción de incendios en forma de aparatos de bombeo contra incendios a mano.

A lo largo de la Revolución Industrial en Gran Bretaña en el siglo XVIII y en E.U.A en el siglo XIX, los incendios comenzaron a disminuir a medida que las construcciones se construían de concreto y acero; se formaron los primeros grupos de bomberos, se instalaron suministros públicos de agua con red subterránea y se mejoraron los equipos contra incendios.

A mediados del siglo XIX, los incendios ocurridos en las fábricas textiles y de papel cobraron fuerza, mismos que no podían ser controladas por los bomberos (por sus limitaciones técnicas). La solución de ingeniería de protección contra incendios fue instalar un sistema de accionamiento manual de tubos perforados en el techo, creando así uno de los primeros sistemas fijos de extinción de incendios. El deseo de hacer un sistema

de agua de extinción automática en última instancia, condujo al desarrollo de una de las innovaciones más importantes en la ingeniería de protección contra incendios, el sistema automático de rociadores, cuya primera patente fue otorgada a Henry S. Parmelee en 1874. Frederick Grinnell perfeccionó el diseño en la década de 1880.

Durante el siglo XIX, muchos de los avances en la ingeniería de protección contra incendios fueron provocados por el deseo de minimizar las pérdidas de las compañías de seguros; por ello se crearon varias organizaciones que lograron el reconocimiento y el crecimiento de la profesión; tales como Factory Mutual (FM) en 1835, la Junta Nacional de Aseguradores de Bomberos en 1866, Asociación de Seguros de fábricas en 1890, Underwriters Laboratories (UL) en 1893 y la National Fire Protection Association (NFPA) en 1896. Estas fueron las organizaciones pioneras de la ingeniería de protección contra incendios y fueron fundadas en gran medida para reducir la pérdida de vidas y propiedades del fuego destructivo. ⁽¹³⁾

1.8 ZONAS INDUSTRIALES EN MÉXICO

En México, una parte importante de la industria se encuentra ubicada en zonas o parques industriales; de acuerdo al Sistema Mexicano de Promoción de parques industriales (SIMPPI) y a la Asociación Mexicana de Parques Industriales Privados, existen aproximadamente 541, siendo las zonas industriales de los estados fronterizos del norte del país los que cuentan con un mayor número (aprox. El 50 % del total de parques industriales del país).

En ocasiones la continuidad geográfica y la proximidad de dos o más parques industriales hacen que se consideren como un solo corredor industrial con 30 o más empresas y algunos miles de pobladores cercanos a la zona. Por el contrario hay parques industriales con 3 ó 4 empresas con un número reducido de habitantes. Asimismo, existen situaciones contrarias a los dos ejemplos citados; es decir, muchas industrias rodeadas de colonias saturadas de residentes en riesgo. Algunos corredores industriales se encuentran ya dentro del ámbito urbano y en torno a ellos se aprecia una tendencia hacia el incremento de unidades habitacionales verticales. Por otro lado, existen parques industriales a lo largo de rutas de transporte público, tanto privado como industrial donde han proliferado numerosos establecimientos de servicios comerciales, de todos tamaños, todos ellos con población flotante potencialmente expuesta a riesgos, muchos de ellos de origen químico ⁽¹⁴⁾.

Los parques industriales permiten a las empresas contar con las condiciones mínimas favorables (calidad, infraestructura, seguridad, urbanización y servicios) para que puedan operar óptimamente. Existen diferentes clases de parques industriales:

- De primer nivel: siguen reglamentos de clase mundial y se manejan bajo esquemas de condominio (todos los residentes cooperan para el mantenimiento y servicios del mismo). Ocupan terrenos de entre 10,000 y 60,000 m².
- Privados: tienen su origen en firmas familiares o medianas empresas, en México 150 de ellos son agrupados por la Asociación Mexicana de Parques Industriales Privados. Ocupan terrenos de entre 2,000 y 8,000 m².
- Del gobierno: albergan a PYMES (aprox. 23). Suelen carecer de servicios por falta de presupuesto. Algunos gobiernos estatales los están incentivando y ya cuentan con infraestructura básica que los potencia.

Además de los parques industriales, las instalaciones de Petróleos Mexicanos como refinerías (6), complejos petroquímicos (8), complejos procesadores de gas (11), Terminales de distribución de gas licuado (18),

Terminales de almacenamiento y reparto (77), ductos y plataformas marinas (231); así como las instalaciones de Comisión Federal de Electricidad (178 centrales generadoras), incluyendo la nucleoeléctrica de Laguna Verde, representan un grado de riesgo para la población aledaña ⁽¹⁵⁾.

Afortunadamente los sistemas integrales de Seguridad y Protección Ambiental de estas compañías paraestatales han desarrollado programas que han disminuido en gran medida los posibles daños a terceros. Aun reconociendo que la prevención nunca conseguirá el cien por ciento de éxito, es necesario planificarla y diseñarla para tratar de reducir las pérdidas cuando se produzcan eventos como un incendio.

Las diversas estrategias para ello constituyen lo que se conoce como protección contra incendios. Es importante señalar que la protección contra incendios exige desarrollar un sistema integrado de protección equilibrada, con muy distintas características y sistemas que se refuercen entre sí y que den cobertura unos a otros para el caso de que falle cualquiera de ellos. Otros conceptos importantes a este respecto son el de defensa en profundidad y el de duplicación de los equipos. La esencia de la ingeniería de la protección contra incendios consiste en el proceso de lograr esa integración, equilibrio y duplicación para conseguir los objetivos de seguridad contra incendios, cumpliendo todas las normas y códigos en vigor.

Todo ello supone que el éxito en este campo no se mide por el uso de cualquier tecnología, sistema o código sino por el sistema de protección eficazmente diseñados e integrados. Ningún sistema se debe menospreciar, pero tampoco considerar ninguno de ellos como la panacea universal.

2 MARCO TEÓRICO DEL FUEGO

2.1 ASPECTOS GENERALES

Es importante diferenciar los conceptos de fuego e incendio; el primero es una rápida reacción química de oxidación entre un material combustible (agente reductor) y un agente oxidante (normalmente el oxígeno del aire), dicho proceso se le conoce como combustión, que se mantiene bajo condiciones controladas y puede o no ir acompañada de la presencia de llamas con una alta disipación de calor. El incendio en cambio, es la consecuencia inmediata de un fuego que se encuentra fuera de control con la liberación de grandes cantidades de energía, luz, humo, llamas y cenizas, propagándose con mucha facilidad hacia otros sitios.

Ningún incendio se comporta igual aún en circunstancias semejantes, pero los fundamentos que describen este fenómeno son los mismos. La protección contra incendio requiere de entender correctamente la su naturaleza y comportamiento, por lo cual se ha desarrollado la teoría del fuego para determinar su naturaleza y origen y la Dinámica del fuego, para entender su comportamiento y propagación una vez desarrollado.

Como el fuego es una reacción química, es importante entender no sólo que tan peligrosos son los materiales que se encuentran en el lugar de trabajo sino también los subproductos del proceso de combustión, que a menudo pueden ser más peligrosos que el material implicado en los incendios.

2.2 TEORÍA DEL FUEGO

Durante muchos años, se creía que con el triángulo del fuego se podía explicar este fenómeno, el cual indica que hay tres elementos esenciales para iniciarlo y mantenerlo: el oxígeno (agente oxidante), el calor o alguna otra fuente de energía y el combustible (agente reductor). Sin embargo, en los últimos años se ha agregado a la reacción química en cadena como un cuarto elemento, la que ocurre entre el combustible, el calor y el oxígeno, con lo cual se forma el llamado tetraedro del fuego. Este concepto es extremadamente importante para las personas que estudian la supresión, prevención e investigación de incendios. Si falta uno de los cuatro componentes, la combustión no se produce. Si la ignición ya se ha producido, el fuego se extingue cuando uno de los componentes se elimina de la reacción.



Fig. 8. Tetraedro del fuego

El aire es la fuente más común del oxígeno, pues en su composición el oxígeno tiene el 21% vol.; sin embargo, los oxidantes son una fuente de oxígeno que deben ser considerados; estas sustancias adquieren electrones del combustible durante la reacción química y liberan oxígeno durante la combustión. En su forma más simple, la fuente de energía o de ignición es aquella que calienta el material a su temperatura de ignición (temperatura mínima a la que debe ser calentada una sustancia en presencia de aire para que en ella se pueda iniciar y mantener una combustión independiente de la fuente de calor). Algunos ejemplos de fuentes de ignición de los incendios incluyen exceso de corriente eléctrica, equipos de calefacción, llamas, chispas y rayos.

2.3 COMBUSTIÓN

El fuego es definido como la oxidación rápida de un material durante el cual se emite luz y calor. Las reacciones involucradas son exotérmicas y la forma de explicarla es mediante la generación de radicales libres. Cuando se quema cualquier tipo de combustible derivado del calor generado, se generan las diferentes especies o fragmentos de radicales libres por la descomposición térmica, inclusive partículas de carbono puro (C). El color naranja-rojizo de las llamas, se debe en gran medida a la incandescencia de las partículas de carbono que se forman durante esta pirolisis a elevadas temperaturas. En el tiempo en el que esta descomposición térmica se lleva a cabo, los enlaces C-H, son rotos y sustituidos por enlaces de elementos afines a los radicales libres de H^* que se forman. Si se tienen especies moleculares afines como el oxígeno del aire, la concentración de radicales libres presentes en la flama aumenta.

Las siguientes reacciones pueden resumir el proceso de combustión.

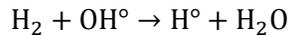
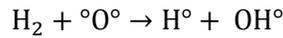
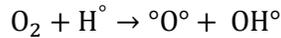
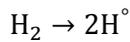
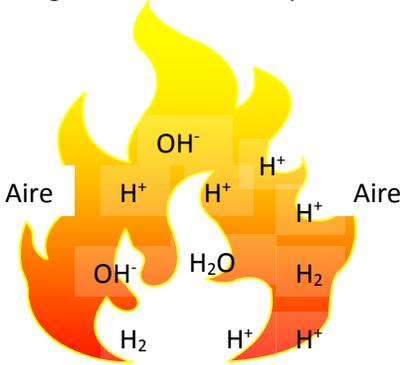


Fig. 9. Combustión

La primera reacción está estrechamente relacionada con la fase de ignición, seguida de la segunda reacción, ambas reacciones son endotérmicas (de acuerdo al tetraedro del fuego, se requiere una fuente de calor o ignición, que se justifica en estas dos reacciones). La tercera y cuarta reacciones disipan una gran cantidad de calor, al grado de que el efecto global de las cuatro reacciones es exotérmico.

El oxígeno tiene una alta afinidad por los radicales libres de hidrógeno, combinándose con estos y formando el radical OH^* , a este paso de la reacción en cadena se le llama hidroxilación y es de las reacciones importantes en una combustión, ya que la velocidad de generación de la flama depende directamente de la concentración de estos radicales en la misma flama. Las reacciones se llevan a cabo hasta que el oxígeno y el combustible se consumen (16).

Dependiendo del combustible, de la cantidad de oxígeno y de otros factores, puede haber una amplia variedad de productos producidos por la combustión. No solo se produce calor, flamas y humo, también una gran cantidad de gases, muchos de ellos tóxicos.

2.4 CARACTERÍSTICAS DE INFLAMABILIDAD

La combustión de una mezcla inflamable se produce si la mezcla combustible-comburente se encuentra dentro del intervalo de inflamabilidad y si además se dan las condiciones adecuadas para la ignición. Las mezclas de un combustible con un oxidante solo pueden reaccionar si se encuentran dentro de un intervalo concreto de composiciones. Los límites de este intervalo se conocen como Límite inferior de inflamabilidad (LFL) y límite superior de inflamabilidad (UFL), y se expresa como la concentración de combustible de una

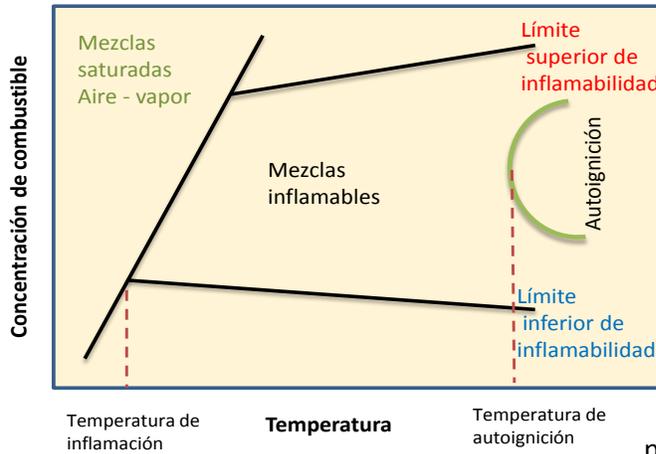


Fig. 10. Diagrama de inflamabilidad

determinada mezcla oxidante/diluyente y a una determinada presión y temperatura. Fuera de esos límites, la mezcla es demasiado pobre para que se pueda producir la combustión.

Los límites de inflamabilidad dependen de las concentraciones de oxígeno y de gases inertes en la mezcla.

A medida que disminuye la concentración de inertes y aumenta la concentración de oxígeno, aumenta el UFL, mientras que el inferior prácticamente no tiene variación.

Este último tampoco se altera por la presión (a excepción de presiones muy por abajo de la atmosférica). Por otro lado, a medida que aumenta la temperatura, el intervalo de concentraciones entre los dos límites se amplía.

Para poder representar los límites de mezclas combustible-oxidante-inerte se recurre a los diagramas de inflamabilidad; los cuales son útiles para conocer no solo si una determinada mezcla es inflamable o no, sino también para decidir cómo modificarla con el fin de hacerla o no inflamable.

Compuesto	LFL	UFL	Gravedad específica	Temperatura Autoignición °F	Densidad de vapor (aire=1)	Punto Flash °F	Punto de ebullición °F
Acetona	2.5	13	0.8	869	2	-4	133
Acetileno	2.5	100	-	581	0.9	(gas)	-118
Amoniaco	15	28	0.7	1204	0.6	(gas)	-28
Benceno	1.3	7.9	0.9	928	2.8	12	176
n-Butano	1.6	8.4	-	550	2	(gas)	31
Diesel	0.6	7.5	<1	428-600	5-6	Por espec.	175-340
Etano	3	12.5	-	882	1	(gas)	-128
Etanol	3.3	19	0.8	685	1.6	55	173
Etileno	2.7	36	-	842	1	(gas)	-155
n-Hexano	1.1	7.5	0.7	437	3	-7	156
Hidrogeno	4	75	-	932	0.1	(gas)	-422
Sulfuro de hidrógeno	4	44	-	500	1.2	(gas)	-76
Iso-Butano	1.8	8.4	-	860	2	(gas)	11
Metano	5	15	-	999	0.6	(gas)	-259
Metanol	6	36	0.8	867	1.1	52	147
MTBE(3)	2.5	15.1	0.74	435	3.1	-22	131
n-Pentano	1.5	7.8	0.6	500	2.5	<-40	97

Propano	2.1	9.5	-	842	1.6	(gas)	-44
Compuesto	LFL	UFL	Gravedad específica	Temperatura Autoignición °F	Densidad de vapor (aire=1)	Punto Flash °F	Punto de ebullición °F
Propileno	2	11.1	-	851	1.5	(gas)	-53
Tolueno	1.2	7.1	0.9	896	3.1	40	231

Tabla 2. Límite inferior (LFL) y superior (ULF) de inflamabilidad de algunos compuestos.

Temperatura de inflamación: Temperatura mínima a la que se produce suficiente vapor como para formar, cerca de la superficie del líquido, una mezcla con aire que se encuentre dentro de los límites de inflamabilidad. A esta temperatura la mezcla ardera, pero brevemente ya que no se genera suficiente vapor como para mantener la llama. En general, la temperatura de inflamación aumenta a medida que lo hace la presión.

Temperatura de autoignición: es aquella en la que una sustancia inflamable puede arder en aire sin necesidad de una fuente de ignición externa.

2.5 PRODUCTOS DE LA COMBUSTIÓN Y SUS PELIGROS

El fuego sin duda constituye una amenaza para la vida y la propiedad; el crecimiento en el uso de polímeros sintéticos (nylon, polietileno, policloruro de vinilo, etc.) ha aumentado esta amenaza debido a los humos tóxicos generados. Aunque la mayoría de las muertes y lesiones ocurridas en los incendios se atribuyen a la inhalación de los productos desprendidos, las investigaciones relacionadas con el desarrollo de materiales seguros contra incendio se enfocan más a evitar su ignición y la propagación de incendios.

Desde los 70's hasta principios de los 90's, la toxicidad del fuego fue reconocida como un problema grave, por lo cual se llevaron a cabo investigaciones que arrojaron resultados importantes para su estudio; se encontraron niveles mucho más altos de toxicidad en incendios reales que en las pruebas de laboratorio a pequeña escala, como consecuencia de las dificultades para simular un incendio real desalentaron la continuación de las investigaciones.

Como resultado de la exposición al humo tóxico y al calor, se tienen distintos grados de incapacidad que pueden conducir a la muerte o lesiones permanentes, estos efectos incluyen:

1. Problemas de visión como resultado de la opacidad óptica por el humo y de los dolorosos efectos de los productos irritantes del humo y el calor en los ojos.
2. Dolor de las vías respiratorias y dificultad para respirar o incluso lesiones del tracto respiratorio que resulta de la inhalación de gases irritantes y calientes. En casos extremos esto puede conducir al colapso dentro de unos pocos minutos de asfixia debido a un espasmo de laringe y/o broncoconstricción. La inflamación pulmonar también puede ocurrir, generalmente después de algunas horas, lo que también puede conducir a diversos grados de dificultad respiratoria.
3. Asfixia por la inhalación de gases tóxicos, lo que resulta en la confusión y pérdida de la conciencia.
4. Dolor de la piel expuesta, quemaduras e hipertermia, lo que puede conducir al colapso.

La siguiente tabla muestra los principales productos de combustión generados en un incendio.

Gases asfixiantes	Gases irritantes	Otros gases a considerar
Monóxido de carbono (CO)	Fluoruro de hidrógeno (HF)	Oxígeno (O ₂)
Cianuro de hidrógeno (HCN)	Cloruro de hidrógeno (HCl)	Dióxido de carbono (CO ₂)
	Bromuro de hidrógeno (HBr)	
	Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	
	Dióxido de azufre (SO ₂)	
	Órgano irritantes	

Tabla 3. Principales gases asfixiantes e irritantes.

2.5.1 Productos asfixiantes del fuego

Los dos principales gases asfixiantes en los incendios son el Monóxido de Carbono (CO) y el cianuro de hidrógeno (HCN). El CO está presente en todos los incendios, mientras que el HCN se encuentra en aquellos incendios en los que esté involucrado material que contenga nitrógeno, como acrílicos, espumas de poliuretano, melanina, nylon y lana, los cuales pueden estar involucrados en alguna medida en la mayoría de los incendios ocurridos en edificios.

Monóxido de carbono: se combina con la hemoglobina de la sangre para formar carboxihemoglobina (COHb), lo que trae como consecuencia una asfixia tóxica porque reduce la cantidad de oxígeno suministrado a los tejidos del cuerpo, particularmente al del cerebro.

La afinidad de la hemoglobina con el CO es muy alta (doscientas veces mayor que para el Oxígeno), de tal forma que se incrementa en forma de (COHb) a medida que el CO es inhalado; por lo tanto, la toxicidad de CO depende de la acumulación de dosis de (COHb), que se expresa en términos del porcentaje de hemoglobina total en forma de carboxihemoglobina, (COHb%). El CO es el principal producto asfixiante en los incendios y su inhalación es la principal causa de muerte.

La pérdida de conciencia puede producirse desde una concentración del 30% de COHb, a niveles más bajos, puede afectar a personas con problemas cardiacos. A concentraciones del 50-70 % de COHb, puede producirse la muerte.

Cianuro de hidrógeno (HCN). Puede ser especialmente peligroso en los incendios debido a su rápido "knockdown", en niveles bajos de 100-200 ppm⁷, puede causar rápidamente la pérdida del conocimiento y en consecuencia, la muerte como resultado de la de la acumulación de CO o algún otro factor. Un pequeño cambio en la concentración de HCN causa una gran disminución en el tiempo de incapacidad, por ejemplo, duplicando la concentración de 100 a 200 ppm puede traer la inhabilitación de actividad de aprox. 20 minutos aprox. 2 min.

Aparte de la hipoxia causada por el CO y el HCN, también se produce por estar expuestos a bajos niveles de oxígeno; se manifiesta en niveles de 9.6 a 11.8 % de oxígeno y los efectos son la degradación de los procesos mentales superiores y neuromusculares, pérdida de juicio crítico, el comportamiento emocional puede variar del letargo y la indiferencia a la excitación con euforia y alucinaciones, marcado aumento de la actividad cardiovascular y respiratoria. Esta es la región crítica durante las exposiciones en los incendios. Cuando la concentración es de 7.8-9.6 % de oxígeno, se presenta la hipoxia crítica con un rápido deterioro del juicio y

⁷ ppm: Se refiere a la cantidad de unidades de la sustancia que hay por cada millón de unidades del conjunto.

la comprensión, que lleva a pérdida del conocimiento seguido por el cese de la respiración y finalmente de la muerte.

2.5.2 Productos irritantes del fuego

Producen incapacidad durante y después de la exposición de dos maneras distintas. Durante la exposición la forma más importante de incapacitación es la irritación sensorial, lo que provoca efectos dolorosos para los ojos y la parte superior de las vías respiratorias, y en cierta medida, también los pulmones. El segundo efecto de los irritantes es una aguda reacción de irritación pulmonar, que consiste en edema e inflamación que puede causar enfermedades y dificultades respiratorias y puede conducir a la muerte en un lapso de 6-24 horas después de la exposición. En los incendios, pueden producirse más de 20 compuestos irritantes, los más importantes son: gases ácidos (fluoruro de hidrógeno, cloruro de hidrógeno, bromuro de hidrógeno, óxidos de nitrógeno, ácido fosfórico, dióxido de azufre) e irritantes orgánicos (acroleína, formaldehído y crotonaldehído). Los compuestos producidos dependerán de los materiales que entren en combustión⁽¹⁷⁾.

2.5.3 Calor

Existen tres formas en que la exposición al calor puede poner en peligro la vida: hipertermia, quemaduras de la superficie del cuerpo y quemaduras de las vías respiratorias. Cuando la suma del calor y energía radiante sobrepasan los límites de seguridad, estos elementos definen el tiempo que las personas tienen para sobrevivir y alejarse del peligro. Las quemaduras en el tracto respiratorio pueden ocurrir en la inhalación de aire por encima de 60 °C, cuando se satura con vapor de agua. El límite de para la exposición de la piel al calor radiante es aproximadamente 2.5kW/m². Por debajo de este nivel, la exposición se puede tolerar durante 30 minutos o más sin consecuencias significativas.

2.6 TRANSFERENCIA DE CALOR

La comprensión de la transferencia del calor es clave para estudiar el comportamiento de los incendios. Las formas de transferirlo son: conducción, convección y radiación.

Conducción: el calor se transfiere por el movimiento de las moléculas que vibran y colisionan con otras moléculas, transfiriendo su energía cinética al material; los factores que más influyen son la composición de los materiales, distancia, temperatura y el área transversal del cuerpo a transferir el calor. En términos del área transversal, cuanto mayor sea, mayor es la transferencia de calor. A medida que la distancia aumenta, disminuye la tasa de transferencia de calor.

Lo anterior se puede observar en la ley de Fourier para transferencia de calor en estado estacionario, $q=kA\Delta T/d$, donde $\Delta T/d$ representa el gradiente de temperatura, k (W/m K) representa la conductividad térmica y se cuantifica mediante el coeficiente de conductividad térmica; en metales, generalmente desciende a medida que aumenta la temperatura; efecto contrario al que se observa en los gases.

Los valores altos de k , corresponden a los buenos conductores de calor y valores pequeños a los materiales aislantes. La propiedad aislante se expresa comúnmente en términos de resistencia térmica R . Los mejores aislantes comerciales tienen partículas finas o fibras de sustancias sólidas con un espacio entre ellos llenos de aire, tales como fibra de vidrio.

Convección: la transferencia de calor por convección es crítica para la propagación del incendio; se produce cuando el fuego calienta el aire y gases, y a su vez, el aire y los gases son lo suficientemente calientes como para encender otros materiales. Esta convección natural ocurre porque al calentarse los fluidos, estos se

expanden, lo que resulta en una menor densidad del fluido; el cual al ser menos denso se desplazará hacia arriba u horizontalmente hacia una región fría, mientras que las masas menos calientes, pero más densas, del fluido descenderán o se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente. La tasa de transferencia de calor es influenciada por las propiedades de los fluidos como densidad, viscosidad y conductividad térmica; además de los parámetros de flujo.

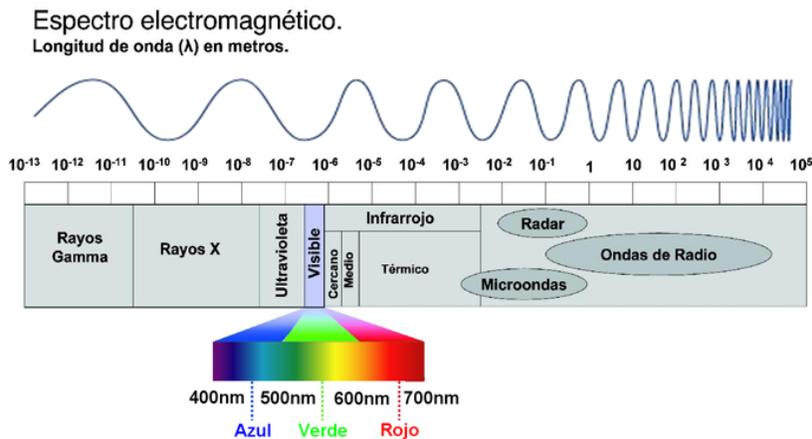


Fig. 11. Espectro electromagnético.

calientes, pero más densas, del fluido descenderán o se moverán en un sentido opuesto al del movimiento de la masa más caliente. La tasa de transferencia de calor es influenciada por las propiedades de los fluidos como densidad, viscosidad y conductividad térmica; además de los parámetros de flujo. Afortunadamente, sólo un valor aborda muchos de estos factores, el coeficiente de transferencia de calor por convección (h). Esta es una constante para un determinado material con el unidades que se vatios por metro cuadrado por grado C. La tasa de convección flujo de calor se puede calcular mediante la fórmula $q=hA\Delta T$.

Radiación: La transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas es la base de la radiación. La radiación es similar a la luz visible (pero con una longitud de onda mayor) y no necesita un medio de propagación (puede ser el vacío). Las ondas electromagnéticas asociadas con los incendios generalmente son las infrarrojas y una pequeña porción de la región visible del espectro electromagnético.

En general, la habilidad de un cuerpo para emitir radiación es proporcional a su habilidad para absorberlo. Esta habilidad se mide mediante la Emisividad (e), misma que no tiene unidades y los valores oscilan entre 0 y 1; la e del cuerpo negro es de 1 y es la máxima cantidad de radiación que un cuerpo puede emitir. ⁽¹⁸⁾

El riesgo para las personas provocado por exposiciones al calor radiante se manifiesta en forma de quemaduras en la piel, en sus diferentes grados incluyendo fatalidades. La quemadura de la piel es el resultado de la coagulación de la proteína llamada colágeno, el grado de muerte de la piel y la coagulación del colágeno depende de la cantidad de energía absorbida luego de que la epidermis (la piel de afuera) alcanza los 44 °C. La tabla muestra los efectos para los diferentes grados.

A manera de comparación, el límite de flujo de radiación de calor aceptable para exposición pública es de 5 kW/m², el promedio anual de flujo de calor del sol que afecta la tierra por encima de la atmosfera es de 1.37 kW/m², mientras que la fatalidad humana ocurre a los 37.5 kW/m². ⁽¹⁹⁾

Intensidad de Radiación (kW/m²)	Efecto Observado
1.39	La piel humana puede estar expuesta por un período largo de tiempo sin producirse efectos adversos serios.
5	Quemaduras de segundo grado (aprox. 55 °C) en la piel después de una exposición de 30 s.
9.5	Umbral de dolor alcanzable en 6 segundos; quemaduras de segundo grado después de 20 s.
11	Quemaduras de segundo grado en la piel después de una exposición de 10 s.
12	Fusión de plásticos.
13.5	Energía mínima requerida para dañar materiales de bajo punto de fusión (aluminio, soldadura, etc.) Este valor es el criterio usado para separar tanques de techo cónico.
18	Degradación del aislamiento de cables eléctricos.
22.1	Límite de exposición segura de los recipientes horizontales para almacenamiento de GLP, que no cuenten con protección térmica.
31.5	Las estructuras hechas de madera arderán espontáneamente después de una exposición de 15 a 20 minutos.
37.5	Daño a los equipos de proceso.

Tabla 4. Efectos de la radiación.

2.7 CLASIFICACIÓN DE INCENDIOS

El fuego es dividido en cinco clases, basado principalmente en el tipo de combustible que es consumido. Este sistema de clasificación determina de forma efectiva el tipo de agente extinguidor que debe utilizarse.

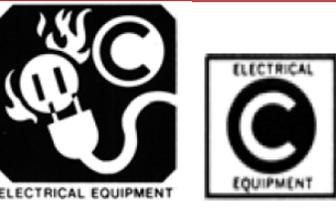
Tipo de fuego	
<p>A</p> 	<p>Involucran combustibles ordinarios y son relativamente lentos en su desarrollo debido a la naturaleza del combustible.</p>
<p>B</p> 	<p>Involucra a los líquidos y gases combustibles, como es el petróleo y sus derivados, alcoholes, propano, butano, grasas, etcétera: Son fuegos superficiales si se comparan con los incendios de la clase A; el fuego de clase B ocurre en tanques abiertos, derrames o fugas de sustancias combustibles.</p>
<p>C</p> 	<p>Se origina a partir de la corriente eléctrica y no se produce por combustión sino por ignición (cortocircuitos originados por chispazos de energía). Se produce en equipo y maquinaria que funciona por medio de electricidad como motores, alternadores, generadores, sub-estaciones, maquinaria de soldar, etc., para extinguirlos es necesario utilizar agentes extintores que no conduzcan la electricidad como son: polvo químico seco y bióxido de carbono.</p>
<p>D</p> 	<p>Tipo de fuego en el cual metales como son: magnesio, titanio, sodio, litio, potasio, aluminio, o zinc en polvo, entre otros, que al estar en contacto con el agua o aire arden. No se recomienda usar extintores comunes pues existe el peligro de aumentar el fuego por reacciones químicas entre el agente extintor y el metal ardiente, se emplea para su extinción de polvos especiales como el grafito.</p>
<p>K</p> 	<p>Son producidos por aceites y grasas animales o vegetales dentro de cocinas. El crecimiento de esta actividad, los equipos de cocina desarrollados últimamente más el uso de aceites vegetales no saturados, requieren de un agente extintor y su aplicación específica no solo por la extinción y sus características de agente limpio sino que deben lograr el efecto de enfriamiento.</p>

Tabla 5. Tipos de fuego. Los símbolos mostrados a la izquierda son los utilizados actualmente, mientras que los de la izquierda fueron los utilizados hasta 1996. (20)

2.8 DINÁMICA DEL FUEGO

El rápido progreso en la comprensión de los incendios y su interacción con los edificios, ha dado como resultado el desarrollo de una amplia variedad de modelos que se utilizan para simular incendios en recintos cerrados. Estos modelos pueden ser clasificados como probabilísticos o deterministas. Los Modelos probabilísticos no hacen uso directo de los principios físicos y químicos que intervienen en los incendios, sino que hacen predicciones estadísticas sobre la transición de una etapa de crecimiento del fuego a otra. Los modelos deterministas pueden dividirse en tres categorías: modelos CFD (dinámica computacional de fluidos) o modelos de campo, modelos de la zona y otros modelos.

Modelos de Campo

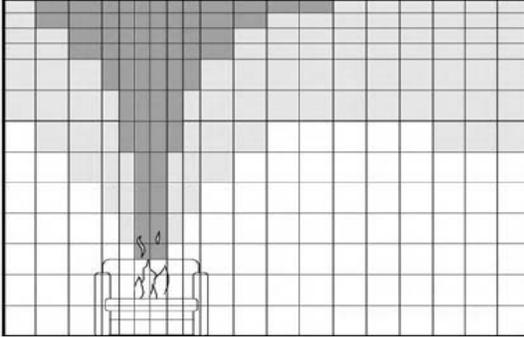


Fig. 12. Modelos de campo

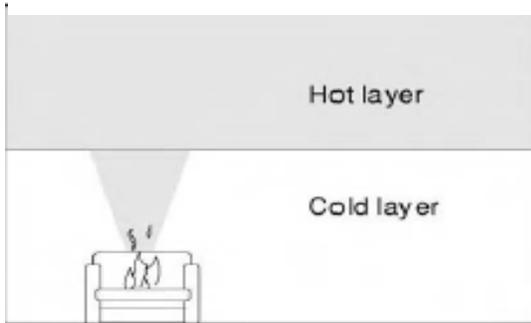


Fig. 13. Modelo de las dos zonas

Los Modelos de Campo son modelos de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluids Dynamics, CFD*); en ellos, se divide el recinto en un gran número de volúmenes elementales de control. Estos modelos resuelven ecuaciones diferenciales de Navier-Stokes⁸ dependientes del tiempo para cada volumen de control, de forma que el análisis es mucho más detallado y complejo.

En este tipo de modelos las asunciones de los escenarios de incendio a considerar pueden ser mucho menores, y además se pueden simular geometrías mucho más complejas. Un modelo utilizado comercialmente para simular incendios en recintos cerrados es el FDS; el cual calcula la densidad, velocidad, temperatura, presión y concentración de especies en cada celda mediante las ecuaciones de conservación de la masa, del momento y de la energía. Además utiliza las propiedades de los materiales de los muebles, paredes, suelo, techo, etc. para simular el desarrollo del incendio.

Modelos de zonas

Los Modelos de Zona son modelos computacionales que dividen el dominio en varios volúmenes de control. El más común es el de dos zonas que representa el desarrollo del

incendio diferenciando una capa fría inferior y otra caliente donde están los humos y gases de la combustión. Dos modelos comerciales de zona son el OZONE y el CFAST.⁽²¹⁾

2.9 DESARROLLO DE INCENDIOS EN RECINTOS CERRADOS

El desarrollo de los incendios en un recinto cerrado (habitación o espacio cerrado en un edificio) es más complejo que en los espacios abiertos. Cuando la cantidad de combustible disponible para quemar es limitada, se dice que el incendio está controlado a nivel de combustible. Cuando el oxígeno es limitado, se dice que la situación está controlada a nivel de ventilación.

Por los estudios realizados en la dinámica de incendios, los incendios en recintos cerrados se desarrollan en las siguientes etapas: Ignición, Crecimiento, Flashover o explosión espontánea tipo flamazo, desarrollo completo y disminución. A continuación se describen las características de cada uno de las etapas.

⁸ Se puede decir que la teoría matemática de la dinámica de los fluidos comienza en el siglo XVII con el trabajo de Isaac Newton, quien fue el primero en aplicar sus leyes de la mecánica a los movimientos de los flujos. Más tarde en 1755 Leonard Euler escribió por primera vez las ecuaciones diferenciales que rigen el movimiento de un fluido ideal, es decir, en ausencia de disipación debido a la interacción entre moléculas, y finalmente en 1822 C. Navier (1822) e independientemente, G. Stokes (1845) introdujeron en el modelo el término de viscosidad y llegaron a las ecuaciones que hoy denominamos de "Navier-Stokes".

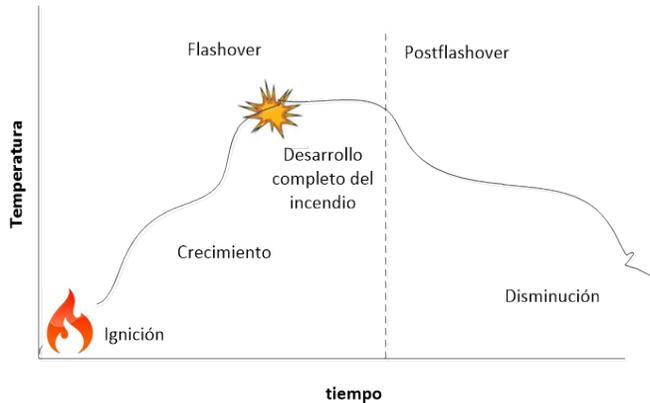


Fig. 14. Fases de los incendios en compartimentos

2.9.1 Ignición

La ignición describe el periodo en que los cuatro elementos del tetraedro del fuego coinciden y se inicia la combustión. El acto físico de la ignición puede ser guiado; es decir, causado por una chispa o llama o no guiado, causado cuando un material llega a la temperatura de ignición como resultado de la autoinflamación, como la ignición espontánea. En este punto, el incendio es pequeño y se circunscribe generalmente al material que se enciende primero (combustible). Todos los incendios, en un lugar abierto o bien en un compartimiento, son el resultado de algún tipo de ignición.

2.9.2 Crecimiento

Poco después de la ignición, se empieza a formar el penacho del incendio sobre el combustible que arde. Mientras el penacho se desarrolla, empieza a atraer o arrastrar aire desde el espacio circundante a la columna. El crecimiento inicial se parece al de un incendio exterior no limitado, con el crecimiento como función del combustible que se enciende primero. Sin embargo, a diferencia del incendio no limitado, en un compartimiento el penacho se ve afectado rápidamente por el techo y las paredes del espacio. La primera consecuencia es la cantidad de aire que atrae el penacho. Debido a que el aire es más frío que los gases calientes que genera el incendio, éste tiene un efecto de enfriamiento sobre las temperaturas del penacho. La ubicación del paquete de combustible en relación a las paredes del compartimiento determina la cantidad de aire que atrae y, por lo tanto, el enfriamiento que se produce. Los paquetes de combustible a proximidad de las paredes atraen menos aire, por lo que las temperaturas del penacho son superiores. Los paquetes de combustible situados en las esquinas atraen incluso menos aire, por lo que las temperaturas del penacho son las más altas. Este factor afecta significativamente a las temperaturas de la capa de gas caliente que se desarrolla encima del incendio. A medida que los gases calientes se elevan, éstos empiezan a propagarse al exterior cuando tocan el techo. Los gases continúan diseminándose hasta llegar a las paredes del compartimiento. Entonces, la profundidad de la capa de gas empieza a incrementarse. Las temperaturas del compartimiento durante este periodo dependen de la cantidad de calor que se transmite al techo y las paredes, ya que los gases fluyen sobre ellos y sobre la ubicación del paquete de combustible inicial y el arrastre de aire resultante. La investigación muestra que las temperaturas del gas disminuyen a medida que la distancia de la línea central del penacho aumenta. La fig. 15 A muestra el penacho de un incendio de compartimiento típico y los factores que afectan a la temperatura de la capa de gas caliente en propagación.

La fase de crecimiento continuará si hay suficiente combustible y oxígeno disponibles. Los incendios de compartimiento en la fase de crecimiento generalmente tienen el combustible controlado. A medida que el incendio crece, la temperatura general del compartimiento aumenta al igual que la temperatura de la capa de gas al nivel del techo (fig. 15 B).

2.9.3 Flashover

Es la etapa de transición entre el crecimiento y el desarrollo completo de las fases del incendio, pero no es un suceso específico como lo sería la ignición. Durante el flashover, las condiciones en el recinto cerrado cambian muy rápidamente a medida que el incendio pasa de quemar los materiales que se encienden primero a quemar todas las superficies de combustible expuestas en el recinto cerrado. La capa de gas

caliente que se crea en el techo durante la fase de crecimiento causa un calor radiante en los materiales de combustible situados lejos del origen del incendio (fig. 15 C). Por regla general, la energía radiante (el flujo de calor) de la capa de gas caliente sobrepasa los 20 kW/m² cuando se produce el flashover. Este calor radiante produce la pirolisis en los materiales combustibles del recinto cerrado. Los gases que se generan durante este periodo se calientan hasta la temperatura de ignición por la energía radiante de la capa de gas en el techo (fig. 15 D).

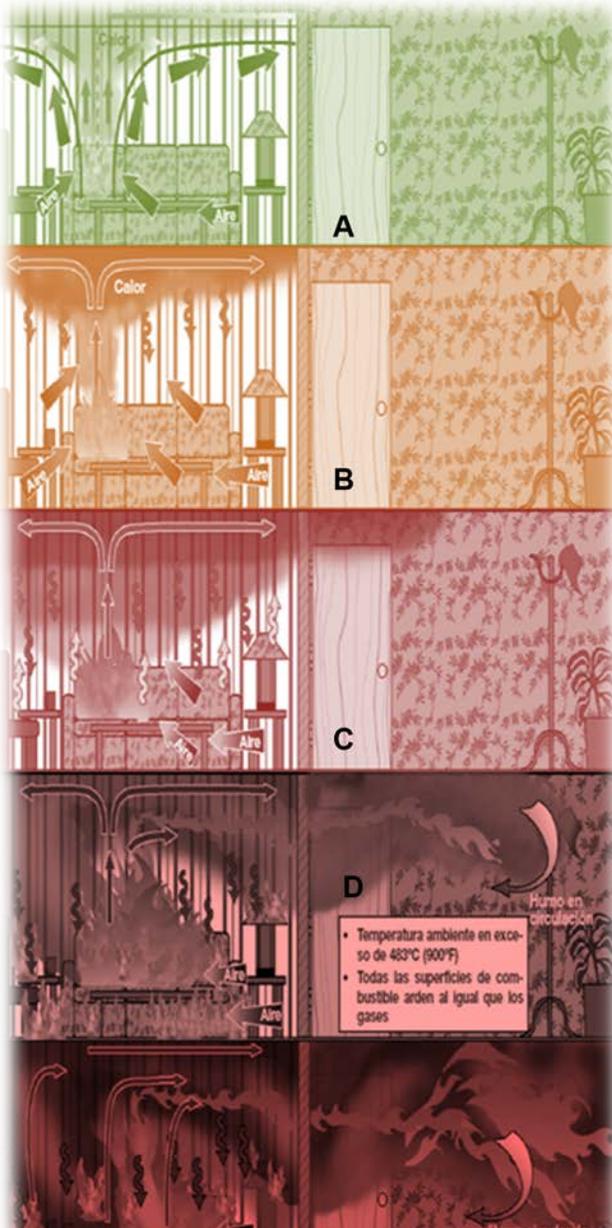


Fig. 15. El desarrollo de un incendio en espacios cerrados:

- A. Desarrollo de la flama
- B. Desarrollo de la capa del techo
- C. Pre-Flashover
- D. Flashover
- E. Post Flashover

Aunque los científicos definen el flashover de diversas maneras, la mayoría basan su definición en la temperatura de un recinto cerrado resultante de la ignición simultánea de todo el contenido combustible en el espacio. Aunque esta incidencia no lleva asociada ninguna temperatura exacta, en la mayoría de las ocasiones se utiliza un intervalo aproximado de 483°C a 649°C (900°F a 1,200°F); el cual está en correlación con la temperatura de auto ignición del monóxido de carbono (CO) (609°C o 1,128°F).

Justo antes del flashover, suceden muchas cosas en el recinto cerrado que se incendia: la temperatura aumentan rápidamente, los paquetes de combustible adicionales empiezan a verse involucrados y desprenden gases combustibles como resultado de la pirolisis. A medida que el flashover ocurre, los materiales combustibles en el recinto cerrado y los gases desprendidos de la pirolisis se encienden. El resultado es que toda la habitación se ve afectada. La liberación de calor de una habitación con un flashover completamente desarrollado puede ser del orden de 10,000 kW o más.

2.9.4 Desarrollo

La fase de desarrollo completo de un incendio tiene lugar cuando todos los materiales combustibles de un recinto cerrado se ven afectados por el fuego. Durante este periodo de tiempo, los combustibles que arden en el recinto cerrado liberan la máxima cantidad de calor posible de los paquetes de combustible y producen grandes volúmenes de gases del fuego. El calor liberado y el volumen de los gases del fuego que se producen dependen del número y del tamaño de las aberturas de ventilación del compartimiento. El incendio se convierte con frecuencia en un incendio controlado a nivel de

ventilación, por lo que se producen grandes volúmenes de gases no quemados. Durante esta fase, los gases del fuego calientes no quemados pueden empezar a fluir fuera del recinto cerrado de origen hacia los espacios o recinto cerrados adyacentes. Estos gases se prenden cuando penetran en un espacio donde el aire es más abundante (fig. 15 E).

2.9.5 Disminución

A medida que el incendio consume el combustible disponible en el recinto cerrado, la tasa de liberación de calor empieza a disminuir. Una vez más, el incendio se convierte en un incendio controlado a nivel de combustible, la cantidad de fuego disminuye y las temperaturas del recinto cerrado empiezan a reducirse. Sin embargo, la masa restante puede mantener temperaturas moderadamente altas en el recinto cerrado durante algún tiempo. (22)

2.9.6 Flameover/Rollover

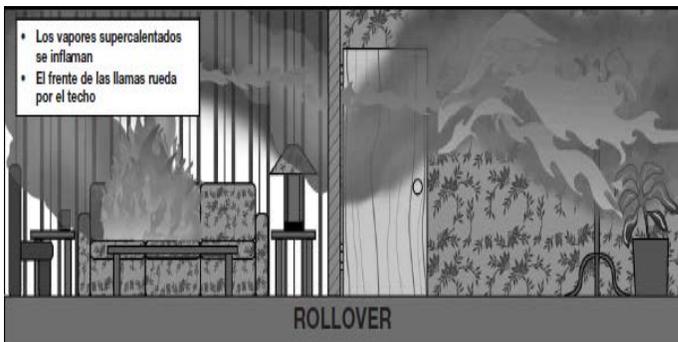


Fig. 16. Rollover

Durante el crecimiento y desarrollo de un incendio, existen varias condiciones o situaciones que merecen ser comentadas. Los términos *flameover* y *rollover* describen una situación en la que las llamas se mueven a través o a lo largo de los gases no quemados durante la progresión de un incendio. El *flameover* se distingue del *flashover* (explosión espontánea tipo flamazo) porque sólo implica a los gases del fuego y no a las superficies de los otros paquetes de combustible del

compartimiento. Esta situación puede producirse durante la fase de crecimiento mientras la capa de gas caliente se forma en el techo del compartimiento. Se pueden observar llamas en la capa cuando los gases combustibles alcanzan la temperatura de ignición. A medida que las llamas se suman al total de calor generado en el compartimiento, esta situación deja de ser un *flashover*. El *flameover* también se puede observar cuando los gases del fuego sin quemar salen de un compartimiento durante las fases de crecimiento y desarrollo completo en el transcurso de un incendio. A medida que estos gases calientes pasan del compartimiento que arde al espacio adyacente, se mezclan con el oxígeno. Si se encuentran en la temperatura de ignición, las llamas a menudo se hacen visibles en la capa.

2.9.7 Capas térmicas de los gases

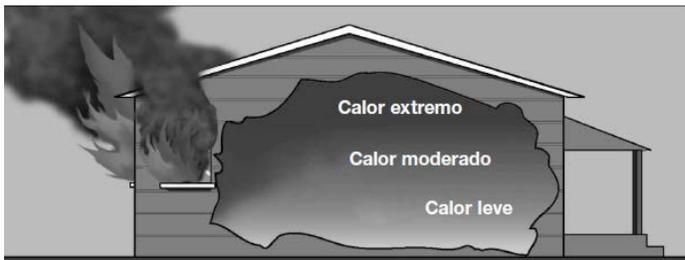


Fig. 17. Capas térmicas de los gases

Las capas térmicas de los gases se refieren a la tendencia que tienen los gases de formar capas según la temperatura. Los gases más calientes suelen estar en la capa superior, mientras que los gases más fríos se forman en las capas inferiores (fig. 17). El humo, una mezcla calentada de aire, gases y partículas, se eleva, si se abre un agujero en el techo, el humo saldrá del edificio o de la habitación al exterior. Las capas térmicas son vitales para las actividades de protección contra incendios. Cuanto más se

permita que el aire y los gases más calientes salgan, más seguros serán los niveles inferiores para los bomberos.

Estas capas normales de los gases más calientes situadas arriba y fuera en la abertura de ventilación pueden suprimirse si se aplica agua directamente sobre las capas. Esta mezcla en forma de remolino de humo y vapor destruye las capas térmicas normales y los gases calientes se mezclan por todo el compartimiento. Este proceso se denomina a veces destrucción del equilibrio térmico o formación de un desequilibrio térmico. Después de una destrucción de las capas normales, se deben utilizar procedimientos de ventilación forzada (como el uso de ventiladores) para airear el área. El procedimiento adecuado frente a estas condiciones es ventilar el compartimiento, permitir que los gases calientes escapen y dirigir el chorro de agua hacia la base del fuego, manteniéndolo alejado de las capas de gases calientes superiores.

2.9.8 Explosión de humo

Los bomberos que trabajan en incendios de edificios deben tener precaución cuando abren un edificio para entrar en él o proporcionar ventilación horizontal (abrir puertas o ventanas). A medida que el incendio crece en un compartimiento, grandes volúmenes de calor y gases del fuego sin quemar pueden acumularse en los espacios no ventilados. Estos gases pueden encontrarse a temperatura de ignición o superior, pero carecen del suficiente oxígeno para encenderse realmente.

Cualquier acción durante las operaciones de protección contra incendios que permita que el aire se mezcle con estos gases calientes puede provocar una ignición explosiva o explosión de humo (backdraft) (fig. 18). Muchos bomberos han resultado muertos o heridos a causa de una explosión de humo. La probabilidad de que ocurra una explosión de humo se puede reducir con una ventilación vertical apropiada (abriendo el punto más alto) para que los gases sin quemar se eleven. Al abrir el punto más alto posible de un edificio o espacio se permite que los gases escapen antes de entrar.



Fig. 18. Explosión de humo

la temperatura (enfriamiento), eliminando el combustible o el oxígeno disponibles o deteniendo la reacción química en cadena.

Enfriamiento: Uno de los métodos más comunes de extinción es el enfriamiento mediante agua. Este proceso depende de la reducción de la temperatura de un combustible hasta un punto en el que no produzca

Las siguientes características pueden indicar una condición para que ocurra una explosión de humo:

- Humo bajo presión saliendo de aberturas pequeñas.
- Humo negro convirtiéndose de un color grisáceo amarillento y denso.
- Aislamiento del incendio y calor excesivo.
- Llamas pequeñas o invisibles.
- Humo que sale del edificio en bocanadas o en intervalos (similar a la respiración).
- Ventanas manchadas por el humo.

2.10 EXTINCIÓN DEL FUEGO

El incendio se extingue limitando o interrumpiendo uno o más elementos esenciales en el proceso de combustión (tetraedro del fuego). Un incendio se extingue reduciendo

suficiente vapor para arder. Los combustibles sólidos y líquidos con puntos de ignición elevados pueden extinguirse mediante el enfriamiento. Sin embargo, el enfriamiento con agua no puede reducir suficientemente la producción de vapor para extinguir incendios en los que intervengan líquidos con puntos de ignición bajos y gases inflamables. Para extinguir un incendio mediante la reducción de temperatura, se debe aplicar suficiente agua al combustible que arde para absorber el calor generado por la combustión.

Eliminación del combustible: La eliminación de la fuente del combustible extingue de modo efectivo algunos incendios. La fuente del combustible puede suprimirse deteniendo el flujo del combustible líquido o gaseoso, o suprimiendo el combustible sólido en el camino del incendio. Otro método para suprimir el combustible es dejar que un incendio arda hasta que todo el combustible se consuma.

Dilución de oxígeno: La dilución del oxígeno disponible en el proceso de combustión disminuye la propagación del incendio y puede extinguirlo totalmente con el tiempo. En su forma más sencilla, este método se utiliza para extinguir los incendios en los fogones de las cocinas cuando se coloca una tapa en una sartén con comida ardiendo. El contenido de oxígeno se puede reducir inundando un área con un gas inerte, como el dióxido de carbono, que desplaza el oxígeno e interrumpe el proceso de combustión. El oxígeno también puede separarse del combustible expandiendo una capa de espuma sobre el combustible. Por supuesto, ninguno de estos métodos funciona en los combustibles raros que se auto oxidan.

Inhibición de la reacción química en cadena: Los agentes extintores tales como algunos agentes químicos secos y halogenados (halones) interrumpen la reacción de combustión y detienen las llamas. Este método de extinción es efectivo para los combustibles gaseosos y líquidos, porque deben tener llama para arder. Los incendios incandescentes no se extinguen fácilmente con estos agentes. Las concentraciones de agentes muy elevadas y los largos periodos de tiempo de extinción necesarios para extinguir los incendios incandescentes hacen que en estos casos no se puedan utilizar estos agentes.

2.11 INCENDIOS EN EDIFICACIONES

Ya se mencionó en la sección anterior cómo se desarrollan los incendios en recintos cerrados, por ello este punto se describirá brevemente el papel que juega el buen diseño de los edificios y cuáles son los factores más importantes a ser tomados en cuenta.

Los edificios se construyen para realizar una función, cada edificio es único y tiene necesidades asociadas, usos, recursos y limitaciones. El hombre pasa gran parte de su vida en ellos, trabajando, estudiando, recibiendo atención médica y realizando actividades que le permiten la convivencia en la vida diaria. ⁽²³⁾

El código NFPA 101 “Código de Seguridad Humana” tiene como propósito proporcionar requisitos mínimos para la diseño, operación y mantenimiento de edificios y estructuras para la seguridad de la vida ante los incendios. Los requisitos de la NFPA 101 no están destinados a la protección de la propiedad, sino que están diseñados para la seguridad de los ocupantes de los edificios. ⁽²⁴⁾

Para lograr el diseño adecuado de los edificios, se debe comenzar con la clasificación del edificio o la estructura. La clasificación de un edificio es una combinación de peligro de su contenido y la ocupación de los mismos. El peligro del contenido puede ser bajo, normal o alto en función de la cantidad y tipo de combustible disponible para arder.

Los edificios se clasifican por su ocupación en: educativos, de asistencia médica, de detención, residenciales, mercantiles, negocios, industriales, de almacenamiento y mixtos (dentro de un mismo edificio puede haber varios tipos de ocupación, en función de las diferentes actividades llevadas a cabo en ella). La mayoría de los edificios de la industria química, petroquímica, e instalaciones de procesamiento de hidrocarburos son de clasificación industrial; misma que se clasifican en la NFPA 101 de la siguiente manera:

- a) **Ocupación industrial general:** riesgos comunes y de bajo peligro en los edificios de diseño convencional adecuado para varios tipos de procesos.
- b) **Propósito especial de ocupación industrial:** Riesgos comunes y bajos en edificios diseñados para (y sólo para) determinados tipos de operaciones que impliquen una baja densidad de población de empleados con gran parte de la zona ocupada por recipientes, equipos, tuberías o maquinaria.
- c) **Alto riesgo de ocupación industrial:** Materiales o procesos de alto riesgo. Una ocupación de alto riesgo implica importantes peligros de incendio o explosión por líquidos inflamables o gases, gases licuados inflamables o polvos combustibles.
- d) **Estructuras abiertas:** las estructuras de soporte de equipos o las operaciones que no se encuentran delimitadas por las paredes de un edificio, tales como las que se encuentran en las refinerías, procesamiento químico o plantas de generación de energía.

Diseñar, construir y mantener un edificio "seguro" permite asegurar niveles razonables de seguridad contra incendios para los ocupantes el edificio mismo. Las características fundamentales que proporcionan una base para la seguridad de la vida en todos los edificios son:

- Elementos de la estructura (pisos, muros, vigas, columnas, etc).
- Revestimientos internos.
- compartición (divisiones del edificio).

Todos los materiales pueden ser dañados por el fuego (incluso si no se queman) derivado de las elevadas temperaturas que se generan; pues las propiedades mecánicas de resistencia y rigidez disminuyen en medida que aumenta la temperatura. Para estudiar estos efectos, los materiales se evalúan exponiéndolos al fuego, generando una curva de conocida como curva estándar tiempo-temperatura⁹. Utilizar los materiales adecuados resulta importante para dar tiempo a los ocupantes a desalojar el lugar y estar fuera de peligro.

(25)

En México, los incendios urbanos representan el 93.4% del total de incendios ocurridos en el país, de los cuales el 85.6% ocurren principalmente en casas habitación, los comerciales implican un 4% y los industriales alrededor de un 3%. De los incendios registrados en casa habitación, la mayor parte de ellos se deben a fallas eléctricas en las instalaciones (inadecuadas o en mal estado) o en los equipos eléctricos. Cabe señalar que de cada 10 incendios, 4 son ocasionados por aparatos eléctricos pirata. (26)

2.12 PROTECCIÓN CONTRA INCENDIOS EN EDIFICIOS

La lucha contra el incendio, tanto en sus facetas de prevención como de protección, se llevan a cabo desde dos formas de protección: protección activa y protección pasiva.

⁹ A los materiales de construcción se les proporcionan una calificación sobre su capacidad para resistir los efectos del fuego, sin presentar fallas en el tiempo. La Normatividad asociada a este tema es ASTM E 119-12 "Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials" y la NFPA 251 "Standard Methods of Tests of Fire Resistance of Building Construction and Materials".

a) **Protección Activa:** Un dispositivo o acción que debe recibir un estímulo para actuar en una condición real de incendio; estas incluyen:

- Sistemas de detección y alarma: Detectores de fuego y humo, alarmas visibles, audibles u audiovisibles.
- Sistemas de supresión:
 - Rociadores automáticos
 - Sistemas de espuma
 - Agentes limpios
 - Sistemas de bióxido de carbono
 - Polvos químicos secos
 - Extintores portátiles.

b) **Protección pasiva o estructural :** Son componentes que se mantiene fijos en el edificio si existe o no una emergencia de incendio, está incluye:

- Aislamiento de los elementos estructurales para evitar fallas en los materiales de construcción.
- Barreras para evitar la extensión de la llama, calor o humo, de un espacio a otro.
- El sistema de salidas de emergencia.
- Vías de ataque de fuego.
- Espaciamiento
- Ventilación.
- Clasificación de áreas eléctricas.

2.13 EVACUACIÓN DE LOS OCUPANTES

La evacuación de las personas que se encuentran en un edificio en llamas depende de sus reacciones durante la huida, pues deben tomar diferentes decisiones según la situación. Dichas reacciones varían mucho dependiendo de las capacidades físicas y mentales de cada individuo.

El propio edificio influye en las decisiones tomadas por los ocupantes en su huida, a través de la señalización y de los sistemas de seguridad instalados. La propagación del incendio y del humo es el factor que más repercute en la toma de decisiones de los ocupantes. El humo limita la visibilidad en el edificio y crea un ambiente irrespirable. La radiación del fuego y las llamas afectan a grandes espacios, que dejan de ser utilizables para la evacuación, lo que aumenta el riesgo. Para diseñar las vías de escape de un edificio es necesario conocer primero la reacción de los ocupantes y sus patrones de movimiento en caso de incendio.

Las tres fases de una evacuación son: aviso, reacción y evacuación. La fase de aviso depende de si existe un sistema de alarma en el edificio, de si los ocupantes pueden comprender o no la situación o de la forma de compartimentación del edificio. La fase de reacción se relaciona con la capacidad de los ocupantes para tomar decisiones, de las características del incendio (como cantidad de calor y de humo) y del sistema de vías de escape del edificio. Por último, en la fase de evacuación influyen los puntos donde se pueden formar aglomeraciones y del comportamiento de los ocupantes en las distintas situaciones.

Una salida segura de un edificio exige unas vías de escape seguras entre el lugar del incendio y el exterior. Por lo tanto, deben existir suficientes vías de escape, estar debidamente proyectadas y tener la capacidad adecuada. Debería haber, como mínimo, una vía de escape alternativa, dado que, por ejemplo, el incendio, el humo y las características de los ocupantes pueden llegar a impedir el uso de las vías de escape. Estas

últimas han de estar protegidas del fuego, el calor y el humo durante el tiempo que dure la salida. Así, en los códigos de construcción debe considerarse la protección pasiva para la evacuación y, lógicamente, para la protección contra incendios.

La evacuación será efectiva si el incendio se detecta en su fase inicial y los ocupantes son avisados rápidamente a través de los sistemas de detección y alarma. Una señalización adecuada de las vías de escape facilita considerablemente la evacuación. Asimismo, es importante la organización y realización de simulacros de evacuación.

2.14 LA PROTECCIÓN CONTRA INCENDIO DENTRO DE LA INGENIERÍA DE PROYECTOS

La integración de la protección contra incendio debe ser considerada en todas las fases del ciclo de vida de las instalaciones: conceptualización, diseño, construcción, arranque, operación y desmantelamiento. Todos los códigos que se apliquen y que sean necesarios para un diseño adecuado de la instalación deben ser identificados en la fase inicial de diseño, pues ello beneficia en la reducción de los costos de protección contra incendios. La identificación de riesgos se desarrolla de forma progresiva e incrementa su detalle durante la ejecución de un proyecto para asegurar que los peligros han sido identificados y las acciones de mitigación de riesgos sean aplicadas de forma correcta. No es raro que, a medida que el proyecto avanza, los requisitos en el diseño del sistema de protección contra incendios se ven afectados y/o modificados. El impacto de estos cambios se minimiza mediante la inclusión temprana del sistema de protección contra incendios en la etapa de diseño.

Durante la construcción se llevan a cabo inspecciones, evaluaciones técnicas y auditorías de seguridad, con el fin de verificar el cumplimiento de las recomendaciones realizadas; además se debe proporcionar capacitación al personal sobre el funcionamiento del sistema de protección contra incendios y se realizan las pruebas de aceptación; estas últimas garantizan que el sistema cumple con los requerimientos especificados en los criterios de diseño.

No es inusual que haya necesidad de realizar cambios en el diseño del sistema durante la construcción; por ello es de vital importancia que tales cambios se hagan de tal manera que la intención del diseño del sistema de protección contra incendios se mantenga o si es posible, mejore de acuerdo a los riesgos resultantes de estos cambios.

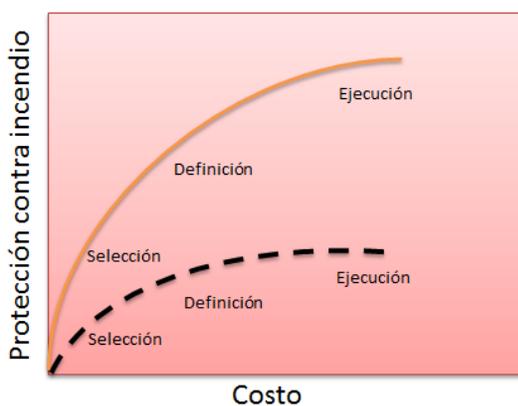


Fig. 19. Costo de la protección contra incendio

Durante la operación de las instalaciones industriales, se pueden esperar cambios que igualmente resulten en un incremento de riesgos, mismos que modificarán la estrategia de protección contra incendios y la respuesta a emergencias.

Adicionalmente, las recomendaciones realizadas por las compañías aseguradoras, requieren diferentes niveles de protección que pueden afectar el alcance de la instalación de protección contra incendios.

Durante el desmantelamiento, los sistemas de protección contra incendios deben mantenerse hasta que los materiales que presenten un riesgo se eliminan totalmente; un sistema contra incendios debe ser el último elemento eliminado o desactivado. Durante el

desmantelamiento, los sistemas de protección contra incendios deben mantenerse hasta que los materiales que presenten un riesgo se eliminan totalmente; un sistema contra incendios debe ser el último elemento eliminado o desactivado.

En la siguiente tabla, se muestran de forma resumida, los diferentes estudios realizados en las diferentes etapas de un proyecto.

Objetivo	Estudio	Diseño
<p>Fase 1: Conceptual</p> <p>*Proporciona el estudio temprano de la ingeniería contra incendios.</p> <p>*Identifica los principales peligros de incendio.</p>	<p>*Análisis preliminar de riesgos</p> <p>*Identificación de peligros</p> <p>*Revisión de Diagramas de Flujo de Procesos (DFP).</p> <p>*Revisión de la normatividad aplicable.</p>	<p>*Requerimientos de espacio entre equipos e instalaciones.</p> <p>*Filosofía de la protección contra incendios (pasiva vs activa).</p>
<p>Fase 2: Diseño preliminar</p> <p>*Define todos los peligros de incendio.</p> <p>*Desarrollo de la estrategia para dirigir cada peligro de fuego en el diseño.</p> <p>*Maximiza las oportunidades para mejorar el diseño del sistema contra incendio.</p> <p>*Asegurar que las decisiones tomadas sean sencillas y eficaces, y optimizar la configuración y el layout.</p>	<p>*Cheklist del análisis de peligros de fuego.</p> <p>*Revisión del layout.</p> <p>*Análisis de riesgos preliminar.</p> <p>*Análisis de riesgos detallado.</p> <p>*Revisión de DFP y Diagramas de Tubería e Instrumentación. (DTI).</p> <p>*Aplicación de la normatividad específica.</p>	<p>*Revisión del layout</p> <p>*Desarrollo de especificaciones para:</p> <p>Sistema de protección contra incendio.</p> <p>Detección</p> <p>Sistema de alarma</p> <p>Bombas contra incendio</p>
<p>Fase 3: Diseño detallado</p> <p>*Asegura el diseño final</p> <p>*Diseño del sistema contra incendio.</p>	<p>*Aplicación de la normatividad específica.</p> <p>*Evaluación de riesgos de incendio.</p> <p>*HAZOP detallado.</p>	<p>*Finalización del layout.</p> <p>*Procura de equipos del sistema contra incendio.</p> <p>*Aprobación de dibujos: sistema de protección contra incendio, detección, y sistema de alarmas.</p> <p>*Revisión de la clasificación eléctrica.</p>
<p>Fase 4: Construcción y arranque</p>	<p>*Aplicación de recomendaciones de reaseguro.</p>	<p>*Realización de las pruebas de aceptación.</p> <p>*Plan de emergencia.</p>

Tabla 6. Estudios de seguridad en las diferentes etapas de un proyecto. (27)

3 CUARTOS DE CONTROL

Impulsadas para aumentar la seguridad de las plantas de proceso y hacer las operaciones más confiables y eficientes, las innovaciones en tecnología de la información han dado lugar a un mayor uso de la automatización y control de procesos.

Las aplicaciones de los centros de control son muchas y variados e incluyen las telecomunicaciones, industria, energía (generación, distribución y transmisión), seguridad, agua (producción, alcantarillado y depuración), vigilancia del tráfico, aeropuertos, redes ferroviarias y de transporte, departamentos de policía y bomberos, servicios de emergencia y centros de llamadas, centros de datos para los gobiernos y para las empresas comerciales.

3.1 CLASIFICACIÓN

El cuarto de control es el edificio donde se concentra el equipo que controla las funciones de operación del proceso y las funciones de comunicación digital de la planta; puede ser de tres diferentes tipos:

1. **Tradicional:** Edificación no resistente a una explosión, donde se encuentran los instrumentos que indican las condiciones de operación y algunos controles remotos, así como también es la estancia del personal de guardia que observa el área bajo su custodia a través de ventanas.
2. **Satélite:** Edificación localizada cerca de la planta de proceso correspondiente, donde se aloja equipo electrónico consistente sólo de gabinetes de interface que recaban la información y la transmiten al cuarto de control central. Este cuarto se encuentra normalmente no tripulado. Cuenta con piso falso y plafón, en su diseño y construcción no se incluyen ventanas y la puerta es resistente para que pueda resistir los efectos de una explosión exterior. Generalmente solo se ocupa por personal para realizar trabajos de mantenimiento.
3. **Central o “bunker”:** Edificación desde la cual se controla la operación de diferentes plantas de proceso. Contiene equipo electrónico como son los gabinetes y principalmente las consolas de control que son atendidas por el personal. Su construcción está destinada para resistir una explosión exterior. Las puertas que comunican al exterior sólo se utilizan para acceso directo y son herméticas, de tipo emergencia (solo abren hacia el exterior), con objeto de permitir el desalojo de personal en caso necesario. Puede incorporar una o más oficinas dependiendo de los requerimientos del proyecto.

En la industria de la refinación del petróleo, el Cuarto de Control Central es el corazón de una refinería. En él se localizan todos los equipos para el monitoreo y control de los procesos en las diferentes plantas de la refinación de petróleo (Destilación primaria, Hidrotratamiento, Reformación catalítica, Cracking Catalítico, Isomerización, Coquización retardada, Alquilación, etc.).

Los usuarios de este edificio son los operadores de las plantas e ingenieros encargados de mantener el buen funcionamiento de las mismas mediante una operación segura. Prácticamente podemos decir que desde aquí se controla toda la refinería por lo que no puede dejar de funcionar en ningún momento. El diseño de este edificio y las áreas que lo conforman debe ser el adecuado para su buen funcionamiento y operación, considerando el bienestar de los usuarios del edificio de tal manera que puedan realizar sus funciones de manera óptima y confiable, contemplando que lo más importante es la seguridad de la refinería y la de los trabajadores.

En el cuarto de control central se recopilan los datos de proceso provenientes de los cuartos de control satélite (o también llamados locales) distribuidos a lo largo de una instalación o de los controles situados a distancia, tales como cobertizos o analizador de unidades terminales remotas, que se encuentran comúnmente en las plantas de proceso. En la figura 20 se muestra la comunicación entre el cuarto satélite y el cuarto de control central.

Para lograr un diseño adecuado de los cuartos de control que cumpla tanto con los requerimientos del personal, así como con los requerimientos técnicos para su funcionalidad, es necesaria la participación de diferentes disciplinas, mismas que en forma resumida se indican a continuación:

1. Ingeniería de Instrumentos. Participa en el diseño del sistema de control y en la selección de las interfaces hombre máquina (IHM).
2. Ingeniería eléctrica. Proporciona la correcta distribución de energía, iluminación y tendido de cables.
3. Arquitectura e Ingeniería Civil. Proporciona el diseño del edificio de acuerdo a los requerimientos del personal, así como en caso de ser necesario, del diseño de la estructura resistente a explosiones.
4. Ingeniería de seguridad. Proporciona los Sistemas de detección y alarma, además de la selección de materiales no tóxicos e ignífugos; así como en el sistema de mitigación de incendios.
5. Ingeniería Mecánica. Proporcionar calefacción, aire acondicionado y ventilación (HVAC) de la instalación, diseño de tuberías para los servicios, etc.

3.2 PARÁMETROS DE DISEÑO

Ambientales: Para el diseño del cuarto de control, es necesario considerar diversos parámetros, tomando en cuenta la funcionalidad de los controles, gabinetes, PC's, como las condiciones climáticas del sitio; por ejemplo, las temperaturas mínima y máxima, humedad relativa, velocidad y dirección del viento (para reducir la posibilidad de arrastre de gases o vapores inflamables o tóxicos hacia el mismo), así como la clasificación de zonas sísmicas.

Físicos: Restricciones de peso y tamaño para el equipo principal o módulos que se instalarán en el sitio y el acceso de transporte y grúas, el nivel freático del lugar (en caso de que se haya planeado cableado subterráneo), además se debe considerar las susceptibilidad a inundaciones.

Disponibilidad de servicios con los que debe contar como de energía eléctrica y agua potable, suministro de aire de instrumentos y sistema de Drenaje, etc.

3.3 REQUISITOS

Para llevar a cabo el diseño preliminar del cuarto de control es necesario contar con la siguiente documentación: Clasificación de áreas eléctricas correspondiente, el plano general de localización de equipo (PLG) en la planta o de la plataforma marina en caso de ser una instalación costa afuera (*offshore*) y el arreglo conceptual del sistema de control. Para el caso de un cuarto de control satelital, es necesario definir las funciones que realizará (cuarto de control de motores, cuarto de control de compresores, etc.); así mismo, es necesario establecer la vía de comunicación con el cuarto de control (Wireless, fibra óptica, etc.). Para el caso de un cuarto de control central, además es necesario establecer los requisitos del personal en sus aspectos técnicos, operativos y administrativos, es necesario definir el tamaño de los cuartos de control, su ubicación, el consumo de energía eléctrica, los sistemas de monitoreo ambiental, de control y paro de emergencia.

3.4 SISTEMAS REQUERIDOS

3.4.1 Sistema de Presurización y aire acondicionado

El objetivo de la presurización es evitar la posible entrada de aire contaminado con gases o vapores inflamables y/o tóxicos que pueda causar daños al personal. Generalmente se combina la presurización con el aire acondicionado con el fin de:

- a. Mantener un diseño adecuado para el funcionamiento de los circuitos electrónicos.
- b. Mantener una presión positiva con respecto a la presión atmosférica.
- c. Mantener un ambiente confortable en lo que se refiere a: pureza del aire, temperatura y humedad relativa.

El sistema de presurización típicamente se diseña para mantener una sobrepresión entre 2,5 mm y 5 mm de H₂O (0,1 –0,2 pulgadas de H₂O).

Un sistema de aire acondicionado HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*) es necesario en los cuartos de control ocupados por personal o en aquello en donde existan equipos sensibles a la temperatura y que se puedan dañar por este efecto. El sistema de aire acondicionado puede servir como un sistema de presurización.

Los cuartos de control deben ubicarse en áreas eléctricas no clasificadas; a excepción de los cuartos de control de instalaciones *offshore*, los cuales se ubican en zonas peligrosas que requieren mantener una presión positiva al interior para evitar que los vapores o gases peligrosos se infiltren en la sala de control.

El cuarto para aire acondicionado y presurización deberá ser alejado tanto como sea posible de la sala para instrumentos y equipos de cómputo para reducir la interferencia mecánica y eléctrica.

La Normatividad relacionada al sistema de presurización en los cuartos de control y la clasificación de áreas es la siguiente:

- ✓ National Fire Protection Association (NFPA) Standard No. 496, “Purged and Pressurized Enclosures for Electrical Equipment”.
- ✓ API RP 500 Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Division 1 and Division 2.
- ✓ API RP 505 Classification of Locations for Electrical Installations at Petroleum Facilities Classified as Class I, Zone 0, Zone 1, and Zone 2.
- ✓ Instrument Society of America (ISA) RP 12.1, “Electrical Instruments in Hazardous Atmospheres”.

3.4.2 Servicios

a) Energía eléctrica

En cuanto a la energía eléctrica, típicamente los niveles de voltaje son los siguientes:

1. 12, 24 VDC o 120 VAC, todos con UPS, para el sistema de instrumentación y control.
2. 12, 24 VDC para los sistemas de alarma.
3. 120 VAC para iluminación y contactos eléctricos.
4. 12, 24 VDC o 120 VDC, todos con UPS, para el sistema de iluminación de emergencia.
5. 12, 24 VDC o 120 VDC, todos con UPS, para el sistema de detección de gas y fuego.
6. 208 o 480 VAC, a 3 fases, 60 Hz para el sistema de aire acondicionado (HVAC).

7. 12, 24 VDC o 120 VAC, todos con UPS, para el sistema de comunicación vía radio.
8. 48 VDC, con UPS, para el sistema de microondas.
9. 120/240 VAC para computadoras y periféricos.

Para los propósitos de la lista anterior, la UPS (*Uninterruptible power supply*) consiste en un cargador, un banco de baterías y la instrumentación necesaria para monitorear y controlar sus funciones.

b) Agua y Aire de instrumentos

Un suministro de agua potable para la sala de control puede ser requerido; así como aire para instrumentos neumáticos utilizados. La tubería para ambos servicios debe cumplir con las especificaciones de tuberías correspondientes, como por ejemplo: ISA RP 60.9 "Piping Guide for Control Centers," e ISA S7.3 "Quality Standard for Instrument Air".

c) Sistema de Protección contra incendio

El sistema contra incendio es necesario en todos los cuartos de control; incluye detectores (humo y fuego, gas tóxico) y el sistema de extinción mismo que puede ser a base de CO₂ o de algún agente limpio (en el capítulo 4 se explican estos sistemas).

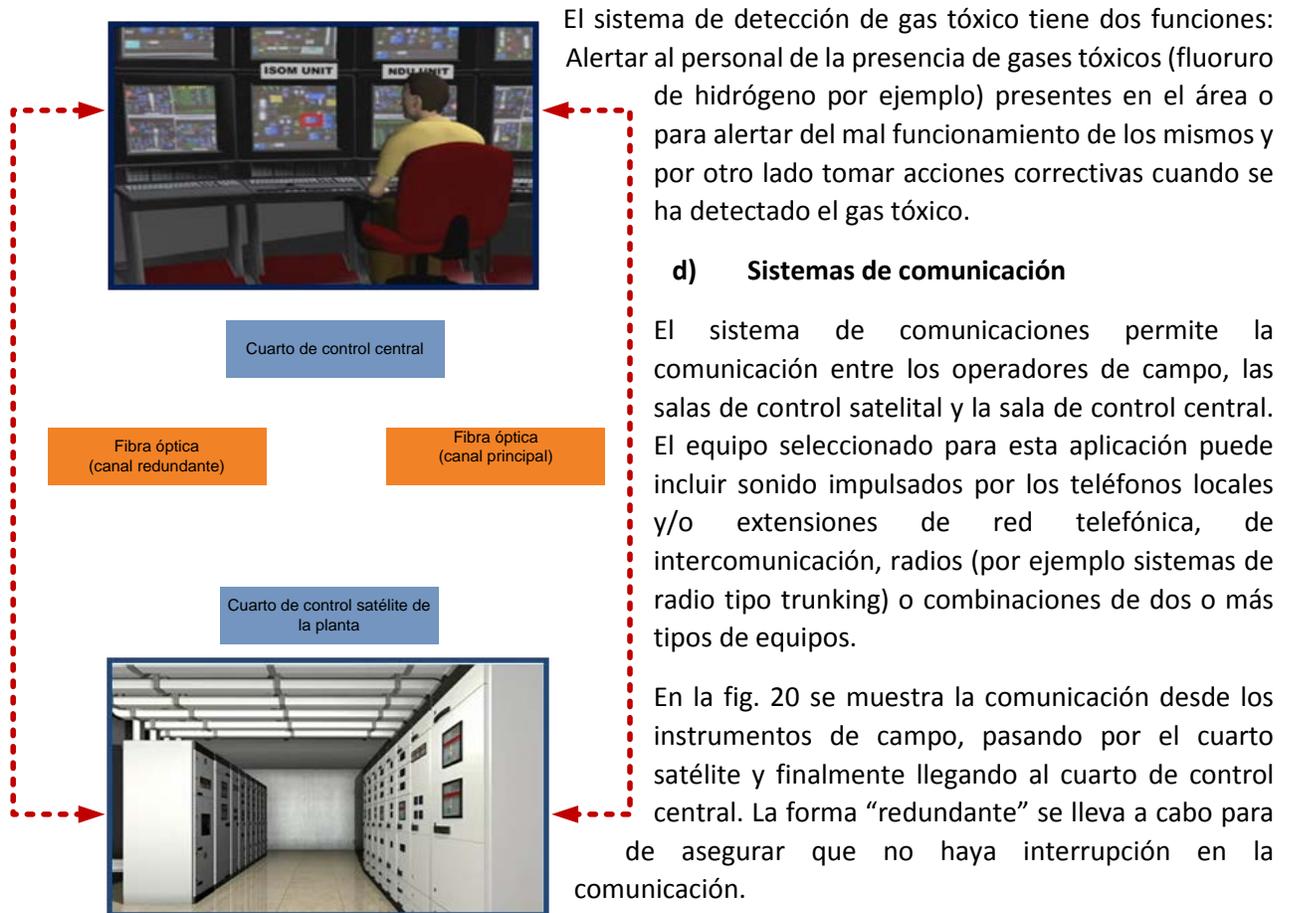


Fig. 20. Sistema de Comunicación de los cuartos de control

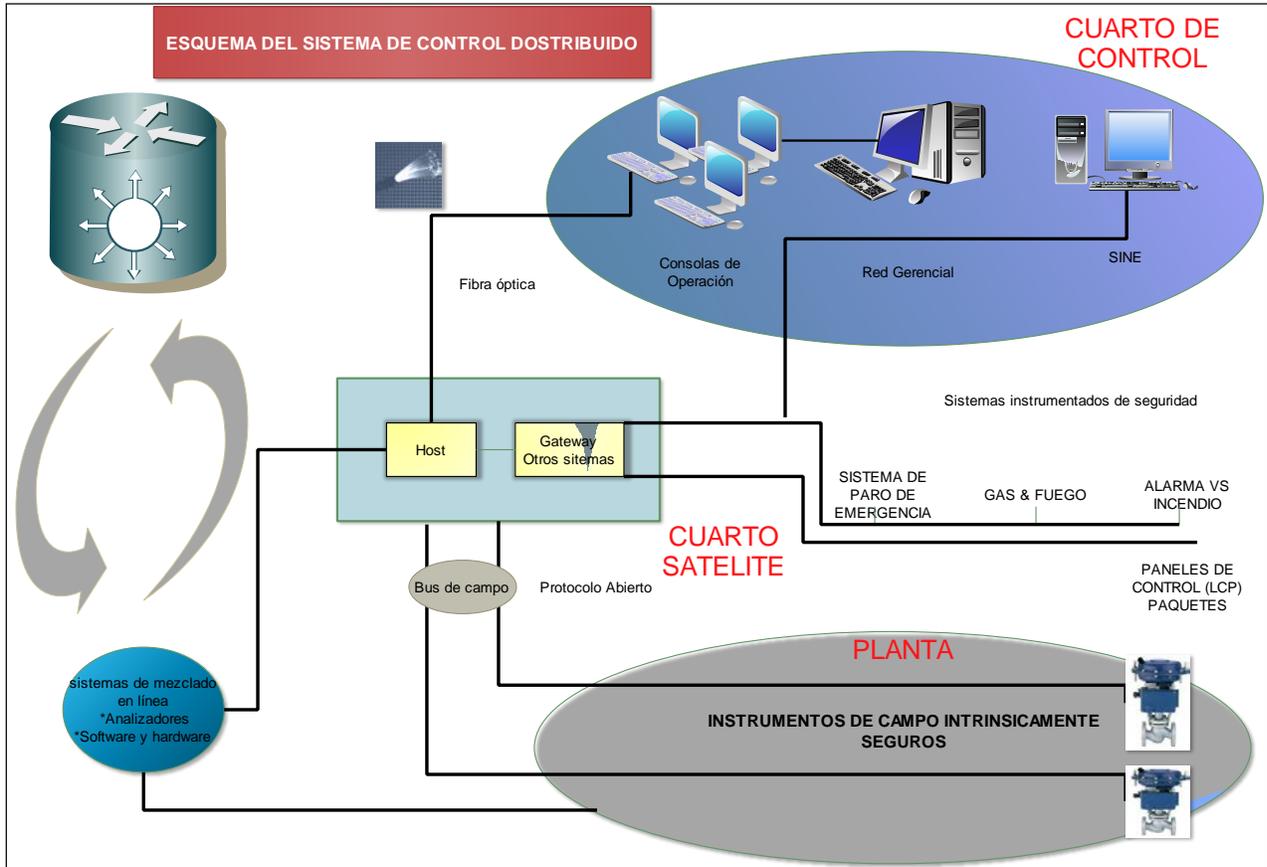


Fig. 20.1. Comunicación de los diferentes instrumentos en campo con el cuarto de control satélite y el cuarto de control central.

3.5 UBICACIÓN DEL CUARTO DE CONTROL

Los cuartos de control de las plantas industriales generalmente se encuentran localizados dentro de las áreas de proceso, en donde están expuestos a riesgos de explosiones, incendios u otros incidentes que pueden producirse en sus inmediaciones, principalmente por fuga de gases o productos volátiles que se manejan en la planta. Una buena distribución de las áreas e instalaciones debe ubicar a los cuartos de control lo suficientemente distanciados de los equipos de proceso que pueden producir fugas o derrames; mismo que es un requerimiento fundamental para prevenir, controlar o minimizar las pérdidas. La ubicación de los cuartos de control es el criterio de seguridad principal a ser considerado.

La disposición de equipos e instalaciones representa un método fundamental de protección para el personal, los equipos y el medio ambiente, esta actividad debe estar dirigida a proveer un nivel de riesgo mínimo, por lo cual se han establecido distancias mínimas de separación entre equipos e instalaciones.

En la siguiente tabla, se encuentran algunas distancias típicas de separación entre equipos y edificaciones en la industria petrolera y petroquímica, incluyendo el cuarto de control, que para los fines de distanciamiento, puede ser satelital o central; es decir, no hay distinción (28), (29).

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

- | | |
|---|-----------------------------------|
| A Compresores | I Calentadores de fuego directo |
| B Bombas de producto de riesgo intermedio | J Soloaires |
| C Bombas de producto de alto riesgo | K Cambiadores de calor |
| D Reactores de riesgo alto | L Corredores de tuberías |
| E Reactores de riesgo intermedio | M Controles de emergencia |
| F Reactores de riesgo moderado | N Válvulas de bloqueo de unidades |
| G Torres de destilación y acumuladores | O Cuartos de análisis |
| H Tanques de proceso con producto inflamable, tóxico o corrosivo. | P Cuartos de control |

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
A	10	10	15	15	15	15	15	30	30	10	10	10	15	15	15	30
B	10	1,5	1,5	3	3	3	3	30	15	5	3	3	15	15	15	30
C	15	1,5	1,5	5	5	5	5	30	15	5	5	5	15	15	15	30
D	15	3	5	7,5	7,5	7,5	15	30	15	7,5	7,5	7,5	30	30	15	30
E	15	3	5	7,5	5	5	7,5	30	15	5	5	5	15	15	15	30
F	15	3	5	7,5	5	5	7,5	30	15	5	3	3	15	15	15	30
G	15	3	5	15	7,5	7,5	5	30	15	5	3	3	15	15	15	30
H	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	60
I	30	15	15	15	15	15	15	30	7,5	15	15	15	15	15	15	30
J	10	5	5	7,5	5	5	5	30	15	(sr)	5	(sr)	15	15	15	30
K	10	3	5	7,5	5	3	3	30	15	5	1,5	3	15	15	15	30
L	10	3	5	7,5	5	3	3	30	15	(sr)	3	(sr)	15	15	15	10
M	15	15	15	30	15	15	15	30	15	15	15	15	(sr)	(sr)	(sr)	(sr)
N	15	15	15	30	15	15	15	30	15	15	15	15	(sr)	(sr)	(sr)	(sr)
O	15	15	15	15	15	15	15	30	15	15	15	15	(sr)	(sr)	(sr)	(sr)
P	30	30	30	30	30	30	30	60	30	30	30	10	(sr)	(sr)	(sr)	(sr)

Para fines prácticos los tipos de emergencias en las plantas de proceso pueden dividirse en: fugas de sustancias inflamables y fugas de sustancias tóxicas. En el primer caso el riesgo mayor resultante de la fuga de un material inflamable es la explosión y el incendio, dependiendo del estado físico del material fugado. En el segundo caso, los efectos son más difíciles de predecir ya que varían con la toxicidad del material, dependen del tiempo, la distancia y de las condiciones climatológicas.

La experiencia ha demostrado que la mayoría de las fugas mayores han ocurrido en los sistemas de tuberías, bombas y compresores, calentadores de fuego directo o por los venteos atmosféricos. Los recipientes a presión y los recipientes de reacción en sí mismos pudieran parecer fuentes obvias de fugas; sin embargo, estos equipos casi nunca presentan una falla durante su servicio, cuando están debidamente diseñados, construidos, inspeccionados y probados de acuerdo a normas, además de estar protegidos en operación por sistemas de seguridad.



Cuarto de control satelital



Cuarto de control central

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

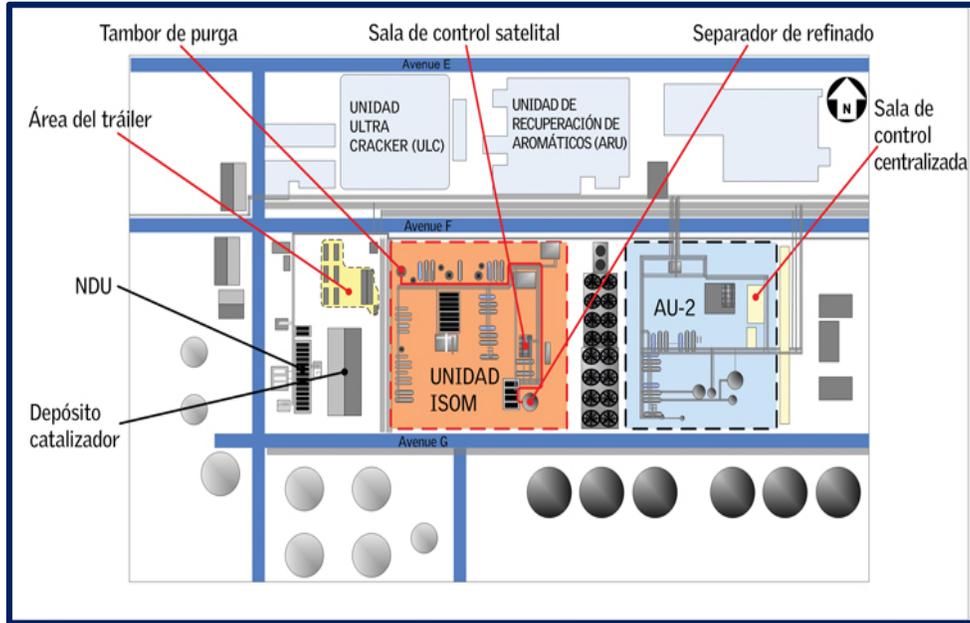


Fig. 20. Ubicación del cuarto de control central en la planta de proceso.

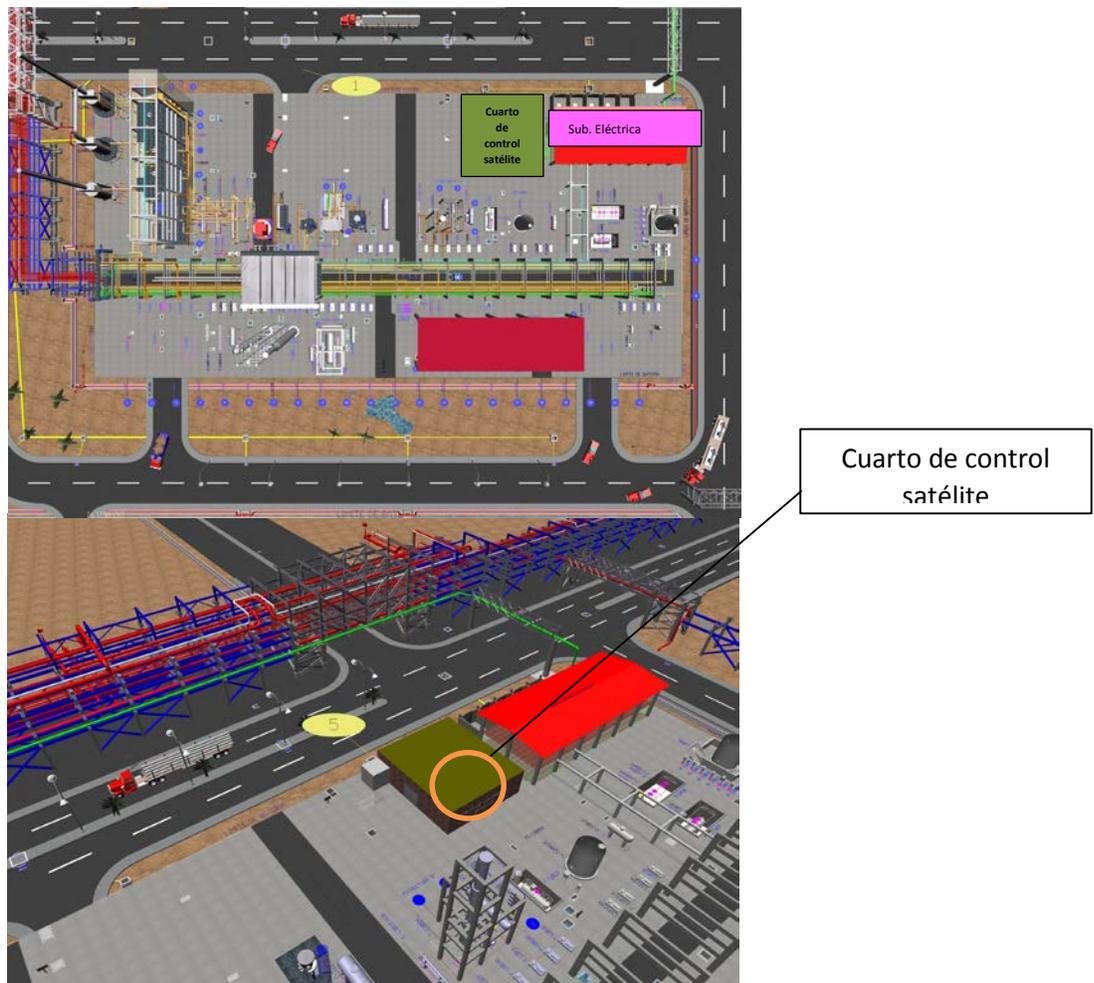


Fig. 21. Ubicación del cuarto de control satélite en una planta de proceso.

Los cuartos de control satelital generalmente forman parte de la misma planta; mientras que los cuartos de control central se ubican en áreas más seguras dentro de la instalación, buscando que los riesgos existentes sean mínimos y con ello se logre una mayor seguridad y continuidad de su funcionamiento (Fig. 22).

El edificio de control se sitúa de modo que el nivel del terreno, no permita su inundación ya sea debido a lluvia o derrames de productos; así mismo debe contener únicamente aquellos ambientes esenciales para la operación y control del proceso, normalmente cuenta con los siguientes componentes:

- Sala de control
- Sala de computación
- Sala de instrumentos y computadoras
- Cuarto eléctrico y de baterías (UPS)
- Cuarto para aire acondicionado y presurización (HVAC).
- Oficinas y servicios

El edificio debe conservar una forma rectangular y debe ser orientado de manera que el lado de menor superficie enfrente la fuente más probable de explosión dentro de la instalación.

El área seleccionada específicamente para la ubicación del cuarto de control central debe ser de preferencia “no clasificada”¹⁰ y generalmente se ubica junto a una vía de acceso interna de la instalación. El cuarto para aire acondicionado y presurización deberá ser alejado tanto como sea posible de la sala para instrumentos y equipos de computación para reducir la interferencia mecánica y eléctrica.

3.6 REQUERIMIENTOS DEL EDIFICIO

Piso Falso y plafón

La sala de control, el cuarto eléctrico y la sala de instrumentos y computadora, requieren de un sistema de piso falso tipo modular, para la colocación del cableado eléctrico y de instrumentación. El piso falso tipo modular, deberá poseer un sistema de circulación de aire que permita mantener una temperatura adecuada para disipar el calor generado por los diferentes componentes de los sistemas de computación y paneles de instrumentación.

El piso falso tipo modular, deberá estar dotado de un sistema de detectores de incendio por ionización y adicionalmente deberá considerarse la conveniencia de instalar un sistema de extinción. Los paneles o cualquier sistema de techo falso deben contar con amarras que impidan su caída en caso de terremotos o explosiones.

Canalización de Potencia e Instrumentación

Las entradas de cables de potencia e instrumentación al edificio de control deben hacerse a un nivel tal que no permita la entrada de aguas provenientes de lluvias o combate de incendios u otros líquidos.

Las entradas de cables y “conduit” deberán sellarse y las entradas no utilizadas, deberán cerrarse para impedir el ingreso de agua al área.

¹⁰ Se refiere a la clasificación de áreas eléctricas peligrosas.

Los cables de potencia e iluminación se canalizarán por los lados del edificio y todos los conduit que ingresan al edificio deberán conectarse a tierra.

3.7 ASPECTOS ERGONÓMICOS DEL CUARTO DE CONTROL

Los centros de control deberán estar organizados para proporcionar al personal un ambiente de trabajo que ayuda a garantizar la seguridad y operatividad. El trabajo del operador en el cuarto de control puede ser muy exigente y de mucha responsabilidad; las consecuencias de las acciones inadecuadas del operador en las salas de control, tales como actos de omisión, tiempo de reacción, interpretaciones inadecuadas, etc., pueden ser potencialmente desastrosas para la vida humana y para las plantas de proceso.

Para evitar el “error humano” existen una serie de factores relacionados con el diseño de los elementos de control de modo más racional, más confortable y menos confuso para los usuarios. Los Factores humanos (o Ergonomía) en el diseño de salas de control se refieren a cómo la gente interactúa con la habitación y su contenido, o en otras palabras son aquellos factores que pueden influir en el comportamiento de las personas. Estos factores incluyen el impacto en la comunicación (verbal y no verbal), asignación de responsabilidades, el número de operadores a laborar en él, separación de los puestos de trabajo, el movimiento de personal en torno a la sala de control, etc.

Otro aspecto importante en el diseño del cuarto de control que deben ser abordados incluyen pantallas de visualización, paneles de indicadores y controles, alarmas, la antropometría¹¹ de las estaciones de trabajo, asientos, ajuste, y la postura, las cuestiones ambientales tales como temperatura, humedad, calidad del aire, iluminación y ruido.

Al diseñar un puesto de trabajo, se busca proporcionar un lugar libre de tensiones innecesarias. Si el operador está incomodo o los controles están mal ubicados, la producción y la seguridad se verán afectadas. Amplia información del diseño ergonómico de los cuartos de control se encuentran en el standard de la ISO 11064, Ergonomic Design of control centers, mencionado en el punto 4.4 de Normas y Códigos.

Las Figuras 23 y 24 presentan las dimensiones sugeridas tanto para operadores sentados como de pie. Es de hacer notar que las exigencias de espacio se han establecido para acomodar al operador más grande y el radio de alcance, para el más pequeño. Debe proporcionarse posibilidades de ajuste, especialmente en el asiento, para el confort y eficiencia de todos los trabajadores, cualquiera sea su tamaño corporal, asignados al puesto de trabajo. ^{(30) (31).}

¹¹ La Antropometría se ocupa de la medición de las variaciones en las dimensiones físicas y la composición del cuerpo humano a diferentes edades y en distintos grados de nutrición

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

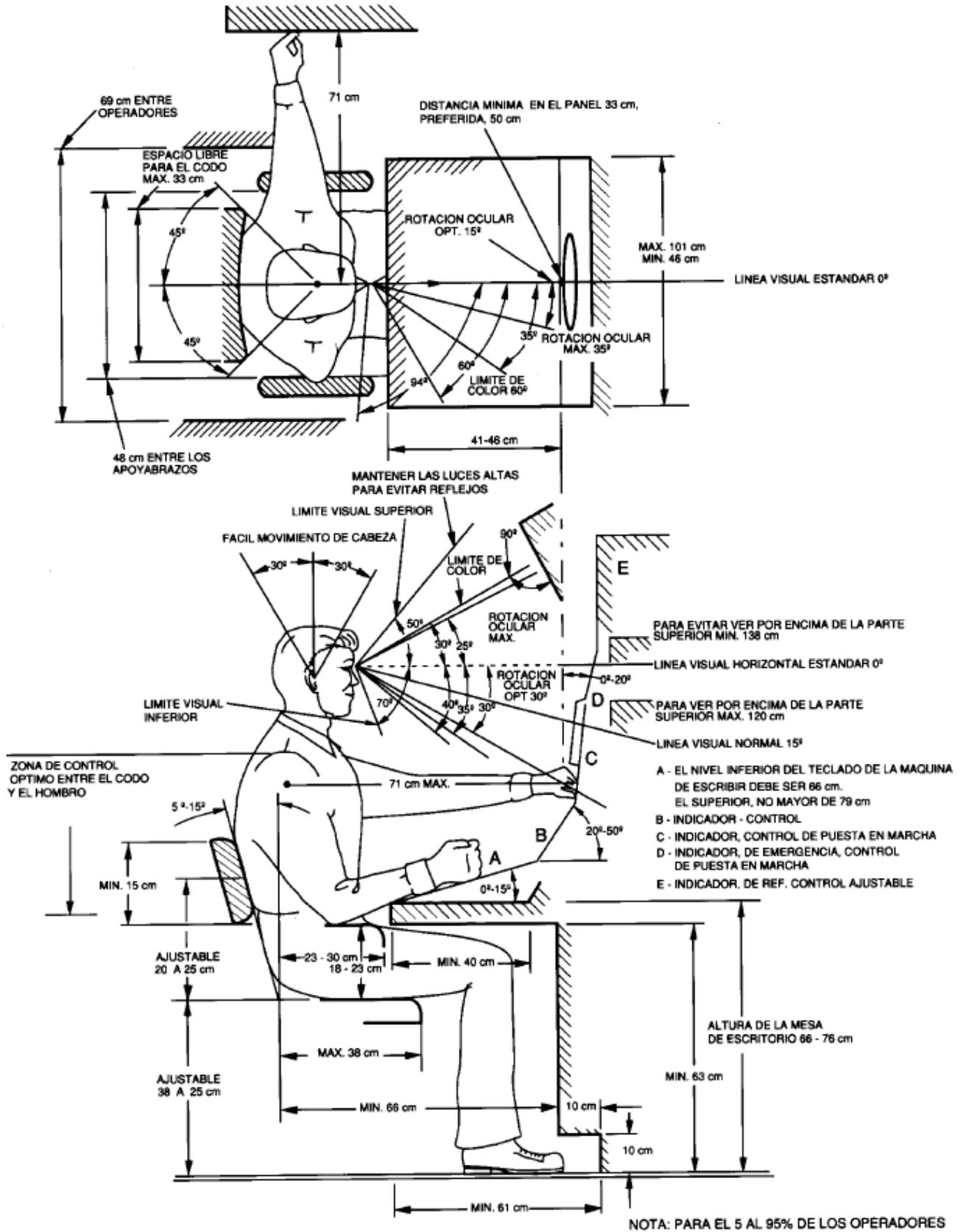


Fig. 22. Dimensiones ergonómicas (SI)

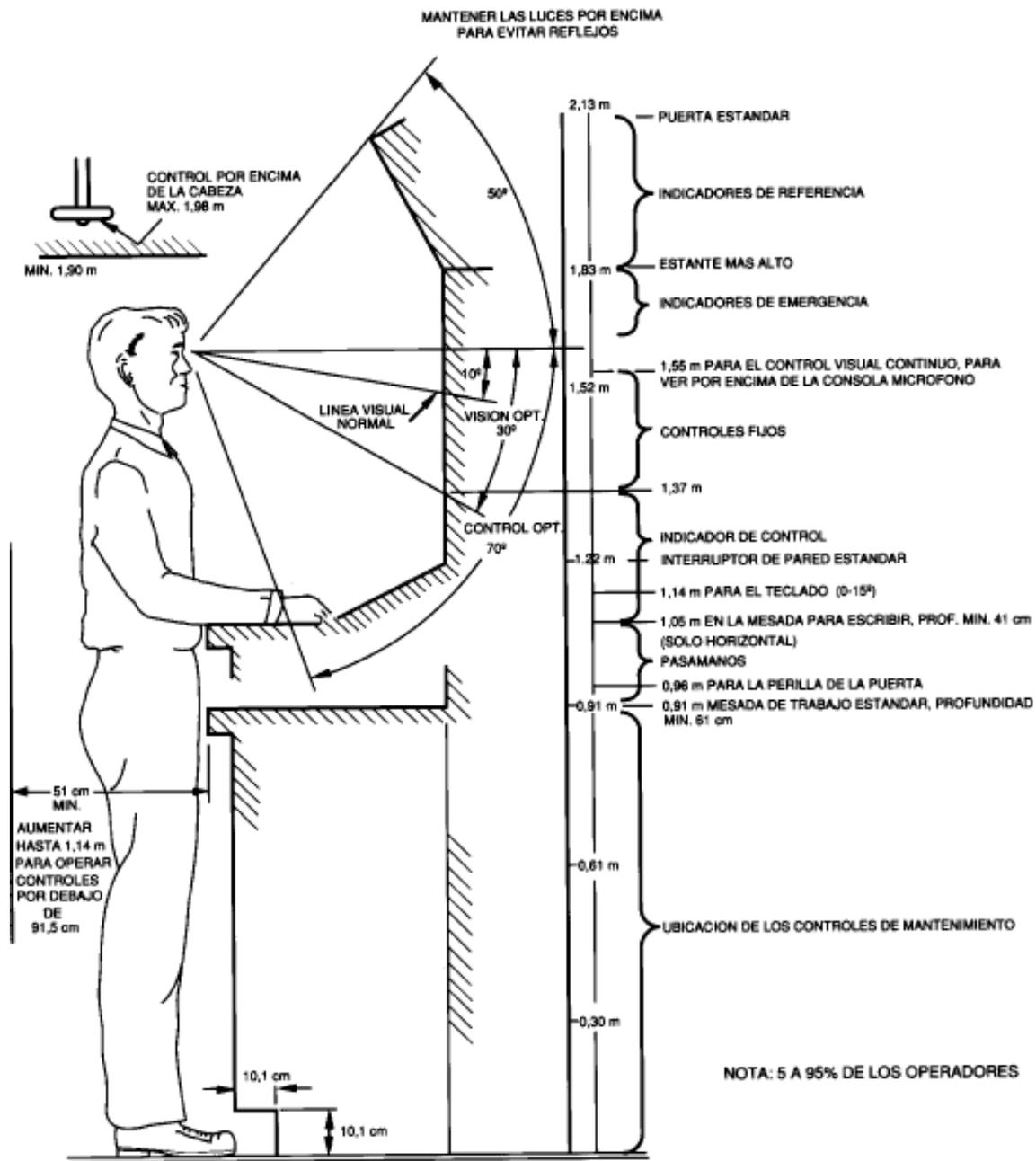


Fig. 23. Dimensiones ergonómicas sugeridas.

3.8 RIESGOS DE INCENDIO EN LOS CUARTOS DE CONTROL

Derivado de los componentes de los cuartos de control, los riesgos de incendio que pueden presentarse al interior del mismo se deben principalmente al sobrecalentamiento de los componentes electrónicos, cables, equipos de cómputo, gabinetes, etc.; por lo cual es muy probable que los incendios que se pudieran suscitar dentro de ellos sean incendios Clase C (materiales eléctricos energizados).

Ahora bien, debido a la ubicación del cuarto de control, puede estar expuesto a explosiones e incendios externos que pueden resultar en destrucción parcial o total del edificio. La siguiente tabla muestra como ejemplos algunos accidentes en los cuáles los cuartos de control fueron afectados. (32)

Fecha	Localización	Víctimas	Descripción
1992	La Mede, Francia	6	Una fuga de LPG en la unidad FCC, provocó una explosión que destruyó la unidad y demolió el cuarto de control satélite.
1992	Castleford, Inglaterra.	5 (3 en edificios)	El calentamiento de residuos de nitrotolueno durante los preparativos de mantenimiento, provocaron una reacción descontrolada que destruyó el cuarto de control.
1989	Pasadena, Texas	23 (se desconoce el número en edificios)	Fuga de Isobutano y etileno en la planta de polietileno, provocaron una explosión que destruyó la planta, incluyendo el cuarto de control, también hubo daños en el edificio administrativo que se encontraba a 0.8 km de distancia.
1988	Norco, Luisiana	7 (6 en edificios)	Fuga de propano, en la FCC provocó una explosión que destruyó el cuarto de control. Seis muertes ocurrieron en el cuarto de control y una más ocurrió por la caída de un ladrillo sobre la persona.
1975	Beek, Holanda	14 (6 en edificios)	Una fuga de propileno ocasionó una explosión que causó graves daños al cuarto de control. Todos los controles y datos históricos de la planta se perdieron.
1974	Fixborough, UK.	28 (18 en edificios)	Una fuga de ciclohexano provocó una explosión que destruyó las oficinas principales, así como dos cuartos de control, uno de ellos se encontraba a 105 m del centro de la explosión.

Tabla 7. Accidentes en edificios involucrando cuartos de control.

4 SISTEMAS CONTRA INCENDIO PARA CUARTOS DE CONTROL

4.1 TIPOS DE SISTEMAS

Los sistemas de supresión de incendio a base de agua están diseñados para proteger a las personas y los edificios; pero cuando se trata de proteger equipo de alto valor económico, como computadoras, gabinetes y otros equipos electrónicos, el agua puede ser aún más dañina que el fuego, por lo cual el sistema de protección con agua no resulta conveniente para proteger los cuartos de control de las plantas de proceso.

En los cuartos de control se encuentran equipos eléctricos y electrónicos que deben ser protegidos en caso de un incendio para evitar su pérdida y la pérdida de información (histórico) que se ha generado por la operación de la(s) planta(s) de proceso.

La NFPA 10 define a los incendios de Clase C como aquellos que involucran equipos con energía eléctrica. Si un incendio con materiales de Clase A es alimentado en forma continua por energía eléctrica, se lo considera un incendio de Clase C. Si el riesgo involucra equipos electrónicos, como equipos de procesamiento de datos o de telecomunicaciones, la energía eléctrica que se transmite al equipo puede o no ser interrumpida antes de la descarga del agente. Si se interrumpiera la energía antes de la descarga del agente, la clasificación del combustible bien podría ser Clase A (superficie que arde). Caso contrario, el combustible podría ser clasificado más precisamente como de Clase C (materiales eléctricos energizados).

Los agentes extintores gaseosos son los que se utilizan para proteger los cuartos de control, mediante un **sistema de inundación total**; el cual consisten en una fuente de suministro de agente gaseoso, permanentemente conectada a una red de tuberías fijas de distribución provistas de boquillas, que descargan dentro de un espacio cerrado formando una atmósfera gaseosa en todo el recinto para la extinción del incendio. En ocasiones, en los cuartos satélite se utiliza el **sistema de aplicación local**, el cual consisten en un suministro permanente conectada a un sistema de tuberías fijas de distribución, dotadas de boquillas que descargan directamente sobre el material o equipo incendiado. El ejemplo a desarrollar en esta tesis es un sistema contra incendio de inundación total a base de agente limpio en un cuarto de control central (ver Capítulo 8).

Presencia del personal	Clasificación
Sin requerimientos	No tripulado
Revisiones de rutina Una por día O una por turno	Sin tripulación permanente
Ocupación permanente 50% del tiempo total del día, o 20% del tiempo total a la semana	Ocupación permanente

Tabla 8. Clasificación de edificios

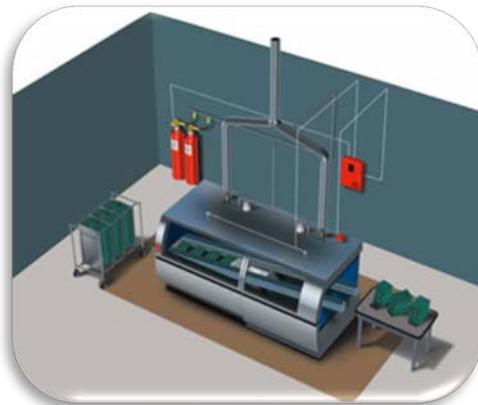


Fig. 24. Sistema de aplicación local

Los antecedentes de los sistemas extintores de incendio de inundación total que utilizan agentes gaseosos se remontan a 1920, cuando Walter Kidde introdujo los sistemas de dióxido de carbono en E.U.A. Desafortunadamente, el dióxido de carbono es letal para los seres humanos si se lo utiliza en concentraciones normales. La llegada de los halones y específicamente del Halón 1301, en los años 60, dio origen a la era de agentes gaseosos de inundación total seguros para las personas. La era de los “agentes limpios” comenzó en el año 1994, con la prohibición sobre la producción del Halón 1301, debido a su alto potencial de reducción de la capa de ozono.

Los halones o agentes extintores halogenados son hidrocarburos en los que uno o más átomos de hidrógeno han sido sustituidos por átomos de flúor, cloro, bromo o yodo. La sustitución confiere no solo inflamabilidad, sino también propiedades extintoras de llama a muchos de los compuestos resultantes. Estos agentes se emplean en extintores portátiles y en sistemas de extinción, se utilizan agentes como el Halón 1211 y 2402 en equipos de lucha manual contra el fuego y en sistemas fijos de aplicación local. El Halón 1301 se utiliza más frecuentemente en sistemas fijos de inundación total. El uso de los sistemas de inundación total se originó en 1963 y en los siguientes cinco años se desarrolló la tecnología a base de dióxido de carbono.

Los halones 1301, 2402 y 1211 contribuyen a dañar la capa de ozono¹² de la estratosfera. El Protocolo de Montreal¹³ sobre sustancias que atacan la capa de ozono, exige abandonar totalmente la producción de estas sustancias, excepto en la medida necesaria para satisfacer usos esenciales que no tengan una alternativa adecuada.

El primer compuesto químico de esta familia fue el tetracloruro de carbono (Halón 104), cuyo uso como agente extintor se remonta probablemente a antes de 1900; en 1917 se discutían ya los posibles efectos que el tetracloruro de carbono podía tener sobre el cuerpo humano.

A finales de 1920 se descubrió el bromuro de metilo (Halón 1001) y debido a su alta toxicidad no se utilizó mucho en los extintores portátiles, aunque si en los buques y aviones británicos y alemanes durante la segunda guerra mundial. En esta época Alemania desarrolló el clorobromometano (Halón 1011) como sustituto del bromuro de metilo. En 1947, un informe de UL, demostró que la toxicidad del tetracloruro de carbono era similar al del clorobromometano, pero este era un agente extintor más eficaz.

En 1947, la Fundación de Investigación de Purdue llevó a cabo una evaluación sistemática de más de 60 agentes extintores. Simultáneamente, el cuerpo de ingenieros del Ejército de los Estados Unidos realizaba estudios toxicológicos de estos mismos agentes; se seleccionaron cuatro halones para su estudio más en profundidad: el dibromodifluorometano (Halón 1202), el bromoclorodifluorometano (Halón 1211), el bromotrifluorometano (Halón 1301) y el dibromotetrafluorometano (Halón 2402). Las pruebas demostraron que el Halón 1202 era el extintor más eficaz, pero también era el más tóxico. El menos tóxico era el Halón 1301, que además era el segundo en eficacia en la extinción del fuego.

Para 1950, la era de los primeros halones (Halón 104, 1001 y 1011) estaba llegando a su fin. La creciente popularidad de los productos químicos secos suponía que ya no era necesario el uso de estos halones y al existir serias dudas sobre su toxicidad, se produjo su “muerte oficial” en la década de los 60's. (33) .

¹² Se sitúa entre 10 y 50 km. sobre la superficie de la tierra y contiene la mayor concentración de ozono de la estratosfera, absorbe prácticamente toda la radiación ultravioleta nociva (UV-B) procedente del sol; la cual puede causar problemas en la salud y el medio ambiente.

¹³ El protocolo de Montreal fue firmado el 16 de septiembre de 1987 y entró en vigor en enero de 1989, Cuenta con cuatro enmiendas denominadas por el lugar de su adopción: Londres, Copenhague, Montreal y Beijín; ha sido ratificado por 165 países incluyendo México. Inicialmente solo contemplaba 8 sustancias químicas que agotan la capa de ozono, actualmente contempla alrededor de 95 y son Clorofluorocarbonos (CFC's), Halones, Hidroclorofluorocarbonos (HCFC's), bromuro de metilo, entre otros.

Los sistemas de mitigación contra incendio en los cuartos de control central emplean **agente limpio** como agente extintor, mientras que en los cuartos satélite también se utiliza un sistema de inundación total pero a base de **dióxido de carbono**. Lo anterior derivado del criterio del tiempo que permanecen los usuarios dentro de ellos, y en general puede aplicar para recintos en donde haya equipo electrónico.

4.2 AGENTES EXTINTORES SUSTITUTOS DE LOS HALONES: AGENTES LIMPIOS

Como resultado de la búsqueda de “Alternativas a los Halones” derivado de los problemas medioambientales que generan), aparecen los denominados agentes limpios que hacen referencia a aquellos agentes que se utilizan como sustitutos del Halón 1301 y que además, no presentan (o presentan un muy bajo) potencial de reducción de la capa de ozono. La NFPA 2001 (ver normatividad), Norma sobre sistemas de extinción de incendios mediante agentes limpios, describe los requisitos sobre el uso de 13 agentes limpios, entre los que se incluyen cuatro agentes de gas inerte y nueve agentes de halocarbono. Al menos siete de los 13 agentes limpios enumerados en la NFPA 2001 se utilizan para protección contra incendios por inundación total en espacios normalmente ocupados; sin embargo, ello no significa que dichos sistemas puedan ser descargados cuando haya personas en el espacio protegido.

Debe evitarse la innecesaria exposición a los agentes limpios y los productos de su descomposición química. El diseño de un sistema de agente limpio supone que el personal evacuará el espacio protegido antes de proceder con la descarga del mismo. El valor esencial de un agente limpio es que no debería provocar daños en personas que involuntariamente se vean expuestas a una mezcla de agente-aire en concentraciones previstas para ser utilizadas en espacios ocupados. En el caso del Halón 1301, la concentración mínima de extinción (*MEC*, por sus siglas en inglés) es de ~3.2 %vol. para llamas de heptano. La concentración máxima de exposición permitida (*MPEC*, por sus siglas en inglés) para seres humanos es de 7 %vol. La concentración habitual de diseño para una aplicación de Halón 1301 era de 5 %vol., lo que dejaba un margen de seguridad (relativo) del 40% antes de alcanzar la concentración máxima permitida. La concentración mínima de diseño (*MDC*, por sus siglas en inglés) que se utiliza para agentes limpios es de 1,3 veces la concentración mínima de extinción (*MEC*), en el caso de aplicaciones de líquidos inflamables. La concentración mínima de diseño resultante deja un margen relativo menor antes de alcanzar la concentración máxima de exposición permitida (*MPEC*). Al especificar la concentración mínima de diseño (*MDC*) más baja permitida, los diseñadores de los sistemas dejan un margen máximo para una exposición segura al agente.

El tiempo de exposición máximo a un agente limpio para recintos normalmente ocupados una vez que ha sido descargado no debe exceder 5 minutos y la concentración debe estar por abajo del NOAEL (No Observable Adverse Effect Level) el cual es el nivel de exposición experimental que representa el máximo nivel probado en el cual no se observan efectos tóxicos. Para recintos normalmente no ocupados, la concentración deberá estar por abajo del LOAEL, la cual es la concentración mínima en la que se observan efectos adversos.

Agente Limpio	NOAEL (%)	LOAEL (%)
FK-5-1-12	10.0	>10.0
HCFC Blend A	10.0	>10.0
HCFC-124	1.0	2.5
HFC-125	7.5	10.0
HFC-227 ea	9.0	10.5
HFC-23	30.0	>30
HFC Blend B*	5.0	7.5

Tabla 9. NOAEL y LOAEL de diferentes agentes limpios

Los agentes limpios no son conductores eléctricos, son volátiles y no dejan residuos. Se clasifican en halocarbonos y gases inertes. Los halocarbonos típicamente incluyen hidrofluorocarbonos (HFC's), hidroclorofluorocarbonos (HCFC's), perfluorocarbonos (PFC's o FC's) y fluoryodocarbonos (FIC's). En los gases inertes se incluye el Argón, Nitrógeno, Dióxido de carbono o combinaciones de estos elementos. Los agentes limpios a utilizar en el sistema de inundación total o de aplicación local, deben estar listados y/o aprobados por organismos como UL, FM y la NFPA. Existe gran variedad de agentes limpios en el mercado que cumplen con lo descrito anteriormente, entre ellos se destacan:

FM-200® (HFC-227 ea): (1,1,1,2,3,3,3-heptafluoropropano) es manufacturado por Great Lakes Chemical Corporation. Como sucede con la mayoría de los halocarbonos, extingue el fuego al interferir con la producción de radicales libres, necesarias para mantener un incendio y por absorber calor, está listado por UL y cumple con los requerimientos de la NFPA 2001.

El FM-200 tiene un ODP de cero y una vida media en la atmósfera de 32 años. La concentración de diseño es del 7-8 % (contra el 4% del Halón 1301) y es efectivo para suprimir fuegos clase A, B y C.

INERGEN®: Manufacturado por ANSUL® Inc., es una mezcla de nitrógeno, argón y dióxido de carbono. Este agente reduce el contenido de oxígeno del área a proteger a aproximadamente 12.5% e incrementa el dióxido de carbono al 4%.

FK-5-1-12	Dodecafluoruro-2-metilpentano-3-1	CF ₂ CF ₂ C(O)CF(CF ₃) ₂
HCFC	Diclorotrifluoroetano	CHCl ₂ CF ₃
Blend A	HFC-123 (4.75%) Clorodifluorometano HFC-22 (82%) Clorotetrafluoretano HCFC-124 (9.5%) Isopropenil-1-metilciclohexano (3.75%)	CHClF ₂ CHClFCF ₃
HCFC-124	Clorotetrafluoretano	CHClFCF ₃
HFC-125	Pentafluoretano	CHF ₂ CF ₃
HFC-227 ea (FM-200)	Heptafluoropropano	CF₃CHFCF₃
HFC-23	Trifluorometano	CHF ₃
HFC-236fa	Hexafluoropropano	CF ₃ CH ₂ CF ₃
FIC-1311	Trifluoroyoduro	CF ₃ I
IG-01	Argón	Ar
IG-100	Nitrógeno	N ₂
IG-541	Nitrógeno (52%) Argón (40%) Dióxido de carbono (8%)	N ₂ Ar CO ₂
IG-55 (INERGEN)	Nitrógeno (50%) Argón (50%)	N ₂ Ar
HFC	Tetrafluoroetano (86%)	CH ₂ FCF ₃ , CHF ₂ ,
Blend B	Pentafluoretano (9%) Dióxido de carbono (5%)	CF ₃ , CO ₂

Tabla 10. Agentes limpios incluidos en la NFPA 2001.

Existe una mínima diferencia entre los agentes indicados en la NFPA 2001 y los indicados en la ISO 14520 parte 1 (ver la sección de normas y códigos), ya que la ISO 14520 no considera el HCFC-124 y FIC-1311 porque ya no son fabricados industrialmente.

Algunas de las propiedades físicas de los agentes limpios listados en la NFPA-2001 se muestran en la siguiente tabla.

Propiedades Termo físicas de Agentes Limpios (English units)										
		FC-3-1-10	HCFC Blend A	HCFC-124	HFC-125	HFC-227ea	HFC-23	IG-541	IG-55	IG-01
Peso molecular	—	238.03	92.9	136.5	120.2	170.03	70.01	34	33.95	39.9
Boiling point @ 760 mm Hg	°F	28.4	-37.0	12.2	-55.3	2.6	-115.7	-320	-310.2	302.6
Punto de congelación	°F	-198.8	<-161.0	-326.0	-153	-204	-247.4	-109	-327.5	308.9
Temperatura	°F	235.8	256	252	150.8	215	78.6	—	-210.5	188.1
Critical pressure	psia	337	964	524.5	521	422	701	—	602	711
Critical volume	ft ³ /lbm	0.025	0.028	0.0283	1	0.0258	0.0305	—	—	—
Critical density	lbm/ft ³	39.3	36	35.28	35.68	38.76	32.78	—	—	—
Specific heat, liquid @77°F	Btu/lb·°F	0.25	0.3	0.27	0.301	0.2831	0.37	—	—	—
Specific heat, vapor @ constant pressure (1 atm) & 77°F	Btu/lb·°F	0.192	0.16	0.177	0.191	0.2054	0.176	0.195	0.187	0.125
Heat of vaporization at boiling point	Btu/lb	41.4	97	83.2	70.8	57	103	94.7	77.8	70.1
Thermal conductivity of liquid @77°F	Btu/h·ft·°F	0.031	0.052	0.0417	6	0.04	0.045	—	—	—
Viscosity, liquid @ 77°F	lb/ft-hr	0.783	0.508	0.723	0.351	0.443	0.201	—	—	—
Relative dielectric strength @ 1 atm @ 734 mm Hg 77 °F (N2 C1.0)	—	5.25	1.32	1.55	0.955	2	1.04	1.03	1.01	1.01
Solubility of water in agent @ 70 °F	—	0.001% by W	0.12% by W	0.07%	0.07%	0.06%	500 ppm	0.02%	0.01%	0.01%
Vapor pressure @ 77°F	psi	38.8	1.37	56	199	66.4	686	2207	—	—

Tabla 11. Propiedades de Agentes limpios.

Como ya se mencionó, el CO₂ también es utilizado como agente extintor en recintos cerrados; sin embargo, dada su toxicidad, es utilizado en recintos que prácticamente no son ocupados. Su uso es muy común por ejemplo, en sistemas de generación de energía eléctrica. A continuación se mencionan algunas características de este compuesto.

4.3 PROPIEDADES DEL CO₂

El CO₂ como agente no conductor de electricidad puede emplearse en incendios de equipos eléctricos energizados. El CO₂ no deja residuos ya que se vaporiza al estar en contacto con el aire, eliminando la necesidad de limpieza que otros agentes pueden causar. El mecanismo de extinción del CO₂ se basa en la reducción de la concentración del oxígeno y/o de los vapores inflamables, hasta el punto en el que la combustión no puede continuar. Aun cuando existan sistemas de CO₂ de alta y baja presión, se recomienda la utilización de los sistemas de alta presión dada su versatilidad operacional y fácil mantenimiento.

El CO₂ influye sobre varias funciones vitales de los organismos vivos tales como la respiración, dilatación del sistema vascular y el pH de los fluidos corporales. En particular, la concentración del CO₂ en el aire que respiramos, gobierna el intercambio de oxígeno en los pulmones. Al aumentar la concentración de CO₂ en el aire se reduce notablemente el proceso de oxigenación de la sangre. El CO₂ no es un gas tóxico, pero la descarga a concentraciones requeridas para la extinción de incendios (mayor al 34 %) reduce la cantidad de oxígeno y crea serios peligros al personal que se encuentra en los cuartos de control. El personal expuesto a concentraciones mayores del 10% de CO₂ se ve drásticamente disminuido en sus funciones vitales.

Bajo condiciones normales el CO₂ es un gas inodoro, incoloro, con una densidad aproximada 50% mayor que la densidad del aire; se licúa fácilmente por compresión y enfriamiento, puede convertirse en estado sólido por mayor enfriamiento y expansión.

Nivel de exposición	Concentración de CO ₂ en el aire %	Síntomas
Bajo	2-3	Dificultad para respirar, respiración profunda.
Medio	5-7	La respiración se vuelve pesada, sudoración, se acelera el pulso, dolor de cabeza, mareo, disnea (dificultad para respirar), incremento de la frecuencia cardíaca y la presión arterial. Inhalación hasta por una hora sin efectos secundarios.
Alto	10	Problemas de audición, náuseas, vómito, pérdida de conciencia en 30 min.
Alto	12	Inconciencia sufrida en 5 minutos.
Muy alto	20	Inconciencia producida en menos de un minuto
Muy alto	30	Convulsiones, estado de coma y muerte en 5 min.

Tabla 12. Efectos fisiológicos del CO₂

La instalación de sistemas fijos de CO₂ se basará en un análisis de riesgo. Algunos ejemplos de los equipos e instalaciones a proteger son: Salas de transformadores, casetas de interruptores, centros de control de motores, equipos rotativos, venteos y alivios de gases inflamables a la atmósfera, líquidos inflamables y combustibles contenidos en recipientes abiertos, pisos falsos que dispongan de instalaciones eléctricas. A medida que aumenta la temperatura del líquido la presión también aumenta. A medida que aumenta la presión, la densidad de vapor sobre el líquido aumenta. El líquido se expande a medida que la temperatura aumenta y su densidad disminuye. La temperatura crítica del CO₂ se alcanza a los 31 °C (87.8 °F). No puede existir como líquido a Presiones por debajo de 60.4 psi, la cual es la presión del punto triple, donde el CO₂ podría estar presente como sólido, líquido o vapor.

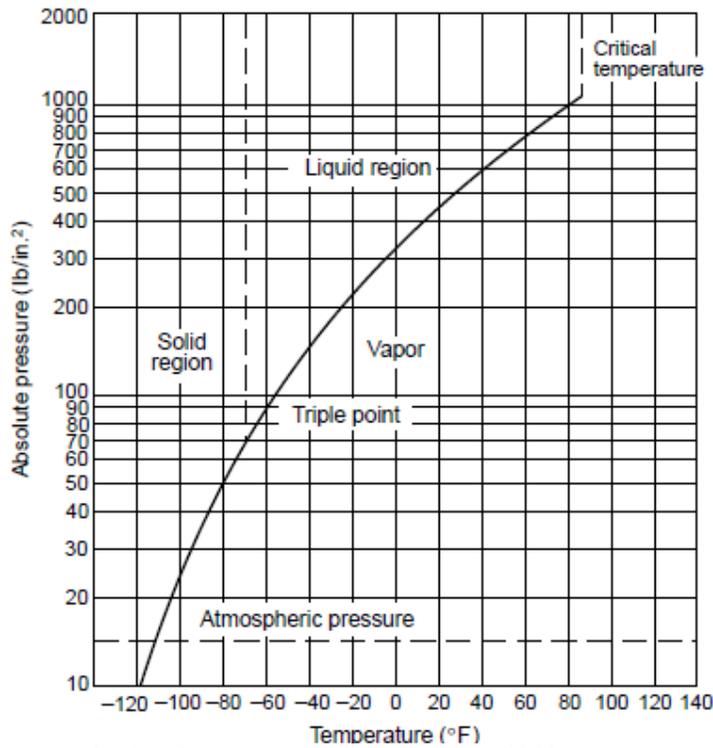


Fig. 25. Diagrama Temperatura - Presión del CO₂

4.4 NORMAS Y CÓDIGOS

A lo largo de los años y derivado de la necesidad de disminuir los accidentes en los centros de trabajo, las empresas, aseguradoras, asociaciones industriales, universidades y centros de investigación, han desarrollado códigos, estándares, normas, Prácticas recomendadas y guías técnicas con el fin disminuir los daños en las instalaciones de trabajo. A continuación se dan las siguientes definiciones:

Código: Grupo de reglas generales o procedimientos sistemáticos para el diseño, fabricación, instalación e inspección, preparada de tal manera que puede ser adoptada por una entidad legal para convertirse en una ley.

Norma (estándar): Documentos preparados por un comité o grupo profesional que contienen los requisitos obligatorios. El usuario es el responsable de la correcta aplicación del mismo. El cumplimiento de una norma no confiere inmunidad ante obligaciones legales.

Prácticas recomendadas: Documentos preparados por un grupo profesional que indican las buenas prácticas de ingeniería, las cuales son opcionales.

Las compañías también desarrollan **guías**, las cuales abarcan métodos de ingeniería considerados como buenas prácticas, sin recomendaciones o requisitos específicos.

Los códigos normalmente utilizados en el diseño de instalaciones no contemplan todos los posibles eventos y escenarios que generan accidentes, por lo tanto la sola aplicación de un código o conjunto de códigos no garantiza la integridad y seguridad de una instalación. Las experiencias a nivel nacional e internacional, han

demostrado en forma evidente la anterior afirmación; razón por la cual algunas organizaciones internacionales han dedicado grandes esfuerzos para el desarrollo de métodos y técnicas conducentes a complementar la aplicación de las prácticas de diseño.

La aplicación exitosa de todo código de ingeniería presupone que todas sus provisiones y requerimientos serán cumplidos completamente y que el sistema es seguro mientras los sistemas de protección operen cuando sea requerido. No obstante, la realidad ha mostrado que tanto la gente como los sistemas de protección son susceptibles a fallas y pueden por tanto permitir o incluso originar la ocurrencia de accidentes.

Específicamente para el diseño de sistemas contra incendio en cuartos de control utilizando agente limpio o dióxido de carbono (CO₂), la normatividad a la que se hace referencia es la siguiente:

4.4.1 Normatividad extranjera

American Petroleum Institute, API	
API-RP 554	Process Instrumentation and control.
API-RP- 752	Management of Hazards Associated with Location of Process Plant Buildings
API-RP- 2001	Fire Protection in Refineries
International Society of Automation, ISA	
ISA-RP60.9-1981	Piping Guide For Control Centers
ISA-RP60.8-1978	Electrical Guide for Control Centers
ISA-RP60.6-1984	Nameplates, Labels, and Tags for Control Centers
ISA-RP60.4-1990	Documentation for Control Centers
ISA-RP60.11-1991	Crating, Shipping, and Handling for Control Centers
ISA-RP60.3-1985	Human Engineering for Control Centers
ISA-RP60.2-1995	Control Center Design Guide and Terminology
ISA-RP60.1-1990	Control Center Facilities
International Organization for Standardization, ISO	
ISO 14520	Gaseous fire-extinguishing systems – Physical properties and system design. Part 1: General Requirements Part 9: HFC227ea extinguishant
ISO 11064	Ergonomic Design of control center
	Part 1: Principles of design of control centers
	Part 2: Principles for the arrangement of control suites.
	Part 3: Control room layout
	Part 4: Layout and dimensions of workstations
	Part 5: Displays and controls
	Part 6: Environmental requirements for control rooms
	Part 7: Principles for the evaluation of control centers
	Part 8: Ergonomic requirements for specific applications
National Fire Protection Association, NFPA	

NFPA 12	Carbon dioxide systems.
NFPA 72	Alarm Code.
NFPA 75	Standard for the Protection of Electronic Computer/Data Processing Equipment.
NFPA 2001	Standard on clean agent fire extinguishing systems. Sistemas de extinción de incendios mediante agentes limpios.
NFPA 101	Código de seguridad Humana.
Center for Chemical Process Safety, CCPS	
1. Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings for External Explosions and Fires.	
2. Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing.	

4.4.2 Normatividad Nacional

Petróleos Mexicanos	
NRF 210	Sistemas de gas y fuego, detección y alarmas.
NRF 10	Espaciamientos mínimos y criterios para la distribución de instalaciones industriales en centros de trabajo de petróleos mexicanos y organismos subsidiarios.
NRF 019	Protección contra incendio en cuartos de control que contienen equipo Electrónico.

La norma NFPA 2001, *Sistemas de extinción de incendios mediante agentes limpios*, describe los requisitos de diseño, instalación y mantenimiento para los sistemas de extinción de incendios mediante agentes limpios. Este trabajo se enfoca principalmente en esta norma.

5 SISTEMAS DE DETECCIÓN Y ALARMA

Cuando se produce un incendio, toda acción que ayude a reducir su impacto está originada por alguna señal. Los sistemas de detección y alarma son el medio de transmitir esta información y por ello son elemento clave en la protección contra incendios de cualquier edificio incluyendo por supuesto los cuartos de control de la plantas de proceso.

La detección y alarma es necesaria para alarmar al personal de la condición de incendio y comenzar con la supresión del incendio de forma automática o manual; cuanto antes se produzca la detección y activación de las alarmas, antes empezará la mitigación de los efectos del incendio.

Desde el momento en que se inicia un incendio aparecen múltiples cambios ambientales mediante los cuales puede detectarse su presencia; los elementos más comunes de un incendio que pueden ser detectados son: el calor, el humo y la radiación luminosa.

Un sistema de detección y alarma de incendio está constituido fundamentalmente por los siguientes componentes: un tablero central de control, fuentes de alimentación eléctrica, detectores de incendio, estaciones manuales de alarma y alarmas audibles y visibles.

5.1 EL TABLERO CENTRAL DE CONTROL

Es el componente neurálgico de un sistema de detección y alarma de incendio, el cual alimenta y supervisa todos los dispositivos y circuitos de detección y alarma. Este tablero contiene internamente los circuitos necesarios para recibir, convertir y emitir las señales de alarma en forma audible y visible.

El tablero debe contener luces para indicar: la operación normal, señales de alarma de incendio, señal de falla, la cual cubre el nivel de descarga de baterías, corto circuito en el tablero, desconexión de los detectores y/o difusores de sonido, rotura de cable en el circuito de detección, alarma sonora, etc.

Este tablero tendrá controles para iniciar y apagar alarmas por zonas, probar señales de alarmas, cancelar alarmas audibles y reponer el sistema. Así mismo deberá tener la capacidad de transmitir instrucciones verbales.

5.2 DETECTORES DE INCENDIO

En función del efecto físico-químico en que se basa su activación, los detectores de incendio se clasifican en detectores de calor, detectores de humo y detectores de llama.

5.2.1 Detectores de Humo

Fundamentales en la detección temprana de incendios en recintos cerrados, con cámaras sensibles que utilizan diferentes principios de operación para detectar la presencia de partículas de combustión (humo), visibles o invisibles que se desprenden en los incendios, activando las alarmas audibles y visibles, para brindar el tiempo que se determine para que el personal evacue las instalaciones antes de que se propague el fuego y activarse los sistemas de supresión.

El detector tiene cualquiera de los dos principios siguientes para llevar a cabo la detección de humo:

- a) Principio de detección fotoeléctrico.
- b) Principio de detección por Ionización.

a) Detector de humo tipo fotoeléctrico

El principio de detección se basa en la dispersión de un haz de luz que incide sobre un elemento fotosensible. Cuando las partículas de humo atraviesan el haz de luz, una parte de los rayos son dispersados sobre el sensor fotosensible. Este tipo de detector es más sensible a las partículas visibles producidas por la mayoría de las combustiones sin llama y es menos sensible a las partículas más pequeñas típicas de las combustiones con llama al igual que al humo de coloración negra.

Deben detectar incendios de combustión lenta que se caracterizan por partículas en la escala de tamaño de 0,3 a 10 micras.

El detector debe ser capaz de trabajar con:

- a) Un rango de temperatura ambiental entre 0 a 49 °C (32 a 120 °F).
- b) Una humedad relativa de 93 por ciento (sin condensación).
- c) Una velocidad de aire de 1,5 m/s (300 ft/min).
- d) Un rango de voltaje de operación de 18 a 30 V c.c., con 24 V c.c., nominales.
- e) Un área de cobertura de 81 m² (871,87 ft²) como máximo, en condiciones ideales e igual o menor a 42 m² (452,08 ft²) en áreas críticas.

b) Detector de humo tipo iónico

Este dispositivo se debe utilizar en áreas cerradas, registra incendios rápidos con flamas, son sensibles a partículas invisibles (de tamaño menor a 1 micrón) producidas por la mayoría de los incendios de flama. Son menos sensibles a partículas de mayor tamaño, lo cual es una característica de la mayoría de los incendios sin flama.

Deben contar con una cámara típica de ionización que consiste de dos placas eléctricamente cargadas y una fuente radioactiva (menor a 1 microgramo) que típicamente es el Americio 241 para ionizar aire entre dichas placas. Este isótopo radioactivo emite partículas alfa (núcleos de helio de alta energía) durante siglos. Debido a la gran capacidad de ionizar el aire de las partículas alfa, solo una hoja de papel o unos 7 cm de aire son suficientes para absorberlas. Esta alta capacidad de ionización hace posible obtener una corriente eléctrica entre los dos electrodos que se colocan cerca de la fuente.

Cuando el humo entra en la cámara de ionización, las partículas alfa quedan prácticamente inmovilizadas por los productos de la combustión, disminuyendo notablemente la corriente eléctrica. A pesar que en términos relativos los cambios en la corriente sean importantes, los valores absolutos son bajísimos, del orden de 10-10 A. Por lo tanto se requieren dispositivos amplificadores de corriente con una extremadamente alta resistencia de entrada.

Estos detectores son del tipo:

- a) Detección de humo por cámara típica de ionización.
- b) Detección de humo por doble cámara de ionización.

Detectores de fuego	
De flama	<ul style="list-style-type: none"> • Ultra violeta • Infrarrojo • Combinación UV/IR • IR multiespectro • Óptico visual
De humo	<ul style="list-style-type: none"> • Fotoeléctrico • Iónico • Combinación iónico fotoeléctrico
De calor	<ul style="list-style-type: none"> • Termostático • Termovelocimétrico • Tapón fusible

Prácticamente deben ser capaces de trabajar con las condiciones que se mencionaron para el caso de los detectores de humo tipo fotoeléctrico.

5.2.2 Detector de calor

Este dispositivo se utiliza para detectar el calor en intervalos de temperatura predeterminados. Las áreas que deben ser protegidas con detectores de calor son: cocina, comedor, trincheras para cableado cámara plena y áreas de turbo maquinaria principalmente.

Éstos pueden ser activos y/o pasivos. Activos son los que llevan a cabo una acción para combatir el fuego (rociadores) de acuerdo a ISO 13702, mientras que los Pasivos, no actúan, únicamente alarman, enviando una señal al sistema de gas y fuego, además de contar con un sistema de eliminación de falsas alarmas.

Se clasifican de la siguiente manera:

- 1) Detectores termostáticos: Reaccionan cuando la temperatura alcanza un valor determinado, los cuales se clasifican en:
 - a) Lámina bimetálica: Formado por una lámina bimetálica conectada a un contacto fijo; la distancia de deformación de la lámina determina el punto de ajuste del detector.
 - b) Membrana bimetálica: Formado por una membrana bimetálica cóncava que al calentarse cambia a convexa.
 - c) Cable termosensible (tipo lineal): Formado por un cable (protegido contra fallas mecánicas) de dos o más conductores metálicos planos o trenzados y separados por un elemento termosensible, el cual se funde a un valor prefijado de temperatura, permitiendo el contacto entre dos conductores.
 - d) Tapón fusible (puntual): Está formado por un conector metálico bloqueado por un metal fundente, conectado a una tubería presurizada con aire de instrumentos que cuando el metal se funde por acción del calor, el aire escapa proporcionando una caída de presión lo que provoca que el sistema de protección se active, operan en puntos específicos.
 - e) Ducto neumático de tubería de plástico (lineal): Funciona de la misma manera que el anterior, con la diferencia de que el calor funde parte del ducto de plástico, el cual debe sustituirse después del incendio.
 - f) Ampolla de cuarzo: Formado por una ampolla de cuarzo que contiene un líquido de alta dilatación térmica, instalado en la descarga de un aspersor, cuando se alcanza una temperatura prefijada, la ampolla se rompe permitiendo la salida de agua contra incendio.
- 2) Detectores termovelocimétricos: Reaccionan por diferencia de temperatura (de 7 °C a 8° C por minuto). Se basan en la diferencia de respuesta de dos elementos o componentes del dispositivo sensor ante un aumento de temperatura superior a un nivel determinado.
- 3) Detectores combinados: Combinan las ventajas de los dos anteriores esto es, actúa por tasa de aumento (termovelocimétrico) y también actúa por temperatura fija (termostático).
- 4) Detectores compensados (termostáticos): A diferencia de los térmicos combinados, opera a bajas velocidades de incremento de temperatura y se dividen en:

- a) Puntuales: Son los que cubren un espacio definido.
- b) Lineales: Son los que cubren una longitud en forma de circuito.

Los detectores compensados (termostáticos) deben seleccionarse en función a la temperatura esperada en el lugar de su instalación, de acuerdo a la temperatura del código de colores conforme a 5.6.2 de NFPA 72 o equivalente como se indica en la tabla 3:

Código de color	Clasificación de temperaturas	Intervalo de temperatura °C	Máximo de temperatura en el techo °C
Sin color	Común	58-79	38
Blanco	intermedia	80-121	66
Azul	Elevada	122-162	107
Rojo	Muy elevada	163-201	149
Verde	Extra elevada	205-259	191
Naranja	Ultra elevada	260-302	246

Tabla 12. Temperaturas de detectores termostáticos

Los detectores de calor, son generalmente más confiables que otros tipos de detectores por su forma de activación y menor requerimiento de calibración y mantenimiento. Sin embargo, su velocidad de respuesta es inherentemente lenta, por lo que su instalación es adecuada en áreas donde no se requiere una alta velocidad de respuesta.

El tipo de detector de calor por velocidad de incremento de temperatura, presenta una respuesta más rápida que el de temperatura fija.

5.2.3 Detectores de llama

Son dispositivos sensibles a la radiación infrarroja (IR) o ultravioleta (UV), emitidas por las llamas del incendio.

a) Detectores Ultravioleta (UV)

Responden a radiaciones con longitud de onda menor de 4,000 angstroms. La velocidad de respuesta de estos detectores es prácticamente instantánea; sin embargo son sensibles también a otro tipo de radiación ultravioleta no procedentes de incendio tales como tormentas eléctricas; radiaciones gama y X, procedentes de equipos para ensayos no destructivos; arcos de soldadura, etc. Cuando se instalen en exteriores, deberá utilizarse un diseño en zona cruzada cuando los mismos activen sistemas automáticos de extinción de incendios o sistemas de paro de emergencia.

b) Detectores infrarrojos (IR)

Responden a radiaciones mayores a los 7,700 A. En general se limita la sensibilidad del detector a una estrecha banda alrededor de 4.3 micrones (longitud de onda de emisión del CO₂) a fin de evitar la respuesta a la radiación solar. Estos detectores están propensos a falsas alarmas generadas por destellos, reflejos de luces o equipos calientes.

c) Detectores combinados (UV/IR)

Debe detectar la radiación ultravioleta e infrarroja producida por un fuego en el ambiente, por medio de foto sensores independientes para cada una de las dos bandas requeridas. El elemento sensor debe funcionar

basándose en el principio fotoeléctrico, a través del procesamiento dinámico de la señal en las bandas ultravioleta e infrarrojo y utiliza una señal combinada para indicar la presencia de fuego.

d) Detectores duales infrarrojo

El detector dual IR-IR posee dos sensores, los cuales responden a longitudes de onda diferentes dentro del espectro infrarrojo (3.8 y 4.3 micrones). Uno de ellos coincide con la banda de emisión infrarroja del dióxido de carbono caliente y el otro actúa libre de dicha banda. Esta característica le permite diferenciar entre una llama debida a incendios de hidrocarburos y cualquier otra fuente de radiación infrarroja.

5.2.4 Ubicación de los detectores de humo y calor

Los detectores de incendio independientemente del tipo que sean deberán ubicarse y distribuirse en el área a proteger de tal forma que se garantice su activación oportuna en la fase incipiente del incendio, teniendo en cuenta las buenas prácticas de ingeniería y las recomendaciones del fabricante. Entre los factores a considerar para la ubicación de los detectores se encuentran: características de combustión del material, sensibilidad del detector, geometría del área protegida, temperatura ambiente, corrientes de aire y posibles obstrucciones. A continuación se muestran de forma general la ubicación y distribución de los detectores, la letra “S” es la distancia de separación indicada por el fabricante y en ningún caso deberá de ser mayor a la establecida.

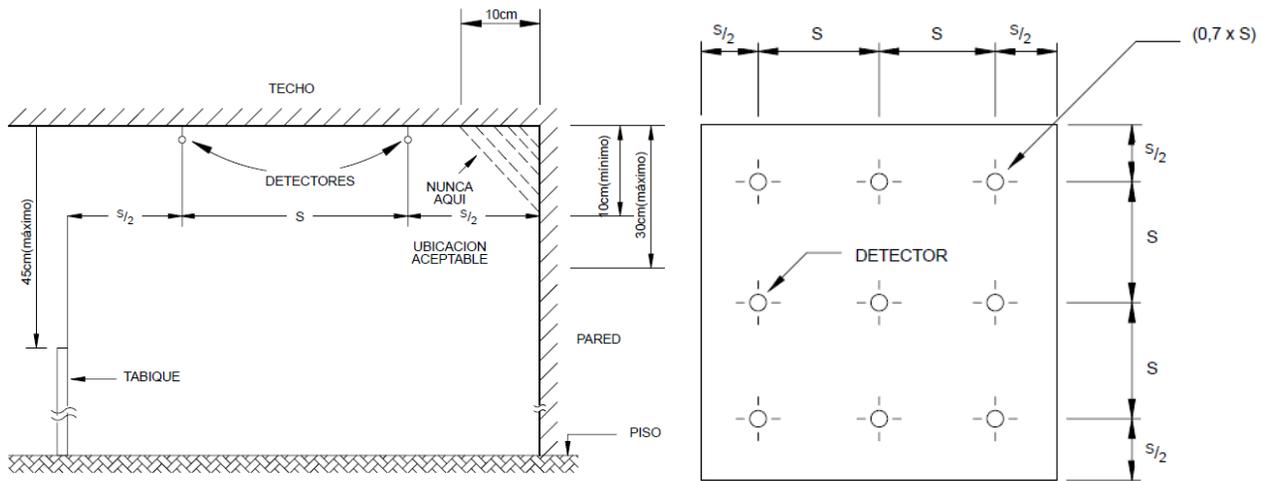


Fig. 26. Ubicación de los detectores de humo y calor.

5.3 ALARMAS AUDIBLES Y VISIBLES

Las alarmas requeridas para alertar al personal que se encuentra dentro y en los alrededores del cuarto de control, deben ser audibles y visibles y deben proporcionar la información necesaria sobre la anomalía detectada para cada tipo de riesgo (fuego, pre-alarma de fuego, aborto del disparo automático, falla y prueba) con distintos tonos y luminarias con colores de lente.

La alarma sonora debe tener la capacidad de ser silenciada una vez que haya confirmado el alcance de la emergencia, mientras que la alarma luminosa debe permanecer activada durante todo el evento, hasta que se restablezca a las condiciones normales.

Alarmas en instalaciones con supresión de CO₂ y Agente limpio				
Riesgo/mensaje	Tono	Frecuencia (Hz)	Modulación (Hz)	Lugar de alarma
Fuego	Sirena	500-1000	0.3	Dentro y fuera del cuarto de control
Pre-alarma de fuego	Aullido	500-1000	2.5	
Aborto del disparo automático	Pulso	475 +/- 25	4.5	
Falla	Gorgoreo	500-100	6.0	
Prueba	Continuo	700 +/- 100		

Alarmas en instalaciones con supresión de CO₂ y Agente limpio		
Verde	Continuo	Condición en automático (normal)
Rojo	Intermitente	Sistema disparado (agente extintor activado)
Ámbar	intermitente	Sistema inhibido (en operación manual) y/o falla del sistema
Alarmas en cuartos de baterías		
Ámbar	intermitente	Peligro alta concentración de gas hidrógeno

Fig. 27. Características de alarmas visibles y audibles

Las alarmas visibles de los cuartos de control deben ser de una sola pieza y se deben instalar lo más cercano a las puertas de acceso tanto en el interior de los cuartos como en su parte exterior.

El sistema de alarma se debe activar automáticamente, cuando el sistema de gas y fuego identifica la presencia de gas y/o fuego en la instalación, esta activación puede ser por zona o en la totalidad de la instalación, la activación de las alarmas también se puede hacer por medio de estaciones manuales localizadas en número suficiente en lugares dentro de la instalación.

En el cuarto de control, las señales de alarmas audibles y visibles, se deben dar a través de los dispositivos físicos que se encuentran en el cuarto y que forman parte integral del sistema de supresión de fuego del propio cuarto de control.

5.4 ESTACIONES MANUALES DE ALARMA

Las estaciones manuales de alarma son dispositivos de señalización que permiten notificar una situación de peligro y/o incendio en una instalación; al ser accionadas transmitan una señal de alarma al sistema de gas y fuego. Se debe operar con una sola mano, y no debe contar con un elemento que pudiera requerir utilizar las dos manos o herramienta específica.

6 DISEÑO DE LOS SISTEMAS CONTRA INCENDIO CON AGENTE LIMPIO LIMPIO

La estructura básica de un sistema de agente limpio de inundación total consiste en cilindros que contienen el agente limpio, cabezas de control que se instalan directamente sobre el cilindro y que pueden ser eléctricas o manuales, así mismo una red de tuberías que distribuyen el agente limpio y que finalmente mediante boquillas, descargan el agente limpio en el área a proteger.

Los sistemas pueden ser de dos tipos: ADS y EDS. El sistema EDS presuriza el cilindro con nitrógeno a 360 psi a 70 °F, mientras que en el sistema ADS la presurización se lleva a cabo también con nitrógeno pero con un contenedor adicional. Este trabajo se enfoca a los sistemas EDS.

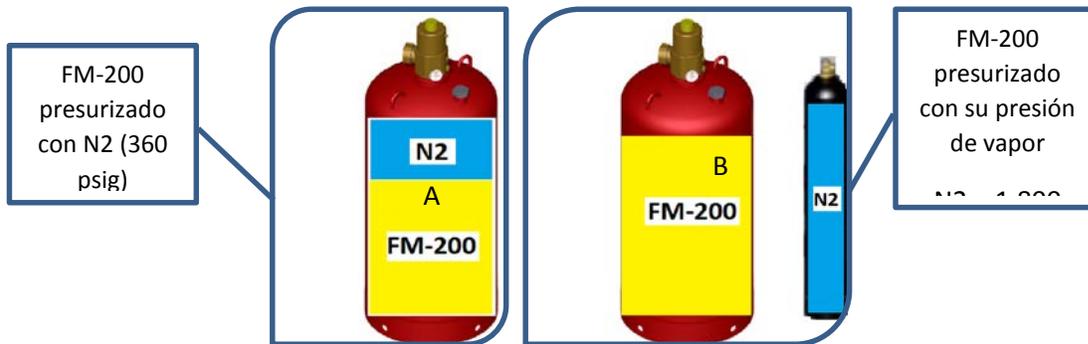


Fig. 28. Sistemas de agente limpio.

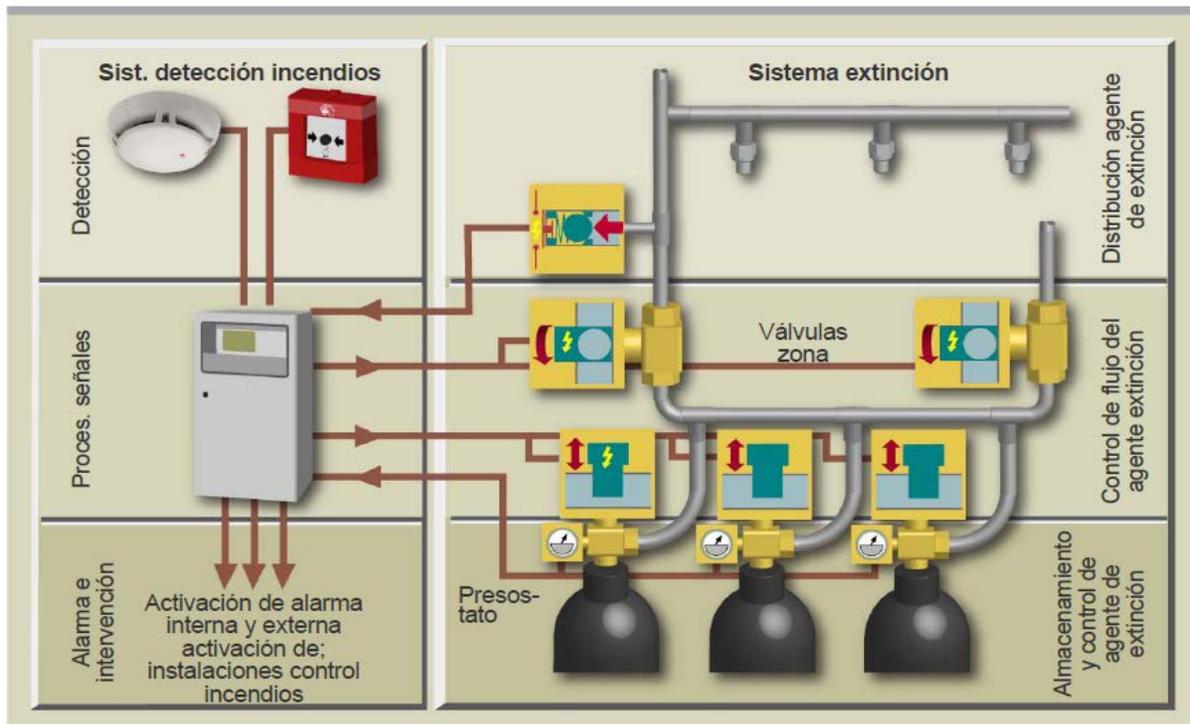


Fig. 29. Componentes de los sistemas de inundación total con agente limpio.

Estos sistemas son similares para los sistemas con los diferentes agentes limpios. La cantidad de agente limpio requerido no se ve afectada de un sistema a otro. Las figuras 30 y 31 muestran los componentes principales de los sistemas de supresión a inundación total.

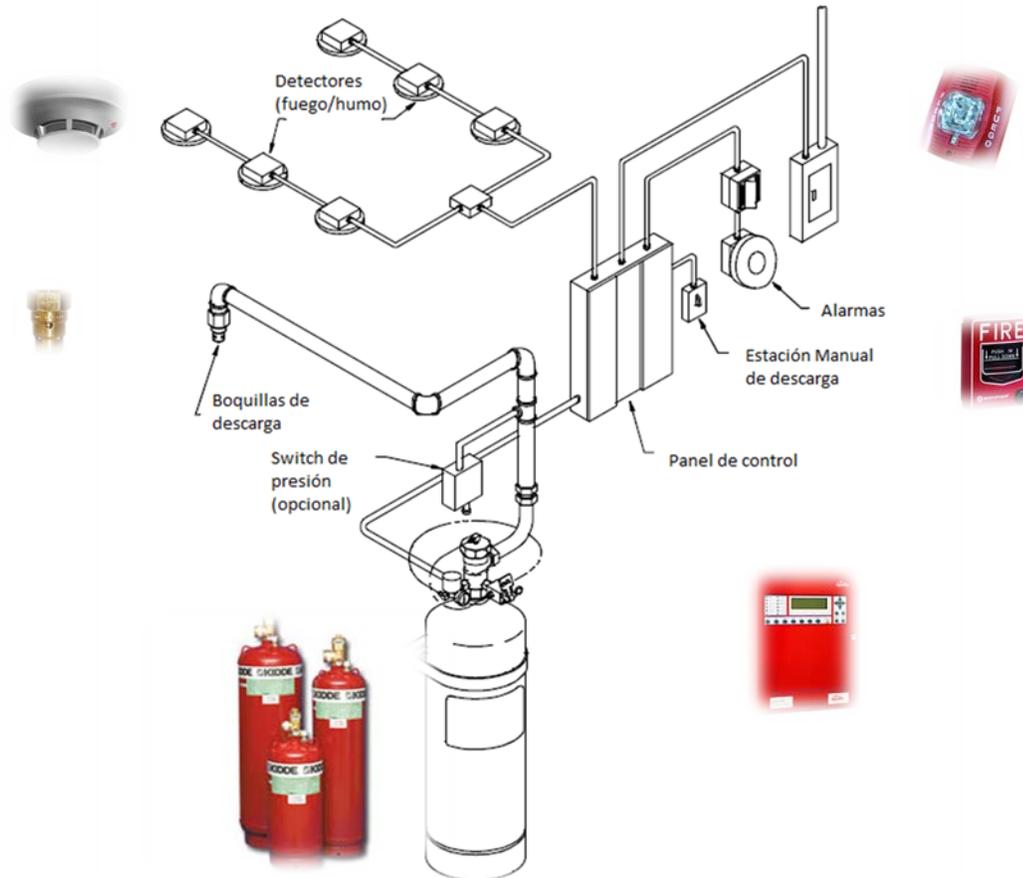


Fig. 30. Arreglo de un sistema de inundación total con agente limpio.

El diseño del sistema debe basarse en los requerimientos de la NFPA-2001, de manera resumida los pasos a seguir para diseñar el sistema son los siguientes; el diseño del sistema que se plantea en este trabajo se realiza mediante software especializado.

◆ Aplicación

1. Determinar la concentración de diseño requerida para eliminar el peligro.
Para sistemas que protegerán incendios de clase A o clase C que incorporen mecanismos de actuación automática, el diseño mínimo es de 6.25 % vol. de concentración.
2. Determinar la máxima y mínima temperatura del lugar.
3. Determinar el volumen del peligro.
4. Determinar el requerimiento de agente limpio adicional por fugas o aire acondicionado.

◆ Cantidad de agente limpio requerido

5. Mediante las tablas indicadas en la NFPA-2001, calcular la cantidad de agente limpio requerido. Por otro lado, al utilizar el software, este dato se obtiene al definir el volumen a proteger y al definir la concentración de diseño a utilizar a la mínima temperatura del lugar.
- ◆ **Componentes requeridos**
 6. Determinar los componentes requeridos para el funcionamiento óptimo del sistema
 - a. Número de cilindros y tamaño.
 - b. Soportes de los cilindros
 - c. Equipos requeridos para la detección y control.
- ◆ **Localización de boquillas de descarga**
 7. Selección y localización de boquillas de descarga.
 - a. Tipo de boquilla (180° y 360°).
 - b. Altura máxima del techo 4.8 m (16 ft) y mínimo 0.3 m (1 ft).
 - c. Área de cobertura
 - d. Consideraciones especiales de peligros en el diseño.
- ◆ **Localización de los cilindros**
 8. Localización de los cilindros en base a su número, condiciones ambientales, accesibilidad, etc.
- ◆ **Localización de tubería**
 9. Localización de tubería en base a la localización de boquillas
- ◆ **Dimensionamiento de tuberías y distribución**
 10. Isométrico de tuberías
 11. Dimensiones de todas las secciones de tubería requeridas.
 12. Localizar los accesorios de las tuberías
 13. Indicar todos los cambios de elevación.

6.1 CRITERIOS DE DISEÑO

a) Concentración del agente limpio

De acuerdo a la NFPA-2001, la concentración de agente limpio debe ser igual o menor al NOAEL (*No Observable Adverse Effect Level*) el cual es el nivel de exposición experimental que representa el máximo nivel probado en el cual no se observan efectos tóxicos. El NOAEL para el FM-200 es de 9%.

La cantidad a emplear de agente limpio se calcula mediante la siguiente expresión, referida en la NFPA-2001.

$$W = \frac{V}{s} \left(\frac{c}{100 - c} \right)$$

En donde:

W= Cantidad de agente limpio [lb (kg)]

V= volumen de la instalación a proteger [ft³ (m³)]

C= concentración de diseño (%vol.)

S= volumen específico del agente limpio [ft³/lb (m³/kg)]

Es posible calcular el valor de s mediante:

$$s = 1.885 + 0.0046t \text{ (sistema inglés)}$$

$$s = 0.1269 + 0.0005t \text{ (sistema SI)}$$

t= temperatura [°F (°C)]

Otra forma de calcular la cantidad de agente limpio es mediante la siguiente tabla, en la cual se busca el valor de s y se sustituye en la fórmula indicada anteriormente.

Temperatura T (° F)	Vol. Espec. Agente Limpio (ft ³ /lb)	Concentraciones del Agente Limpio (% vol.). (U.S. units)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	1.9264	0.0331	0.0391	0.0451	0.0513	0.0570	0.0642	0.0708	0.0776	0.0845	0.0916
20	1.9736	0.0323	0.0381	0.0441	0.0501	0.0563	0.0626	0.0691	0.0757	0.0825	0.0894
30	2.0210	0.0316	0.0372	0.0430	0.0489	0.0550	0.0612	0.0675	0.0739	0.0805	0.0873
40	2.0678	0.0309	0.0364	0.0421	0.0478	0.0537	0.0598	0.0659	0.0723	0.0787	0.0853
50	2.1146	0.0302	0.0356	0.0411	0.0468	0.0525	0.0584	0.0645	0.0707	0.0770	0.0835
60	2.1612	0.0295	0.0348	0.0402	0.0458	0.0514	0.0572	0.0631	0.0691	0.0753	0.0817
70	2.2075	0.0289	0.0341	0.0394	0.0448	0.0503	0.0560	0.0618	0.0677	0.0737	0.0799
80	2.2538	0.0283	0.0334	0.0386	0.0439	0.0493	0.0548	0.0605	0.0663	0.0722	0.0783
90	2.2994	0.0278	0.0327	0.0378	0.0430	0.0483	0.0538	0.0593	0.0650	0.0708	0.0767
100	2.3452	0.0272	0.0321	0.0371	0.0422	0.0474	0.0527	0.0581	0.0637	0.0694	0.0752
110	2.3912	0.0267	0.0315	0.0364	0.0414	0.0465	0.0517	0.0570	0.0625	0.0681	0.0738
120	2.4366	0.0262	0.0309	0.0357	0.0406	0.0456	0.0507	0.0560	0.0613	0.0668	0.0724
130	2.4820	0.0257	0.0303	0.0350	0.0398	0.0448	0.0498	0.0549	0.0602	0.0656	0.0711
140	2.5272	0.0253	0.0298	0.0344	0.0391	0.0440	0.0489	0.0540	0.0591	0.0644	0.0698
150	2.5727	0.0248	0.0293	0.0338	0.0384	0.0432	0.0480	0.0530	0.0581	0.0633	0.0686
160	2.6171	0.0244	0.0288	0.0332	0.0378	0.0425	0.0472	0.0521	0.0571	0.0622	0.0674
170	2.6624	0.0240	0.0283	0.0327	0.0371	0.0417	0.0464	0.0512	0.0561	0.0611	0.0663
180	2.7071	0.0236	0.0278	0.0321	0.0365	0.0410	0.0457	0.0504	0.0552	0.0601	0.0652
190	2.7518	0.0232	0.0274	0.0316	0.0359	0.0404	0.0449	0.0496	0.0543	0.0592	0.0641
200	2.7954	0.0228	0.0269	0.0311	0.0354	0.0397	0.0442	0.0488	0.0535	0.0582	0.0631
Temperatura T (° C)	Vol. Espec. Agente Limpio (m ³ /kg)	Concentraciones del Agente Limpio (% vol.). (unidades SI)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-10	0.1215	0.5253	0.5761	0.7157	0.8140	0.9145	1.0172	1.1223	1.2298	1.3398	1.4524
-5	0.1241	0.5143	0.5641	0.7007	0.7969	0.8953	0.9959	1.0988	1.2041	1.3118	1.4220
0	0.1268	0.5034	0.5521	0.6858	0.7800	0.8763	0.9747	1.0754	1.1784	1.2838	1.3917
5	0.1294	0.4933	0.5410	0.6720	0.7643	0.8587	0.9551	1.0538	1.1548	1.2580	1.3638
10	0.132	0.4836	0.5303	0.6588	0.7493	0.8418	0.9363	1.0331	1.1320	1.2333	1.3369
15	0.1347	0.4739	0.5197	0.6456	0.7342	0.8249	0.9176	1.0124	1.1093	1.2085	1.3101
20	0.1373	0.4649	0.5098	0.6333	0.7203	0.8093	0.9002	0.9932	1.0883	1.1857	1.2853
25	0.1399	0.4563	0.5004	0.6216	0.7069	0.7942	0.8835	0.9747	1.0681	1.1636	1.2614
30	0.1425	0.4479	0.4912	0.6102	0.6940	0.7797	0.8673	0.9569	1.0486	1.1424	1.2384
35	0.1450	0.4402	0.4828	0.5997	0.6821	0.7663	0.8524	0.9404	1.0305	1.1227	1.2170
40	0.1476	0.4325	0.4743	0.5891	0.6701	0.7528	0.8374	0.9239	1.0124	1.1029	1.1956
45	0.1502	0.4250	0.4660	0.5789	0.6585	0.7398	0.8229	0.9079	0.9948	1.0838	1.1749
50	0.1527	0.4180	0.4584	0.5695	0.6477	0.7276	0.8094	0.8930	0.9786	1.0661	1.1557
55	0.1553	0.4110	0.4507	0.5599	0.6368	0.7155	0.7959	0.8781	0.9622	1.0482	1.1363
60	0.1578	0.4045	0.4436	0.5511	0.6267	0.7041	0.7832	0.8642	0.9469	1.0316	1.1183
65	0.1604	0.3979	0.4364	0.5421	0.6166	0.6927	0.7705	0.8501	0.9316	1.0149	1.1002
70	0.1629	0.3918	0.4297	0.5338	0.6071	0.6821	0.7587	0.8371	0.9173	0.9993	1.0833
75	0.1654	0.3859	0.4232	0.5257	0.5980	0.6718	0.7473	0.8244	0.9034	0.9842	1.0669
80	0.1679	0.3802	0.4169	0.5179	0.5890	0.6618	0.7361	0.8122	0.8900	0.9696	1.0510
85	0.1704	0.3746	0.4108	0.5103	0.5804	0.6521	0.7253	0.8003	0.8769	0.9553	1.0356

Adicionalmente a la concentración de diseño, la NFPA 2001 recomienda cantidades adicionales de agente limpio para compensar alguna condición especial que pueda afectar la eficiencia de extinción; para ello se utilizan los factores de diseño; entre los cuales podemos considerar el factor del uso de las Tees y el factor de corrección atmosférica.

Altitud		Presión		Factor
ft	km	psia	mm Hg	
-3000	-0.91	16.25	840.14	1.11
-2000	-0.61	15.71	812.22	1.07
-1000	-0.30	15.23	787.40	1.04
0	0.00	14.71	760.52	1
1,000	0.30	14.18	733.12	0.96
2,000	0.61	13.64	705.20	0.93
3,000	0.91	13.12	678.31	0.89
4,000	1.22	12.58	650.39	0.86
5,000	1.52	12.04	622.48	0.82
6,000	1.83	11.53	596.11	0.78
7,000	2.13	11.03	570.26	0.75
8,000	2.44	10.64	550.10	0.72
9,000	2.74	10.22	528.38	0.69
10,000	3.05	9.77	505.12	0.66

Tabla 13. Factor de corrección por altitud

Cantidad de Tees	Sistemas con Halocarbon	Sistemas con Gases inertes
0-4	0	0
5	0.01	0
6	0.02	0
7	0.03	0
8	0.04	0
9	0.05	0.01
10	0.06	0.01
11	0.07	0.02
12	0.07	0.02
13	0.08	0.03
14	0.09	0.03
15	0.09	0.04
16	0.1	0.04
17	0.11	0.05
18	0.11	0.05
19	0.12	0.06

La NFPA también establece un factor de seguridad y depende del tipo de incendio a sofocar.

b) Tiempos de descarga

Es recomendable que la descarga del agente limpio se lleve a cabo en máximo 10 s y se recomienda mantener la concentración durante 10 minutos.

c) Sistemas balanceados y no balanceados

Un sistema de tubería balanceado es aquel en el que las distancias entre el contenedor y cada una de las boquillas es la misma; además el flujo de descarga de las boquillas también es el mismo en cada una de ellas. Todo aquel sistema que no cumpla con los criterios anteriores, se considera un sistema no balanceado. En los diseños se busca en principio tener un sistema balanceado.

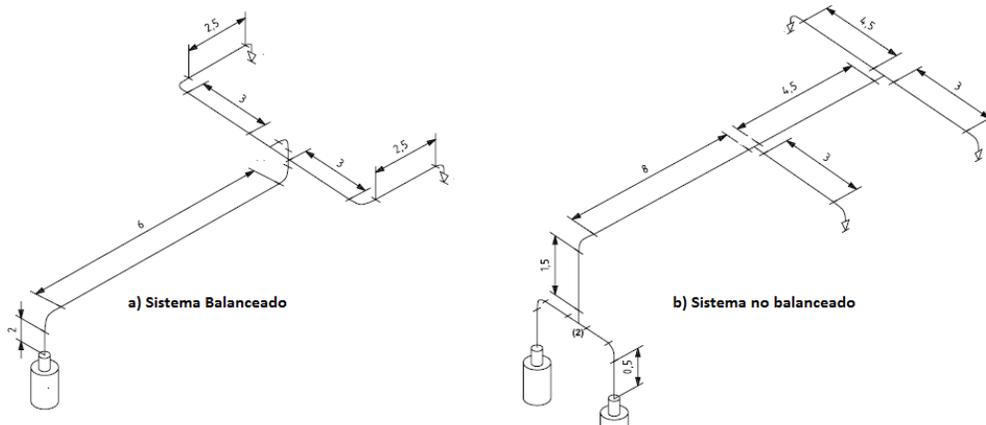


Fig. 31. Sistema Balanceado y no balanceado

d) Manifold

Un manifold es un arreglo de tubería y accesorios que permite conectar dos o más fuentes de agente limpio permitiendo la descarga simultánea de agente limpio mediante una misma red de tubería. Existen varios tipos y son usados para cumplir con una necesidad de diseño del sistema, los principales son: Centro, Fin y tipo H.

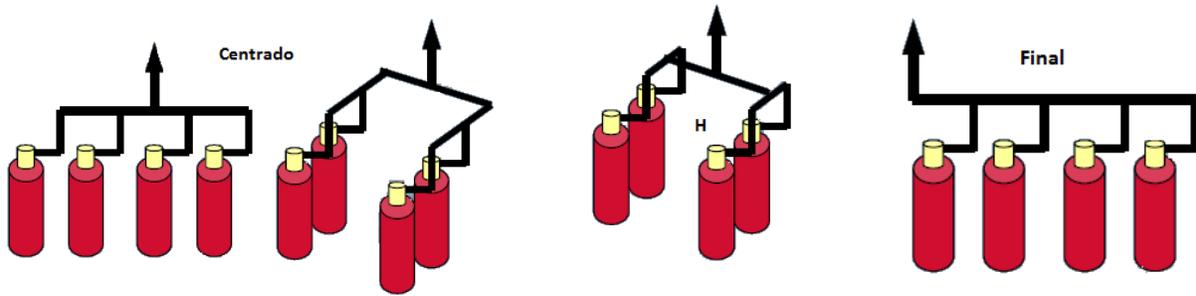


Fig. 32. Arreglos de manifold

Tipo Centrado: Puede ser utilizado en sistemas Principal/reserva o solo en sistemas con cilindro principal. El número de cilindros tiene que ser par. La salida del agente se coloca en el centro con la mitad de cilindros por cada lado.

Tipo Final: No se usan en sistemas principal/reserva y pueden utilizarse cualquier número de cilindros. La salida del agente es colocada en cualquier extremo.

Tipo H: Se utilizan en sistemas múltiples de cuatro cilindros siguiendo un patrón de arreglo "H" y puede utilizarse en sistemas principal/reserva. La salida del agente se coloca al centro de la H en forma ascendente o descendente.

De acuerdo a los requerimientos de la NFPA 2001, para un sistema que contiene múltiples cilindros y que suministren el agente limpio al mismo manifold, deben considerarse del mismo tamaño y deben contener la misma cantidad de agente limpio.



Fig. 33. Requerimientos de los cilindros en manifolds

Cuando los cilindros sean conectados a un manifold es necesario considerar en el diseño una válvula check con el fin de prevenir pérdidas de agente por fugas y garantizar la seguridad del personal si el sistema es operado cuando algún cilindro haya sido retirado para su mantenimiento.

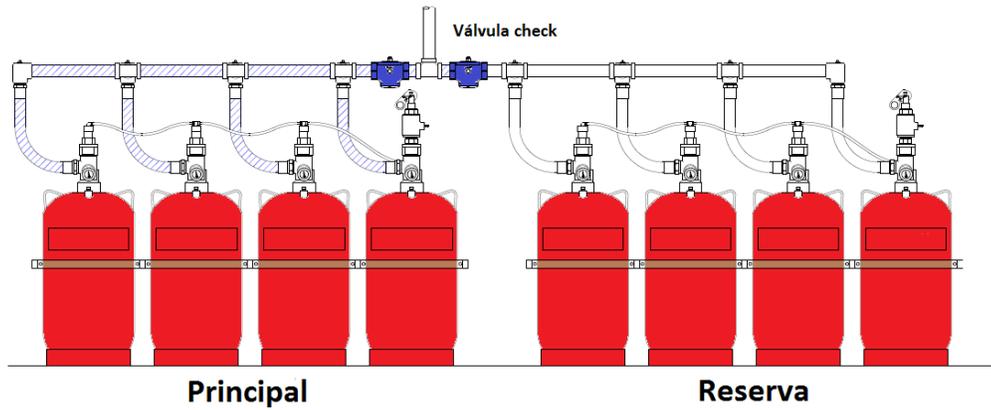


Fig. 34. Arreglo típico con válvula check en sistemas principal y reserva

El uso de sistemas Principal reserva, se utiliza para que en todo momento el recinto este protegido aún y cuando se haya llevado a cabo una descarga de agente limpio.

e) Tipos de "Tee"

Los parámetros a considerar para la selección de "T" de se centran en lo siguiente:

Orientación: La entrada es horizontal o vertical, las salidas necesariamente debe ser horizontal

Tipo: Tipo Bull o Tipo Side.

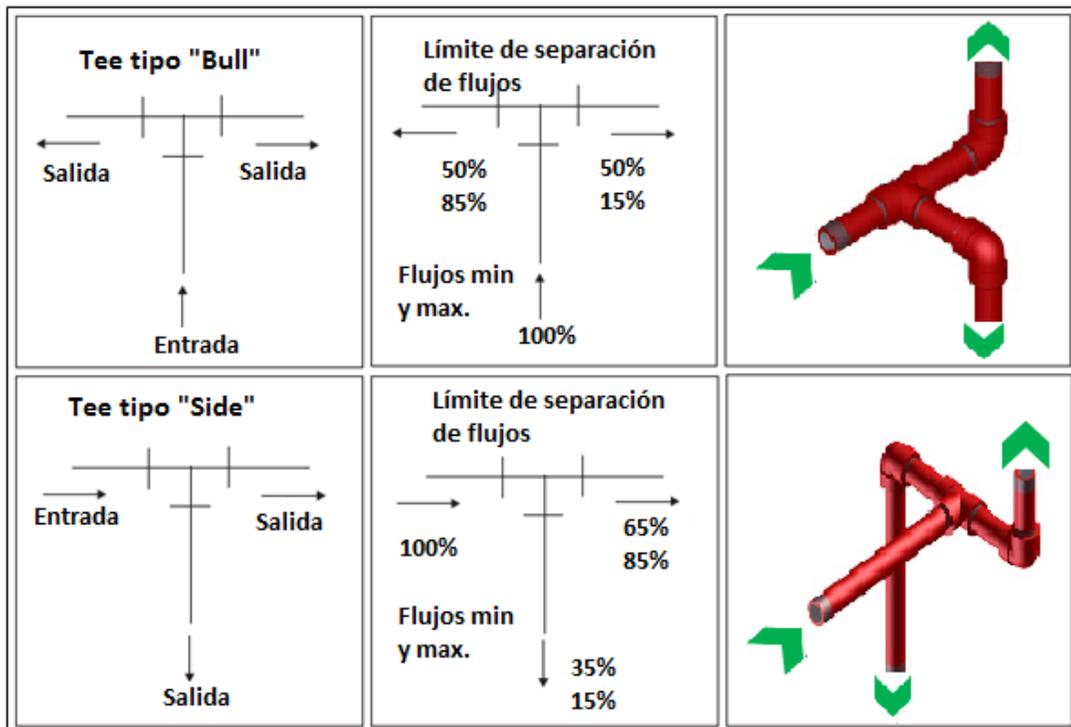


Fig. 35. Tipos de "Tees" y sus características

f) Boquillas de descarga

La presión mínima de descarga de cada una de las boquillas debe ser de 74 Psig para asegurar una dispersión adecuada del agente limpio en el aire del recinto a proteger.

Con lo que respecta a la altura de boquillas se indica lo siguiente: Si las boquillas se localizan por arriba, por abajo o en ambas posiciones (arriba y abajo) de la descarga del contenedor, la diferencia de altura máxima entre el contenedor y las boquillas (del punto más alto al punto más bajo incluyendo la parte inferior del cilindro) no debe exceder 9.1 m (30 ft).

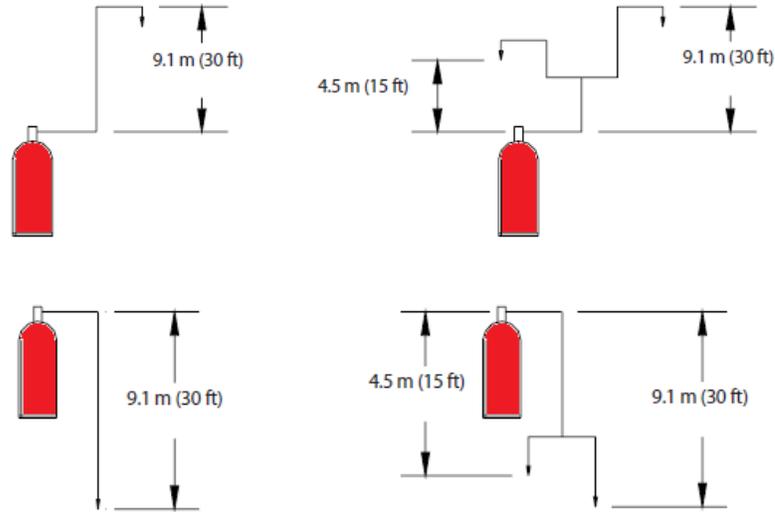


Fig. 36. Colocación de boquillas de descarga.

g) Áreas de cobertura de boquillas

La cobertura máxima para una boquilla de 180° es un radio máximo de 10 m (33 ft) y para una de 360° es de 8.7m (28.6 ft).

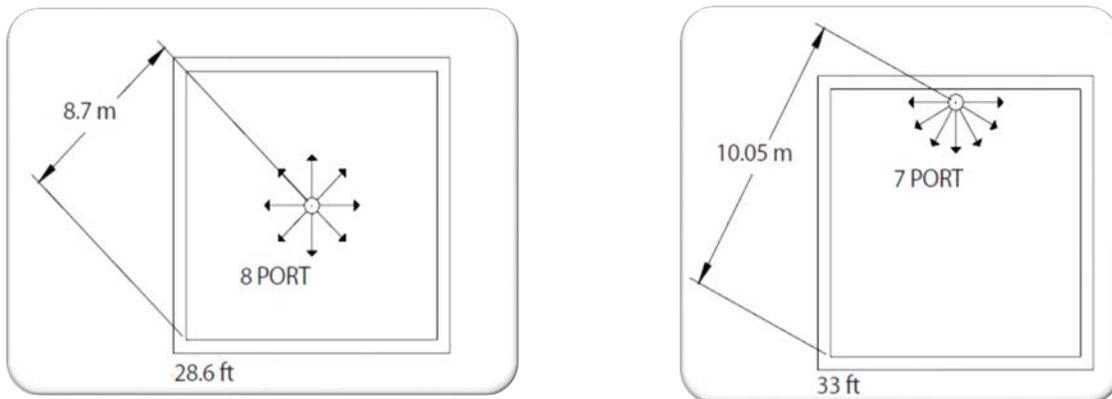


Fig. 37. Área de cobertura de las boquillas de descarga.

6.2 FILOSOFÍA DE OPERACIÓN

a) Activación automática

El sistema debe actuar de manera automática en cualquiera de las situaciones que a continuación se describen:

Cuando dos elementos como mínimo, del conjunto de detectores de humo, que se encuentran distribuidos en forma estratégica en la zona de riesgo y estando configurados en el tablero de control para supresión de incendio, en la modalidad de zona cruzada, se activen por emergencia, enviando la señal correspondiente a dicho tablero.

La señal de activación proveniente de cada uno de los detectores de humo (elementos que están configurados en el tablero de control como zona cruzada), se direccionan automáticamente al tablero de control para supresión de incendio, donde se establece un estado de alarma primaria y se activan simultáneamente las alarmas audibles y visibles en el tablero de control, sin que se active el disparo del sistema de supresión de incendio.

Para el disparo del sistema de supresión de incendio, debe ser recibida la señal proveniente del segundo elemento de detección de humo, confirmando así la zona cruzada y estableciendo en el tablero de control para supresión de incendio, el estado de alarma secundaria, la cual debe alertar al personal por medio de las alarmas visuales y audibles, diferentes al estado de la alarma primaria y posteriormente, en un lapso máximo de 60 segundos, se debe iniciar la descarga del agente extinguidor de incendio.

En aquellos casos en donde la distribución arquitectónica de los cuartos de control, presente un área de riesgo, que por sus características de diseño, se considere zona confinada, y por su dimensionamiento no permita colocar más de un detector de humo, solo en esta condición, se debe configurar en el tablero de control para supresión de incendio, la descarga automática del sistema de supresión de incendio por una señal de detección.

La señal del detector de humo, que se configure en el tablero de control para supresión de incendio, como única detección para una zona de riesgo, será identificada por dicho tablero y procesada como alarma secundaria.

b) Activación Manual

El sistema debe actuar de manera manual en cualquiera de las situaciones que a continuación se describen:

Se efectúa en forma manual remota por medio del accionamiento de cualquiera de las estaciones de activación manual distribuidas según las necesidades de la instalación. Al ser activada una estación manual el tablero de control recibe la señal y entra en estado de alarma, indicándolo por medio de las señales de alarma visual y audible, posteriormente en un lapso máximo de 60 segundos, debe iniciar la descarga del agente extinguidor de incendio.

Se efectúa en forma manual local, por medio del accionamiento directo del interruptor de disparo por presión, ubicado en la zona de cilindros de almacenamiento de agente limpio.

c) Aborto del sistema.

El sistema debe ser capaz de abortar su secuencia de disparo, para lo cual es necesario que se cumplan las siguientes condiciones:

- a) Debe efectuarse desde una de las estaciones de aborto ubicadas en el cuarto de control y/o en el tablero de supresión.
- b) La señal de aborto debe ser procesada hasta 10 segundos antes de iniciarse la descarga del agente extinguidor.

El tablero de control debe tener la capacidad de ajustar el tiempo de disparo automático en forma manual.

d) Niveles de alarmas

Alarma primaria. Esta condición se presenta cuando uno de los detectores de humo se activa y envía señal al tablero de control de supresión de incendio. En la pantalla del tablero se debe indicar el lugar donde se encuentra el detector activado y además accionar una señal luminosa y una alarma audible (de 70 dB a 3 m máximo) en el mismo tablero. Bajo esta situación el sistema de supresión aún no debe ser activado y puede permanecer en este estado por tiempo indefinido, hasta que la señal de campo desaparezca y se opere el interruptor correspondiente para su restablecimiento.

Alarma secundaria. Esta condición se presenta cuando el tablero de control de supresión de incendio se encuentra en un estado de alarma primaria (activado por un detector) y por la propagación de humo, se activa otro u otros detectores, pasando al estado de alarma secundaria, que se indica por medio de alarmas visible y audible, en el primer caso presentando una luz continua de color rojo, y en el segundo caso por un sonido de sirena, lo cual indica una confirmación de la señal de incendio, estas alarmas deben prevalecer durante permanencia del agente limpio dentro del cuarto de control.

e) Situación de problema en el sistema de supresión de incendio

Cuando en la lógica programada del sistema de supresión de incendio sea detectada una falla, interna o externa, en la pantalla del tablero de control debe indicarse la anomalía, con la leyenda establecida para cada caso, notificando el elemento y lugar donde se manifestó, además de encender una alarma visual de color ámbar continua y otra alarma audible con un sonido de gorjeo.

El documento en el cual se indican las diferentes partes del sistema de control que actuarán en el sistema se denomina Arquitectura general del sistema e incluye periféricos y dispositivos necesarios, redes de comunicación, etc.

En los anexos se incluye un ejemplo de arquitectura típica de los sistemas de supresión con agente limpio.

7 DESARROLLO DEL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INUNDACIÓN TOTAL

1. El diseño del sistema contempla lo siguiente:

- ✓ El cuarto de control central se encuentra ubicado prácticamente a 2,000 m sobre el nivel del mar.
- ✓ La temperatura máxima al interior es de 25 °C.
- ✓ Cuenta con dos áreas a proteger: Área plena y falso piso.
- ✓ El diseño contempla la inundación total del recinto con agente limpio, el comercialmente llamado FM-200.
- ✓ En el diseño se aplica la NFPA-2001, explicado en el capítulo 6 de este documento.
- ✓ El arreglo es del tipo Principal/Reserva, para que el cuarto de control nunca quede desprotegido, por ejemplo cuando haya la necesidad de dar mantenimiento o por el llenado de los cilindros que ya se han descargado por la activación del sistema en algún momento.
- ✓ Se considera que el cuarto de control cuenta con un sistema de detección y alarma; mismo que está compuesto por detectores de humo, y alarmas audiovisuales; los cuales activarán el sistema de supresión con FM-200 y alertarán al personal de la situación que se está suscitando.
- ✓ Además del sistema de supresión automático por agente limpio, el cuarto de control cuenta con extinguidores portátiles a base de polvo químico seco.
- ✓ El cuarto de control cuenta con un sistema HVAC, el cual está en comunicación con el sistema de supresión, para que en el caso de la activación de este último, el sistema HVAC interrumpa su operación con la finalidad de que el agente limpio no salga del cuarto de control y disminuya la eficiencia de supresión de incendio.
- ✓ El tiempo máximo para descargar la totalidad del FM-200 es de 10 segundos.

2. Desarrollo del sistema:

- ✓ En primera instancia, se cuantifica mediante hoja de cálculo la cantidad de agente limpio necesario y el número de boquillas requeridas para su descarga.
- ✓ Posteriormente, el diseño se realiza mediante software especializado, y el resultado indica la cantidad de FM-200 necesario para extinguir una situación de fuego en forma temprana, el número de boquillas necesarias para descargar la totalidad del agente limpio contenido en los cilindros de almacenamiento en 10 segundos, y los diámetros de la tubería de cada uno de los nodos que conforman el sistema.

En el Anexo 1, se muestra el plano arquitectónico del cuarto de control a proteger.

En el anexo 2, se muestra la arquitectura general del sistema de protección con agente limpio.

A continuación se muestra el desarrollo de lo indicado anteriormente:



1 **CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE AGENTE LIMPIO A EMPLEAR PARA EL CUARTO DE CONTROL**

2

3 **a) Descripción del cuarto de control**

4

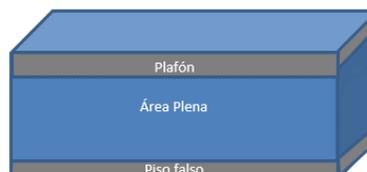
5 El cuarto de control central (CCC) se ubica en una zona que prácticamente es a nivel del mar; se compone de diferentes zonas; si embargo el área a proteger es la que alberga a las interfaces hombre máquina de las diferentes unidades de proceso.

6 El área a proteger es área plena y piso falso; no se considera la protección del plafón.

7

8

	Protección	Dimensiones (m)		
		Largo	Ancho	Altura
11 Plafón	no	0	0	0
12 Área plena	si	14	14	3
13 Piso falso	si	14	14	0.6



14

15

16

17 **b) Condiciones ambientales del área de riesgo.**

18

19 La temperatura ambiental del interior del cuarto de control es de 20°C ya que cuenta con un sistema de aire acondicionado.

20

21	Temperatura mínima	20	° C	=	68	°F
22	Temperatura máxima	25	° C	=	77	°F

23

24

25 **c) Altura sobre el nivel del mar del cuarto a proteger**

26

28		2,020.00 m	=	6,626 ft
----	--	------------	---	----------

29

30 **d) Concentración de diseño para el área de riesgo**

31

32 El sistema de supresión con heptafluoropropano HFC-227ea (FM-200) se diseño para combatir un fuego Clase C en el cuarto de control central. Se encuentra permanentemente ocupado por lo que la concentración del agente limpio será menor que el NOAEL.

33

34

35

Agent	LC 50	NOAEL (%)	LOAEL (%)
37 FK-5-1-12	>10.0	10.0	>10.0
38 HCFC	64	10.0	>10.0
39 HCFC-124	23-29	1.0	2.5
40 HFC-125	>70	7.5	10.0
41 HFC-227 ea	>80	9.0	10.5
42 HFC-23	>65	50.0	>50

Para sistemas de supresión, con actuación automática, para fuego clase C, utilizando heptafluoropropano, se puede utilizar una concentración mínima de diseño de:

43	Concentración mínima	=	7.0	% vol
44	Factor de seguridad	=	1.05	% vol
45	Concentración de diseño	=	7.35	% vol (ver punto b)

44

45 **c) Cantidad de agente limpio a emplear**

46

47 La cantidad de agente limpio para lograr la inundación total del recinto a proteger (supresión del fuego), se estima a partir de lo indicado en la NFPA 2001.

48

$$49 \quad W = \frac{V}{s} \left(\frac{C}{100 - C} \right) \quad \dots (1)$$

50

51

52

53

54

55

56

57

58

59

60

61

62

63

64

65

66

67

68

69

70

7. Desarrollo del diseño de un sistema de inundación total

Se emplean las tablas de la NFPA 2001 W/V
NFPA 2001/A-3-5.1 (k) inglés 2001-61 Apen. A
NFPA 2001/A-3-5.1 (k) SI 2001-62 Apen. A

Nomenclatura:

- W : Masa de Agente Limpio necesaria para la extinción, kg (lb)
- V : Volumen total del recinto a proteger. m3 (ft3)
- C : Concentración del agente limpio (% en vol.).
- s : Volumen específico del agente limpio a la temperatura "T". Kg/m3 (ft3/lb)

Altura sobre el nivel del mar :

2,020.00 m	6,626 ft
------------	----------

La altura sobre el nivel del mar es importante ya que la cantidad de agente limpio necesaria para la protección se ve afectada por un factor que es función de la altitud, a mayor altitud el requerimiento de agente limpio disminuye.

Cantidad de agente limpio = cantidad de diseño * Factor de altitud.

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

1 Empleando la expresión 1 y tomando "s" de la tabla de la NFPA , la cantidad de agente limpio a emplear es:

		SI				Inglés					
		Plafón	Área plena	Piso falso	Total	Plafón	Área plena	Piso falso	Total		
6	Largo	m	0.00	14.00	14.00	14.00	ft	0	45.92	45.92	45.92
7	Ancho	m	0.00	14.00	14.00	14.00	ft	0	45.92	45.92	45.92
8	Altura	m	0	3	0.6	3.60	ft	0	9.84	1.97	11.808
9	Área	m ²	0.00	196.00	196.00	392.00	ft ²	0.00	2,108.65	2,108.65	2,108.65
11	Volúmen	m ³	0.00	588.00	117.60	705.60	ft ³	0.00	20,749.08	4,149.82	24,898.90
12	W/V	kg/m ³	0.5382	0.5382	0.5382	0.5382	lb/ft ³	0.0341	0.0341	0.0341	0.0341
14	W	kg	0	316	63	380	lb	0	708	142	849

16 Cantidad de agente limpio a la temperatura máxima esperada en el recinto

18			0.5382					0.03340			
19	W	kg	0	316	63	380	lb	0	693	139	832

21 La cantidad de agente limpio a considerar debe ser la obtenida a la temperatura mínima, ya que como se indica, el requerimiento es mayor bajo esta condición.

23 La NFPA recomienda que se debe considerar un factor de seguridad de **1.04** para incendios tipo "C".
 24 Por lo cual la concentración de diseño para este sistema es de : **7.35** % vol.

26 **Calculando la cantidad de agente limpio mediante la expresión 1 con el cálculo de s a la concentración de diseño:**

28	s= 0.1269+0.0005*	=	0.1369			s= 1.885+0.0046+* t	=	2.1978			
30	kg	W	0	341	68	409	lb	0	749	150	899

33 **Considerando el factor de la altitud** = 0.78

35	Agente limpio W	kg	0	266	53	319	lb	0	584	117	701
37	% para cada área		0.00	83.33	16.67	100.00			83.33	16.67	100.00

40 RESULTADO:

41 Debe emplearse un sistema que contenga al menos 319 kg de agente limpio para la protección del Cuarto de control (no incluye la reserva)
 42 701 lb

44 d) Número de boquillas de descarga requeridas

46 De acuerdo a las recomendaciones de que cada boquilla descargue como máximo 200 lbs, el número de boquillas a emplear es el siguiente:

47 Descarga recomendada por boquilla : 200 lb = 90.719 kg

49	Falso plafón:	0.00	0
50	Área plena	3.74	4
51	Piso falso	0.75	1
52			5.0

54 e) Número de cilindros de agente limpio requeridos

56 El sistema estará conformado por cilindros principales y de reserva; el número de cilindros de reserva es el mismo número que los principales.

58 Se requieren **701** lb de agente limpio; dado que existen cilindros de 150, 300, 600 y 900 lb, se seleccionan en principio

60 **2 cilindros de 600 lb** (los cilindros no deben llenarse al 100 %)

62 Sin embargo, el sistema contará con cilindros principales y de reserva, por lo que el total de cilindros será de 4 (2 principales y 2 de reserva).

63 Se debe instalar un manifold para conectar los cilindros.

65	No. de cilindros principales	2
66	No. de cilindros reserva	2
67		4

A continuación se indican los resultados de la simulación:

1. Información general de las áreas a proteger (sistema inglés)

Elevation:	6626 ft (relative to sea level)
Atmospheric Correction Factor:	0.78
<hr/>	
Enclosure Number:	1
Name:	Area plena
Enclosure Temperature...	
Minimum:	68 F
Maximum:	77 F
Maximum Concentration:	7.515 %
Design Concentration...	
Adjusted:	7.386 %
Minimum:	7.250 %
Minimum Agent Required:	572.8 lbs
Width:	45.9 ft
Length:	45.9 ft
Height:	9.8 ft
<hr/>	
Volume:	20646.7 cubic ft
Non-permeable:	0.0 cubic ft
<hr/>	
Total Volume:	20646.7 cubic ft
Adjusted Agent Required:	584.4 lbs
Number of Nozzles:	4
<hr/>	
Enclosure Number:	2
Name:	Falso piso
Enclosure Temperature...	
Minimum:	68 F
Maximum:	77 F
Maximum Concentration:	7.535 %
Design Concentration...	
Adjusted:	7.405 %
Minimum:	7.250 %
Minimum Agent Required:	116.9 lbs
Width:	45.9 ft
Length:	45.9 ft
Height:	2.0 ft
<hr/>	
Volume:	4213.6 cubic ft
Non-permeable:	0.0 cubic ft
<hr/>	
Total Volume:	4213.6 cubic ft
Adjusted Agent Required:	119.6 lbs
Number of Nozzles:	1

1. Información general de las áreas a proteger (sistema SI)

This system was developed using English units of measure. This report converts to Metric units of measure. Some minor discrepancies may be apparent in this report due to rounding.

Elevation: 2020 m (relative to sea level)
 Atmospheric Correction Factor: 0.78

Enclosure Number:	1
Name:	Area plena
Enclosure Temperature...	
Minimum:	20.0 C
Maximum:	25.0 C
Maximum Concentration:	7.515 %
Design Concentration...	
Adjusted:	7.386 %
Minimum:	7.250 %
Minimum Agent Required:	259.8 kg
Width:	13.99 m
Length:	13.99 m
Height:	2.99 m
Volume:	584.65 cubic m
Non-permeable:	0.00 cubic m
Total Volume:	584.65 cubic m
Adjusted Agent Required:	265.1 kg
Number of Nozzles:	4
Enclosure Number:	2
Name:	Falso piso
Enclosure Temperature...	
Minimum:	20.0 C
Maximum:	25.0 C
Maximum Concentration:	7.535 %
Design Concentration...	
Adjusted:	7.405 %
Minimum:	7.250 %
Minimum Agent Required:	53.0 kg
Width:	13.99 m
Length:	13.99 m
Height:	0.61 m
Volume:	119.32 cubic m
Non-permeable:	0.00 cubic m
Total Volume:	119.32 cubic m
Adjusted Agent Required:	54.3 kg
Number of Nozzles:	1

2. Cantidad de agente limpio (Sistema inglés y SI)

Agent: FM-200 / Propellant N2
(FM-200 is a Trademark of Great Lakes Chemical Corp.)
Total Agent Required: 1408.0 lbs (includes reserve)
Adjusted Agent Required: 704.0 lbs
Container Name: 600 lb Cylinder, 3 in. Valve, w/LLI
Container Part Number: 90-100601-100
Number of Main Containers: 2
Number of Reserve Containers: 2
Manifold: H, 4 x 600 lb Cyls, Up

Pipe Take Off Direction: Up
Agent Per Container: 352.0 lbs
Fill Density: 41.1 lbs / cubic ft
Container Empty Weight: 362.0 lbs
Weight, All Containers + Agent: 2856.0 lbs
Floor Area Per Container: 2.64 square ft
Floor Loading Per Container: 270 lbs / square ft

Agent: FM-200 / Propellant N2
(FM-200 is a Trademark of Great Lakes Chemical Corp.)
Total Agent Required: 638.7 kg (includes reserve)
Adjusted Agent Required: 319.3 kg
Container Name: 600 lb Cylinder, 3 in. Valve, w/LLI
Container Part Number: 90-100601-100
Number of Main Containers: 2
Number of Reserve Containers: 2
Manifold: H, 4 x 600 lb Cyls, Up

Pipe Take Off Direction: Up
Agent Per Container: 159.7 kg
Fill Density: 0.658 kg / l
Container Empty Weight: 164.2 kg
Weight, All Containers + Agent: 1295.5 kg
Floor Area Per Container: 0.25 square m
Floor Loading Per Container: 1320 kg /square m

3. Sistema de tuberías (Sistema Inglés)

Pipe Network

Part 1 - Pipe			Pipe			
Description	Start	End	Type	Diameter	Length	Elevation
Main Cyl. X 2	0	1		3 in	4.00 ft	4.00 ft
Manifold X 2	1	2	40T	3 in	0.75 ft	2.47 ft
Manifold X 2	2	3	40T	3 in	2.30 ft	0.00 ft
Manifold X 1	3	4	40T	3 in	2.30 ft	0.00 ft
Pipe	4	5	40T	3 in	10.00 ft	10.00 ft
Pipe	5	6	40T	3 in	26.00 ft	0.00 ft
Pipe	6	7	40T	3 in	4.00 ft	0.00 ft
Pipe	7	8	40T	3 in	6.00 ft	0.00 ft
Pipe	8	9	40T	2-1/2 in	11.00 ft	0.00 ft
Pipe	9	10	40T	1-1/2 in	5.00 ft	0.00 ft
Pipe/E1-N1	10	11	40T	1-1/2 in	1.00 ft	-1.00 ft
Pipe	9	12	40T	1-1/2 in	5.00 ft	0.00 ft
Pipe/E1-N3	12	13	40T	1-1/2 in	1.00 ft	-1.00 ft

Part 1 - Pipe			Pipe			
Description	Start	End	Type	Diameter	Length	Elevation
Pipe	8	14	40T	2-1/2 in	11.00 ft	0.00 ft
Pipe	14	15	40T	1-1/2 in	5.00 ft	0.00 ft
Pipe/E1-N2	15	16	40T	1-1/2 in	1.00 ft	-1.00 ft
Pipe	14	17	40T	1-1/2 in	5.00 ft	0.00 ft
Pipe/E1-N4	17	18	40T	1-1/2 in	1.00 ft	-1.00 ft
Pipe	7	19	40T	2 in	6.00 ft	0.00 ft
Pipe	19	20	40T	2 in	4.00 ft	0.00 ft
Pipe	20	21	40T	2 in	11.00 ft	-11.00 ft
Pipe	21	22	40T	2 in	6.00 ft	0.00 ft
Pipe	22	23	40T	2 in	1.00 ft	0.00 ft
Pipe/E2-N1	23	24	40T	2 in	0.50 ft	-0.50 ft

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

Part 2 - Equivalent Length

Start	End	90	45	Thru	Side	Union	Other	Added	Total
0	1	0	0	0	0	0		0.00 ft	50.0 ft
1	2	0	0	0	0	0	3in Fix H	0.00 ft	30.8 ft
2	3	0	0	0	2	0	3in SChk	0.00 ft	48.5 ft
3	4	0	0	0	1	0	3in SChk	0.00 ft	31.9 ft
4	5	0	0	0	0	0		0.00 ft	10.0 ft
5	6	1	0	0	0	0		0.00 ft	34.2 ft
6	7	1	0	0	0	0		0.00 ft	12.2 ft
7	8	0	0	1	0	0		0.00 ft	11.1 ft
8	9	0	0	0	1	0		0.00 ft	24.4 ft
9	10	0	0	0	1	0		0.00 ft	13.7 ft
10	11	1	0	0	0	0		0.00 ft	5.3 ft
9	12	0	0	0	1	0		0.00 ft	13.7 ft
12	13	1	0	0	0	0		0.00 ft	5.3 ft
8	14	0	0	0	1	0		0.00 ft	24.4 ft
14	15	0	0	0	1	0		0.00 ft	13.7 ft
15	16	1	0	0	0	0		0.00 ft	5.3 ft
14	17	0	0	0	1	0		0.00 ft	13.7 ft
17	18	1	0	0	0	0		0.00 ft	5.3 ft
7	19	0	0	0	1	0		0.00 ft	17.2 ft
19	20	1	0	0	0	0		0.00 ft	9.5 ft
20	21	1	0	0	0	0		0.00 ft	16.5 ft
21	22	1	0	0	0	0		0.00 ft	11.5 ft

Part 2 - Equivalent Length

Start	End	90	45	Thru	Side	Union	Other	Added	Total
22	23	1	0	0	0	0		0.00 ft	6.5 ft
23	24	1	0	0	0	0		0.00 ft	6.0 ft

4. Boquillas de descarga (Sistema inglés)

Part 3 - Nozzles

Start	End	Flow	Name	Size	Type	Nozzle Area
0	1	352.0 lbs				
1	2	352.0 lbs				
2	3	352.0 lbs				
3	4	704.0 lbs				
4	5	704.0 lbs				
5	6	704.0 lbs				
6	7	704.0 lbs				
7	8	584.4 lbs				
8	9	292.4 lbs				
9	10	146.2 lbs				
10	11	146.2 lbs	E1-N1	1-1/2 in	360°	0.9587 square in
9	12	146.2 lbs				
12	13	146.2 lbs	E1-N3	1-1/2 in	360°	0.9587 square in
8	14	292.0 lbs				
14	15	146.2 lbs				
15	16	146.2 lbs	E1-N2	1-1/2 in	360°	0.9587 square in
14	17	145.8 lbs				
17	18	145.8 lbs	E1-N4	1-1/2 in	360°	0.9587 square in
7	19	119.6 lbs				
19	20	119.6 lbs				
20	21	119.6 lbs				
21	22	119.6 lbs				
22	23	119.6 lbs				
23	24	119.6 lbs	E2-N1	2 in	180°	0.8439 square in

5. Sistema de tuberías (Sistema SI)

Pipe Network

This system was developed using English units of measure. This report converts to Metric units of measure. Some minor discrepancies may be apparent in this report due to rounding.

Description	Start	End	Pipe			
			Type	Diameter	Length	Elevation
Main Cyl. X 2	0	1		3 in	1.22 m	1.22 m
Manifold X 2	1	2	40T	3 in	0.23 m	0.75 m

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

Part 1 - Pipe			Pipe			
Description	Start	End	Type	Diameter	Length	Elevation
Manifold X 2	2	3	40T	3 in	0.70 m	0.00 m
Manifold X 1	3	4	40T	3 in	0.70 m	0.00 m
Pipe	4	5	40T	3 in	3.05 m	3.05 m
Pipe	5	6	40T	3 in	7.92 m	0.00 m
Pipe	6	7	40T	3 in	1.22 m	0.00 m
Pipe	7	8	40T	3 in	1.83 m	0.00 m
Pipe	8	9	40T	2-1/2 in	3.35 m	0.00 m
Pipe	9	10	40T	1-1/2 in	1.52 m	0.00 m
Pipe/E1-N1	10	11	40T	1-1/2 in	0.30 m	-0.30 m
Pipe	9	12	40T	1-1/2 in	1.52 m	0.00 m
Pipe/E1-N3	12	13	40T	1-1/2 in	0.30 m	-0.30 m
Pipe	8	14	40T	2-1/2 in	3.35 m	0.00 m
Pipe	14	15	40T	1-1/2 in	1.52 m	0.00 m
Pipe/E1-N2	15	16	40T	1-1/2 in	0.30 m	-0.30 m
Pipe	14	17	40T	1-1/2 in	1.52 m	0.00 m
Pipe/E1-N4	17	18	40T	1-1/2 in	0.30 m	-0.30 m
Pipe	7	19	40T	2 in	1.83 m	0.00 m
Pipe	19	20	40T	2 in	1.22 m	0.00 m
Pipe	20	21	40T	2 in	3.35 m	-3.35 m
Pipe	21	22	40T	2 in	1.83 m	0.00 m
Pipe	22	23	40T	2 in	0.30 m	0.00 m
Pipe/E2-N1	23	24	40T	2 in	0.15 m	-0.15 m

Part 2 - Equivalent Length

Start	End	90	45	Thru	Side	Union	Other	Added	Total
0	1	0	0	0	0	0		0.00 m	15.24 m
1	2	0	0	0	0	0	3in Flx H	0.00 m	9.39 m
2	3	0	0	0	2	0	3in SChk	0.00 m	14.78 m
3	4	0	0	0	1	0	3in SChk	0.00 m	9.72 m
4	5	0	0	0	0	0		0.00 m	3.05 m
5	6	1	0	0	0	0		0.00 m	10.42 m
6	7	1	0	0	0	0		0.00 m	3.72 m
7	8	0	0	1	0	0		0.00 m	3.38 m
8	9	0	0	0	1	0		0.00 m	7.44 m
9	10	0	0	0	1	0		0.00 m	4.18 m
10	11	1	0	0	0	0		0.00 m	1.62 m

Part 2 - Equivalent Length

Start	End	90	45	Thru	Side Union	Other	Added	Total
9	12	0	0	0	1	0	0.00 m	4.18 m
12	13	1	0	0	0	0	0.00 m	1.62 m
8	14	0	0	0	1	0	0.00 m	7.44 m
14	15	0	0	0	1	0	0.00 m	4.18 m
15	16	1	0	0	0	0	0.00 m	1.62 m
14	17	0	0	0	1	0	0.00 m	4.18 m
17	18	1	0	0	0	0	0.00 m	1.62 m
7	19	0	0	0	1	0	0.00 m	5.24 m
19	20	1	0	0	0	0	0.00 m	2.90 m
20	21	1	0	0	0	0	0.00 m	5.03 m
21	22	1	0	0	0	0	0.00 m	3.51 m
22	23	1	0	0	0	0	0.00 m	1.98 m
23	24	1	0	0	0	0	0.00 m	1.83 m

6. Boquillas de descarga (Sistema SI)

Part 3 - Nozzles

Start	End	Flow	Name	Size	Type	Nozzle Area
0	1	159.7 kg				
1	2	159.7 kg				
2	3	159.7 kg				
3	4	319.3 kg				
4	5	319.3 kg				
5	6	319.3 kg				
6	7	319.3 kg				
7	8	265.1 kg				
8	9	132.6 kg				
9	10	66.3 kg				
10	11	66.3 kg	E1-N1	1-1/2 in	360°	618.51 square mm
9	12	66.3 kg				
12	13	66.3 kg	E1-N3	1-1/2 in	360°	618.51 square mm
8	14	132.5 kg				
14	15	66.3 kg				
15	16	66.3 kg	E1-N2	1-1/2 in	360°	618.51 square mm
14	17	66.1 kg				
17	18	66.1 kg	E1-N4	1-1/2 in	360°	618.51 square mm
7	19	54.3 kg				
19	20	54.3 kg				

Part 3 - Nozzles

Start	End	Flow	Name	Size	Type	Nozzle Area
20	21	54.3 kg				
21	22	54.3 kg				
22	23	54.3 kg				
23	24	54.3 kg	E2-N1	2 in	180°	544.45 square mm

Parts Information

Total Agent Required: 1408.0 lbs (includes reserve)
 Container Name: 600 lb Cylinder, 3 in. Valve, w/LLI (Part: 90-100601-100)
 Number Of Containers: 4
 Manifold: H, 4 x 600 lb Cyls, Up

Nozzle	Type	Nozzle Area	Part Number
E1-N1	360°	0.9587 square in	90-194027-391
E2-N1	180°	0.8439 square in	90-194018-358
E1-N2	360°	0.9587 square in	90-194027-391
E1-N3	360°	0.9587 square in	90-194027-391
E1-N4	360°	0.9587 square in	90-194027-391

Pipe:	Type	Diameter	Length
	40T	1-1/2 in	24.00 ft
	40T	2 in	28.50 ft
	40T	2-1/2 in	22.00 ft
	40T	3 in	46.00 ft

'Other' Items:

4 - 3 in. Flex Hose - Horizontal (Part: 06-118225-001)

6 - 3 in. Swing Check Valve (Part: 06-118058-001)

List of 90 degree elbows:

4 - 1-1/2 in

5 - 2 in

2 - 3 in

List of Tees:

2 - 2-1/2 in

2 - 3 in

Total Agent Required: 638.7 kg (includes reserve)
 Container Name: 600 lb Cylinder, 3 in. Valve, w/LLI (Part: 90-100601-100)
 Number Of Containers: 4
 Manifold: H, 4 x 600 lb Cyls, Up

Nozzle	Type	Nozzle Area	Part Number
E1-N1	360°	618.51 square mm	90-194027-391
E2-N1	180°	544.45 square mm	90-194018-358
E1-N2	360°	618.51 square mm	90-194027-391
E1-N3	360°	618.51 square mm	90-194027-391
E1-N4	360°	618.51 square mm	90-194027-391

Pipe:	Type	Diameter	Length
	40T	1-1/2 in	7.32 m
	40T	2 in	8.69 m
	40T	2-1/2 in	6.71 m
	40T	3 in	14.02 m

'Other' Items:

- 4 - 3 in. Flex Hose - Horizontal (Part: 06-118225-001)
- 6 - 3 in. Swing Check Valve (Part: 06-118058-001)

List of 90 degree elbows:

- 4 - 1-1/2 in
- 5 - 2 in
- 2 - 3 in

List of Tees:

- 2 - 2-1/2 in
- 2 - 3 in

7. Aceptación del Sistema

System Acceptance

System Discharge Time: 8.8 seconds
 Percent Agent In Pipe: 61.4%
 Percent Agent Before First Tee: 36.0%
 Enclosure Number: 1
 Enclosure Name: Area plena

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

Minimum Design Concentration: 7.250%
 Adjusted Design Concentration: 7.386%
 Predicted Concentration: 7.273%
 Maximum Expected Agent Concentration: 7.400% (At 77 F)

Nozzle	Minimum Agent Required	Adjusted Agent Required	Predicted Agent Delivered	Nozzle Pressure (Average)
E1-N1	143.3 lbs	146.2 lbs	143.7 lbs	131 psig
E1-N2	143.3 lbs	146.2 lbs	143.7 lbs	131 psig
E1-N3	143.3 lbs	146.2 lbs	143.7 lbs	131 psig
E1-N4	142.9 lbs	145.8 lbs	143.7 lbs	131 psig

Enclosure Number: 2
 Enclosure Name: Falso piso

Minimum Design Concentration: 7.250%
 Adjusted Design Concentration: 7.405%
 Predicted Concentration: 7.955%
 Maximum Expected Agent Concentration: 8.093% (At 77 F)

Nozzle	Minimum Agent Required	Adjusted Agent Required	Predicted Agent Delivered	Nozzle Pressure (Average)
E2-N1	116.9 lbs	119.6 lbs	129.2 lbs	128 psig

System Acceptance

This system was developed using English units of measure. This report converts to Metric units of measure. Some minor discrepancies may be apparent in this report due to rounding.

System Discharge Time: 8.8 seconds
 Percent Agent In Pipe: 61.4%
 Percent Agent Before First Tee: 36.0%

Enclosure Number: 1
 Enclosure Name: Area plena

Minimum Design Concentration: 7.250%
 Adjusted Design Concentration: 7.386%
 Predicted Concentration: 7.273%
 Maximum Expected Agent Concentration: 7.400% (At 25.0 C)

Sistemas contra incendio para cuartos de control de plantas de proceso

Nozzle	Minimum Agent Required	Adjusted Agent Required	Predicted Agent Delivered	Nozzle Pressure (Average)
E1-N1	65.0 kg	66.3 kg	65.2 kg	9.023 bar
E1-N2	65.0 kg	66.3 kg	65.2 kg	9.023 bar
E1-N3	65.0 kg	66.3 kg	65.2 kg	9.023 bar
E1-N4	64.8 kg	66.1 kg	65.2 kg	9.023 bar

Enclosure Number: 2

Enclosure Name: Falso piso

Minimum Design Concentration: 7.250%

Adjusted Design Concentration: 7.405%

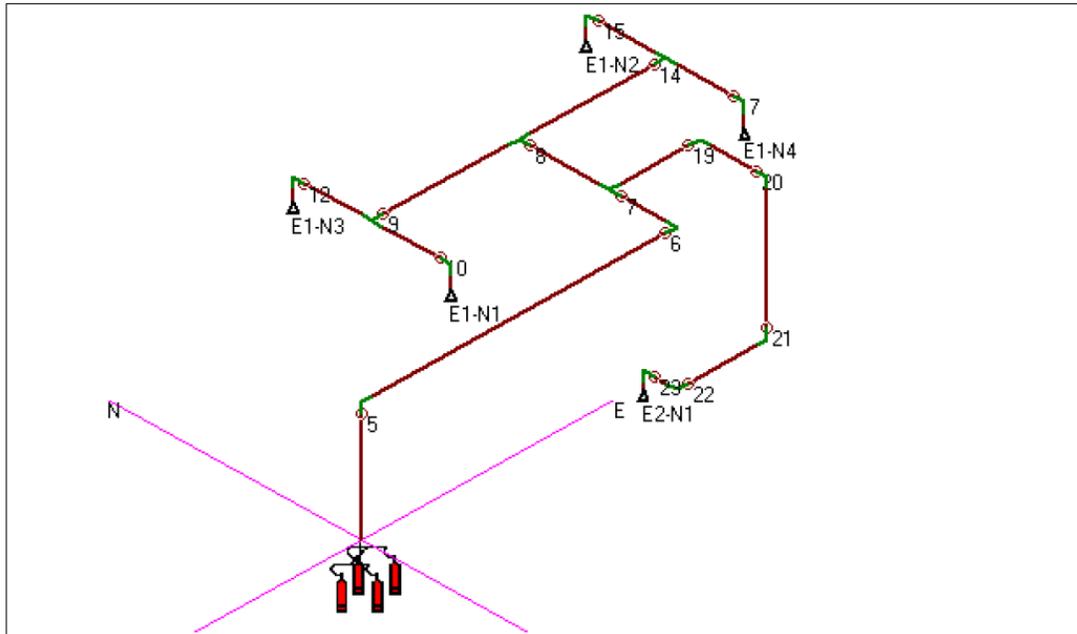
Predicted Concentration: 7.955%

Maximum Expected Agent Concentration: 8.093% (At 25.0 C)

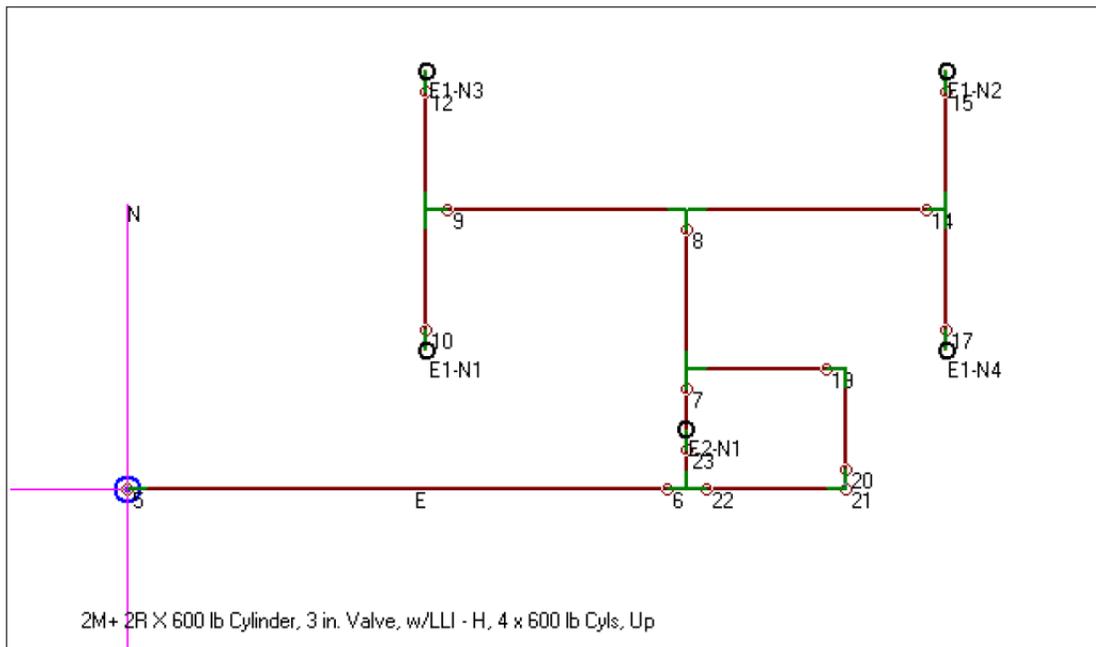
Nozzle	Minimum Agent Required	Adjusted Agent Required	Predicted Agent Delivered	Nozzle Pressure (Average)
E2-N1	53.0 kg	54.3 kg	58.6 kg	8.820 bar

8. Isométricos

Standard Isometric View



Standard Plan View



8 RESULTADOS

De la simulación desarrollada, el sistema de inundación total con agente limpio FM-200 tiene las siguientes características:

1. La cantidad de agente limpio necesario es de 638.7 kg (1,408 lb), incluyendo la reserva.
2. La capacidad de los cilindros contenedores del FM-200 es de 600 lb y se requieren 2 cilindros principales y dos cilindros de reserva.
3. Se logra que el tiempo de descarga sea de 9 segundos, menor a los 10 segundos indicados en la normatividad aplicable.
4. Son necesarias cuatro boquillas de descarga en el área plena de 360 ° y una boquilla en el piso falso también de 360 °.
5. Los nodos de tubería por donde se transporta el FM-200 tiene un diámetro máximo de 3 pulgadas y un diámetro mínimo de 1 ½ pulgadas.

Los resultados de la simulación indican que el diseño del sistema de inundación total con agente limpio para la protección del cuarto de control central es adecuado y cumple con la normatividad vigente.

Una vez realizado el diseño del sistema, asumiendo que es adecuado, este deberá verificarse en todas las etapas posteriores del proyecto para asegurar el correcto funcionamiento del sistema; sobre todo en la etapa de construcción; en donde es fundamental validar el diseño propuesto ya que la instalación de los componentes del sistema puede verse modificada con respecto al diseño (rutas de tubería y diámetros de las mismas, posición de las boquillas de descarga, etc.) y con ello se pone en riesgo la seguridad del recinto y del personal que se encuentra laborando en el mismo.

No omito señalar que una vez construido el sistema, es necesario llevar a cabo las pruebas de funcionamiento correspondiente; con la finalidad de asegurar la correcta funcionalidad del sistema.

9 CONCLUSIONES

En los procesos industriales resulta indispensable el monitoreo de las diferentes variables involucradas en la correcta operación de las plantas de proceso pues ante una desviación de los parámetros establecidos en el diseño, es fundamental corregir rápidamente y en forma automática tales anomalías a fin de evitar pérdidas humanas y materiales dentro y fuera de las instalaciones. El cuarto de control es el espacio destinado para tal fin y en todo momento su funcionamiento no debe verse interrumpido por factores externos o internos; en pocas palabras, es en este lugar donde se lleva el control de toda la planta de procesamiento.

Los incendios en los cuartos de control son eventos que pocas veces se presentan y lo deseable es que nunca se presenten para no interrumpir su operación; sin embargo, si se presenta es necesario contar con sistemas que permitan su extinción rápida y oportuna para salvaguardar la vida del personal así como la de los equipos electrónicos encargados del procesamiento de todas las señales provenientes de los instrumentos instalados en campo y en el mismo cuarto de control.

El cuarto de control por sí mismo visto como un espacio habitable en donde se desarrolla una actividad de monitoreo y control debe contar con características propias que permitan un óptimo desempeño de los operadores, como por ejemplo el aspecto ergonómico y de confort que influye de manera considerable en la toma de decisiones en circunstancias críticas que requieren de máxima concentración.

Los sistemas de inundación total a base de agentes limpios han sido estudiados desde hace ya muchos años, la diferencia entre los diseños anteriores básicamente se centran en el tipo de agente extintor a ser utilizado y por ende las concentraciones del mismo para sofocar el incendio.

El tiempo en el que un incendio puede desarrollarse totalmente depende de los materiales que se encuentren en el recinto; sin embargo, dada la naturaleza de los materiales que pueden encontrarse en los cuartos de control, el incendio puede llegar a su plenitud rápidamente, despidiendo sustancias sumamente tóxicas para el hombre.

Ante esta situación el sistema de inundación total con agente limpio debe actuar de forma inmediata y en forma eficaz, en el tiempo establecido y con la concentración suficiente. Para lograr este resultado, es necesario diseñar el sistema con todas las consideraciones establecidas en la normatividad existente, teniendo en mente que las debilidades en el diseño siempre estarán presentes en la vida útil del sistema.

Si bien es cierto que este trabajo se enfocó a un cuarto de control de una refinería, el diseño puede aplicarse a espacios en donde algún otro agente extintor como el agua no sea la mejor opción de extinción de incendios, por ejemplo archivos históricos, bibliotecas, laboratorios, centros de datos y de monitoreo, etc. La aplicación de este tipo de sistemas es bastante amplia.

Un rubro de suma importancia en todo sistema destinado a la protección contra incendio es el mantenimiento; el cuarto de control podrá contar con el mejor sistema de supresión de incendios, incluyendo el sistema de detección y alarma asociado; sin embargo, si no se le mantiene adecuadamente mediante programas de mantenimiento bien definidos, llegará un momento en el que el funcionamiento del sistema se verá disminuido y las consecuencias de ello pueden ser suficientemente considerables para la empresa. Aunado a lo anterior, siempre resulta indispensable que el personal conozca el funcionamiento del sistema, este punto resulta talvez muy obvio, sin embargo las empresas necesitan asegurarse que el personal tenga

el suficiente conocimiento de ello; en otras palabras, la capacitación no debe ser un tema ajeno y que deba ser excluido.

Por lo explicado anteriormente, los objetivos planteados de este trabajo fueron cubiertos en su totalidad.

10 GLOSARIO

Accidente: Es aquel incidente que ocasiona afectaciones a los trabajadores, a la comunidad, al ambiente, al equipo y/o instalaciones, al proceso, transporte y distribución del producto y que debe ser reportado e investigado para establecer las medidas preventivas y/o correctivas, que deben ser adoptadas para evitar su recurrencia.

Análisis de consecuencias: Es aquel incidente que ocasiona afectaciones a los trabajadores, a la comunidad, al ambiente, al equipo y/o instalaciones, al proceso, transporte y distribución del producto y que debe ser reportado e investigado para establecer las medidas preventivas y/o correctivas, que deben ser adoptadas para evitar su recurrencia.

Análisis de riesgos de proceso: Conjunto de metodologías que consisten en la identificación, análisis y evaluación sistemática de la probabilidad de la ocurrencia de daños asociados a los factores externos (fenómenos naturales y sociales), fallas en los sistemas de control, sistemas mecánicos, factores humanos y fallas en los sistemas de administración; con la finalidad de controlar y/o minimizar las consecuencias al personal, a la población, al ambiente, a la producción e instalaciones.

American Petroleum Institute (API). Principal asociación comercial de E.U.A. que representa a más de 650 empresas implicadas en la producción, refinación, distribución de gas y petróleo. Fundada en marzo de 1920. Cuenta con más de 600 estándares y prácticas recomendadas de la industria de petróleo y gas y de las cuales muchas de ellas han sido adoptadas por la ISO.

Alquilación: Los procesos de alquilación comprenden la combinación de una olefina con un hidrocarburo parafínico o aromático en presencia de un catalizador. En refinación el proceso involucra la unión de propileno o butilenos, principalmente de las plantas de desintegración catalítica (FCC), así como de unidades de coquización retardada; con isobutano en presencia de ácido fluorhídrico o sulfúrico como catalizador, para formar una isoparafina denominada alquilado ligero, compuesta básicamente por isoheptano o isotctano. Este proceso se considera opuesto al de desintegración, ya que a partir de moléculas pequeñas, produce moléculas más grandes.

Consecuencias: Efectos que pueden causar eventos o accidentes que involucran fugas y derrames de sustancias tóxicas, inflamables y/o explosivas.

Coquización: Proceso de refinación mediante el cual se incrementa la producción de destilados ligeros e intermedios por el craqueo térmico de moléculas de mayor peso molecular, como subproducto se obtiene de este proceso se obtiene coque de petróleo.

Desintegración: Cracking. Proceso que consiste en descomponer las moléculas de hidrocarburos más grandes, pesadas o complejas en moléculas más ligeras y simples. La desintegración se lleva a cabo mediante la aplicación de calor y presión y, en técnicas más avanzadas mediante el uso de catalizadores. La utilización de este proceso permite incrementar el rendimiento de gasolina de otros productos importantes (gas seco, propano, propileno, butano-butileno, gasolinas, aceites cíclicos y decantados, etc.) que tienen aplicaciones diversas en la industria del petróleo.

Ducto: Tuberías destinadas para transportar aceites, gas, gasolinas y otros productos petrolíferos a las terminales de almacenamiento, embarque y distribución, o bien de una planta o refinería a otra. Existen

diferentes tipos de ductos, según el producto que transporta: Gasoducto, gasolinoducto, oleoducto, poliducto, etc.

Evento no deseado: Evento que implica la pérdida de un valor: salud, vida, producción, ambiente, capital, etc.

Efecto domino: Efectos subsiguientes a un accidente o área de su zona de efectos. Evento asociado a un incendio o explosión en una instalación que multiplica sus consecuencias por efecto de la sobrepresión, proyectiles o la radiación térmica que se generan, sobre elementos próximos y vulnerables, tales como otros recipientes, tuberías o equipos de la misma instalación o instalaciones próximas, de tal forma que pueden ocurrir nuevas fugas, derrames, incendios o explosiones que a su vez, pueden nuevamente provocar efectos similares.

Fuga: Liberación repentina o escape accidental por pérdida de contención de una sustancia en estado líquido o gaseoso.

Hidrotratamiento: Proceso cuyo objetivo es estabilizar catalíticamente los petrolíferos, además de eliminar los componentes contaminantes que contienen, haciéndolos reaccionar con hidrógeno a temperaturas comprendidas entre 315 y 430 °C a presiones que varían de 7 a 210 kg/cm², en presencia de catalizadores diversos, tales como el óxido de cobalto y molibdeno sobre alúmina (los más usados). Entre las reacciones efectuadas, las de estabilización comprenden la conversión de hidrocarburos insaturados como olefinas, diolefinas de baja estabilidad precursoras de la formación de gomas, en compuestos saturados, por hidrogenación o desintegración.

Instalación: Conjunto de estructuras, edificios, equipos, circuitos de tuberías de proceso y servicios auxiliares, sistemas instrumentados, dispuestos para un proceso productivo específico.

International Standards Organization (ISO): Es una organización internacional cuyo objetivo es el de promover estándares para uso internacional, fue creada en 1947. Sus oficinas centrales se encuentran en Ginebra, Suiza y trabaja por medio de comités, subcomités y grupos de trabajo.

Isomerización: Proceso mediante el cual se altera el arreglo fundamental de los átomos de una molécula sin adherir o sustraer nada de la molécula original. Por ejemplo el butano es isomerizado a isobutano para ser utilizado en la alquilación de isobutileno y otras olefinas para la producción de hidrocarburos de alto octano.

Inflamabilidad: Mayor o menor facilidad con la que una sustancia puede arder en aire o en algún otro comburente.

Límite inferior de inflamabilidad: Es la concentración mínima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente a la temperatura ambiente.

Límite superior de inflamabilidad: Es la concentración máxima de cualquier vapor o gas (% por volumen de aire), que se inflama o explota si hay una fuente de ignición presente a la temperatura ambiente.

Mantenimiento predictivo: Técnica para pronosticar el punto futuro de falla de un componente de una máquina o equipo, de tal forma que dicho componente pueda reemplazarse, con base en un plan justo antes de que falle.

Medidas de mitigación: Conjunto de actividades o medidas, destinadas a disminuir los efectos adversos, originados por la ocurrencia de un accidente.

Nivel de integridad de seguridad: Nivel de integridad (SIL 1, SIL 2 o SIL 3) de los sistemas instrumentados de seguridad (SIS) el cual se define en función de la probabilidad de falla en demanda.

NFPA: Organización fundada en Estados Unidos en 1896, encargada de crear y mantener las normas y requisitos mínimos para la seguridad humana y la prevención contra incendio, capacitación, instalación y uso de medios de protección contra incendio, utilizados tanto por bomberos, como por el personal encargado de la seguridad. Sus estándares conocidos como National Fire Codes recomiendan las prácticas seguras desarrolladas por personal experto en el control de incendios.

Peligro: Es toda condición física o química que tiene el potencial de causar daño al personal, a las instalaciones o al ambiente.

Reformación: Proceso que mejora la calidad antidetonante de fracciones de la gasolina modificando la estructura molecular. Cuando se lleva a efecto mediante calor se conoce como reformación térmica y reformación catalítica cuando se le asiste mediante un catalizador.

Riesgo: Peligros a los que se expone el personal. Combinación de la probabilidad de que ocurra un accidente.

Riesgo ALARP: (*As low as reasonably practicable*. Tan bajo como sea razonablemente práctico): los riesgos que se ubiquen en esta región deben estudiarse a detalle mediante el análisis de costo beneficio para que pueda tomarse una decisión en cuanto a que se tolere el riesgo o se implanten recomendaciones que permitan reducirlos a la región de riesgo tolerable.

Sistemas activos de seguridad: Requieren de la acción manual o automática para actuar. Interlocks, válvulas, dispositivos de relevo de presión, sistemas de lavado, sistemas de aislamiento o bloqueo, sistemas de paro de emergencia, sistemas de aspersión, detectores de fuego, mezclas explosivas o de concentraciones tóxicas, sólo si activan automáticamente algunos sistemas de mitigación activos.

Sistemas de seguridad pasivos: Áreas de amortiguamiento, aplicación de material ignífugo, diques, paredes o muros de contención, alcantarillas, drenajes y sumideros, sólo si estos tres últimos fueron diseñados con el propósito de mitigar las consecuencias del evento.

Sistema Instrumentado de seguridad: Sistema compuesto de sensores, “logic solver” y elementos finales de control cuyo propósito es llevar el proceso de un estado seguro cuando se violan unas condiciones predeterminadas de seguridad.

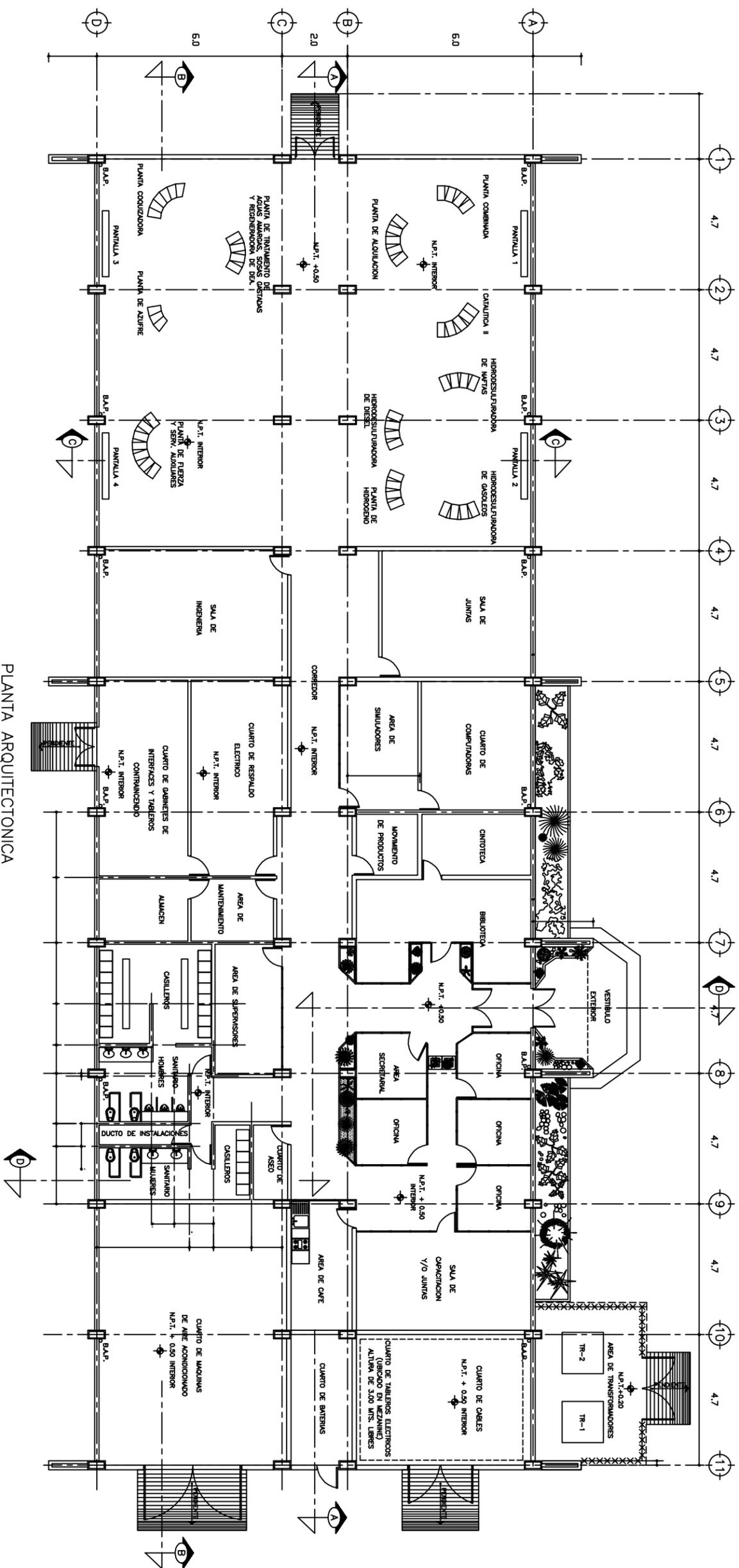
Sustancia Peligrosa: Cualquier sustancia que cuando es emitida, puesta en ignición o cuando su energía es liberada (fuego explosión, fuga tóxica) puede causar lesión, daños a las instalaciones debido a sus características de toxicidad, inflamabilidad, explosividad, corrosión, inestabilidad térmica, calor latente o compresión.

11 BIBLIOGRAFÍA

1. **DCO.** *Criterios técnicos para simular escenarios de riesgo por fuga y derrames de sustancias peligrosas en instalaciones de Petróleos Mexicanos.* 2007.
2. **Casal, Joaquim.** *Análisis del riesgo en instalaciones industriales.* s.l. : Ediciones UPC, 1999.
3. *Development of a new chemical process-industry accident database to assist in past accident analysis.* **Bahman Abdolhamidzadeha, Tasneem Abbasib, D. Rashtchiana, S.A. Abbasib.** 4, s.l. : Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2011, Vol. 24.
4. *Large Property Damage Losses in the Hydrocarbon chemical industries- a thirty years review.* **Marsh Risk Consulting.** New York : s.n., 2001.
5. **Casal, Joaquim.** *Evaluation of the effects and consequences of mayor accidents in industrial plants.* Barcelona, España. : ELSEVIERE, 2007. Vol. 8.
6. *Domino effect in process industry accidents An inventory of past events and identification of some patterns.* **Bahman Abdolhamidzadeh a, Tasneem Abbasi b, D. Rashtchian a, S.A. Abbasi b.** s.l. : Elsevier, 2010.
7. **Daniel A. Crowl, Joseph F. Louvar.** *Chemical process safety : fundamentals with applications.* 2nd ed. s.l. : Prentice Hall international series in the physical and chemical engineering sciences.
8. **G.Ramachandran.** *The Economics of Fire Protection.* s.l. : Taylor & Francis e-Library, 2003.
9. **Marsh Risk consulting 2010.** *The 100 larges losses 1972-2009.* 2010.
10. **Operaciones, Dirección operativa de.** *Guías técnicas para realizaranálisis de riesgo de procesos.* México : s.n., 2010.
11. **Dirección Corporativa de Operaciones.** *Guía técnica para la administración de cambios de tecnología.* México : s.n., 2010.
12. **Ericson, Clifton A.** *Hazard analysis techniques for system safety.* s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2005.
13. *History of Fire Protection Engineering.* **Arthur E. Cote, P.E., FSFPE.** 2008, Fire Protection Engineering,.
14. **CENAPRED.** *Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana.* 2009.
15. *Anuario estadístico de Pemex 2010.* 2011.
16. **Antonio, Medrano González Marco.** *Tesis: Diseño del sistema de protección contra incendio para la planta FCC No. 2 de la refinería de Francisco I.Madero.* México : s.n., 1999.
17. **Anna Stec, Richard Hull.** *Fire toxicity.* New York : CRC, 2010.
18. **Janicak., Lon H. Ferguson and Christopher A.** *Fundamentals of fire protection for the safety professional.* EUA : Government Institutes, 2005.
19. *Calor peligroso.* **Raj, Phani k.** Marzo, 2007, NFPA Journal Latinoamericano.

20. **Schroll, R. Craig.** *Industrial fire protection handbook*. 2nd ed. s.l. : CRC Press LLC, 2002.
21. **Björn Karlsson, James G. Quintiere.** *Enclosure fire dynamics*. s.l. : CRC Press LLC, 2000.
22. *Fundamentos de lucha contra incendios*.
23. **Fitzgerald, Robert W.** *Building fire performance analysis* . s.l. : John Wiley & Sons Ltd, 2004. .
24. **NFPA.** *NFPA 101 Code for Safety to Life from Fire in Buildings and Structures] Código de Seguridad Humana en edificios*.
25. **Andrew Furness, Martin Muckett.** *Introduction to fire safety management*. s.l. : ELSEVIERE, 2007.
26. **Comisión de Seguridad Eléctrica** . [En línea]
<http://www.seguridadelectricamexico.com/SegApaElec.php>.
27. **CCPS.** *Fire protection in chemical, petrochemical, and hydrocarbon processing facilities*. New York : AICHE, 2003.
28. **Center for Chemical Process Safety.** *Guidelines for facility siting and layout*. 2003.
29. **Industrial Risk Insurance** . *Oil and Chemical Plant Layout and spacing IM.2.5.2*. 1996.
30. **Hunt, Toni Ivergard & Briant.** *Handbook of control room design and ergonomics : a perspective for the future*. 2a. ed. s.l. : CRC Press, 2009.
31. **Bransby, Jan Noyes & Mathew.** *People in control: human factors in control room design*. First ed. s.l. : IET, 2001. Vols. IET Control Engineering Series, 60.
32. **Center for chemical process safety.** *Guidelines for Evaluating Process plant buildings for external explosions and fires*. s.l. : CCPS, 1996.
33. **MAPFRE.** *Manual de Protección contra incendios*. España : s.n.
34. **PDVSA.** *Manual de ingeniería de riesgos. Diseño de edificaciones en áreas de proceso*. Rev. 3 . 2004.
36. **INEGI.** [En línea] [Citado el: 8 de 11 de 2015.]
<http://cuentame.inegi.org.mx/economia/default.aspx?tema=E>.
37. **Vincoli, Jeffrey W.** *Basic guide to system safety*. 2nd ed. s.l. : John Wiley & Sons, Inc., 2006.
38. **Casals.** *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. s.l. : UPC, 1999.
39. **Center for Chemical Process Safety.** *Postrelease mitigation technology in the chemical process industry*. s.l. : CCPS, 1997.
40. **U.S. Department of Commerce.** *Hurricane Katrina, August 23-31, 2005*. New Orleans, Louisiana : s.n., 2006.
41. **Assael, Marc J.** *Fires, explosions, and toxic gas dispersions : effects calculation and risk analysis*. s.l. : CRC Press, 2010.

Anexo 1. Plano arquitectónico y fachada del cuarto de control a proteger



PLANTA ARQUITECTONICA

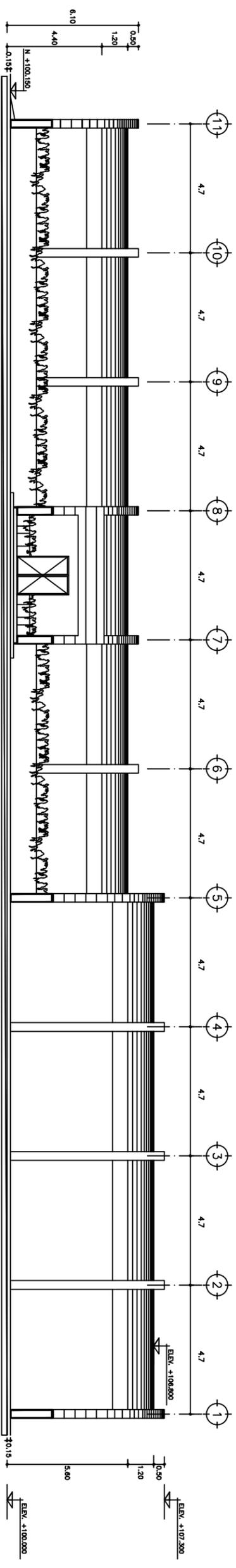
NOTAS

1.- ACOLOCACIONES Y NIVELES EN METROS

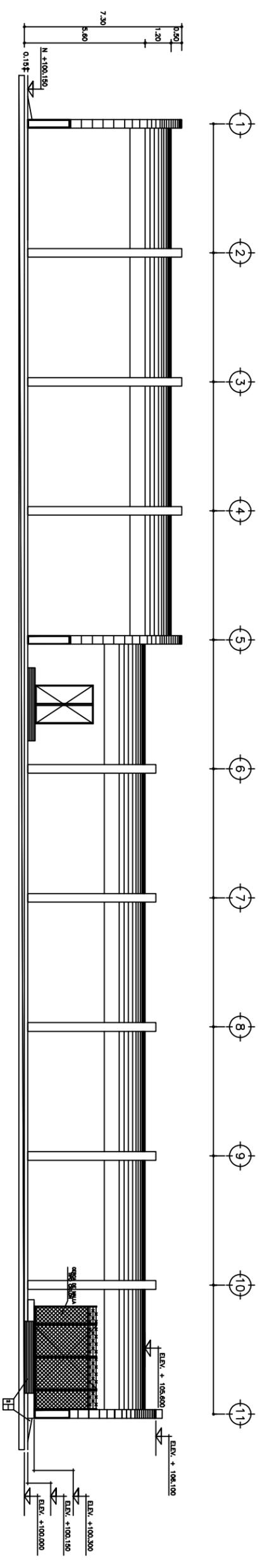
TESIS:
SISTEMAS CONTRA INCENDIO PARA CUARTOS
DE CONTROL DE PLANTAS DE PROCESO

CUARTO DE CONTROL
CENTRAL
PLANTA ARQUITECTONICA

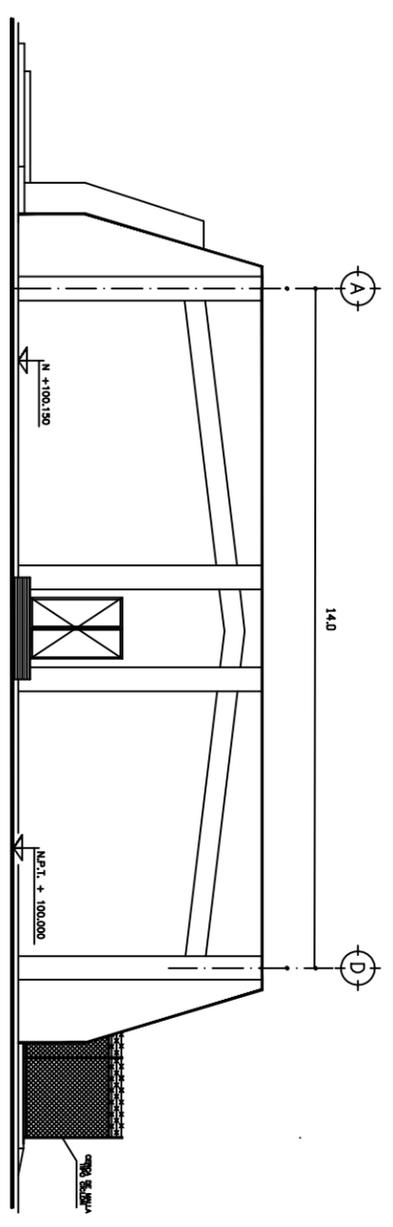
ESCALA: 1/25
AUTOR: M.H.
PLANO 1A (Pag. 103) REV 0



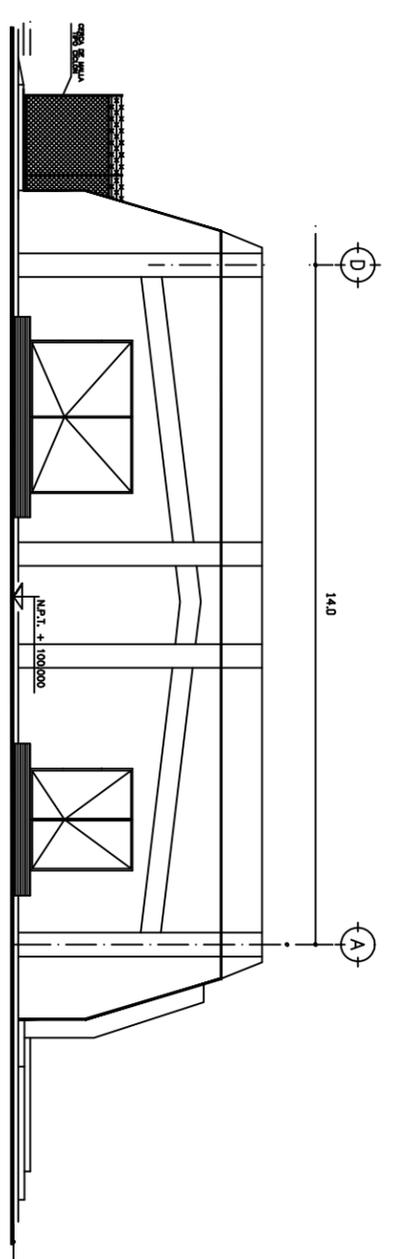
FACHADA EJE A



FACHADA EJE D



FACHADA EJE 1



FACHADA EJE 11

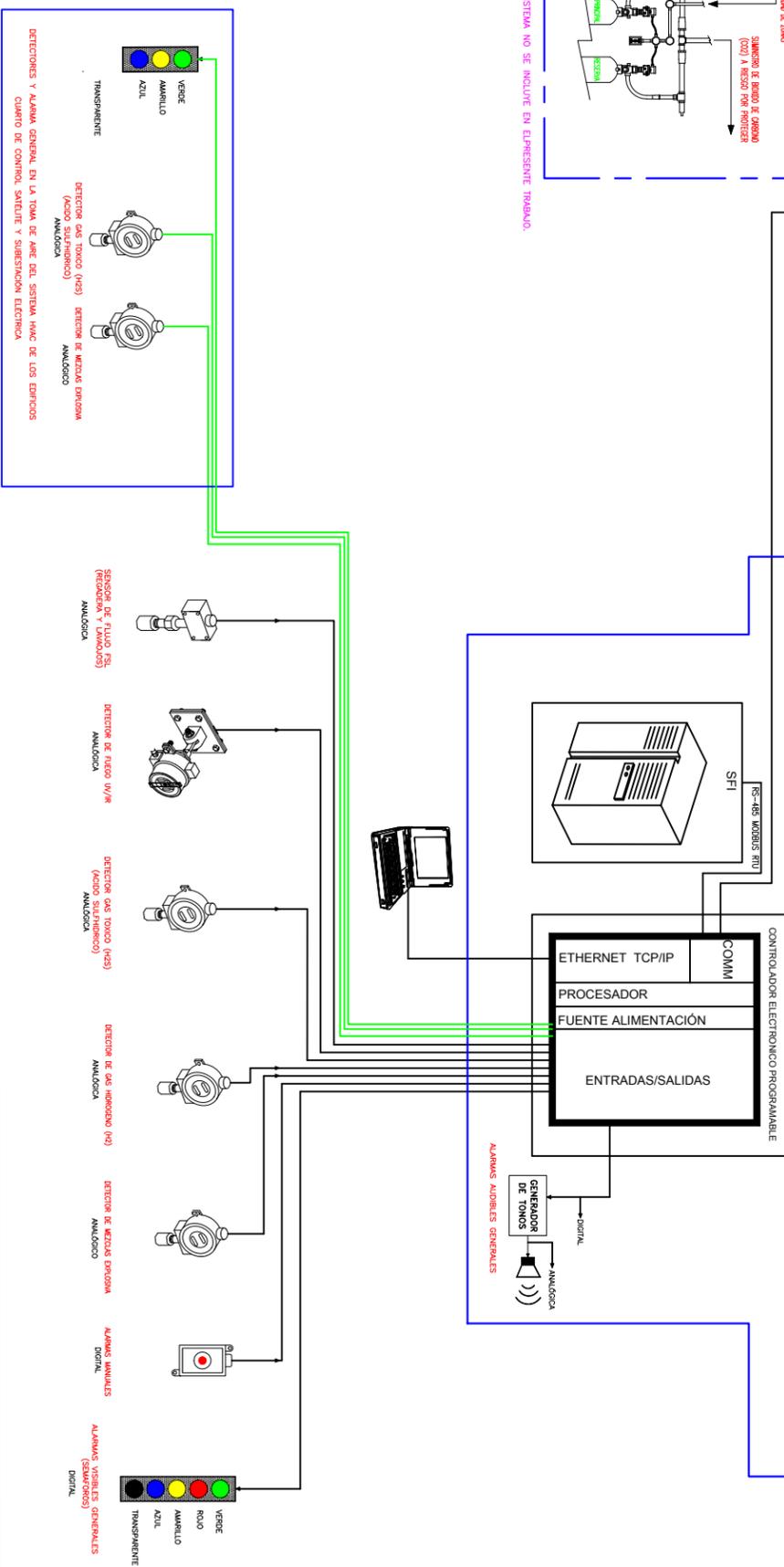
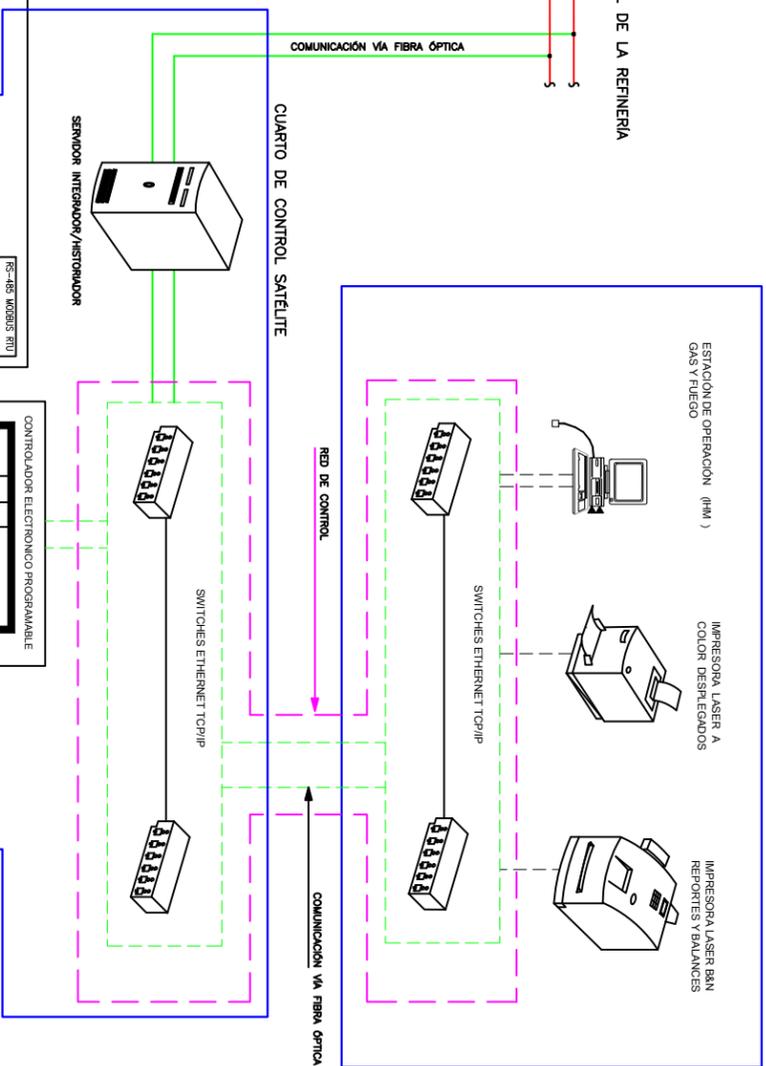
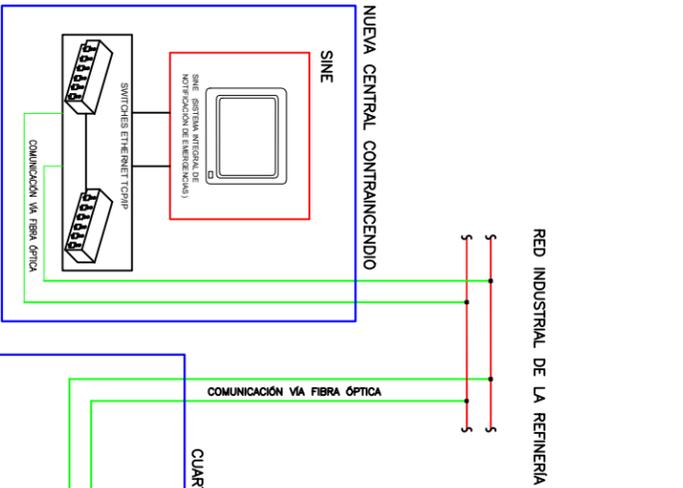
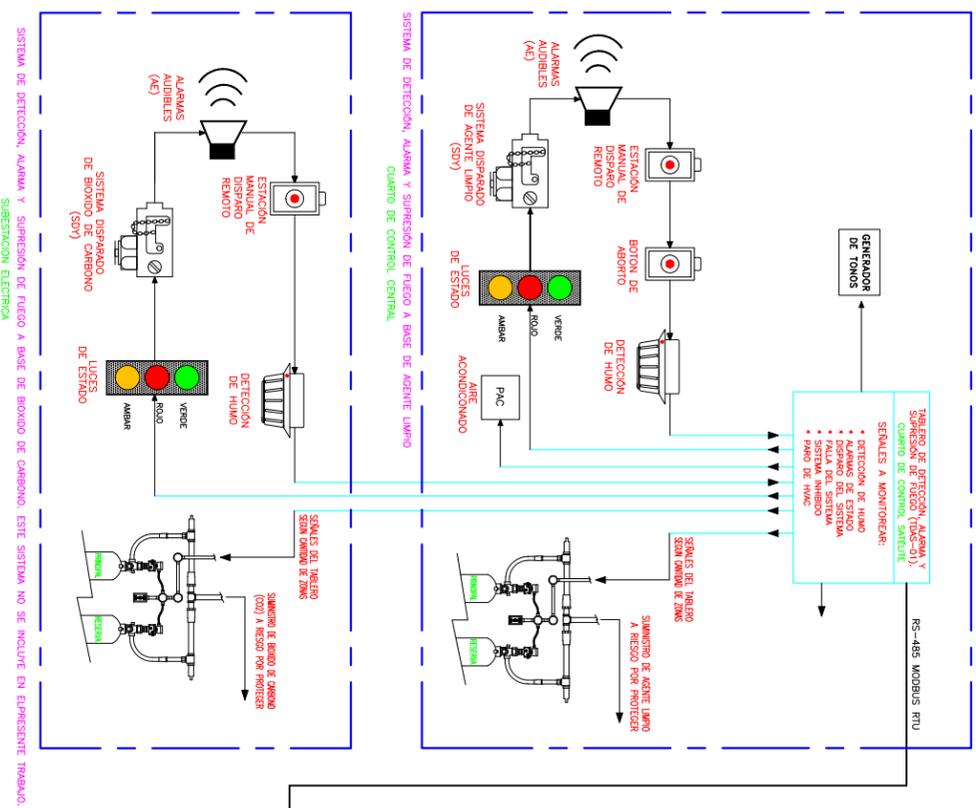
TESIS:
SISTEMAS CONTRA INCENDIO PARA CUARTOS
DE CONTROL DE PLANTAS DE PROCESO



CUARTO DE CONTROL
CENTRAL
FACHADAS



Anexo 2. Arquitectura del sistema contra incendio del cuarto de control



TESIS:
SISTEMAS CONTRA INCENDIO PARA CUARTOS DE CONTROL DE PLANTAS DE PROCESO



CUARTO DE CONTROL CENTRAL
ARQUITECTURA DEL SISTEMA CONTRA INCENDIO DEL CUARTO DE CONTROL

