



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE  
DIÓXIDO DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE  
COMBATE DE INCENDIOS EN GENERADORES PARA  
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS**

Gabriel Fernando Aguilar Rodas  
Asesorado por el Ing. Julio César Molina Zaldaña

Guatemala, noviembre de 2010



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO  
DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE  
INCENDIOS EN GENERADORES PARA CENTRALES  
HIDROELÉCTRICAS**

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

**GABRIEL FERNANDO AGUILAR RODAS**  
ASESORADO POR EL ING. JULIO CÉSAR MOLINA ZALDAÑA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO MECÁNICO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

|            |  |
|------------|--|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos             |
| VOCAL I    | Inga. Glenda Patricia García Soria           |
| VOCAL II   | Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López |
| VOCAL III  | Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón            |
| VOCAL IV   | Br. Luis Pedro Ortíz de León                 |
| VOCAL V    | P.A. José Alfredo Ortíz Herincx              |
| SECRETARIO | Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez              |

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| DECANO     | Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos |
| EXAMINADOR | Ing. Roberto Guzmán Ortiz        |
| EXAMINADOR | Ing. Julio César Campos Paiz     |
| EXAMINADOR | Ing. Carlos Enrique Sanabria     |
| SECRETARIA | Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas |

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO DE  
CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE INCENDIOS EN  
GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Mecánica, el 7 de junio de 2010.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Gabriel', enclosed within a large, loopy circular scribble.

**GABRIEL FERNANDO AGUILAR RODAS**

Guatemala, 11 de octubre de 2010

**Ingeniero**  
**Julio César Campos Paiz**  
**Director Escuela Ingeniería Mecánica**  
**Facultad de Ingeniería**  
**Universidad de San Carlos de Guatemala**

Ingeniero Campos:

Por este medio informo a usted que el tema del Trabajo de Graduación titulado, ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE INCENDIOS EN GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, presentado por el estudiante Gabriel Fernando Aguilar Rodas, ha sido revisado técnica y profesionalmente, y las observaciones y correcciones surgidas de esta asesoría, han sido efectuadas por el estudiante.

Por tal motivo, doy mi visto bueno para que se continúe con el trámite respectivo, aclarando que dicho Trabajo de Graduación es responsabilidad del graduado y de mi persona, referente al contenido y presentación del mismo, de los conceptos y opiniones que allí se traten, así como del estilo y la calidad de redacción

Atentamente,



**Ing. Julio César Molina Zaldaña**  
**Colegiado No. 3959**  
**Asesor**



El Coordinador del Área Térmica de la Escuela de Ingeniería Mecánica, luego de conocer el dictamen del Asesor y habiendo revisado en su totalidad el trabajo de graduación titulado, **ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE INCENDIOS EN GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS** del estudiante Gabriel Fernando Aguilar Rodas, recomienda su aprobación.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

  
Ing. Julio César Molina Zaldana  
Coordinador de Área



Guatemala, octubre de 2010.

/behdei

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA**



**FACULTAD DE INGENIERIA  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen del asesor, con la aprobación del Coordinador del Área Complementaria, al Trabajo de Graduación titulado ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE INCENDIOS EN GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS, del estudiante Gabriel Fernando Aguilar Rodas, procede a la autorización del mismo.

**ID Y ENSEÑAD A TODOS**

Ing. Julio César Campos Paiz  
**DIRECTOR**



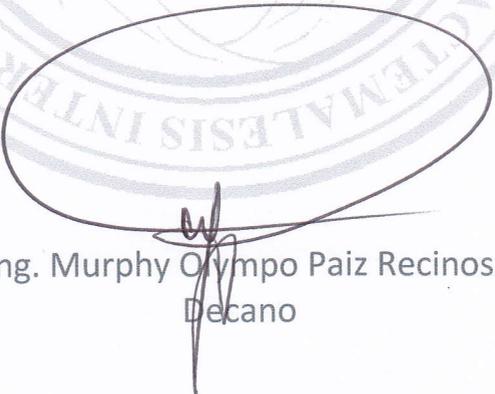
Guatemala, noviembre de 2010

JCCP/behdei



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica, al trabajo de graduación titulado: **ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA APLICACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO UTILIZADO EN SISTEMAS DE COMBATE DE INCENDIOS EN GENERADORES PARA CENTRALES HIDROELÉCTRICAS,** presentado por el estudiante universitario **Gabriel Fernando Aguilar Rodas,** autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos  
Decano

Guatemala, 18 de noviembre de 2010.

/gdech



## **DEDICATORIA:**

A mi esposa e hija, Cesi y Dani, por su amor y paciencia;

a mis padres, Fernando y Anabella por su apoyo incondicional,

a Julio Molina, por su asesoramiento en la elaboración de este Trabajo de Graduación;

a Haydn, Flor y Manuel por el apoyo profesional brindado.

# ÍNDICE GENERAL

|   |      |
|---|------|
| <b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....  | VII  |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....  | XI   |
| <b>GLOSARIO</b> .....   | XIII |
| <b>RESUMEN</b> .....  | XVII |
| <b>OBJETIVOS</b> .....  | XIX  |
| <b>INTRODUCCIÓN</b> .....   | XXI  |
| <b>1 GENERALIDADES DEL FUEGO Y ANÁLISIS DE RIESGO DE<br/>INCENDIO EN GENERADORES ELÉCTRICOS</b> ..... | 1    |
| 1.1 Termodinámica del fuego .....   | 1    |
| 1.1.1 Transferencia de calor .....  | 2    |
| 1.2 Estructura de la flama.....   | 23   |
| 1.3 Mecanismo de combustión.....  | 24   |
| 1.3.1 Punto de inflamación .....  | 25   |
| 1.3.2 Temperatura de ignición .....   | 25   |
| 1.3.3 Estequiometría.....   | 25   |
| 1.4 Clasificación del fuego.....  | 26   |
| 1.4.1 Clasificación por material incinerado .....   | 26   |
| 1.4.2 Clasificación por nivel de afectación .....   | 27   |
| 1.5 Análisis del riesgo de incendio en generadores eléctricos .....                                   | 28   |
| 1.5.1 Descripción del riesgo.....   | 28   |
| 1.5.2 Fuentes de ignición y tipo de fuego .....   | 30   |
| 1.5.3 Consecuencias de la consumación del riesgo .....  | 30   |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.5.4 | Protección recomendada.....  | 30 |
| 2     | DIÓXIDO DE CARBONO Y SISTEMAS DE APLICACIÓN.....                           | 33 |
| 2.1   | Antecedentes del uso del CO <sub>2</sub> para extinción de incendios ..... | 33 |
| 2.2   | Propiedades del CO <sub>2</sub> .....                                      | 33 |
| 2.2.1 | Propiedades termodinámicas .....   | 34 |
| 2.2.2 | Propiedades físicas .....  | 35 |
| 2.2.3 | Propiedades de extinción .....   | 36 |
| 2.3   | Limitaciones del CO <sub>2</sub> como agente extintor .....                | 38 |
| 2.4   | Métodos de aplicación .....  | 39 |
| 2.4.1 | Inundación total .....   | 39 |
| 2.4.2 | Aplicación local.....  | 40 |
| 2.4.3 | Sistema manual de línea de manguera .....                                  | 41 |
| 2.4.4 | Descarga extendida.....  | 42 |
| 2.4.5 | Aplicaciones especiales.....   | 43 |
| 2.5   | Seguridad personal.....  | 43 |
| 2.5.1 | Consideraciones generales de seguridad.....                                | 43 |
| 2.5.2 | Espacios ocupados.....   | 44 |
| 2.5.3 | Alarmas .....  | 44 |
| 2.5.4 | Avisos .....   | 45 |
| 2.5.5 | Procedimientos de evacuación.....  | 49 |
| 2.5.6 | Espacios libres eléctricos .....   | 49 |
| 2.5.7 | Duración de la protección .....  | 51 |
| 2.6   | Consideraciones ambientales en el uso y manejo del CO <sub>2</sub> .....   | 51 |

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 3     | COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE ALTA Y BAJA PRESIÓN DE CO <sub>2</sub> ..... | 55 |
| 3.1   | Contenedores de almacenaje.....   | 55 |
| 3.1.1 | Almacenaje de alta presión.....   | 55 |
| 3.1.2 | Almacenaje de baja presión.....   | 60 |
| 3.2   | Sistemas de tuberías.....   | 62 |
| 3.2.1 | Parámetros de operación.....  | 62 |
| 3.2.2 | Parámetros de diseño.....   | 63 |
| 3.2.3 | Parámetros de diseño para accesorios.....                                   | 65 |
| 3.2.4 | Válvulas de acción.....   | 66 |
| 3.2.5 | Válvulas selectoras.....  | 74 |
| 3.2.6 | Otras válvulas del sistema.....   | 75 |
| 3.2.7 | Dispositivos de alivio de presión.....                                      | 77 |
| 3.2.8 | Interruptor de presión.....   | 77 |
| 3.3   | Detectores de fuego.....  | 78 |
| 3.3.1 | Sistema de detección neumática.....   | 78 |
| 3.3.2 | Sistema de detección eléctrica.....   | 78 |
| 3.3.3 | Sistema de detección mecánica.....  | 79 |
| 3.4   | Toberas de descarga.....  | 79 |
| 3.4.1 | Toberas tipo A o D.....   | 79 |
| 3.4.2 | Toberas tipo selladas.....  | 80 |
| 3.4.3 | Toberas tipo regular.....   | 81 |
| 3.4.4 | Toberas tipo baffle.....  | 81 |
| 3.4.5 | Otros tipos de toberas.....   | 82 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.5   | Panel de control .....   | 83  |
| 3.6   | Alarmas .....  | 84  |
| 3.6.1 | Alarmas de predescarga.....  | 84  |
| 3.6.2 | Alarmas de descarga.....   | 84  |
| 3.6.3 | Dispositivos de seguridad.....   | 86  |
| 3.7   | Configuración básica de un sistema de alta presión .....   | 87  |
| 4     | DISEÑO DE SISTEMA DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS PARA<br>GENERADORES HIDRÁULICOS.....   | 89  |
| 4.1   | Determinación de la concentración de CO <sub>2</sub> .....   | 89  |
| 4.1.1 | Equipo recirculante .....  | 90  |
| 4.1.2 | Equipo no recirculante .....   | 91  |
| 4.2   | Determinación del tiempo de descarga .....   | 91  |
| 4.3   | Toberas de descarga .....  | 91  |
| 4.3.1 | Diseño y condiciones de funcionamiento.....  | 91  |
| 4.3.2 | Tipo de tobera .....   | 94  |
| 4.3.3 | Número y distribución de toberas .....   | 94  |
| 4.4   | Cálculos hidráulicos .....   | 94  |
| 4.4.1 | Esquematación del sistema .....  | 94  |
| 4.4.2 | Cálculo de tasa de aplicación .....  | 95  |
| 4.4.3 | Cálculo de tubería equivalente .....   | 95  |
| 4.4.4 | Cálculo de diámetro de tubería y orificio de toberas.....  | 97  |
| 4.5   | Aplicación de sistema de extinción a base de CO <sub>2</sub> en<br>unidades generadoras de Planta Hidroeléctrica Chixoy..... | 103 |
|       | <b>CONCLUSIONES</b> .....  | 105 |

**RECOMENDACIONES**..... 107  
**BIBLIOGRAFÍA** ..... 109



# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Diagrama de superficie en llamas .....  | 3  |
| 2  | Pérdida de calor a través de una ventana .....  | 10 |
| 3  | Perfiles de temperatura en intervalos de tiempo dentro del espesor de un sólido debido a la transferencia de calor desde la cara izquierda ..           | 13 |
| 4  | Efecto del aislamiento térmico $k\rho c$ en el aumento de la temperatura en una superficie de sólido semi-infinito.....                                 | 15 |
| 5  | Espectro electromagnético .....   | 19 |
| 6  | Radiación intercambiada entre dos superficies .....   | 20 |
| 7  | Diagrama esquemático del decrecimiento de la intensidad de radiación de una fuente, como el cuadrado de la distancia entre la fuente y el receptor..... | 22 |
| 8  | Tipos de flamas (a) Flama premezclada, (b) Flama de difusión.....   | 24 |
| 9  | Triángulo de fuego.....   | 24 |
| 10 | Variación de presión del CO <sub>2</sub> con cambio en la temperatura (volumen constante).....  | 34 |
| 11 | Instalación de sistema combate de incendio por aplicación total en generador hidroeléctrico.....  | 39 |
| 12 | Instalación de sistema combate de incendio por aplicación local en freidora industrial.....   | 41 |
| 13 | Sistema Manual de CO <sub>2</sub> con manguera montada en riel.....   | 42 |

|    |   |    |
|----|---|----|
| 14 | Aviso en cada espacio protegido .....   | 46 |
| 15 | Aviso en cada entrada a espacio protegido .....   | 46 |
| 16 | Aviso en cada entrada a espacio protegido por sistemas provistos con un odorizante de aceite .....        | 47 |
| 17 | Aviso en cada espacio próximo donde el dióxido de carbono puede acumularse hasta niveles peligrosos ..... | 47 |
| 18 | Aviso afuera de cada entrada a cuartos de almacenaje de dióxido de carbono .....                          | 48 |
| 19 | Aviso en cada estación de activación manual.....  | 48 |
| 20 | Cilindro de almacenamiento a alta presión .....   | 55 |
| 21 | Partes de válvula de descarga .....   | 58 |
| 22 | Válvula de descarga mostrando disco de ruptura .....  | 59 |
| 23 | Bastidor de cilindros .....   | 59 |
| 24 | Depósito de baja presión .....  | 60 |
| 25 | Válvula actuadora de palanca para aplicación local.....   | 67 |
| 26 | Válvula actuadora de palanca para aplicación local.....   | 68 |
| 27 | Barra de acoplamiento para palancas actuadoras .....  | 68 |
| 28 | Estación de acción manual de compuerta asegurada.....   | 69 |
| 29 | Estación de acción manual de ventana de vidrio .....  | 70 |
| 30 | Accesorios de actuación manual.....   | 71 |
| 31 | Actuador neumático/manual .....   | 72 |
| 32 | Actuador neumático .....  | 72 |
| 33 | Disposición de alimentación neumática para varios cilindros de CO <sub>2</sub> .....                      | 73 |
| 34 | Válvula eléctrica .....   | 73 |

|    |  |     |
|----|--|-----|
| 35 | Válvula selectora con actuación neumática.....   | 74  |
| 36 | Válvula selectora con actuador solenoide .....   | 74  |
| 37 | Válvula cheque .....   | 75  |
| 38 | Válvula de cerrojo manual .....  | 76  |
| 39 | Válvula de dirección/paro .....  | 76  |
| 40 | Válvula de dirección/paro .....  | 77  |
| 41 | Tobera tipo A .....  | 80  |
| 42 | Tobera tipo sellada .....  | 81  |
| 43 | Tobera tipo regular .....  | 81  |
| 44 | Tobera tipo baffle.....  | 82  |
| 45 | Tobera tipo cono.....  | 82  |
| 46 | Tobera tipo multidescarga .....  | 83  |
| 47 | Sirena operada por presión .....   | 85  |
| 48 | Sirena operada por presión .....   | 85  |
| 49 | Odorizador.....  | 86  |
| 50 | Retardador neumático de descarga .....   | 87  |
| 51 | Sistema principal o de reserva con válvulas selectoras .....                               | 87  |
| 52 | Diagrama hs del proceso real e isoentrópico de una tobera .....                            | 93  |
| 53 | Caída de presión en la tubería para almacenaje de alta presión .....                       | 99  |
| 54 | Sistema de Combate de Incendios a Base de CO <sub>2</sub> en<br>Hidroeléctrica Chixoy..... | 103 |

## TABLAS

|      |   |     |
|------|---|-----|
| I    | Correlaciones de transferencia convectiva de calor .....  | 18  |
| II   | Espacios libres desde el equipo de dióxido de carbono a componentes eléctricos vivos no aislados.....   | 50  |
| III  | Factores de inundación .....  | 89  |
| IV   | Descarga prolongada de protección para generadores eléctricos, recirculantes, encerrados (pies cúbicos protegidos durante el tiempo de desaceleración ..... | 90  |
| V    | Longitudes equivalentes en pies de accesorios roscados de tubería .....   | 96  |
| VI   | Longitudes equivalentes en pies de accesorios soldados de tubería.....  | 96  |
| VII  | Valores de Y y Z para presión inicial de almacenaje de 750psi .....   | 98  |
| VIII | Valores de $D^{1.25}$ y $D^2$ para varios tamaños de tubería.....   | 100 |
| IX   | Tasa de descarga por pulgada cuadrada de área de orificio equivalente para almacenaje de alta presión.....  | 101 |
| X    | Tasa de descarga por pulgada cuadrada de área de orificio equivalente para almacenaje de alta presión .....   | 102 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                 |   |
|-----------------|---|
| Amp             | Medida de corriente eléctrica en Amperios.        |
| °C              | Temperatura en grados centígrados.                |
| CO <sub>2</sub> | Dióxido de carbono.                               |
| Btu             | Medida de calor en Unidad Térmica Británica.      |
| °F              | Temperatura en grados Fahrenheit.                 |
| K               | Temperatura absoluta en Kelvin.                   |
| Kg              | Medida de masa en Kilogramos.                     |
| KJ              | Medida de calor en Kilojoules.                    |
| KPa             | Medida de presión en Kilopascales.                |
| KV              | Medida de voltaje en Kilovoltios.                 |
| KW              | Medida de calor en Kilowatts.                     |
| Mol             | Cantidad de sustancia.                            |
| Psi             | Medida de presión en libras por pulgada cuadrada. |
| °R              | Temperatura absoluta en grados Rankine.           |
| VCD             | Voltios de corriente directa.                     |



## GLOSARIO

|  |   |
|--|---|
| <b>Administrador del Mercado Mayorista</b> | Es el ente encargado de administrar el Mercado Mayorista y tiene como funciones primordiales el garantizar la seguridad y abastecimiento de energía eléctrica, a través de mecanismos de operación técnica y comerciales.   |
| <b>Alternador trifásico</b>                | Generador eléctrico.  |
| <b>ANSI</b>                                | Instituto Nacional Americano de Estándares, por sus siglas en inglés, es una organización sin ánimo de lucro que supervisa el desarrollo de estándares para productos, servicios, procesos y sistemas en los Estados Unidos.  |
| <b>API</b>                                 | Instituto Americano de Petróleo, por sus siglas en inglés, principal asociación comercial de los Estados Unidos, representan cerca de 400 corporaciones implicadas en la producción, el refinamiento, la distribución y otros aspectos de la industria del petróleo y del gas natural. Las principales funciones incluyen la defensa, negociación con agencias gubernamentales, asuntos legales, y negociación con organismos reguladores; investigación de efectos económicos, toxicológicos, y ambientales; establecimiento y certificación de estándares de la industria, entre otros. |

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| <b>ASME</b>                 | Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, por sus siglas en inglés, es una asociación profesional, que genera códigos de diseño, construcción, inspección y pruebas para equipos.                                  |
| <b>Devanado</b>             | Bobinas de las que está compuesto un generador, cuyo fin es la creación de un campo electromagnético para inducir electricidad.  |
| <b>DOT</b>                  | Departamento de Transporte, por sus siglas en inglés. Organización estatal estadounidense de códigos, normativas y estándares.   |
| <b>Entalpía</b>             | Magnitud termodinámica, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, o sea, la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno. |
| <b>Entropía</b>             | Es la magnitud termodinámica que mide la parte de la energía que no puede utilizarse para producir trabajo.  |
| <b>Generador Hidráulico</b> | Máquina eléctrica rotativa que aprovecha la energía mecánica transferida desde una turbina hidráulica, para generar energía eléctrica en una Hidroeléctrica.   |
| <b>Isoentrópico</b>         | Proceso termodinámico en el cual no existe variación de la entropía.   |

|                         |   |
|-------------------------|---|
| <b>Hidruro metálico</b> | Es la combinación del hidrógeno con un metal.   |
| <b>Licuadao</b>         | Gas que ha pasado del estado gaseoso al líquido, por acción de la temperatura y el aumento de presión.  |
| <b>Lucro cesante</b>    | Pérdidas económicas derivadas de fallas ocurridas en el sistema de producción de una industria o empresa, que ocasionan paros parciales o totales de la producción.   |
| <b>NFPA</b>             | Asociación Nacional de Protección Contra el Fuego, por sus siglas en inglés. Es la fuente autoritativa principal de conocimientos técnicos, datos, y consejos para el consumidor sobre la problemática del fuego, la protección y prevención del mismo. |
| <b>Sublimación</b>      | Es el proceso que consiste en el cambio de estado de la materia sólida al estado gaseoso sin pasar por el estado líquido.   |
| <b>Termoestable</b>     | Polímero que no se funde al elevarlos a altas temperaturas, sino que se quema, siendo imposible volver a moldearlo.   |
| <b>Termoplástico</b>    | Es un polímero que, a temperatura ambiente, es plástico o deformable, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado vítreo cuando se enfría lo suficiente.   |

**Tobera**

Dispositivo que incrementa la velocidad y energía cinética de un fluido por medio de una caída de presión.

**Vapor flash**

Es el vapor producido por la caída de presión del dióxido de carbono líquido a través de la tobera de descarga.

## RESUMEN

La termodinámica define los procesos de transferencia de calor que se dan en la ocurrencia de fuego en materiales y líquidos. Los mecanismos de transferencia de calor presentes en un proceso de incineración son conducción, convección y radiación, siendo esta transferencia fundamental para dicho proceso: el flujo másico de gases de combustión está en función del flujo de calor de la flama a la superficie, el flujo de calor cedido por la superficie al ambiente y las características propias del material en llamas.

De igual manera, para que ocurra incendio en los devanados de un generador eléctrico, es necesario que se cumpla el triángulo de fuego, hecho indeseable, considerando que dicho equipo es crítico para la producción de energía en una hidroeléctrica. El método más eficiente y seguro para el equipo, que sofocará un incendio dentro del generador, es la aplicación de dióxido de carbono por medio de un sistema automático de combate de incendio, que proporcionará un desplazamiento de oxígeno como ningún otro agente gaseoso extintor en el mercado y permitirá una transferencia de calor considerable de los elementos en llamas a él, lo que ayudará a llevar a los elementos en llamas, por debajo de su temperatura ignición y su temperatura de gasificación.

La aplicación del  $\text{CO}_2$  se hará por medio de toberas, aprovechando una caída de presión (presión de almacenaje por encima de la presión atmosférica), imprimiéndole energía cinética al gas, provocando una alta velocidad de descarga, lo que permitirá llenar todas las partes del equipo con la concentración de gas requerida, por el tiempo definido, según norma.

El método de diseño del sistema toma como base pruebas de laboratorio que definen la concentración de diseño en 50%, debiéndose alcanzar en un

tiempo no mayor a 7 minutos, y concentración mínima de 30%, debiéndose alcanzar en un tiempo no mayor a los 2 minutos. Los cálculos hidráulicos pueden ser simplificados por tablas y gráficas que se encuentran dispuestas en este trabajo de graduación.

# OBJETIVOS

## **General**

Describir un sistema de combate de incendios a base de CO<sub>2</sub> para generadores hidráulicos, determinando sus cualidades termodinámicas y físicas, para que sirva de base en el desarrollo de proyectos encaminados a brindar protección a estos equipos críticos en las hidroeléctricas más importantes del Estado.

## **Específicos**

1. Evaluar el riesgo de incendio en generadores eléctricos y los medios para minimizar sus consecuencias.
2. Realizar un análisis termodinámico del fuego, como base de la aplicación de agentes gaseosos para la extinción de incendios.



# INTRODUCCIÓN

En la industria de generación hidroeléctrica, como en cualquier otro tipo de actividad de producción, las fallas e incendios en los equipos críticos del proceso causan gran preocupación, ya que estos pueden conllevar lucro cesante por estar fuera de línea, pérdidas en remoción de equipo y estructuras dañadas, tiempos largos de recuperación de las condiciones iniciales de operación, daño físico al personal y proyección negativa de la imagen de la compañía.

Los generadores eléctricos son equipos de vital importancia en las hidroeléctricas y debe considerarse un sistema de extinción de incendios en estos, de tal manera se garantice la minimización de pérdidas por posibles incendios, ya que la probabilidad de ocurrencia de un evento de esta magnitud, no puede ser eliminado.

La base científica utilizada para la aplicación de los sistemas de extinción a base de dióxido de carbono, está cimentada, en la Norma sobre Sistemas de Extinción a Base de Dióxido de Carbono, NFPA 12, cuyos parámetros de aplicación y diseño, toman en cuenta la Termodinámica de los fluidos. En este trabajo de graduación se hace especial énfasis en este estándar y en las metodologías de diseño de fabricantes que se respaldan en el mismo.



# 1 GENERALIDADES DEL FUEGO Y ANÁLISIS DE RIESGO DE INCENDIO EN GENERADORES ELÉCTRICOS

## 1.1 Termodinámica del fuego

El fuego es un proceso complejo que abarca variadas interacciones entre procesos de índole física y química.

Cuando un material determinado es calentado, puede responder de las dos formas siguientes, dependiendo de las propiedades físicas y químicas de este:

a. *Producción de humo sin llama.* Esta es una reacción exotérmica de la superficie. Esta caracterizada, usualmente, por incandescencia y producción de humo. Depende mayormente de las condiciones del ambiente y de las propiedades de material y la disponibilidad de oxígeno.

Representa un grave riesgo de fuego debido a que es una forma ineficiente de combustión, en donde el monóxido de carbono, producto de la combustión, representará un gran porcentaje del producido en condiciones de fuego como tal; además proveerá un medio por el cual se producirá llama desde fuentes de calor, muy pequeñas, que normalmente no generarían esta llama.

b. *Pirólisis.* Es la descomposición química de un material en una o más sustancias, debido a una transferencia de calor hacia este. Todos los combustibles sólidos deben pasar por este proceso, con el fin de generar vapores inflamables para la posterior aparición de flama.

La energía requerida para convertir un material en vapor por pirólisis, es llamada calor de gasificación, propiedad que puede ser determinada por calorímetros en laboratorios con atmósferas controladas.

### 1.1.1 Transferencia de calor

La transferencia se debe a la diferencia de temperatura, el calor siempre fluye de altas a bajas temperaturas. En un proceso de incineración, el calor fluye de las flamas a la superficie que se incendia.

El modelo simplificado de una superficie en llamas muestra como el flujo de los vapores de combustión son mantenidos por la transferencia de calor de las flamas a la superficie:

$$\dot{m}'' = \frac{\dot{Q}''_{flama} - \dot{Q}''_{cedido}}{L_g} \text{ kg/s} \quad (1), \text{ donde:}$$

$\dot{m}''$  = flujo másico de gases de combustión

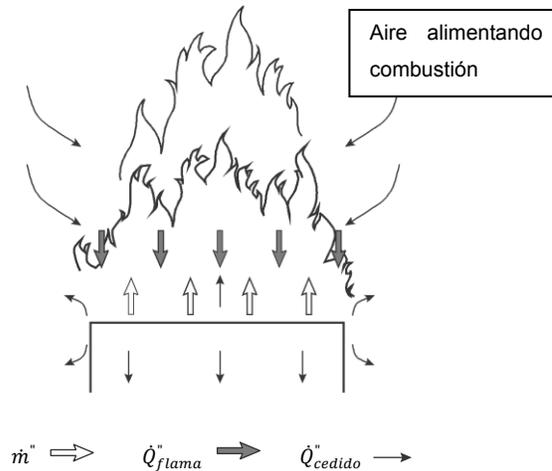
$\dot{Q}''_{flama}$  = flujo de calor de la flama a la superficie ( $kW/m^2$ )

$\dot{Q}''_{cedido}$  = flujo de calor cedido por la superficie ( $kW/m^2$ )

$L_g$  = calor de gasificación ( $kJ/kg$ )

Esta fórmula contiene la esencia de la comprensión y el comportamiento del fuego: la transferencia de calor es determinante en el proceso de la incineración. Esto también puede verse gráficamente, mediante el diagrama de superficie en llamas.

**Figura 1** Diagrama de superficie en llamas



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-4

### 1.1.1.1 Unidades de temperatura

#### 1.1.1.1.1 Celsius

Un grado centígrado ( $^{\circ}\text{C}$ ), es la centésima parte de la diferencia entre la temperatura de derretir hielo y la temperatura de evaporar agua a presión atmosférica. Es una unidad aprobada por el Sistema Internacional.

#### 1.1.1.1.2 Kelvin

Kelvin (K) es del mismo tamaño que el grado Celsius, pero el cero en esta escala es  $-273.15^{\circ}\text{C}$ . Las temperaturas indicadas con Kelvin son absolutas. Esta es una unidad aprobada por el Sistema Internacional.

### **1.1.1.1.3 Fahrenheit**

Un grado Fahrenheit es 1/180 de la diferencia entre la temperatura del congelamiento del agua y la evaporación del agua a temperatura atmosférica, siendo estos puntos 32 °F y 212 °F, respectivamente. No está aprobada por el Sistema Internacional.

### **1.1.1.1.4 Rankine**

Un grado Rankine (°R) es del mismo tamaño que un grado Fahrenheit, pero en la escala Rankine, cero es -459.64 °F. Las temperaturas dadas son absolutas. No es una unidad aprobada por el Sistema Internacional.

## **1.1.1.2 Medición de temperatura**

Los instrumentos de medición de temperatura dependen del cambio físico, cambio de estado, cambios de energía, cambios en la emisión termal radiante potencial.

### **1.1.1.2.1 Termómetro líquido de expansión**

Consisten en un tubo parcialmente lleno con líquido. El tubo mide la expansión y la contracción del líquido por cambio en la temperatura, por medio de una escala calibrada en grados de temperatura.

#### **1.1.1.2.2 Termómetro bimetalico**

Se fundan en el distinto coeficiente de dilatación de dos metales diferentes, tales como latón, monel o acero y una aleación de ferroníquel o invar (35.5% de níquel) laminados conjuntamente. Las láminas bimetalicas pueden ser rectas o curvas, formando espirales o hélices. El eje y el elemento están sostenidos con cojinetes y el conjunto está construido con precisión para evitar rozamientos.

#### **1.1.1.2.3 Termocupla**

O termopar se basa en el efecto de la circulación de una corriente en un circuito formado por dos metales diferentes cuyas uniones se mantienen a distinta temperatura. Esta circulación de corriente obedece al efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión, cuando una corriente circula a través de esta, y al efecto Thomson que consiste en la liberación a absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas.

#### **1.1.1.2.4 Pirómetros**

Miden la temperatura de un cuerpo a distancia en función de la radiación de este. Se funda en la ley de Stefan-Boltzmann, que dice que la intensidad de energía radiante (J/s) emitida por la superficie de un cuerpo, aumenta proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, es decir,  $W = ET^4$ .

La aplicación de medición de temperaturas industriales abarca las longitudes de onda térmica desde 0.1 micras para radiación ultravioleta, hasta 12 micras para radiación infrarroja.

### **1.1.1.3 Unidades de calor**

#### **1.1.1.3.1 Joule (J)**

Está definida como la energía de calor necesaria para elevar en 1° la temperatura de una unidad de masa de agua.

#### **1.1.1.3.2 Watt (W)**

Es el cambio de energía liberada o consumida. Un watt es igual a 1 joule por segundo. La razón de cambio del calor liberado de un fuego puede ser expresado en kilowatt o megawatt. Esta es una unidad aprobada por el Sistema Internacional.

#### **1.1.1.3.3 Caloría**

Una caloría es la cantidad de calor requerido para incrementar la temperatura de 1 g de agua un grado centígrado. Una caloría equivale a 4.183 J.

#### **1.1.1.3.4 Unidad Térmica Británica (BTU)**

Un Btu equivale al calor necesario para elevar en 1 °F la temperatura de 1 lb de agua. 1 Btu equivale a 1054 J y 252 calorías.

#### **1.1.1.4 Calor específico**

El calor específico de una sustancia es la cantidad de calor que necesita una unidad de masa de esta sustancia, para incrementar su temperatura un grado.

Estos valores son importantes para la prevención y protección de incendios, debido a que el calor específico define la cantidad de calor requerida para aumentar la temperatura de una sustancia o material a su punto de ignición. Para el combate de incendios, nos indica el calor a ser removido para bajar la temperatura del material incinerado por debajo de su punto de ignición.

#### **1.1.1.5 Calor latente**

Es la cantidad de calor absorbida por una sustancia pasando de estado líquido a gaseoso, o de estado sólido a líquido. Esta propiedad está medida en J/Kg. Un alto valor de calor latente es deseado en los agentes extintores, lo cual permitirá absorber una mayor cantidad de calor del sólido que se está incinerando, en un mismo estado.

### 1.1.1.6 Calor de gasificación

Cantidad de energía requerida para producir una unidad de masa de vapor combustible de un sólido combustible que inicialmente estaba a temperatura ambiente.

### 1.1.1.7 Mecanismos de transferencia de calor

La transferencia de calor puede producirse mediante tres mecanismos distintos: conducción, convección y radiación. Estos deben ser considerados juntos en cualquier situación de fuego, aunque es común que uno domine sobre los otros.

La ecuación para la transferencia de calor conductivo, viene dado por la fórmula:

$$\dot{q}'' = \frac{k}{L} \Delta T \frac{kW}{m^2} \quad (2),$$

donde:

$k$  = conductividad térmica del material ( $kW/m \times K$ )

$L$  = espesor del material ( $m$ )

$\Delta T$  = cambio de temperatura

Para la transferencia de calor convectiva, entre un sólido y un fluido, la fórmula está dada por:

$$\dot{q}'' = h\Delta T \frac{kW}{m^2} \quad (3),$$

donde:

$h$ = coeficiente de transferencia de calor convectiva ( $kW/m^2 \times K$ )

La transferencia de calor radiante, se da a través del vacío. La ecuación para la pérdida de calor desde una superficie es:

$$\dot{q}'' = \varepsilon\sigma T^4 \frac{kW}{m^2} \quad (4),$$

donde:

$\varepsilon$ = emisividad de la superficie (los emisores más eficientes son llamados cuerpos negros y tienen una emisividad de 1.0

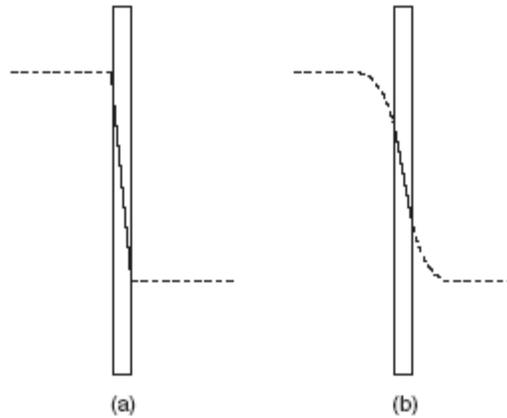
$\sigma$ = constante Stefan-Boltzman ( $56.7 \times 10^{-12} kW/m^2 \cdot K^4$ )

#### 1.1.1.7.1 Conducción

Es la transferencia de energía debida a las interacciones entre las partículas en el interior de un material.

Si se desea calcular el flujo de pérdida de calor a través de una ventana, normalmente se conocen las temperaturas del aire de adentro y afuera,  $T_1$  y  $T_2$  respectivamente.

**Figura 2** Pérdida de calor a través de una ventana



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-6

El calor es transferido a la superficie interior de la ventana por convección. Bajo condiciones de régimen estacionario, de acuerdo a la ecuación (3) de convección, tenemos:

$$\dot{q}'' = h(T_1 - T_{vi}) \quad (A)$$

Donde  $T_{vi}$ , es la temperatura de la superficie interior de la ventana. Si la temperatura de la superficie exterior de la ventana es  $T_{ve}$ , la ecuación (2) del flujo de calor conductivo queda de la siguiente forma:

$$\dot{q}'' = \frac{k}{L}(T_{vi} - T_{ve}) \quad (B)$$

Tomando en cuenta también, la pérdida de calor al aire exterior (por convección):

$$\dot{q}'' = h(T_{ve} - T_2) \quad (C)$$

Siendo  $T_2$  la temperatura del aire externo.

Bajo condiciones de régimen estacionario, estos tres flujos de calor, deben ser iguales. Las ecuaciones A, B y C pueden ser presentadas de la siguiente manera:

$$\frac{\dot{q}''}{h} = (T_1 - T_{vi})$$

$$\frac{\dot{q}''L}{k} = (T_{vi} - T_{ve})$$

$$\frac{\dot{q}''}{h} = (T_{ve} - T_2)$$

$$\dot{q}'' = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{h} + \frac{L}{k} + \frac{1}{h}} \quad (5)$$

Esta ecuación es análoga a la ecuación que describe el flujo de corriente eléctrica (I), induciendo un voltaje (V) en una resistencia (R):

$$I = \frac{V}{R}$$

De esta manera, en la ecuación 5, la diferencia de temperatura es análoga al voltaje y el denominador es, efectivamente, una resistencia térmica. La protección estructural del acero, por revestimiento térmico, es un claro ejemplo de proveer resistencia térmica al flujo de calor hacia el acero.

La prueba para determinar la capacidad de un material para transferir calor a través de él, es examinando el dimensionamiento del número de Biot,  $Bi = hL/k$ . Si el número Biot es menor que 0.1, el material es llamado "térmicamente delgado", entonces cualquier gradiente de temperatura entre el sólido puede ser despreciado y la conducción de calor es mucha más rápida dentro de este que la convección dentro de la superficie.

Por ejemplo, si se considera un sólido (una tabla de un material particular) combustible “térmicamente delgado”, el cual puede presentar un punto de ignición a  $T_{ig}^{\circ}C$ . Entonces se puede estimar qué tanto tiempo toma para llegar al punto de ignición si es expuesto a un flujo definido de calor. Para una hoja de papel, con  $L = 0.5 \times 10^{-3}kW/m \cdot K$ ,  $h = 0.015kW/m^2 \cdot K$ , esta puede ser tratada como “térmicamente delgada”, debido a que  $Bi = 0.07$ . Si es calentada convectivamente, exponiéndola a un flujo de aire a una temperatura  $T_{\infty}$  en ambos lados, entonces el ritmo de incremento de temperatura vendrá dado por:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{Ah}{V\rho c}(T_{\infty} - T) \quad (6),$$

donde  $T$  es la temperatura del sólido, la cual será uniforme en toda el área del material, debido a  $Bi < 0.1$ ,  $A$  es el área a través de la cual el calor es transferido, y  $V$  es el volumen del material. Esta ecuación afirma que el ritmo de crecimiento de la temperatura del material es igual al ritmo de transferencia de calor por convección  $Ah(T_{\infty} - T)$  dividida por la capacidad térmica del volumen del material asociada con el área  $A$ .

Arreglando la ecuación e integrando, tenemos:

$$\frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0} = \exp\left(-\frac{2ht}{x\rho c}\right) \quad (7),$$

donde  $T_0$ , es la temperatura inicial y  $x = V/2A$ , el factor de 2 aparece debido a que el calor es transferido a ambas caras, dividiendo la efectividad del espesor.

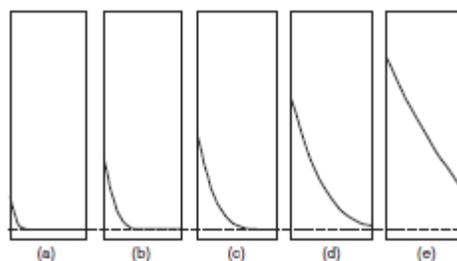
Si la temperatura de ignición es  $T_{ig}$ , el tiempo de ignición vendría dado por:

$$t_{ig} = \frac{x\rho c}{2h} \ln\left(\frac{T_{\infty} - T}{T_{\infty} - T_0}\right) \quad (8)$$

Esta ecuación muestra que el tiempo de ignición es proporcional al espesor  $x$ , o correctamente, la capacidad térmica por unidad de área. Además,  $T_{\infty}$  debe ser más grande que  $T_{ig}$  para que la ignición sea posible. Esta misma ecuación provee la base para el tiempo de respuesta de las cabezas rociadoras del un sistema de extinción de fuego automático.

Lamentablemente, la mayoría de los materiales de interés no pueden ser tomados como “térmicamente delgados” y las temperaturas no pueden ser asumidas uniformes, debido a la existencia de un gradiente de temperatura. En régimen estacionario, este gradiente es lineal, pero si una cara del material, inicialmente a temperatura  $T_0$  es repentinamente expuesta a un flujo de calor convectivo, o radiante, entonces el calor será conducido al material, al aumentar la temperatura de la superficie, desarrollando un perfil de temperatura transitoria a través del espesor de la tabla, como lo muestra la Figura 3.

**Figura 3** Perfiles de temperatura en intervalos de tiempo dentro del espesor de un sólido debido a la transferencia de calor desde la cara izquierda



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-8

En esta figura, los perfiles del (a) al (c), con tiempos de 1, 5 y 10 minutos, respectivamente, son tomados como sólidos semi-infinitos, pero el calor está siendo perdido en la cara posterior en (d) y (e) en 30 y 120 minutos.

La habilidad de una tabla de conducir calor desde la superficie, influenciará que tan rápido la temperatura crece en esta superficie. Materiales de alta conductividad térmica (acero, por ejemplo), al ser tocados, se sienten fríos, debido a que sacan el calor fuera de la superficie, hacia adentro. Contrariamente, si se toca con la mano, una superficie de un bloque de poliuretano, este se siente caliente porque el calor no es retirado de la superficie y las pérdidas de calor desde la mano, son reducidas.

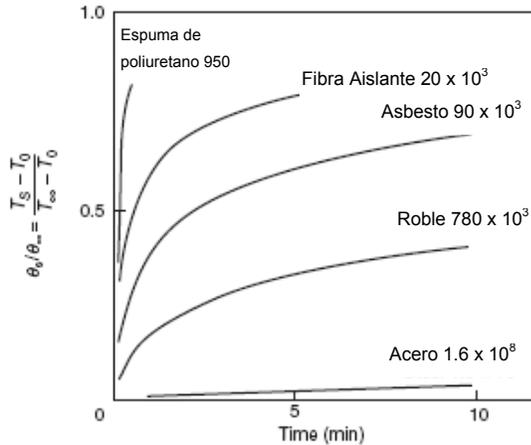
Al considerar un sólido semi-infinito, las pérdidas térmicas de la superficie contraria a la superficie que recibe directamente el flujo de calor, ya sea por convección o radiación, es despreciable, ya que la ola de calor nunca alcanza la superficie contraria, esto, según se aprecia en la Figura 3 en (a), (b) y (c). La expresión para el aumento de la temperatura de la superficie del sólido semi-infinito, está dada por:

$$\frac{T - T_0}{T_\infty - T_0} = 1 - \exp\left(\frac{h^2 t}{k\rho c}\right) \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{h\sqrt{t}}{\sqrt{k\rho c}}\right) \quad (9),$$

en donde  $t$  es el tiempo en segundos y el producto  $k$  (conductividad térmica,  $kW/m \times K$ )  $\times \rho$  (densidad,  $kg/m^3$ )  $\times c$  (capacidad térmica,  $kJ/kg \cdot K$ ), es conocido como inercia térmica ( $k\rho c$ ).

Un alto valor de inercia térmica, asociada a un alto valor de  $k$ , implica que la temperatura de la superficie se incrementará muy lentamente, mientras que la superficie de materiales aislantes mostrarán una rápida respuesta de aumento de temperatura, lo que significa un valor bajo de  $k$ . Esto puede verse en la Gráfica 1.

**Figura 4** Efecto del aislamiento térmico  $k\rho c$  en el aumento de la temperatura en una superficie de sólido semi-infinito



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-8

Para todos los propósitos, una tabla de grosor finito, será analizada como un sólido semi-infinito, hasta que la temperatura de la cara contraria a la exposición al calor, empiece a aumentar. Este período de tiempo  $t$  está definido por el grosor  $x$  de la expresión  $x = 4\sqrt{\alpha t}$ , donde  $\alpha = k/\rho c$  ( $m^2/s$ ) es conocida como la difusividad térmica. Por tanto, los materiales que llegan a su punto de ignición rápidamente, cuando son expuestos a un gran flujo de calor, serán tomados como sólidos semi-infinitos.

Espesores reales, en principio, pueden alcanzar estados de régimen estacionario, aunque en incendios, estos es raro y de poca relevancia. Lo importante es el comportamiento instantáneo: qué tan rápido un combustible sólido puede alcanzar su punto de ignición ante la presencia de una fuente de calor, que tan rápidamente las llamas se extienden sobre las superficies y qué tan rápido una columna de acero aislada alcanza su temperatura crítica.

### 1.1.1.7.2 Convección

Es la interacción de energía por la circulación de un fluido, ya sea gas o líquido. Las corrientes de aire pueden ser utilizadas para llevar calor por convección, en cualquier dirección, con el uso de ventiladores (convección forzada).

El coeficiente de transferencia de calor  $h$ , de la fórmula de transferencia de calor por convección,  $\dot{q}'' = h\Delta T$  (ecuación 3), depende de la geometría del sistema, características del flujo (laminar o turbulento), las propiedades del fluido y la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Si una superficie de un sólido, tiene una temperatura más alta que el fluido alrededor de este, entonces el aire adyacente a la superficie, será calentado y se convertirá menos denso que el aire en los alrededores y así, asciende.

La densidad del aire, puede ser calculada por medio de la ley de gases ideales:  $PV = nRT$ , donde  $P$  es la presión ( $Pa$  o  $bar$ ),  $V$  el volumen ( $m^3$ ),  $T$  es la temperatura ( $K$ ),  $R$  es la constante del gas ideal ( $8.314 J/K \cdot mol$  o  $8.2 \times 10^{-5} m^3 \cdot atm/K \cdot mol$ ), y  $n$  es el número de moles del gas analizado.

La ecuación de gases ideales, es ampliamente utilizada en la ingeniería de prevención de incendios. Esto debido a que, en la mayoría de los casos, la extensión de la dilución de los gases de combustión en un incendio, es tan grande, que ellos consisten principalmente en aire. Por lo tanto, esta ecuación es una aproximación satisfactoria del comportamiento real.

Es muy importante resaltar, entonces, que el coeficiente de transferencia convectiva de calor,  $h$ , puede ser expresado como una función de un conjunto adimensional: Número de Reynolds, Número de Prandtl y el Número de Grashof:

$$\text{Reynolds:} \quad Re = \frac{v\rho L}{\mu} \quad \left( \frac{\text{Estrés inercial}}{\text{viscosidad}} \right)$$

$$\text{Prandtl:} \quad Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \left( \frac{\text{Viscosidad Cinemática}}{\text{Difusión térmica}} \right)$$

$$\text{Grashof:} \quad Gr = \frac{\beta \Delta T L^3 \rho^2}{\mu^2} \quad \left( \frac{\text{Fuerza de empuje}}{\text{Retardo viscoso}} \right)$$

en donde,

$L$  = Longitud del sólido ( $m$ )

$v$  = Velocidad ( $m/s$ )

$\rho$  = Densidad ( $kg/m^3$ )

$\mu$  = Viscosidad ( $N \cdot s/m^2$ )

$c_p$  = Calor específico a presión constante ( $kJ/kg \cdot K$ )

$\beta$  = Coeficiente de expansión térmica

$g$  = Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

El coeficiente de transferencia de calor está, normalmente expresado, con el número adimensional Nusselt,  $Nu = hL/k$ , donde  $k$  es la conductividad térmica del aire y  $L$  es la longitud del sólido. Teóricamente, se ha demostrado que para convección natural, cuando la fuerza de empuje es importante:

$$Nu = f(Pr, Gr)$$

en tanto que para convección forzada se tiene:

$$Nu = f(Re, Pr)$$

Valores experimentales de coeficientes de transferencia de calor convectiva, para diferentes geometrías, están expresadas en términos de el Número Nusselt, estas expresiones para convección forzada y convección laminar se muestran a continuación.

**TABLA I** Correlaciones de transferencia convectiva de calor

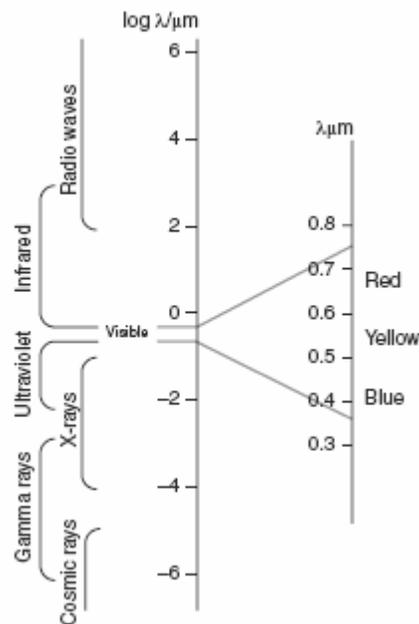
| Tipo de flujo y configuración de la superficie   | $Nu = \frac{hL}{k}$       |
|--|---------------------------|
| <b>Convección Forzada</b>  |                           |
| Flujo laminar paralelo a placa plana de longitud $L$ , con $(20 < Re < 3 \times 10^5)$   | $0.66Re^{1/2}Pr^{1/3}$    |
| Flujo turbulento paralelo a placa plana de longitud $L$ , con $(Re > 3 \times 10^5)$   | $0.037Re^{4/5}Pr^{1/3}$   |
| Flujo circulante en esfera de diámetro $L$   | $2 + 0.6Re^{1/2}Pr^{1/3}$ |
| <b>Convección Natural</b>  |                           |
| Laminar: convección natural en una placa vertical de longitud $L$ , con $(10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9)$                                    | $0.59(Gr \cdot Pr)^{1/4}$ |
| Turbulento: convección natural en una placa vertical de longitud $L$ , con $(Gr \cdot Pr > 10^9)$  | $0.13(Gr \cdot Pr)^{1/3}$ |
| Laminar: convección natural en una placa caliente horizontal de longitud $L$ , con $(10^5 < Gr \cdot Pr < 2 \times 10^7)$                | $0.54(Gr \cdot Pr)^{1/4}$ |
| Turbulento: convección natural en una placa caliente horizontal de longitud $L$ , con $(2 \times 10^7 < Gr \cdot Pr < 3 \times 10^{10})$ | $0.14(Gr \cdot Pr)^{1/3}$ |

Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-10

### 1.1.1.7.3 Radiación

La radiación es un tipo de energía que viaja a través del espacio sin la necesidad de la intervención de algún medio. Esta viaja como ondas electromagnéticas en línea recta, y son similares a las ondas de luz y ondas de radio, según lo muestra la Figura 4. La radiación térmica ocurre principalmente en la zona infrarroja. En el vacío, todas las ondas electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz. Si estas ondas son dirigidas directamente a un cuerpo, estas pueden ser absorbidas, reflejadas y/o absorbidas.

Figura 5 Espectro electromagnético



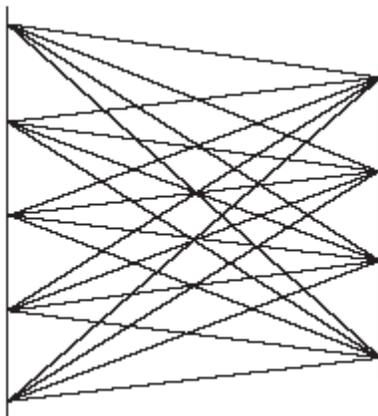
Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-10

Una pequeña fracción de la radiación en la región visible es emitida por objetos calientes cuando la temperatura es lo suficientemente alta. La radiación visible aumenta de intensidad y cambia de color con el incremento de temperatura.

La mayor parte del calor irradiado desde una flama de difusión surge desde partículas diminutas de hollín (partículas sólidas carbonosas) formadas en las complejas series de reacciones que ocurren en la flama. Las partículas son la fuente de la característica luminosidad amarilla, irradiando un ancho rango de longitudes de onda, principalmente infrarrojas, viéndose solo una parte de la emisión que pertenece al espectro visible. Los productos gaseosos de combustión como  $H_2O$  y  $CO_2$  también emiten radiación pero solo en el espectro infrarrojo. Combustibles que no producen hollín (por ejemplo hidrógeno) no tienen flamas luminosas. En estos casos, el 10% o menos del calor perdido de flama en la combustión, es por radiación.

Fuegos con diámetros mayores a los 0.3 m, de combustibles comunes, pueden ceder del 30% al 50% del total de energía como radiación, exponiendo superficies cercanas a altos niveles de transferencia de calor radiante. Como lo expuesto anteriormente, la radiación viaja en línea recta. En todo caso, se puede esperar que el calor recibido desde una pequeña fuente de calor, sea menor que el recibido desde una larga superficie de radiación, según lo muestra la Figura 5.

**Figura 6** Radiación intercambiada entre dos superficies



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-11

La radiación térmica puede pasar libremente a través de gases consistentes en moléculas simétricas diatómicas, tales como oxígeno ( $O_2$ ), y nitrógeno ( $N_2$ ) (los principales constituyentes del aire), pero es absorbida en longitudes de onda estrechas por vapor de agua ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y otras moléculas asimétricas como monóxido de carbono ( $CO$ ) y dióxido de sulfuro ( $SO_2$ ).

El vapor de agua y el dióxido de carbono en la atmósfera son los responsables de la absorción de apreciable cantidad de radiación térmica emitida por grandes incendios forestales; este efecto es significativo solo a largas distancias de dichos incendios. Esta absorción en días altamente húmedos hace menos peligrosos los incendios forestales.

Cuando dos cuerpos, cara a cara, uno a más alta temperatura que el otro, un flujo de energía radiante del cuerpo más caliente al más frío, fluye hasta que el equilibrio térmico es alcanzado. La habilidad del cuerpo más frío para absorber calor radiante, depende de la naturaleza de la superficie. Si la superficie que recibe la energía es brillante o pulida, reflejará la mayor cantidad de calor radiante, mientras que si la superficie es negra o de color oscuro, absorberá más calor.

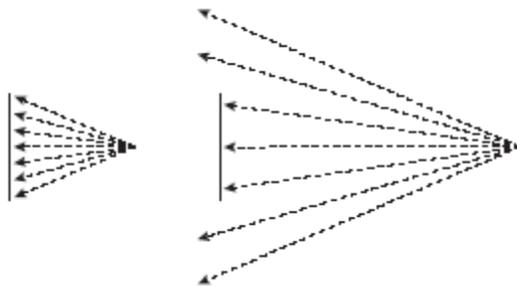
La absorbencia de una superficie, es la capacidad de una superficie de captar calor radiante. Una superficie con una absorbencia de 1.0 (máximo valor) es llamada superficie negra. La mayoría de los materiales no metálicos son efectivamente “negros” a la radiación infrarroja, a pesar que de hecho, tienen colores claros. Algunas sustancias como el agua o el vidrio, son transparentes a la radiación visible y permiten el paso a través de ellos con mínima absorción, sin embargo estos son opacos a la mayoría de longitudes de onda infrarrojas. Los paneles solares operan bajo el principio de ser transparentes a las la radiación solar visible y al mismo tiempo ser opacos a la radiación infrarroja.

Los metales brillantes son excelentes reflectores de energía radiante y tienen bajas absorbencias, menores a 0.1. Por ejemplo, la hoja de aluminio es usada a menudo con fibra de vidrio para aislamiento. Láminas de metal son comúnmente usadas en estufas o en paredes expuestas al fuego.

La ley de Stefan-Boltzmann indica que la radiación emitida por unidad de área de una superficie caliente es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta, según ecuación 4:  $\dot{q}'' = \epsilon\sigma T^4 \text{ kW}/m^2$ .

La energía radiante transmitida de una fuente a una superficie que recibe esta energía, variará inversamente al cuadrado de la separación de estos, ver Figura 6. Si la fuente de esta radiación es considerada como una superficie larga y el objeto receptor está cercano, se debe proteger la superficie del objeto receptor por una tabla no combustible con una cara de material reflectivo (de baja absorbencia).

**Figura 7** Diagrama esquemático del decrecimiento de la intensidad de radiación de una fuente, como el cuadrado de la distancia entre la fuente y el receptor



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-12

La transferencia de calor radiante entre dos superficies puede ser calculada usando factores de configuración que describen la relación geométrica de ambas superficies.

Si el poder de emisividad de una superficie es conocida (ecuación 4), entonces es posible calcular la intensidad de la radiación a determinada distancia de la fuente, esto está dado por la ecuación:

$$\dot{q}'' = \phi \varepsilon \sigma T^4 \frac{kW}{m^2} \quad (10),$$

donde  $\phi$  es conocida como el “área al punto”, definiendo la configuración geométrica entre el área de la superficie radiante y la distancia entre el radiador y el receptor.

La emisividad de las flamas está fuertemente ligada a la cantidad de partículas de hollín presentes, lo que dependerá de la naturaleza del combustible y la estructura y comportamiento de la flama.

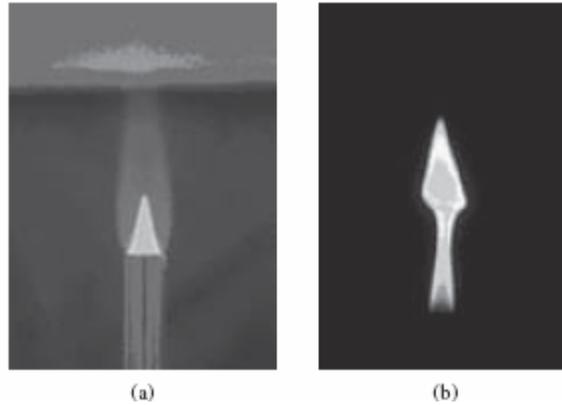
## 1.2 Estructura de la flama

Los dos tipos básicos de flama son la *flama premezclada* y la *flama de difusión*.

La flama premezclada se da cuando un gas íntimamente mezclado con aire, dentro de los límites de ignición, le es introducida una chispa que inicia una flama que se propaga en toda la mezcla.

La flama de difusión está asociada cuando el combustible y el aire inicialmente están separados y arden en la región en donde se mezclan.

**Figura 8** Tipos de flamas (a) Flama premezclada, (b) Flama de difusión



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 2-13

### 1.3 Mecanismo de combustión

Para iniciar el fuego se deben involucrar tres elementos: combustible, oxígeno y temperatura de ignición (calor), según lo describe el triángulo de fuego:

**Figura 9** Triángulo de fuego



Fuente: *Trabajo de graduación: Sistemas de prevención de explosión y fuego de transformadores de potencia, por el método de drenaje de sobre presiones e inyección de nitrógeno, USAC, 2005*. Pág. 82

### **1.3.1 Punto de inflamación**

Es la temperatura a la cual un material empieza a despedir humo cuando es calentado.

### **1.3.2 Temperatura de ignición**

La ignición es el fenómeno que inicia la combustión autoalimentada. Es la menor temperatura a la que determinado material debe llegar para iniciar la combustión.

### **1.3.3 Estequiometría**

La estequiometría de la combustión se ocupa de las relaciones másicas y volumétricas entre reactivos y productos. Siendo los aspectos a determinar, las cantidades exactas de combustible y oxígeno para que se produzca una combustión.

#### **1.3.3.1 Límites de inflamabilidad**

Son los límites máximo y mínimo de la concentración de un combustible dentro de un medio oxidante, por el que la llama, una vez iniciada, continúa propagándose a presión y temperaturas específicas.

## **1.4 Clasificación del fuego**

### **1.4.1 Clasificación por material incinerado**

#### **1.4.1.1 Clase A, fuegos de papel, cartón, madera**

Este tipo de fuego involucra materiales ordinarios, como papel, madera y una gran variedad de plásticos.

#### **1.4.1.2 Clase B, fuegos de líquidos y gases inflamables**

Estos fuegos son los que se presentan en materiales como aceites, grasas, alquitrán, pinturas a base de aceite, laca y gasolina.

#### **1.4.1.3 Clase C, fuegos en equipo eléctrico energizado**

Entre los equipos eléctricos se pueden incluir los cuartos de control, transformadores, interruptores de aceite, interruptor de circuito, equipo rotativo, bombas y motores.

#### **1.4.1.4 Clase D, fuegos de metales combustibles**

Entre estos se encuentran metales combustibles como el sodio, potasio, magnesio, titanio y zirconio.

#### **1.4.1.5 Otras clases de fuegos**

Fuegos en químicos que contienen su propio suministro de oxígeno, como el nitrato de celulosa.

También se incluyen los hidruros metálicos.

### **1.4.2 Clasificación por nivel de afectación**

#### **1.4.2.1 Fuegos de superficie**

Son fuegos que involucran líquidos inflamables, gases y sólidos.

#### **1.4.2.2 Fuegos profundos**

Estos son incendios profundos arraigados que involucran sólidos sujetos a fuego latente (humeante y sin llama).

## **1.5 Análisis del riesgo de incendio en generadores eléctricos**

En la actualidad, la generación de energía eléctrica se realiza casi exclusivamente con alternadores trifásicos de 50 Hz o 60 Hz. Sin embargo, en pequeñas centrales hidroeléctricas, también se suelen equipar con generadores asincrónicos.

Los generadores que se emplean en las centrales hidroeléctricas de acumulación por bombeo, tienen habitualmente velocidades de sincronismo de 600 rev/min a 750 rev/min; mientras que las velocidades de sincronismo de los generadores de grandes centrales hidroeléctricas fluviales, están dentro del intervalo de 60 rev/min a 125 rev/min.

### **1.5.1 Descripción del riesgo**

Si las fases de un generador no están totalmente balanceadas, estas pueden sobrecalentarse o cortocircuitarse. Las fallas eléctricas representan una fuente de alta energía de ignición que fácilmente puede desarrollar fuego, considerando la cantidad de componentes combustibles dentro de los generadores, estas pueden ser debidas a sobrecargas y a fallas de elementos de protección propios de los generadores y diversidad de fallas, por lo que la probabilidad de ocurrencia de incendio dentro de generadores eléctricos es media, debido al tipo de servicio prestados por estos, a pesar de las protecciones eléctricas de diseño de estos.

La magnitud de las consecuencias de incendio en los generadores eléctricos, depende de los materiales usados dentro de estos. Materiales termoplásticos como asfaltos son comunes en unidades antiguas. Estos son

altamente combustibles y tienden a fallar con el tiempo, presentado un mayor riesgo de falla eléctrica. Los materiales termoestables como las resinas de fibra de vidrio epóxicas son más comunes en las unidades de generación nuevas. Estas últimas tienden a ser auto extingüibles cuando son desenergizadas.

Redevanar los generadores con aislante de fraguado térmico no elimina totalmente el riesgo. Otros componentes combustibles típicos persisten, como transformadores de corriente, transformadores de potencia, transformadores de tierra, resistencias a tierra, material termoplástico de final de vuelta del bobinado y los ductos de la barra colectora (bus) isofase.

#### **1.5.1.1 Generadores recirculantes**

Los generadores recirculantes aprovechan el aire de refrigeración, volviendo este a circular por los devanados optimizando así dicha refrigeración. Esta magnitud es de vital importancia para el combate de incendios en estos equipos, ya que de esto depende la cantidad de agente extintor a utilizar.

#### **1.5.1.2 Generadores no recirculantes**

Estos tienen una renovación continua de aire, por lo que la cantidad de agente extintor, en caso de incendio será mayor respecto a generadores recirculantes.

### **1.5.2 Fuentes de ignición y tipo de fuego**

Las fuentes de ignición son cortocircuitos o fallas eléctricas en los devanados del generador o sus componentes y la magnificación del incendio podría deberse al material aislante del generador, ya que en caso de unidades generadoras antiguas, es muy común el asfalto que tiende a incinerarse.

### **1.5.3 Consecuencias de la consumación del riesgo**

Pérdida total o parcial del equipo, lo que afectaría primeramente la continuidad de operaciones, generando pérdidas por lucro cesante, gastos por remoción de equipo o partes dañadas, gastos por reparaciones o sustitución de los equipos, gastos de puesta en marcha.

El Administrador del Mercado Mayorista multaría a la empresa de darse un evento de este tipo, además el precio por kWh a que puede vender energía una hidroeléctrica, decaería debido a la indisponibilidad no programada.

La imagen de la empresa, como la de sus autoridades, se vería afectada negativamente.

### **1.5.4 Protección recomendada**

- Cambiar el material aislante de los devanados de los generadores eléctricos, cuando estos se traten de materiales termoplásticos, por materiales aislantes termoestables como las resinas epóxicas.

- Proveer de un sistema automático de combate de incendios para generadores eléctricos a base de CO<sub>2</sub>, debido a sus características termoquímicas para la eliminación del fuego, así como por la ausencia de subproductos corrosivos.



## **2 DIÓXIDO DE CARBONO Y SISTEMAS DE APLICACIÓN**

### **2.1 Antecedentes del uso del CO<sub>2</sub> para extinción de incendios**

El dióxido de carbono ha sido usado por casi un siglo, para extinguir incendios en líquidos inflamables, fuegos debidos a gases, incendios en equipo eléctrico energizado, y en menor medida incendios en materiales ordinarios como papel y otros materiales a base de celulosa.

El CO<sub>2</sub> suprimirá efectivamente casi cualquier fuego. Las excepciones son incendios en material clase D, ver numeral 1.4.1.4, y los fuegos descritos en numeral 1.4.1.5.

### **2.2 Propiedades del CO<sub>2</sub>**

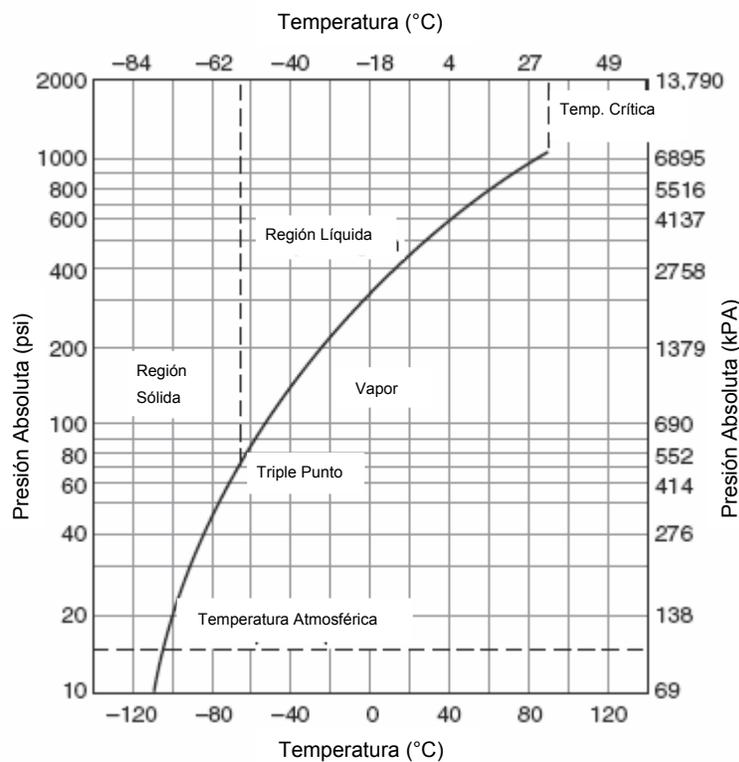
Este gas es no combustible, no reacciona con la mayoría de sustancias y provee su propia presión para descargar del contenedor de almacenaje. Debido a que es un gas, este puede penetrar y esparcirse a todas las partes del área de incendio. Tanto en estado gaseoso como en estado sólido, finamente dividido, llamado “nieve” o “hielo seco”, no conduce la electricidad, pudiendo ser utilizado en equipo energizado. No deja residuo, eliminando así, la limpieza.

## 2.2.1 Propiedades termodinámicas

A temperatura y presión ambiente, el CO<sub>2</sub> es un gas incoloro, sin olor con una densidad cerca del 50% mayor que la del aire, pudiendo ser fácilmente licuado por enfriamiento y compresión, siendo así, que para mayor enfriamiento y expansión puede ser convertido a estado sólido.

La relación entre la temperatura y la presión del dióxido de carbono líquido es mostrada sobre la curva de la Gráfica 2. En la medida que la temperatura del líquido se incrementa, la presión también se incrementa. Debido a esto, la densidad del vapor sobre el líquido aumenta.

**Figura 10** Variación de presión del CO<sub>2</sub> con cambio en la temperatura (volumen constante)



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-70

Por otro lado el líquido se expande así como sube la temperatura y la densidad decrece. A 87.8 °F (31 °C), el líquido y el vapor tienen la misma densidad, desapareciendo así, el líquido; este punto es la temperatura crítica para el CO<sub>2</sub>. Por debajo de la temperatura crítica, estando el dióxido de carbono en un contenedor cerrado, es parte líquido y parte gas. Sobre la temperatura crítica, es enteramente gas.

### **2.2.1.1 Condiciones de almacenaje**

El dióxido de carbono líquido, puede ser almacenado en cilindros a alta presión (750 psi) con variación de temperatura correspondiente a la del ambiente. También puede ser almacenado en contenedores refrigerados de baja presión (300 psi), diseñados para mantener la temperatura cerca de 0 °F (-18 °C): la solidificación en el almacenaje no es problema.

Cualquier reducción sustancial en la temperatura de almacenaje, junto con una reducción de presión, ocasionarán la disminución del flujo de descarga por debajo de los límites de diseño.

## **2.2.2 Propiedades físicas**

### **2.2.2.1 Propiedades en la descarga**

La descarga de dióxido de carbono líquido consiste en una nube blanca, finamente dividida en partículas de hielo seco contenidas en el vapor flash. Debido a la baja temperatura, cierta cantidad de vapor de agua de la atmósfera

se condensa, creando neblina adicional que persistirá hasta que las partículas de hielo seco se hayan secado o sublimado.

#### **2.2.2.2 Electricidad estática**

Las partículas de hielo seco producidas en la descarga de CO<sub>2</sub>, pueden llevar carga de energía estática. Esta energía estática puede ser transmitida desde las toberas de descarga sin aterrizaje apropiado. Para prevenir posibles descargas al personal o evitar descargas en atmósferas potencialmente explosivas, todas las toberas o boquillas de descargas, deben ser aterrizadas.

#### **2.2.2.3 Densidad**

La densidad del gas dióxido de carbono es de 1.5 veces, la densidad del aire a la misma temperatura. La descarga fría tiene mucha mayor densidad, lo que se traduce en su habilidad para desplazar el aire sobre superficies en llamas y regular la temperatura en una atmósfera particular.

#### **2.2.3 Propiedades de extinción**

El mecanismo principal, por medio del cual el dióxido de carbono extingue fuego es por reducción de oxígeno. El efecto de enfriamiento de este gas, es relativamente pequeño, pero realiza una contribución importante, particularmente cuando este es aplicado directamente al material en proceso de incineración.

### **2.2.3.1 Extinción por desplazamiento de oxígeno**

La generación de calor en un incendio, es producida por una rápida oxidación del material que se está incinerando. Parte de este calor, aumenta la temperatura del material, que aún no se ha quemado, a la temperatura de ignición de este, mientras que una gran parte del calor se pierde por radiación y convección.

Si la atmósfera que suministra oxígeno al fuego es diluida con vapor de dióxido de carbono, entonces, el flujo del calor generado es reducido por debajo del flujo de calor perdido. De tal manera que el material es enfriado por debajo de su temperatura de ignición, provocando la extinción del fuego.

La concentración mínima de dióxido de carbono para extinguir fuegos en materiales sólidos, es variable, debido a que el flujo de pérdida de calor por radiación y convección, dependen del “efecto escudo” causado por el arreglo físico del material en llamas. Las concentraciones mínimas son determinadas por pruebas de laboratorio, NFPA 12 da las concentraciones de diseño para peligros puntuales.

### **2.2.3.2 Extinción por enfriamiento**

Las temperaturas involucradas en la descarga de dióxido de carbono oscilan los  $-79\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $-110\text{ }^{\circ}\text{F}$ ), a pesar de esto, la capacidad de enfriamiento de este gas es pequeño comparado con el equivalente en peso de agua. El calor latente de 1 kg (0.4536 kg) de dióxido de carbono líquido, es 126 KJ (120 BTU), para almacenamiento de baja presión y 67.5 KJ (64 BTU) para almacenamiento de alta presión a temperatura ambiente.

El enfriamiento es más efectivo cuando el agente es descargado directamente en fuegos que involucren material sin confinar.

### **2.3 Limitaciones del CO<sub>2</sub> como agente extintor**

El uso general de dióxido de carbono en fuegos Clase A, está limitado por su relativa baja capacidad de enfriamiento, comparado con el agua, y por encerramientos incapaces de retener una atmósfera de extinción.

Los incendios de superficie son extinguidos fácilmente, debido a que el enfriamiento natural se da rápidamente. Opuestamente, si el fuego penetra bajo la superficie de la masa provee aislamiento térmico de la flama lo que genera una baja pérdida de calor (esto mantiene la temperatura por encima del punto de inflamación del material), lo que necesitará una concentración mayor de CO<sub>2</sub> y un tiempo mayor de permanencia del gas, para una extinción completa.

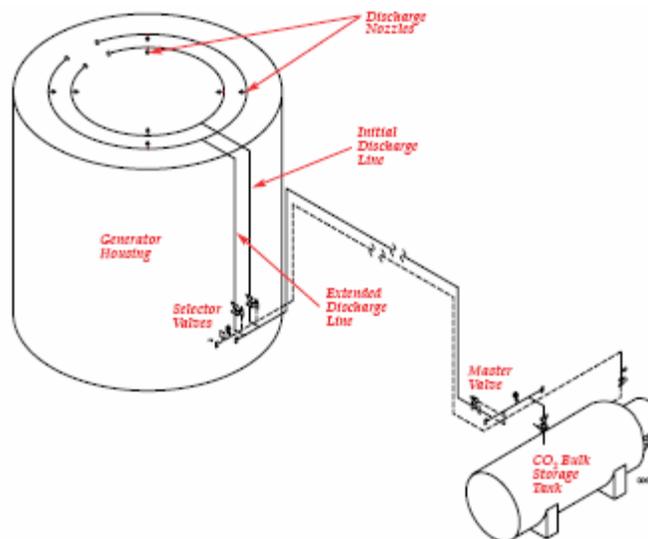
El dióxido de carbono no es efectivo como agente extintor en incendios que involucran químicos que contienen su propio suministro de aire, por ejemplo, nitrato de celulosa. Fuegos de metales reactivos como sodio, potasio, magnesio, titanio, zirconio e hidruros metálicos, no pueden ser extinguidos con CO<sub>2</sub> porque estos descomponen este gas, no permitiendo una expansión adecuada del mismo.

## 2.4 Métodos de aplicación

### 2.4.1 Inundación total

En este método de extinción, el dióxido de carbono es aplicado a través de toberas diseñadas y localizadas para suministrar una concentración uniforme de agente extintor en todas las partes de un encerramiento. El cálculo de la cantidad de gas requerido para brindar una atmósfera de extinción, está basado en el volumen del encerramiento o cuarto y la concentración de CO<sub>2</sub> requerida dependiendo del material a proteger.

**Figura 11** Instalación de sistema combate de incendio por aplicación total en generador hidroeléctrico



Fuente: *ANSUL PREFERRED Carbon Dioxide System Application CD.*

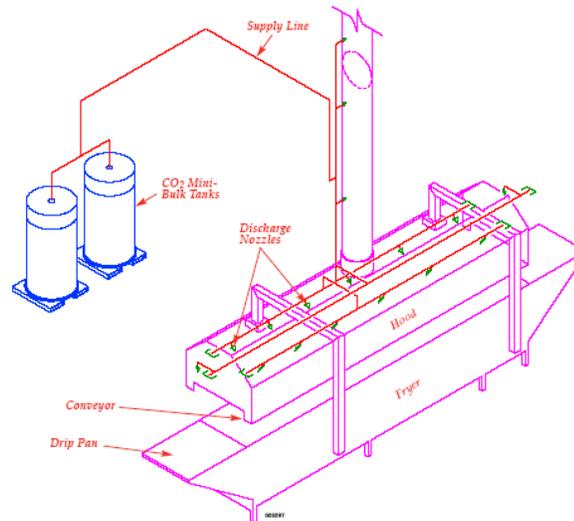
La integridad del encerramiento es una parte fundamental de la inundación total, particularmente si existe un peligro potencial de fuego profundo. Si el cuarto es hermético, especialmente a los lados y abajo, la atmósfera de agente extintor puede ser retenida por un mayor tiempo para garantizar por completo el control del incendio. Pero si existen aberturas por los lados y por abajo, la mezcla más pesada  $\text{CO}_2$  y aire se escapará rápidamente del cuarto. Si la atmósfera de extinción se pierde rápidamente, pueden quedar partes incandescentes y causar la reignición cuando el aire entre en contacto con estos. Es de vital importancia cerrar todas las aberturas para minimizar el escape o se debe compensar este escape, por medio de una descarga extendida. Debido al peso relativo del dióxido de carbono, una abertura en la parte superior ayuda a liberar la presión interna durante una descarga, con un pequeño efecto en el flujo de dióxido de carbono después de la descarga.

#### **2.4.1.1 Usos**

#### **2.4.2 Aplicación local**

En los sistemas de aplicación local, la descarga se realiza directamente sobre superficies en llama, a través de toberas diseñadas para el propósito, de tal manera que estos cubran toda la superficie de determinado objeto a proteger. Toda área adyacente a la que pueda ser proyectado el fuego o combustible, debe ser cubierta, ya que cualquier fuego residual puede causar la reignición cuando la descarga de  $\text{CO}_2$  ha terminado.

**Figura 12** Instalación de sistema combate de incendio por aplicación local en freidora industrial



Fuente: *ANSUL PREFERRED Carbon Dioxide System Application CD.*

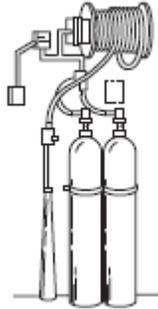
Las toberas de aplicación son normalmente designadas para velocidades relativamente bajas, esto para evitar salpicaduras y la interacción con el aire. La detección automática es indispensable para proveer una respuesta inmediata y así reducir el aumento de la temperatura.

#### 2.4.2.1 Usos

#### 2.4.3 Sistema manual de línea de manguera

Este sistema consiste en una manguera conectada permanentemente por medio de una tubería rígida que a su vez está conectada a un suministro fijo de dióxido de carbono.

**Figura 13** Sistema Manual de CO<sub>2</sub> con manguera montada en riel



Fuente: *Fire Protection Handbook*. Pág. 17-7

#### **2.4.4 Descarga extendida**

La descarga extendida de CO<sub>2</sub> es usada cuando el encerramiento no es suficiente para retener la concentración de extinción por el tiempo necesario. La descarga empieza con un flujo alto, seguido de la descarga extendida como tal, con un flujo reducido de agente extintor. El flujo reducido está en función del flujo de dióxido de carbono que se escapa por las aberturas del encerramiento, siendo calculado en base al área de escape, o en base al flujo a través de los ductos de ventilación que no pueden ser apagados.

Es particularmente aplicable en equipo eléctrico rotativo, tales como generadores eléctricos, en donde se dificulta la prevención de la pérdida de gas hasta que el equipo está parado.

### **2.4.5 Aplicaciones especiales**

Los sistemas de extinción de incendios a base de dióxido de carbono, algunas veces son usados para crear atmósferas inertes o como medio de purga, con el fin de evitar explosiones.

## **2.5 Seguridad personal**

### **2.5.1 Consideraciones generales de seguridad**

La concentración mínima de diseño de CO<sub>2</sub> para sistemas de inundación total, es 34%. Al respirar tal concentración, causará inmediatamente, inconsciencia, seguida de la muerte en pocos minutos, si no se auxilia adecuadamente a la persona. Todos los sistemas de inundación total producen concentraciones letales de dióxido de carbono, en los espacios protegidos. Para estos sistemas es obligatoria una evacuación predescarga.

En sistemas de aplicación local en espacio abierto, la descarga inicial representa un riesgo menor para el personal.

Tanto en sistemas de inundación total como aplicación local, la migración de CO<sub>2</sub> de descarga, a espacios adyacentes bajo la descarga pueden producir concentraciones peligrosas, y si hay presencia de personas, esta migración representa un peligro para la vida. Por tal motivo deben de proveerse de equipos de protección personal adecuados.

### **2.5.2 Espacios ocupados**

Los arreglos para asegurar una evacuación efectiva, antes de cualquier descarga, deben ser hechos para todos los espacios protegidos por sistemas de inundación total, incluso aquellos que no son normalmente ocupados pero en los cuales, personal puede estar presente para mantenimiento u otras actividades. Si la evacuación no puede ser garantizada, el sistema debe instalarse con una válvula de operación manual en la tubería de descarga, entre las toberas y el suministro, que quedará cerrada, evitando el flujo hacia el lugar protegido.

### **2.5.3 Alarmas**

Es obligatorio el uso de alarmas de predescarga, visuales y audibles para todos los sistemas de CO<sub>2</sub>, a excepción de los sistemas de línea de manguera. Todo el personal que pueda ingresar a un área protegida, deberá recibir el entrenamiento adecuado. La alarma de predescarga tendrá como propósito principal, evacuar el área antes de la descarga.

Es imprescindible que los sistemas de inundación total cuenten con válvulas de demora de descarga, del tipo neumáticas y alarmas de predescarga neumática. Estas, por lo común, serán accionadas por el CO<sub>2</sub> almacenado.

En los encerramientos protegidos, se proveerá de señales y alarmas de descarga, a la salida, para prevenir al personal de ingresar al área de descarga.

Se debe considerar el riesgo de filtración de gas a sitios contiguos al encerramiento protegido, de tal manera de instalar señales y alarmas, también en estos sitios.

Los odorizadores que acompañan una descarga de dióxido de carbono, son utilizados como una alarma olfativa, para indicar que existe una filtración desde el área protegida.

## **2.5.4 Avisos**

### **2.5.4.1 Avisos de seguridad**

Se deben fijar avisos de alerta con una ubicación llamativa en cada espacio protegido; en cada entrada a espacios protegidos; en espacios cerca de los espacios protegidos a donde se haya determinado que el dióxido de carbono podría emigrar creando un peligro para el personal; y en cada entrada a cuartos de almacenaje y en donde éste podría y en donde éste podría emigrar o recolectarse en el evento de una descarga desde un dispositivo de seguridad de un contenedor de almacenaje.

El formato de aviso de seguridad, color, estilo de letra de las palabras del aviso, letras del panel de mensaje, tamaño y las estipulaciones de seguridad de los símbolos deben ser en concordancia con ANSI Z535.

**Figura 14** Aviso en cada espacio protegido



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-10

**Figura 15** Aviso en cada entrada a espacio protegido



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-10

**Figura 16** Aviso en cada entrada a espacio protegido por sistemas provistos con un odorizante de aceite



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-10

**Figura 17** Aviso en cada espacio próximo donde el dióxido de carbono puede acumularse hasta niveles peligrosos



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-10

**Figura 18** Aviso afuera de cada entrada a cuartos de almacenaje de dióxido de carbono



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-10

#### 2.5.4.2 Avisos para operación manual

Los avisos de advertencia deben ubicarse en cada instalación donde pueda ocurrir la operación manual del sistema, como lo muestra la Figura 17.

**Figura 19** Aviso en cada estación de activación manual



Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-11

### **2.5.5 Procedimientos de evacuación**

Todas las personas que puedan en algún momento entrar a un espacio protegido por CO<sub>2</sub>, deben ser advertidas del peligro involucrado y estar provistas de procedimientos de evacuación segura.

Se debe prohibir la entrada de personal sin protección a espacios que se ha hecho inseguros por la descarga de dióxido de carbono hasta que el espacio haya sido ventilado y las pruebas adecuadas de la atmósfera hayan verificado que es seguro para la entrada de personas sin protección. Las personas que no han sido debidamente entrenadas en el uso, y equipadas con aparatos de respiración autónoma, no deben permanecer en espacios donde la concentración sea mayor de 4 por ciento.

### **2.5.6 Espacios libres eléctricos**

Todos los componentes de sistemas deben ubicarse de manera que mantengan espacios libres mínimos en relación con las partes vivas, tal como se muestra en la siguiente tabla:

**TABLA II Espacios libres desde el equipo de dióxido de carbono a componentes eléctricos vivos no aislados**

| Voltaje Nominal del Sistema (KV) | Voltaje Máximo del Sistema (KV) | Nivel de Aislamiento Básico (KV) | Espacio Libre Mínimo |            |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------|
|                                  |                                 |                                  | Pulgadas             | Milímetros |
| ≤13.8                            | 14.5                            | 110                              | 7                    | 178        |
| ≤ 23.0                           | 24.3                            | 150                              | 10                   | 254        |
| ≤ 34.5                           | 36.5                            | 200                              | 13                   | 330        |
| ≤ 46.0                           | 48.3                            | 250                              | 17                   | 432        |
| ≤ 69.0                           | 72.5                            | 350                              | 25                   | 635        |
| ≤ 115.0                          | 21.0                            | 550                              | 42                   | 1067       |
| ≤ 138.0                          | 145.0                           | 650                              | 50                   | 1270       |
| ≤ 161.0                          | 169.0                           | 750                              | 58                   | 1473       |
| ≤ 230.0                          | 242.0                           | 900                              | 76                   | 1930       |
|                                  |                                 | 1050                             | 84                   | 2134       |
| ≤ 345.0                          | 362.0                           | 1050                             | 84                   | 2134       |
|                                  |                                 | 1300                             | 104                  | 2642       |
| ≤ 500.0                          | 550.0                           | 1500                             | 124                  | 3150       |
|                                  |                                 | 1800                             | 144                  | 3658       |
| ≤ 765.0                          | 800.0                           | 2050                             | 167                  | 4242       |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono, Edición 2008*. Pág. 12-12

El espacio libre seleccionado a tierra debe satisfacer el mayor del sobre voltaje de conmutación o del Nivel de Aislamiento Básico (BIL), en lugar de basarse en el voltaje nominal.

### **2.5.7 Duración de la protección**

Una concentración efectiva de agente para sistemas de inundación total debe ser lograda y mantenida por un período de tiempo que permita una efectiva acción de emergencia por personal entrenado.

Las alarmas predescarga visibles, deben cumplir con lo siguiente:

- Deben ser visibles en todo el espacio protegido.
- Deben ser distintas de las señales de alarma de incendio del edificio y de otras señales de alarma.
- No se debe exigir que los aparatos visibles, excepto estroboscopios, estén sincronizados entre sí o con las alarmas de incendio del edificio.

## **2.6 Consideraciones ambientales en el uso y manejo del CO<sub>2</sub>**

El CO<sub>2</sub> es incoloro, de olor penetrante y sabor ácido. Es un componente minoritario de atmósfera (aproximadamente 3 partes por 10,000). Proviene de la combustión de hidrocarburos, de la fermentación y de la respiración animal.

El dióxido de carbono no puede considerarse como contaminante en sentido estricto, ya que no es tóxico y se halla en la atmósfera de modo natural y es imprescindible para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que posibilita la existencia de la fotosíntesis de las plantas y el clima actual. No obstante, se incluye dentro de las sustancias contaminantes ya que impide que una parte de la energía radiante que recibe la Tierra vuelva al espacio, produciendo el llamado efecto invernadero.

Dentro de las consideraciones que deben tomarse en cuenta para el manejo de los cilindros con contenido de dióxido de carbono, tenemos:

a. Antes del uso: mover los cilindros utilizando un carro porta cilindros o montacargas. No hacerlos rodar ni arrastrarlos en posición horizontal. Evitar que se caigan o golpeen violentamente uno contra otro o con otras superficies. No se deben transportar en espacios cerrados como, por ejemplo, el baúl de un automóvil o camioneta. Para descargarlos, usar un rodillo de caucho.

b. Durante su uso: no calentar el cilindro para acelerar la descarga del producto. Usar una válvula de contención o anti retorno en la línea de descarga para prevenir un contraflujo peligroso al sistema. Usar un regulador para reducir la presión al conectar el cilindro a tuberías o sistemas de baja presión (<200 bar – 3.000 psig). Jamás descargar el contenido del cilindro hacia las personas, equipos, fuentes de ignición, material incompatible o a la atmósfera.

c. Después del uso: cerrar la válvula principal del cilindro. Marcar los cilindros vacíos con una etiqueta que diga “VACIO”. Los cilindros deben ser devueltos al proveedor con el protector de válvula o la tapa. No deben reutilizarse cilindros que presenten fugas, daños por corrosión o que hayan sido expuestos al fuego o a un arco eléctrico. En estos casos, notificar al proveedor para recibir instrucciones.

Además deben ser de observancia obligatoria, las siguientes precauciones para el almacenamiento de cilindros:

a. Almacenar los cilindros en posición vertical. Separar los cilindros vacíos de los llenos. Para esto, usar el sistema de inventario “primero en llegar, primero en salir” con el fin de prevenir que los cilindros llenos sean almacenados por un largo período de tiempo.

b. El área de almacenamiento debe encontrarse delimitada para evitar el paso de personal no autorizado que pueda manipular de forma incorrecta el producto. Los cilindros deben ser almacenados en áreas secas, frescas y bien ventiladas, lejos de áreas congestionadas o salidas de emergencia. El área debe ser

protegida con el fin de prevenir ataques químicos o daños mecánicos como cortes o abrasión sobre la superficie del cilindro. No permitir que la temperatura en el área de almacenamiento exceda los 54° C (130° F) ni tampoco que entre en contacto con un sistema energizado eléctricamente. Señalizar el área con letreros que indiquen “PROHIBIDO EL PASO A PERSONAL NO AUTORIZADO”, “NO FUMAR” y con avisos donde se muestre el tipo de peligro representado por el producto. El almacén debe contar con un extinguidor de fuego apropiado (por ejemplo, sistema de riego, extinguidores portátiles, etc.). Los cilindros no deben colocarse en sitios donde hagan parte de un circuito eléctrico. Cuando los cilindros de gas se utilicen en conjunto con soldadura eléctrica, no deben estar puestos a tierra ni tampoco se deben utilizar para conexiones a tierra; esto evita que el cilindro sea quemado por un arco eléctrico, afectando sus propiedades físicas o mecánicas.



### 3 COMPONENTES DE LOS SISTEMAS DE ALTA Y BAJA PRESIÓN DE CO<sub>2</sub>

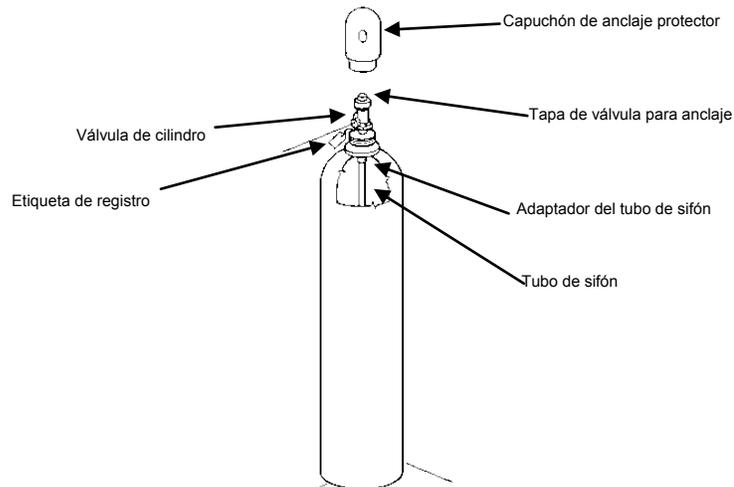
#### 3.1 Contenedores de almacenaje

El CO<sub>2</sub> puede ser almacenado en contenedores de alta o baja presión. Debido a la diferencia de presión, el diseño de los sistemas es influenciado por el método de almacenaje.

##### 3.1.1 Almacenaje de alta presión

Los contenedores de alta presión, comúnmente cilindros, son diseñados para almacenar dióxido de carbono líquido a temperatura atmosférica.

**Figura 20** Cilindro de almacenamiento a alta presión



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-1

Comúnmente, múltiples cilindros son conectados a un múltiple (manifold), para obtener la cantidad necesaria de agente extintor para determinada aplicación.

Debido a que la máxima presión en el cilindro es afectada por la temperatura ambiente, el contenedor debe ser diseñado para soportar la máxima presión esperada.

#### **3.1.1.1 Temperatura de almacenaje**

La temperatura de almacenaje es la atmosférica. Para propósitos de diseño esta puede considerarse como 21 °C.

#### **3.1.1.2 Parámetros de operación**

Temperaturas anormalmente bajas, afectan negativamente el flujo de descarga. Por esta razón, no se permiten las temperaturas debajo de -18 °C (0 °F) para sistemas de inundación total, o debajo de los 0 °C (32 °F) para sistemas de aplicación local.

Son permitidas temperaturas menores, a las indicadas en el párrafo anterior, solo si el diseño incluye componentes especiales para compensar la reducción de la presión. El uso de aclimatadores, permite el uso de sistemas de alta presión a temperaturas bajo los -51 °C (-60 °F).

### **3.1.1.3 Tamaño de cilindros**

Las capacidades estándares de los cilindros son 5, 10, 15, 20, 25,35, 50, 75, 100 y 120 libras (2.3, 4.5, 6.8, 9.1, 11.3, 15.9, 22.7, 34, 45.4 y 54.4 kilogramos) de CO<sub>2</sub>.

### **3.1.1.4 Normativas de diseño**

Los cilindros son diseñados, probados y llenados según los códigos y estándares nacionales, del Departamento de Transporte (DOT, por sus siglas en inglés). La densidad máxima de llenado permitida, es igual a 68 por ciento de su peso en líquido que el contenedor pueda retener a 16 °C (60 °F).

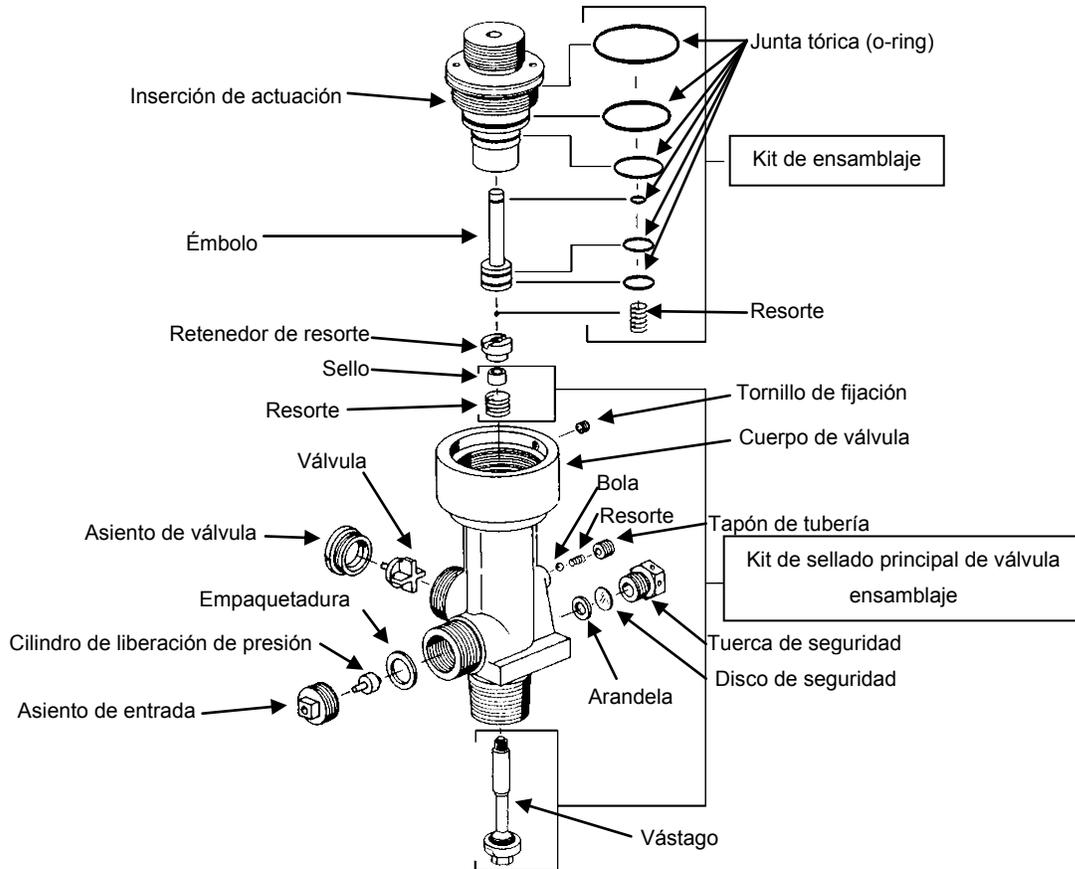
Los cilindros de extinción son llenados con un tubo interno, en el fondo del contenedor, de tal manera que el líquido será descargado desde el fondo cuando el cilindro este parado y la válvula abierta.

El material típico de construcción de los cilindros es el acero.

### **3.1.1.5 Válvula de descarga y alivio de presión**

La válvula de descarga de dióxido de carbono está construida en bronce y la descarga, puede provocarse por medio de actuadores eléctricos, neumáticos y manual, o una combinación de los anteriores.

**Figura 21** Partes de válvula de descarga

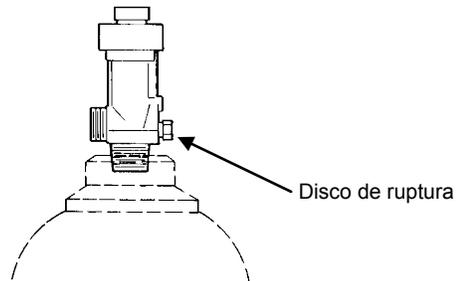


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-1

Cada cilindro debe proveerse con un dispositivo de alivio de presión del tipo disco de ruptura.

El dispositivo de alivio de presión debe dimensionarse y adaptarse en concordancia con los requerimientos especificados en las regulaciones 49 CFR 171-190 del Departamento de Transporte (DOT).

**Figura 22** Válvula de descarga mostrando disco de ruptura



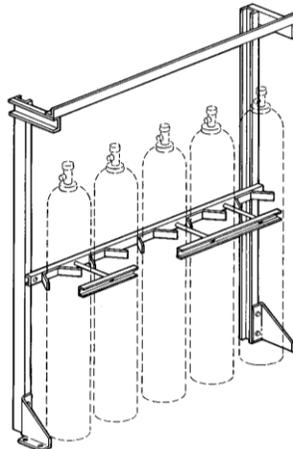
Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-1

### 3.1.1.6 Baterías de cilindros

En las baterías, los cilindros deben montarse y soportarse en un bastidor provisto para ese propósito, incluyendo facilidades para un servicio individual conveniente y pesaje del contenido.

Deben proveerse medios automáticos para evitar la pérdida de dióxido de carbono desde la batería si el sistema está operando cuando cualquier cilindro es removido para mantenimiento.

**Figura 23** Bastidor de cilindros

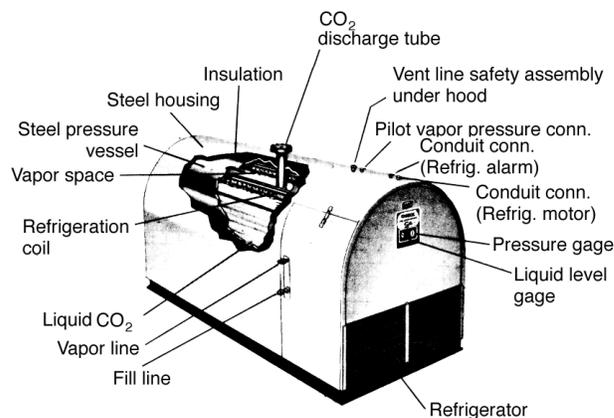


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-20

### 3.1.2 Almacenaje de baja presión

El contenedor a presión debe estar hecho, probado, aprobado, equipado y marcado en concordancia con las especificaciones corrientes de API-ASME Code for Unfired Pressure Vessels for Petroleum Liquids and Gases (Código para contenedores a presión, a prueba de fuego para líquidos derivados del petróleo y gases), o, en caso de contenedores para suministro móvil, si son aplicables, los requerimientos de DOT 49 CFR 171-90, o ambos.

**Figura 24** Depósito de baja presión



Fuente: *Fire protection handbook 2008*. Pág. 17-10

#### 3.1.2.1 Temperatura de almacenaje

Los contenedores deben diseñarse para mantener el suministro de dióxido de carbono a una presión nominal de 2068 KPa (300 psi) correspondientes a una temperatura aproximada de -18 °C (0 °F).

### **3.1.2.2 Parámetros de operación**

La presión de diseño debe ser de al menos 325 psi. Cada contenedor de presión, debe equiparse con un indicador de nivel líquido, un indicador de presión y una alarma supervisora de alta/baja presión, ajustada para sonar a no más del 90% de la presión de diseño del recipiente, presión de trabajo máxima permisible a no menos de 250 psi.

### **3.1.2.3 Calentamiento**

Donde es requerido, el sistema de calentamiento, debe ser capaz de mantener a -18 °C en el contenedor de presión por debajo de la más baja temperatura ambiental esperada.

No debe requerirse que sea provisto calentamiento a menos que la información meteorológica conocida, indique la probable ocurrencia de temperaturas ambientales que podrían enfriar el contenido del tanque, o reducir la presión por debajo de 250 psi, aproximadamente -23 °C.

### **3.1.2.4 Refrigeración**

Los contenedores mantienen bajas temperaturas por medio del aislamiento y refrigeración mecánica. Un compresor, controlado por un interruptor de presión en el tanque, circula refrigerante a través de un intercambiador de calor en la parte alta del tanque. La presión del tanque es controlada por la condensación del vapor de CO<sub>2</sub> en el intercambiador.

En el caso de falla de la refrigeración, las válvulas de seguridad de presión, liberan algo del vapor, para mantener la presión dentro de límites seguros. Esto permite que algo del líquido a evaporar, cree un efecto auto-refrigerante que reduce la presión en el contenedor.

## **3.2 Sistemas de tuberías**

### **3.2.1 Parámetros de operación**

El sistema de tubería debe ser soportado seguramente con la debida tolerancia para las fuerzas de empuje del agente y la expansión y contracción térmicas, y no debe estar sujeto a daño mecánico, químico o de otra clase.

Donde son posibles explosiones, la tubería debe estar colgada de soportes que son menos probables a ser desplazado.

La tubería debe escariarse y limpiarse antes de ser armada, y después de ser armado el sistema entero, debe ser limpiado con aire comprimido, antes que las boquillas o los dispositivos de descarga sean instalados.

En sistemas donde la disposición de las válvulas introduce secciones de tubería cerrada, tales secciones, deben equiparse con dispositivos de alivio de presión o las válvulas diseñarse para evitar el atrapamiento del líquido dióxido de carbono.

Los dispositivos de alivio de presión deben operar entre 2,400 psi y 3,000 psi, en sistemas de alta presión y a 450 psi en sistemas a baja presión.

### **3.2.1.1 Sistemas de alta presión**

Están permitidas tuberías de  $\frac{3}{4}$  de pulgada y menores que sean cédula 40. Las tuberías entre 1 y 4 pulgadas, deben tener una cédula mínima de 80.

No debe usarse tubería ASTM A53 de soldadura de tope al horno.

### **3.2.1.2 Sistemas de baja presión**

En sistemas de baja presión, la tubería debe ser como mínimo cédula 40. Es permitido usar tubería ASTM A53 de soldadura de tope al horno.

### **3.2.2 Parámetros de diseño**

La tubería debe ser de material metálico no combustible que tenga características físicas y químicas tales que su deterioro bajo esfuerzo pueda ser predicho con confiabilidad.

Toda la tubería debe disponerse para reducir las pérdidas por fricción a un mínimo razonable y cuidar posibles restricciones debido a materiales extraños o defectos de fabricación.

Las tuberías galvanizadas sumergidas en caliente por dentro y por fuera o el acero inoxidable son buenos ejemplos.

En atmósferas severamente corrosivas, deben usarse materiales especiales o recubrimientos resistentes a la corrosión.

Los materiales para tubería y las normas que cubren estos materiales se detallan a continuación:

- La tubería de acero negro o galvanizado debe ser ASTM A53 sin costuras o eléctricamente soldada, Grado A o B; o ASTM A 106, Grado A, B o C.
- No debe usarse la tubería ASTM A 120 y la tubería ordinaria de hierro fundido.
- Debe usarse acero inoxidable TP304 o TP316 para conexiones roscadas o TP 304, TP 316, TP304L o TP316L para conexiones soldadas.

Debe instalarse al final de cada tramo de tubería, una trampa de sedimentos consistente en una tee con un niple con tapa, de al menos 2 pulgadas de largo (51mm).

Las secciones de tubería no abiertas normalmente a la atmósfera, no requieren tener acabado interior resistente a la corrosión.

### **3.2.2.1 Sistemas de alta presión**

Si se utiliza tubería diferente a la especificada en el numeral 3.2.2, el espesor de la tubería debe calcularse en concordancia a ASME B31.1. La presión interna para este cálculo deber ser 2,800 psi.

### **3.2.2.2 Sistemas de baja presión**

En sistemas de baja presión, que utilizan tubería diferente a la especificada en el numeral 3.2.2, el espesor debe calcularse en concordancia a ASME B31.1, Power Piping Code. La presión interna para este cálculo debe ser de 450 psi.

### **3.2.3 Parámetros de diseño para accesorios**

#### **3.2.3.1 Sistemas de alta presión**

Deben usarse accesorios de hierro Clase 300 maleable o dúctil en la tubería de dimensión interna de hasta 2 pulg y accesorios de hierro forjado en los tamaños mayores.

Las uniones con bridas, aguas arriba de cualquier válvula de cierre, deben ser Clase 600.

Las uniones con bridas, aguas abajo de válvulas de cierre o sistemas sin válvulas de cierre, deben ser Clase 300. Las uniones roscadas deben, como mínimo, ser equivalentes al acero forjado Clase 2,000.

Los accesorios de acero inoxidable deben ser Tipo 304 o 316 para conexiones roscadas en concordancia con ASTM A 182, roscada o de cuello soldado, para todos los tamaños, 1/8 (3 mm) de pulgada hasta 4 pulgadas (100 mm).

### **3.2.3.2 Sistemas de baja presión**

Deben usarse accesorios de hierro maleable o dúctil Clase 300 hasta 3 pulgadas (80 mm) y 1,000 lb en hierro dúctil o accesorios de acero forjado en todos los tamaños mayores.

Las uniones con bridas deben ser Clase 300.

Los accesorios de acero inoxidable deben ser Tipo 304 o 316 para conexiones roscadas o Tipo 304, 316, 304L, o 316L para conexiones soldadas, fraguado o soldado en concordancia con ASTM A 182, Clase 2,000, roscada o de cuello soldado, para todos los tamaños, 1/8 de pulgada (3 mm) hasta 4 pulgadas (100 mm).

Es correcto el uso de uniones soldadas y accesorios roscados o con bridas de hierro maleable y hierro dúctil.

Las uniones y accesorios mecánicos ranurados, pueden ser utilizados, si están listados específicamente para el servicio con dióxido de carbono.

### **3.2.4 Válvulas de acción**

Las válvulas de acción van montadas justo encima de la válvula de descarga del cilindro y su función es permitir la salida del CO<sub>2</sub>. Estas pueden ir combinadas entre sí en un mismo cilindro, es decir, un cilindro, por ejemplo puede tener acción mecánica y acción neumática, simultáneamente.

### 3.2.4.1 Válvulas de acción mecánica

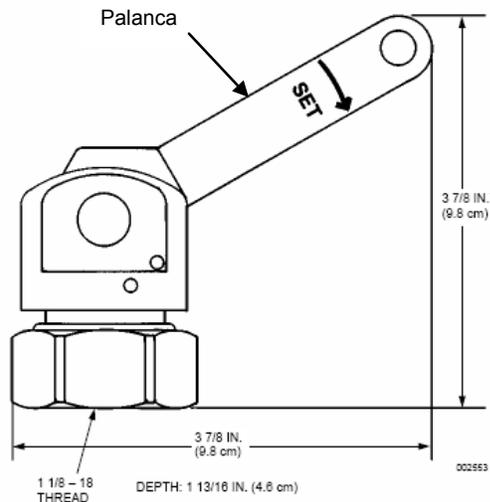
#### 3.2.4.1.1 Válvulas de acción manual/local

La actuación manual, puede ser usada con o sin detección automática.

##### 3.2.4.1.1.1 Válvula actuadora de palanca

Esta válvula permite accionar un cilindro contenedor, por la actuación manual de la palanca o cable de actuación, cuando es usado en conjunto con una estación manual (ver numeral 3.2.4.1.2).

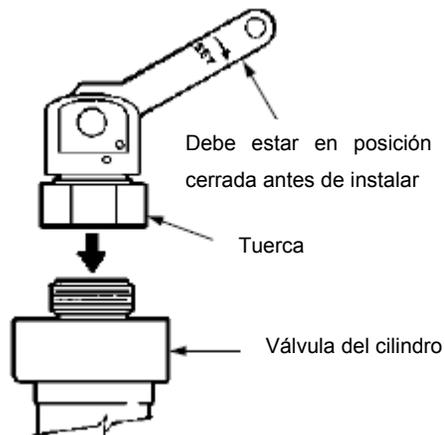
**Figura 25** Válvula actuadora de palanca para aplicación local



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-8.1

Esta va montada en la válvula del cilindro como se muestra a continuación:

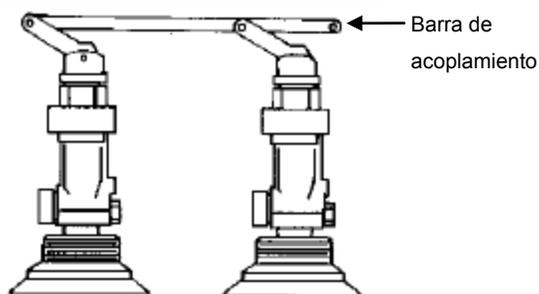
**Figura 26** Válvula actuadora de palanca para aplicación local



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-18

Si el sistema requiere de dos o más palancas actuadoras, se usará una barra de acoplamiento.

**Figura 27** Barra de acoplamiento para palancas actuadoras



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-18

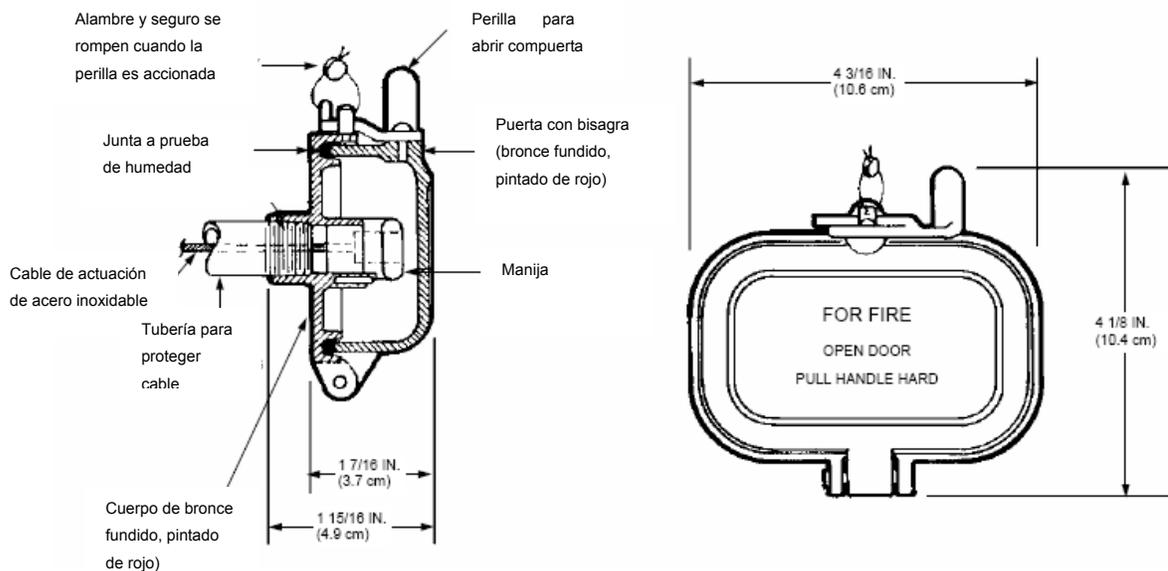
### 3.2.4.1.2 Válvulas de acción manual/remota

Consiste en realizar la actuación mecánica, por medio de la acción de presionar un botón o jalar una palanca para realizar una descarga.

#### 3.2.4.1.2.1 Estación de acción

La estación de acción en un sistema de dióxido de carbono es usada para liberar CO<sub>2</sub> al sistema o activar una válvula de dirección. El tipo compuerta asegurada tiene una sólida compuerta de bronce vaciado que debe ser abierta para accionar la manija.

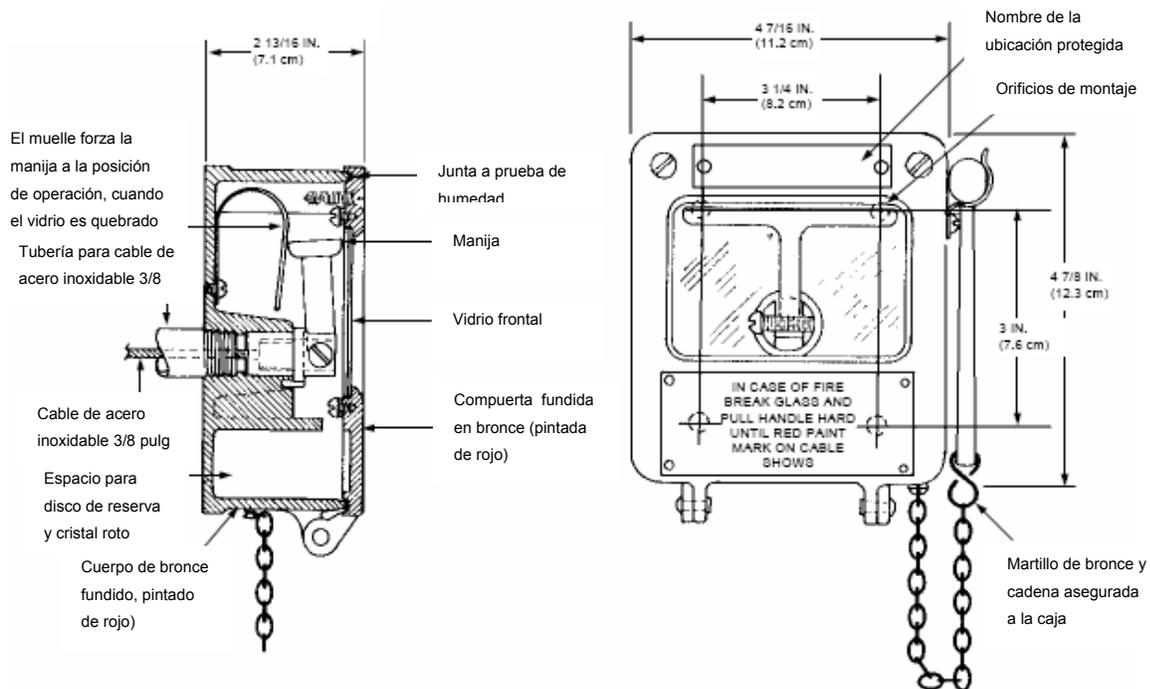
**Figura 28** Estación de acción manual de compuerta asegurada



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-34

Otro tipo es el que tiene una ventana de vidrio y un muelle que acciona hacia adelante al momento de romper el vidrio. La transferencia de movimiento de este hacia las válvulas actuadoras de palanca, se hace mediante cable de acero inoxidable el cual será tensionado para lograr la actuación.

**Figura 29** Estación de acción manual de ventana de vidrio



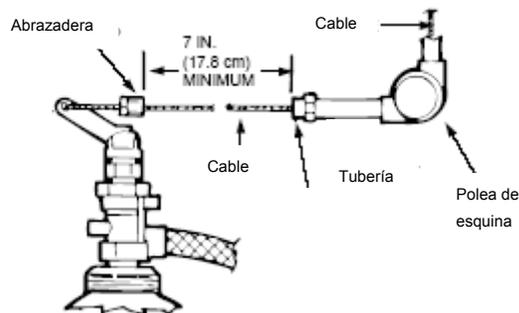
Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-34

### 3.2.4.1.2.2 Accesorios

Entre los accesorios para la actuación manual, está el cable que es usado para accionar desde las estaciones de acción manual remota, las válvulas de cilindros y también las válvulas selectoras. El cable es construido en acero inoxidable.

Para cambios de dirección del cable, son utilizadas las poleas de esquina que brindan una variación de 90°. Estas son instaladas como parte de la tubería protectora del cable de acción.

**Figura 30** Accesorios de actuación manual

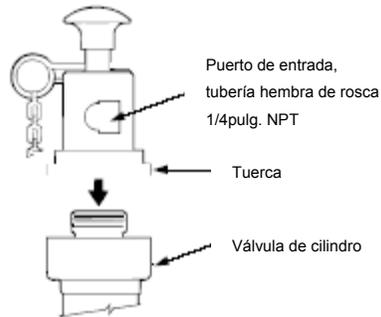


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-22

### 3.2.4.2 Válvulas de acción neumática

La válvula neumático/manual, Figura 29, es utilizada cuando el diseño del sistema requiere actuación manual sobre el cilindro. Puede ser montada directamente en el acople del cilindro, o en algunos casos, en la parte superior de un actuador eléctrico, lo que proporciona al sistema, la capacidad de actuación manual, neumática y eléctrica. La operación se logra removiendo el pin y presionando el botón rojo, o suministrando un mínimo de 30psi en el puerto de entrada de aire.

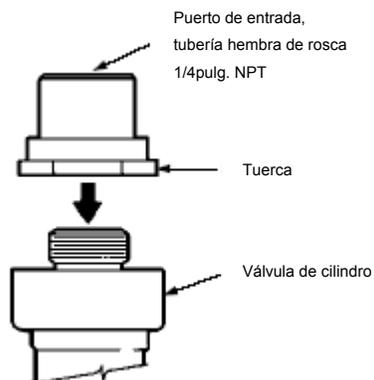
**Figura 31** Actuador neumático/manual



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-17

También existen válvulas neumáticas simples, que van montadas encima de los cilindros de CO<sub>2</sub>, con presiones de operación de 30 y 100 psi.

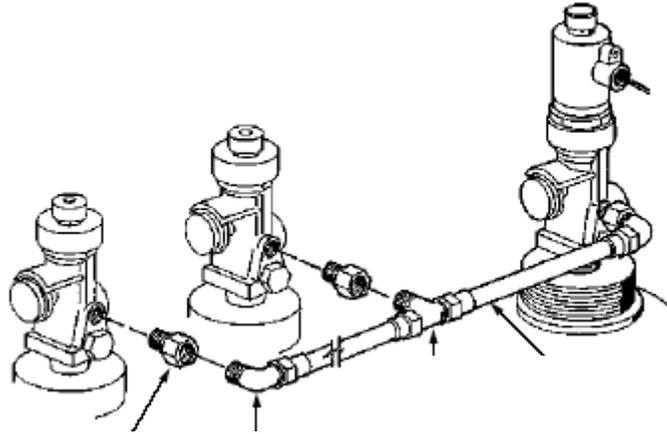
**Figura 32** Actuador neumático



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-17

Es común utilizar múltiples actuadores neumáticos, cuando, por cuestiones de diseño se necesita un volumen considerable de gas, lo que significa el empleo de varios cilindros, con un máximo de 15, debido a la caída de presión.

**Figura 33** Disposición de alimentación neumática para varios cilindros de CO<sub>2</sub>

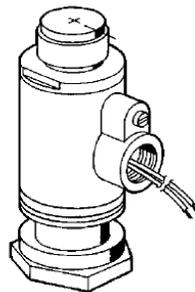


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-17

### 3.2.4.3 Válvulas de acción eléctrica

Al igual que las demás válvulas de acción, esta se monta en la parte superior del cilindro de CO<sub>2</sub> y es accionada por medio de un pulso eléctrico de 1.5 amp a 24 VCD o 0.57 amp a 12 VCD, desde el panel de control.

**Figura 34** Válvula eléctrica



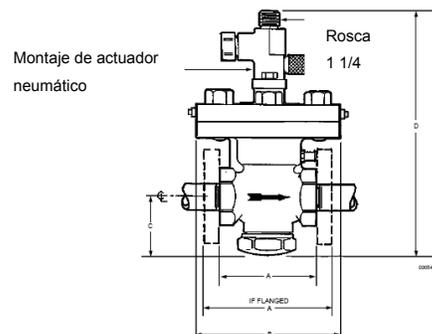
Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-5.1

### 3.2.5 Válvulas selectoras

Son utilizadas para dirigir el flujo de dióxido de carbono a un área específica o un sistema múltiple de áreas a proteger.

La válvula en la siguiente figura viene equipada con un actuador neumático encima de esta.

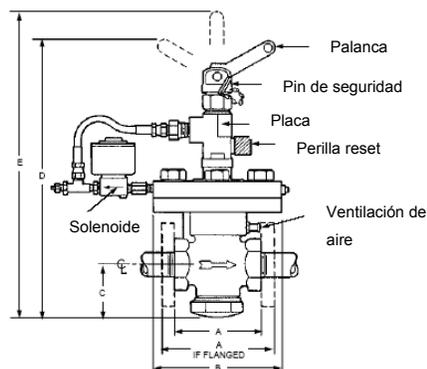
**Figura 35** Válvula selectora con actuación neumática



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-30

La actuación eléctrica en válvulas selectoras es lograda por un solenoide eléctrico conectada al panel de control. En la Figura 36 se muestra una válvula selectora, que puede ser accionada por un solenoide o manualmente.

**Figura 36** Válvula selectora con actuador solenoide



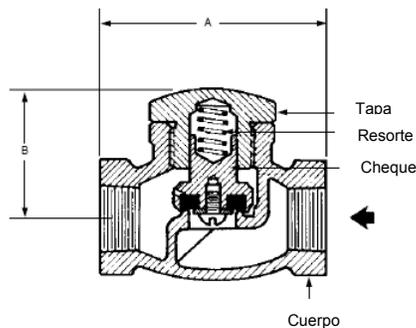
Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-30.1

### 3.2.6 Otras válvulas del sistema

#### 3.2.6.1 Válvula cheque

Las válvulas de cheque son utilizadas en los sistemas principales y de reserva. Estas previenen la presurización del múltiple del sistema de reserva, bloqueando el flujo de dióxido de carbono desde el sistema principal. Permite al gas fluir desde el sistema de reserva (si este es accionado) para pasar a través de la tubería de distribución.

Figura 37 Válvula cheque

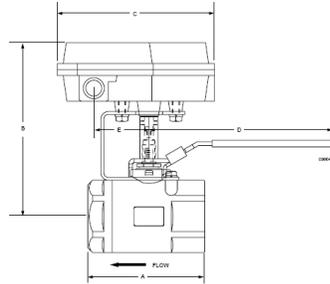


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-36

#### 3.2.6.2 Válvula de cerrojo manual

Esta se opera manualmente y se ubica en varios puntos del sistema de tubería. Inhibe la descarga de CO<sub>2</sub> totalmente o en un área específica. Cuenta con palanca que deja la válvula con candado en la posición de cerrado.

**Figura 38** Válvula de cerrojo manual

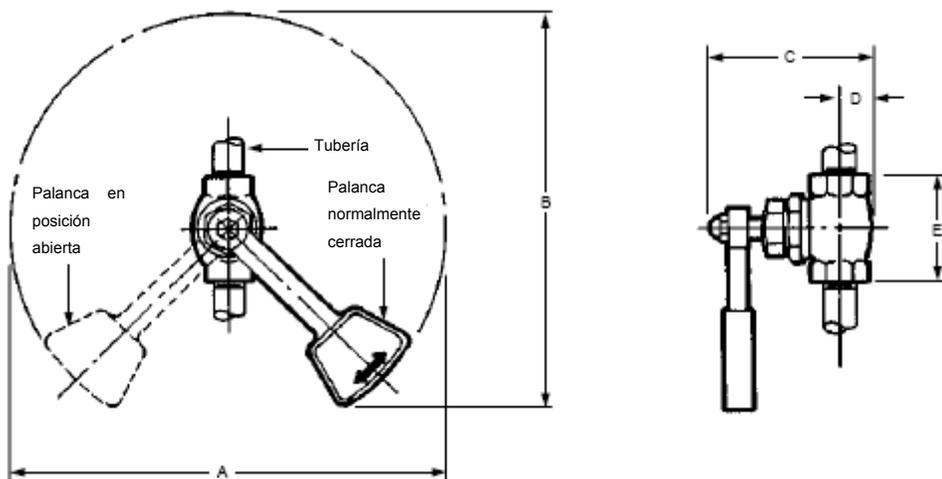


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-33.1

### 3.2.6.3 Válvulas dirección/paro

Son usadas para controlar manualmente el flujo de dióxido de carbono a un área específica de varias áreas protegidas. Pueden ser usadas como dispositivo de seguridad, permitiendo que el flujo de gas sea descargado hasta la salida de los ocupantes.

**Figura 39** Válvula de dirección/paro

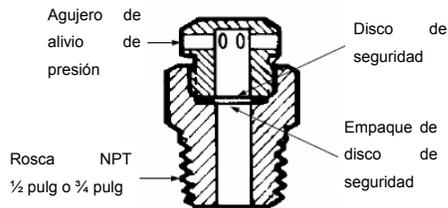


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-33

### 3.2.7 Dispositivos de alivio de presión

La cabeza de seguridad (Figura 38) es usada para liberar el incremento de altas presiones en una sección cerrada de la tubería. Si la presión de actuación quedase atrapada y un incremento de temperatura causa un incremento peligroso de la presión, el disco en la cabeza de seguridad se rompe, permitiendo el escape de la presión.

**Figura 40** Válvula de dirección/paro



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-45

### 3.2.8 Interruptor de presión

El interruptor de presión es operado por la presión del dióxido de carbono descargado. Este puede ser utilizado para abrir o cerrar circuitos eléctricos, apagar equipos, activar luces o alarmas.

### **3.3 Detectores de fuego**

A continuación se detallan los diferentes sistemas de detección disponibles. Cualquiera de estos es utilizado en los sistemas de CO<sub>2</sub>. La aplicación recomendada para la protección de generadores hidráulicos es el sistema de detección eléctrica con detectores de tasa de crecimiento de calor. Si se desea la mayor efectividad en la detección, se deben instalar detectores combinados, que podrán detectar llama, humo de combustión e incremento de calor.

#### **3.3.1 Sistema de detección neumática**

Consiste en un control montado en la válvula del cilindro. La tubería de aire comprimido llega hasta el detector neumático. Un incremento en la temperatura provoca un incremento en la presión en el circuito de detección neumática, lo que provocará la descarga de gas.

#### **3.3.2 Sistema de detección eléctrica**

La operación eléctrica de un sistema de dióxido de carbono, es a través del uso de un sistema de control electrónico que monitorea y controla varias funciones (detección, actuación, etc.).

Los dispositivos de detección disponibles son: detectores de ionización de humo, detectores fotoeléctricos de humo, detectores de temperatura fija, detectores de tasa de crecimiento de calor, detectores de flama, o detectores de vapores de combustión.

Cuando se detecta fuego, una señal es enviada desde el detector al panel de control. El panel a su vez, manda una señal eléctrica localizada en el actuador de la válvula del cilindro. El actuador abre la válvula del cilindro, provocando que el CO<sub>2</sub> sea liberado a la red de tubería, y descargado por las toberas al área protegida.

### **3.3.3 Sistema de detección mecánica**

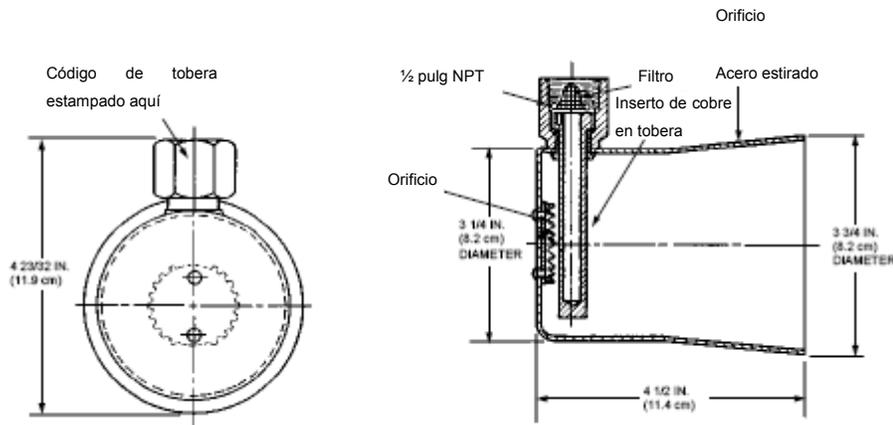
Consiste en un mecanismo de liberación encerrado junto con un cartucho de nitrógeno. El mecanismo de liberación opera cuando el fusible de unión con el ambiente a proteger, normalmente tenso, se afloja, debido al aumento de temperatura, pinchando el sello del cartucho de nitrógeno. Esta presión liberada, opera el actuador colocado sobre la válvula del cilindro.

## **3.4 Toberas de descarga**

### **3.4.1 Toberas tipo A o D**

Las toberas tipo A y D son utilizadas, principalmente, para aplicación local, pero también pueden ser usadas para inundación total, la velocidad de descarga depende en el tamaño de orificio y la presión de las toberas.

**Figura 41** Tobera tipo A



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-14

### 3.4.2 Toberas tipo selladas

Son usadas primariamente en ductos y en espacios cerrados de maquinaria. La parte cerrada de la tobera es una combinación de la línea sellada y la unidad de filtro.

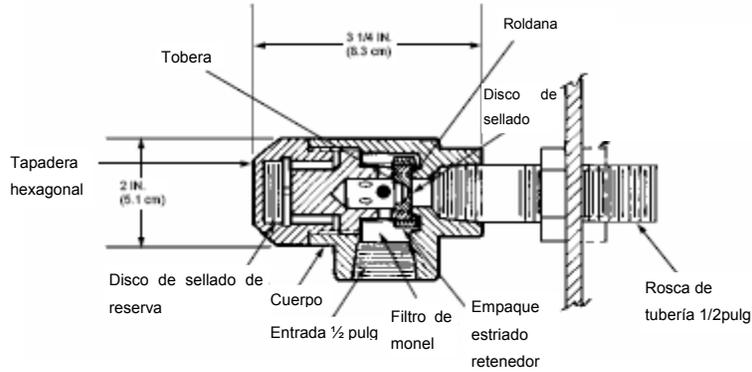
Su diseño está hecho para prevenir polvo o vapores que puedan entrar al sistema de tubería y sirve de filtro para el CO<sub>2</sub>.

En operación, la alta presión del gas desde los cilindros, rompe el disco de sellado, permitiendo el flujo de gas a la descarga interna de la tobera.

La ventaja de la tobera sellada es que no requiere desmontaje del sistema de tubería para limpiar el filtro o reemplazar el disco de sellado roto. Esto se logra removiendo la tapadera hexagonal de la tobera.

Está recomendada para su uso en generadores hidráulicos.

**Figura 42** Tobera tipo sellada

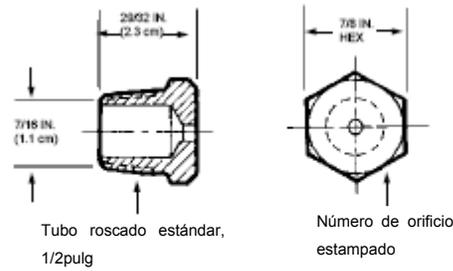


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-12

### 3.4.3 Toberas tipo regular

Es utilizada para aplicaciones de inundación total, solamente.

**Figura 43** Tobera tipo regular

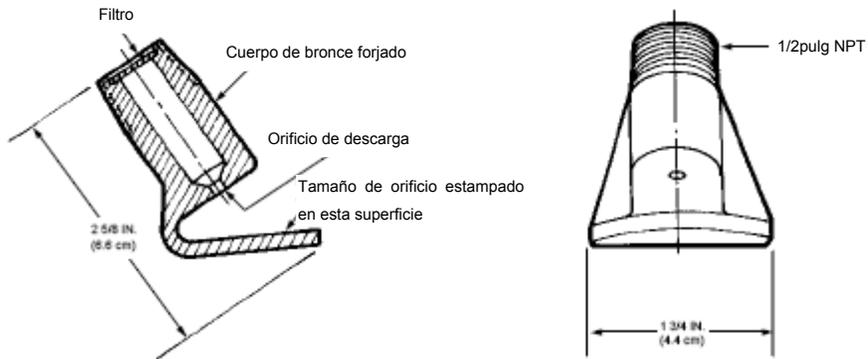


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-18

### 3.4.4 Toberas tipo baffle

Las toberas tipo baffle se utilizan en aplicaciones de inundación total.

**Figura 44** Tobera tipo baffle



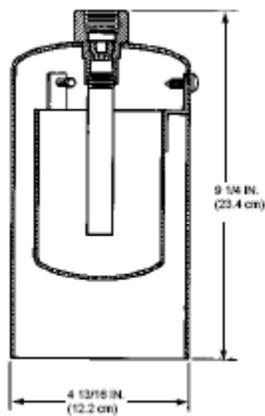
Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-19

### 3.4.5 Otros tipos de toberas

#### 3.4.5.1 Tobera tipo cono

Es usada primariamente para aplicación local.

**Figura 45** Tobera tipo cono

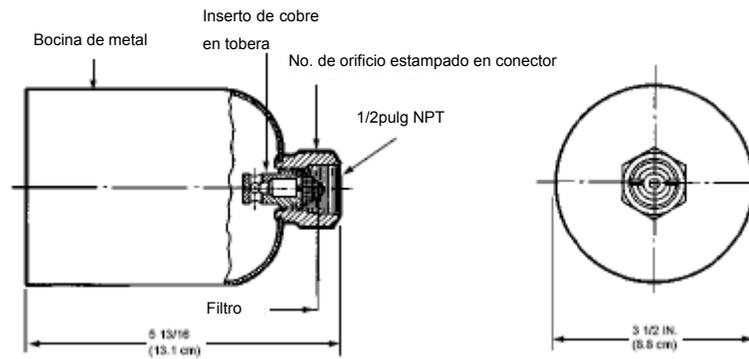


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-15

### 3.4.5.2 Tobera tipo multidescarga

La tobera multidescarga es utilizada exclusivamente para aplicaciones de inundación total.

**Figura 46** Tobera tipo multidescarga



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-16

## 3.5 Panel de control

El panel de control es utilizado cuando un sistema de control automático es requerido para accionar un sistema fijo de dióxido de carbono. Este es utilizado para controlar un sistema de supresión y alarma, basado en señales de entrada recibidas desde los dispositivos de detección.

Los circuitos de detección, deben ser configurados usando cruce, conteo de zonas independientes o prioritarias.

Además, deberá ser capaz de registrar las condiciones de temperatura y transferencia de calor presentes en el área protegida, para poder llevar un monitoreo constante y saber con exactitud condiciones anormales, por medio de detectores múltiples, que integren la detección de flama, vapores de combustión y radiación.

### **3.6 Alarmas**

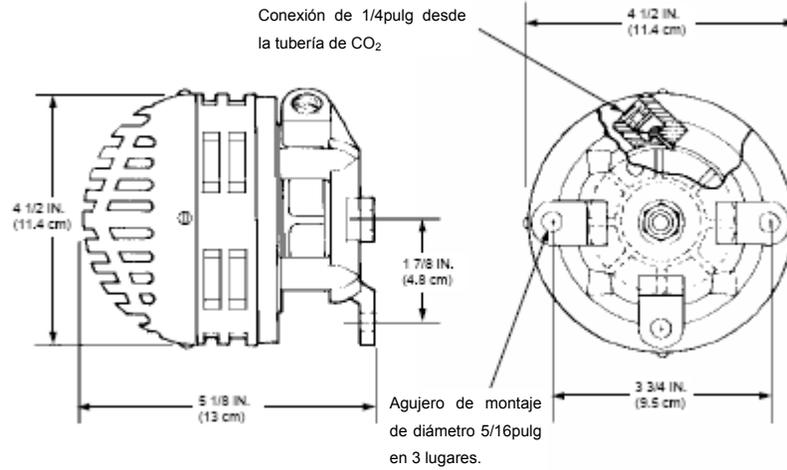
#### **3.6.1 Alarmas de predescarga**

Las alarmas de predescarga deberán estar al menos 15 dB sobre el nivel del ruido ambiental o 5 dB sobre el nivel máximo de sonido, el que sea mayor, medidos 1.5 m sobre el piso del área ocupada.

#### **3.6.2 Alarmas de descarga**

La sirena operada por presión es usada para indicar al personal de una descarga del sistema. Esta es operada por presión de dióxido de carbono, desde el inicio de una descarga y continuará luego de la descarga. El mínimo nivel de decibeles a 3 metros, es de 90 dB, con un flujo de 5 kg/min.

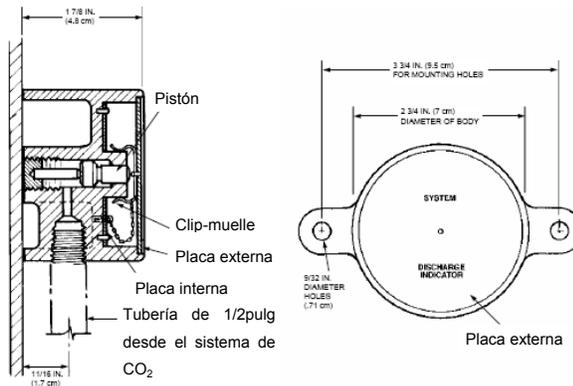
**Figura 47** Sirena operada por presión



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-47

Respecto a las alarmas visuales, se encuentra el indicador de descarga, la cual, cuando el sistema registra una descarga, la presión acciona un pistón, que presiona una placa de cobertura y expone las letras “Sistema Descargando”.

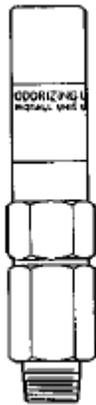
**Figura 48** Sirena operada por presión



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-47

También se puede disponer de alarmas olfativas, por medio del odorizador, que inyecta una pequeña cantidad de esencia de menta cuando ocurre una descarga, lo que prevendrá al personal que está ocurriendo una descarga en el lugar protegido, o que el gas se filtra del lugar protegido hacia afuera.

**Figura 49** Odorizador

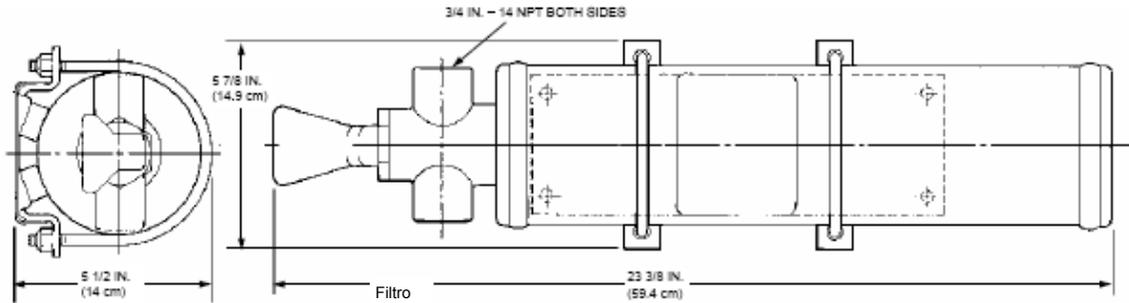


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-49

### **3.6.3 Dispositivos de seguridad**

Debido a que los fosos de generadores hidráulicos pueden llegar a estar ocupados por mantenimiento, la descarga de CO<sub>2</sub> debe ser retardada por un período corto de tiempo, seguido de la actuación. Los retardadores usan la presión del gas para activar el mecanismo de retardo. Este es instalado en la tubería de descarga, directamente después del control del cilindro o a lo largo de la tubería. El tiempo de retardo es predefinido de fábrica y no es ajustable: los tiempos disponibles son 10, 30 y 60 segundos.

**Figura 50** Retardador neumático de descarga

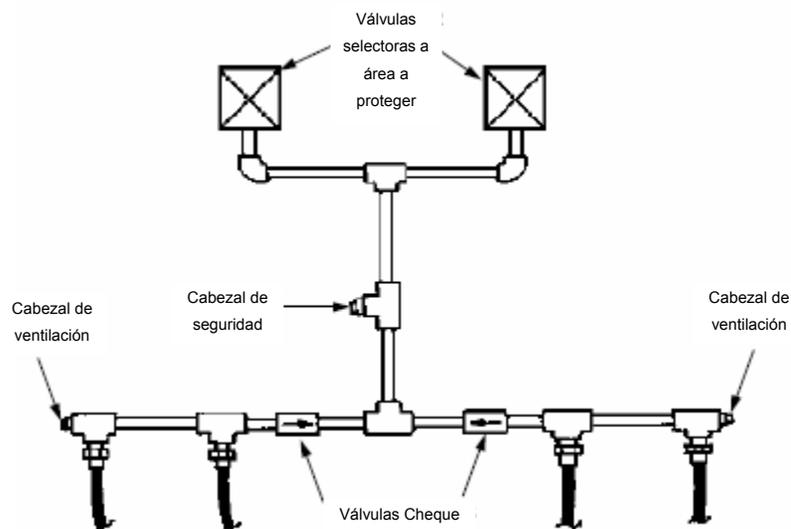


Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 1-41

### 3.7 Configuración básica de un sistema de alta presión

Los suministros principal y de reserva deben estar permanentemente conectados al sistema de tuberías e instalados para un fácil mantenimiento y recambio de componentes.

**Figura 51** Sistema principal o de reserva con válvulas selectoras



Fuente: *Ansul High Pressure Carbon Dioxide Systems CD*. Sección 7-7

El sistema de CO<sub>2</sub> consiste en dos bancos de cilindros y dos instalaciones de tuberías separadas. Un banco de cilindros (banco principal) es conectado por la tubería a las toberas de descarga, las cuales darán una tasa de descarga al recibir la señal del tablero de control. Esta descarga será capaz de llevar la concentración de dióxido de carbono al 30% en dos minutos o menos.

El segundo banco de cilindros está diseñado para descargar simultáneamente a una tasa de descarga menor, en una línea y toberas independientes. Esta red proveerá una descarga extendida en el período de desaceleración del generador para compensar fugas y mantener una atmósfera inerte dentro del encerramiento. La concentración mínima de diseño deberá ser mantenida por al menos 20 minutos.

## 4 DISEÑO DE SISTEMA DE EXTINCIÓN DE INCENDIOS PARA GENERADORES HIDRÁULICOS

### 4.1 Determinación de la concentración de CO<sub>2</sub>

La concentración mínima de CO<sub>2</sub> para generadores hidráulicos debe ser de 30%. La concentración de diseño es de 50%, debiéndose alcanzar en un tiempo no mayor a 7 minutos. La tasa de descarga de gas no deberá ser menor a la requerida para desarrollar la concentración de 30% en 2 minutos.

El volumen de dióxido de carbono requerido para desarrollar una concentración dada en la atmósfera es expresada por la ecuación siguiente:

$$X = 2.303 \log_{10} \frac{100}{100 - \%CO_2}, \text{ donde:}$$

X: volumen de dióxido de carbono agregado por volumen de espacio protegido.

Para fines de diseño de sistemas, en generadores hidráulicos, el factor de volumen para la concentración de diseño, 50%, vienen dados por la siguiente tabla:

**TABLA III** Factores de inundación

| Volumen protegido            | pie <sup>3</sup> /lb CO <sub>2</sub> | m <sup>3</sup> /kg CO <sub>2</sub> | lb CO <sub>2</sub> /pie <sup>3</sup> | lb CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> |
|------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 0 – 2000pie <sup>3</sup>     | 10                                   | 0.62                               | 0.100                                | 1.6                                |
| Mayor a 2000pie <sup>3</sup> | 12                                   | 0.75                               | 0.083                                | 1.33                               |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-27

#### 4.1.1 Equipo recirculante

Para generadores con entrada de aire recirculante, la cantidad de descarga inicial no debe ser menor a 1 lb de gas por cada 10pie<sup>3</sup> de volumen encerrado protegido (1.6 kg/m<sup>3</sup>). Para grandes volúmenes, debe usarse 1lb de gas por cada 12 pie<sup>3</sup>.

La Tabla 4, puede usarse como guía para estimar la cantidad de gas necesaria para la descarga prolongada a fin de mantener una concentración mínima del 30% para el tiempo de desaceleración del generador. La cantidad está basada en el volumen interno de la máquina y el tiempo de desaceleración, asumiendo una fuga promedio.

**TABLA IV** Descarga prolongada de protección para generadores eléctricos, recirculantes, encerrados (pies cúbicos protegidos durante el tiempo de desaceleración)

| lb CO <sub>2</sub> | Tiempo (minutos) |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                    | 5                | 10    | 15    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    |
| 100                | 1200             | 1000  | 800   | 600   | 500   | 400   | 300   | 200   |
| 150                | 1800             | 1500  | 1200  | 1000  | 750   | 600   | 500   | 400   |
| 200                | 2400             | 1950  | 1600  | 1300  | 1000  | 850   | 650   | 500   |
| 250                | 3300             | 2450  | 2000  | 1650  | 1300  | 1050  | 800   | 600   |
| 300                | 4600             | 3100  | 2400  | 2000  | 1650  | 1300  | 1000  | 700   |
| 350                | 6100             | 4100  | 3000  | 2500  | 2000  | 1650  | 1200  | 900   |
| 400                | 7700             | 5400  | 3800  | 3150  | 2500  | 2000  | 1600  | 1200  |
| 450                | 9250             | 6800  | 4900  | 4000  | 3100  | 2600  | 2100  | 1600  |
| 500                | 10800            | 8100  | 6100  | 5000  | 3900  | 3300  | 2800  | 2200  |
| 550                | 12300            | 9500  | 7400  | 6100  | 4900  | 4200  | 3600  | 3100  |
| 600                | 13900            | 10900 | 8600  | 7200  | 6000  | 5200  | 4500  | 3900  |
| 650                | 15400            | 12300 | 9850  | 8300  | 7050  | 6200  | 5500  | 4800  |
| 700                | 16900            | 13600 | 11100 | 9400  | 8100  | 7200  | 6400  | 5600  |
| 750                | 18500            | 15000 | 12350 | 10500 | 9150  | 8200  | 7300  | 6500  |
| 800                | 20000            | 16400 | 13600 | 11600 | 10200 | 9200  | 8200  | 7300  |
| 850                | 21500            | 17750 | 14850 | 12700 | 11300 | 10200 | 9100  | 8100  |
| 900                | 23000            | 19100 | 16100 | 13800 | 12350 | 11200 | 10050 | 9000  |
| 950                | 24600            | 20500 | 17350 | 14900 | 13400 | 12200 | 11000 | 9800  |
| 1000               | 26100            | 21900 | 18600 | 16000 | 14500 | 13200 | 11900 | 10700 |
| 1050               | 27600            | 23300 | 19900 | 17100 | 15600 | 14200 | 12850 | 11500 |
| 1100               | 29100            | 24600 | 21050 | 18200 | 16600 | 15200 | 13750 | 12400 |
| 1150               | 30600            | 26000 | 22300 | 19300 | 17700 | 16200 | 14700 | 13200 |
| 1200               | 32200            | 27300 | 23550 | 20400 | 18800 | 17200 | 15600 | 14100 |
| 1250               | 33700            | 28700 | 24800 | 21500 | 19850 | 18200 | 16500 | 14900 |
| 1300               | 35300            | 30100 | 26050 | 22650 | 20900 | 19200 | 17450 | 15800 |
| 1350               | 36800            | 31400 | 27300 | 23750 | 22000 | 20200 | 18400 | 16650 |
| 1400               | 38400            | 32800 | 28550 | 24900 | 23100 | 21200 | 19350 | 17500 |
| 1450               | 39900            | 34200 | 29800 | 26000 | 24200 | 22200 | 20300 | 18350 |
| 1500               | 41100            | 35600 | 31050 | 27100 | 25250 | 23200 | 21200 | 19200 |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-48

### **4.1.2 Equipo no recirculante**

Para generadores del tipo no recirculante, con compuertas de tiro, añadir 35% a las cantidades indicadas en la Tabla 4.

## **4.2 Determinación del tiempo de descarga**

El tiempo de descarga para la protección de generadores hidráulicos, debe ser por el lapso en que el equipo es desacelerado o al menos 20 minutos (el tiempo que sea mayor).

## **4.3 Toberas de descarga**

### **4.3.1 Diseño y condiciones de funcionamiento**

El diseño y las condiciones de funcionamiento de las toberas se determinan a continuación:

- No hay trabajo de eje, puesto que una tobera, es meramente un conducto.
- La variación de la energía potencial es despreciable, ya que el fluido experimenta una variación de altura pequeña o nula.
- En muchos casos, el calor por unidad de masa puede ser pequeño comparado con la variación de la energía cinética y entalpía. La velocidad del gas puede ser tan alta que no hay tiempo suficiente para que el calor transferido sea significativo.

La hipótesis de proceso adiabático, es una buena aproximación para el diseño de toberas.

#### 4.3.1.1 Balance energético general

El balance energético para aplicaciones de ingeniería en las que aparecen volúmenes de control en régimen estacionario, viene dado por la fórmula:

$$q + w = (h_2 - h_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + g(z_2 - z_1),$$

Considerando la ausencia de una transferencia del calor al gas, la variación de energía cinética en la tobera se debe a dos efectos, que son la variación de la energía interna del fluido y la variación en el trabajo de flujo durante el proceso (caída de presión). El valor de la variación de la energía interna será mayor que el valor del trabajo de flujo (desplazamiento). Entonces la ecuación de balance energético general, para una tobera es:

$$h_1 - h_2 = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2},$$

donde:

$h_2$ : entalpía del gas, a la salida de la tobera (KJ/Kg)

$h_1$ : entalpía del gas, a la entrada de la tobera (KJ/Kg)

$V_2$  : velocidad a la salida de la tobera (m/s)

$V_1$  : velocidad a la entrada de la tobera (m/s)



### **4.3.2 Tipo de tobera**

La tobera tipo sellada, es generalmente usada en espacios cerrados de maquinaria. Esto disminuirá el mantenimiento y mantendrá el sistema de tubería libre de polvo.

### **4.3.3 Número y distribución de toberas**

No existe ciencia exacta para la distribución de toberas en el área del generador, pero deberán ser seguidas algunas reglas:

- ✓ El espacio máximo entre toberas será de 20 pies.
- ✓ No más de 10 pies desde una pared u obstrucción mayor.
- ✓ No deben colocarse cerca de aberturas que no puedan cerrarse.
- ✓ Nada debe interferir con la descarga de la tobera.
- ✓ Deben estar situados en la corriente de aire frío que entra al generador, para que este aire lleve el CO<sub>2</sub> a los devanados del generador.

## **4.4 Cálculos hidráulicos**

### **4.4.1 Esquematización del sistema**

Se debe realizar un plano de la disposición de la tubería, así como todos los accesorios (codos, tees, etc.) y toberas. Esto con el fin de poder calcular la longitud de tubería necesaria.

#### **4.4.2 Cálculo de tasa de aplicación**

La tasa mínima de aplicación de diseño debe basarse en la cantidad de dióxido de carbono y el tiempo máximo para alcanzar la concentración de diseño.

Además deben considerarse las pérdidas por filtraciones y la entrada de aire o su recirculación, para conseguir el flujo que logre la concentración mínima en dos minutos y la concentración de diseño, en 7 minutos, esto a través de las acciones que el panel del control realice para optimizar el proceso de descarga.

#### **4.4.3 Cálculo de tubería equivalente**

Las Tablas 5 y 6 listan longitudes equivalentes de accesorios de tubería para determinar la longitud equivalente de los sistemas de tubería. La Tabla 4 es para juntas roscadas y la Tabla 5 para juntas soldadas.

Ambas tablas fueron calculadas para tamaños de tubería calibre 40; sin embargo, para todos los propósitos prácticos, las mismas figuras pueden ser usadas también para tamaños de tubería calibre 80.

Con la sumatoria de las longitudes equivalentes de todos los accesorios que componen el sistema más las longitudes de tubería como tal, se tendrá una longitud total, que servirá para determinar la caída de presión del sistema.

**TABLA V** Longitudes equivalentes en pies de accesorios roscados de tubería

| Tamaño de tubería (pulg) | Codo Std. 45° | Codo Std. 90° | Codo de radio de 90° y T de flujo pasante | Lado de la T | Acople de unión o válvula de compuerta |
|--------------------------|---------------|---------------|---|--------------|--|
| 3/8                      | 0.6           | 1.3           | 0.8                                       | 2.7          | 0.3                                    |
| 1/2                      | 0.8           | 1.7           | 1.0                                       | 3.4          | 0.4                                    |
| 3/4                      | 1.0           | 2.2           | 1.4                                       | 4.5          | 0.5                                    |
| 1                        | 1.3           | 2.8           | 1.8                                       | 5.7          | 0.6                                    |
| 1 1/4                    | 1.7           | 3.7           | 2.3                                       | 7.5          | 0.8                                    |
| 1 1/2                    | 2.0           | 4.3           | 2.7                                       | 8.7          | 0.9                                    |
| 2                        | 2.6           | 5.5           | 3.5                                       | 11.2         | 1.2                                    |
| 2 1/2                    | 3.1           | 6.6           | 4.1                                       | 13.4         | 1.4                                    |
| 3                        | 3.8           | 8.2           | 5.1                                       | 16.6         | 1.8                                    |
| 4                        | 5.0           | 10.7          | 6.7                                       | 21.8         | 2.4                                    |
| 5                        | 6.3           | 13.4          | 8.4                                       | 27.4         | 3.0                                    |
| 6                        | 7.6           | 16.2          | 10.1                                      | 32.8         | 3.5                                    |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-62**TABLA VI** Longitudes equivalentes en pies de accesorios soldados de tubería

| Tamaño de tubería (pulg) | Codo Std. 45° | Codo Std. 90° | Codo de radio de 90° y T de flujo pasante | Lado de la T | Acople de unión o válvula de compuerta |
|--------------------------|---------------|---------------|---|--------------|--|
| 3/8                      | 0.2           | 0.7           | 0.5                                       | 1.6          | 0.3                                    |
| 1/2                      | 0.3           | 0.8           | 0.7                                       | 2.1          | 0.4                                    |
| 3/4                      | 0.4           | 1.1           | 0.9                                       | 2.8          | 0.5                                    |
| 1                        | 0.5           | 1.4           | 1.1                                       | 3.5          | 0.6                                    |
| 1 1/4                    | 0.7           | 1.8           | 1.5                                       | 4.6          | 0.8                                    |
| 1 1/2                    | 0.8           | 2.1           | 1.7                                       | 5.4          | 0.9                                    |
| 2                        | 1.0           | 2.8           | 2.2                                       | 6.9          | 1.2                                    |
| 2 1/2                    | 1.2           | 3.3           | 2.7                                       | 8.2          | 1.4                                    |
| 3                        | 3.8           | 4.1           | 3.3                                       | 10.2         | 1.8                                    |
| 4                        | 2.0           | 5.4           | 4.4                                       | 13.4         | 2.4                                    |
| 5                        | 2.5           | 6.7           | 5.5                                       | 16.8         | 3.0                                    |
| 6                        | 3.0           | 8.1           | 6.6                                       | 20.2         | 3.5                                    |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-62

#### 4.4.4 Cálculo de diámetro de tubería y orificio de toberas

Los tamaños de tubería y áreas de orificios (de toberas), deben seleccionarse sobre la base de cálculos para dar la tasa de flujo requerida para cada boquilla.

La ecuación siguiente o las curvas desarrolladas de ella, deben usarse para determinar la caída de presión en la línea de tubería:

$$Q^2 = \frac{3647(D^{5.25}Y)}{L+8.08(D^{1.25}Z)},$$

donde:

$Q$ : tasa de flujo [*lb/min (kg/min)*]

$D$ : diámetro real interior del tubo [*pulg(mm)*]

$L$ : longitud equivalente de tubería [*pie(m)*]

$Y$  y  $Z$ : factores que dependen de la presión del almacenaje y de la línea, los cuales pueden verse a continuación, en la Tabla 7.

**TABLA VII** Valores de Y y Z para presión inicial de almacenaje de 750psi

| Presión<br>(psi) | Y     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  | Z     | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 750              | 0.000 | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     |
| 740              | 0.038 | 497   | 448   | 399   | 350   | 300   | 251   | 201   | 151   | 101   | 51    |
| 730              | 0.075 | 975   | 928   | 881   | 833   | 786   | 738   | 690   | 642   | 594   | 545   |
| 720              | 0.110 | 1436  | 1391  | 1345  | 1299  | 1254  | 1208  | 1161  | 1115  | 1068  | 1022  |
| 710              | 0.143 | 1882  | 1838  | 1794  | 1750  | 1706  | 1661  | 1616  | 1572  | 1527  | 1481  |
| 700              | 0.174 | 2314  | 2271  | 2229  | 2186  | 2143  | 2100  | 2057  | 2013  | 1970  | 1926  |
| 690              | 0.205 | 2733  | 2691  | 2650  | 2608  | 2567  | 2525  | 2483  | 2441  | 2399  | 2357  |
| 680              | 0.235 | 3139  | 3099  | 3059  | 3018  | 2978  | 2937  | 2897  | 2856  | 2815  | 2774  |
| 670              | 0.265 | 3533  | 3494  | 2455  | 3416  | 3377  | 3338  | 3298  | 3259  | 3219  | 3179  |
| 660              | 0.296 | 3916  | 3878  | 2840  | 3802  | 3764  | 3726  | 3688  | 3649  | 3611  | 3572  |
| 650              | 0.327 | 4286  | 4250  | 4213  | 4176  | 4139  | 4102  | 4065  | 4028  | 3991  | 3953  |
| 640              | 0.360 | 4645  | 4610  | 4575  | 4539  | 4503  | 4467  | 4431  | 4395  | 4359  | 4323  |
| 630              | 0.393 | 4993  | 4959  | 4924  | 4890  | 4855  | 4821  | 4786  | 4751  | 4716  | 4681  |
| 620              | 0.427 | 5329  | 5296  | 5263  | 5229  | 5196  | 5162  | 5129  | 5095  | 5061  | 5027  |
| 610              | 0.462 | 5653  | 5621  | 5589  | 5557  | 5525  | 5493  | 5460  | 5427  | 5395  | 5362  |
| 600              | 0.498 | 5967  | 5936  | 5905  | 5874  | 5843  | 5811  | 5780  | 5749  | 5717  | 5685  |
| 590              | 0.535 | 6268  | 6239  | 6209  | 6179  | 6149  | 6119  | 6089  | 6058  | 6028  | 5997  |
| 580              | 0.572 | 6560  | 6531  | 6502  | 6473  | 6444  | 6415  | 6386  | 6357  | 6328  | 6298  |
| 570              | 0.609 | 6840  | 6812  | 6785  | 6757  | 6729  | 6701  | 6673  | 6645  | 6616  | 6588  |
| 560              | 0.646 | 7110  | 7084  | 7057  | 7030  | 7003  | 6976  | 6949  | 6922  | 6895  | 6868  |
| 550              | 0.683 | 7371  | 7345  | 7320  | 7294  | 7268  | 7242  | 7216  | 7190  | 7163  | 7137  |
| 540              | 0.719 | 7622  | 7597  | 7572  | 7548  | 7523  | 7498  | 7472  | 7447  | 7422  | 7396  |
| 530              | 0.756 | 7864  | 7840  | 7816  | 7792  | 7768  | 7744  | 7720  | 7696  | 7671  | 7647  |
| 520              | 0.792 | 8098  | 8075  | 8052  | 8028  | 8005  | 7982  | 7958  | 7935  | 7911  | 7888  |
| 510              | 0.827 | 8323  | 8301  | 8278  | 8256  | 8234  | 8211  | 8189  | 8166  | 8143  | 8120  |
| 500              | 0.893 | 8540  | 8519  | 8497  | 8476  | 8454  | 8433  | 8411  | 8389  | 8367  | 8345  |
| 490              | 0.898 | 8750  | 8730  | 8709  | 8688  | 8667  | 8646  | 8625  | 8604  | 8583  | 8562  |
| 480              | 0.933 | 8953  | 8933  | 8913  | 8893  | 8873  | 8852  | 8832  | 8812  | 8791  | 8771  |
| 470              | 0.967 | 9149  | 9129  | 9110  | 9091  | 9071  | 9052  | 9032  | 9012  | 8993  | 8973  |
| 460              | 1.002 | 9338  | 9319  | 9301  | 9282  | 9263  | 9244  | 9225  | 9206  | 9187  | 9168  |
| 450              | 1.038 | 9520  | 9502  | 9484  | 9466  | 9448  | 9430  | 9412  | 9393  | 9375  | 9356  |
| 440              | 1.073 | 9697  | 9697  | 9662  | 9644  | 9627  | 9609  | 9592  | 9574  | 9556  | 9538  |
| 430              | 1.109 | 9866  | 9850  | 9833  | 9816  | 9799  | 9782  | 9765  | 9748  | 9731  | 9714  |
| 420              | 1.146 | 10030 | 10014 | 9998  | 9982  | 9966  | 9949  | 9933  | 9916  | 9900  | 9883  |
| 410              | 1.184 | 10188 | 10173 | 10157 | 10141 | 10126 | 10110 | 10094 | 10078 | 10062 | 10046 |
| 400              | 1.222 | 10340 | 10325 | 10310 | 10295 | 10280 | 10265 | 10250 | 10234 | 10219 | 10204 |
| 390              | 1.262 | 10486 | 10472 | 10458 | 10443 | 10429 | 10414 | 10399 | 10385 | 10370 | 10355 |
| 380              | 1.302 | 10627 | 10613 | 10599 | 10585 | 10571 | 10557 | 10543 | 10529 | 10515 | 10501 |
| 370              | 1.344 | 10762 | 10749 | 10735 | 10722 | 10708 | 10695 | 10681 | 10668 | 10654 | 10641 |
| 360              | 1.386 | 10891 | 10878 | 10866 | 10853 | 10840 | 10827 | 10814 | 10801 | 10788 | 10775 |
| 350              | 1.429 | 11015 | 11003 | 10991 | 10978 | 10966 | 10954 | 10941 | 10929 | 10916 | 10904 |
| 340              | 1.473 | 11134 | 11122 | 11110 | 11099 | 11087 | 11075 | 11063 | 11051 | 11039 | 11027 |
| 330              | 1.518 | 11247 | 11236 | 11225 | 11214 | 11202 | 11191 | 11180 | 11168 | 11157 | 11145 |
| 320              | 1.564 | 11356 | 11345 | 11334 | 11323 | 11313 | 11302 | 11291 | 11280 | 11269 | 11258 |
| 310              | 1.610 | 11459 | 11449 | 11439 | 11428 | 11418 | 11408 | 11398 | 11387 | 11377 | 11366 |
| 300              | 1.657 | 11558 | 11548 | 11539 | 11529 | 11519 | 11509 | 11499 | 11489 | 11469 | 11469 |

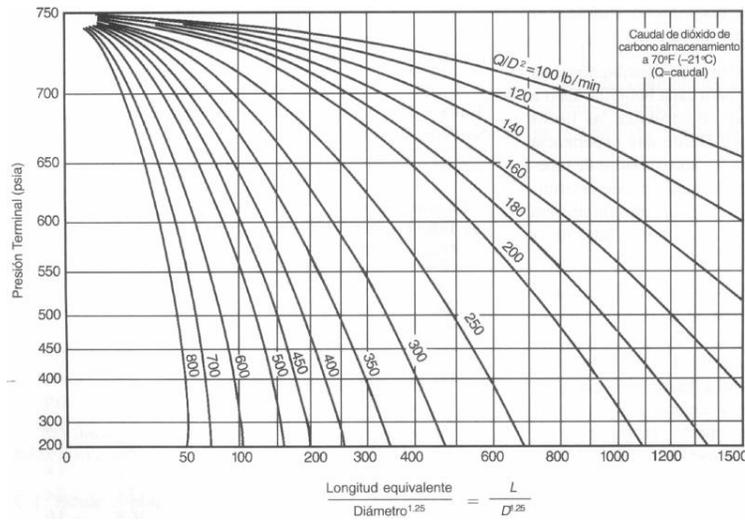
Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-60

La ecuación de flujo puede ser redispuesta como se muestra a continuación, y para una aplicación práctica, es deseable trazar curvas para cada tamaño de tubería que pueda usarse:

$$\frac{L}{D^{1.25}} = \frac{3647Y}{\left(\frac{Q}{D^2}\right)^2} - 8.08Z$$

Esta ecuación puede expresarse gráficamente, como se muestra a continuación, mostrando la caída de presión correspondiente para un caudal de CO<sub>2</sub> específico:

**Figura 53** Caída de presión en la tubería para almacenaje de alta presión



Fuente: **NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008**. Pág. 12-61

Por ejemplo, para un diámetro interior de tubería de exactamente 1 pulg  $D^2$  y  $D^{1.25}$ , son reducidos a unidades y se eliminan. Para otros tamaños de tubería, es necesario convertir la tasa de flujo y longitud equivalente dividiendo o multiplicado por estos factores. La Tabla 8 da los valores para D.

**TABLA VIII** Valores de  $D^{1.25}$  y  $D^2$  para varios tamaños de tubería

| Tipo y tamaño de tubería | Diámetro interior (pulg) | $D^{1.25}$ | $D^2$  |
|--------------------------|--------------------------|------------|--------|
| ½ Std.                   | 0.622                    | 0.5521     | 0.3869 |
| ¼ Std.                   | 0.824                    | 0.785      | 0.679  |
| 1 Std.                   | 1.049                    | 1.0615     | 1.100  |
| 1 XH                     | 0.957                    | 0.9465     | 0.9158 |
| 1 ¼ Std.                 | 1.380                    | 1.496      | 1.904  |
| 1 ¼ XH                   | 1.278                    | 1.359      | 1.633  |
| 1 ½ Std.                 | 1.610                    | 1.813      | 2.592  |
| 1 ½ XH                   | 1.500                    | 1.660      | 2.250  |
| 2 Std.                   | 2.067                    | 2.475      | 4.272  |
| 2 XH                     | 1.939                    | 2.288      | 3.760  |
| 2 ½ Std.                 | 2.469                    | 3.09       | 6.096  |
| 2 ½ XH                   | 2.323                    | 2.865      | 5.396  |
| 3 Std.                   | 3.068                    | 4.06       | 9.413  |
| 3 XH                     | 2.900                    | 3.79       | 8.410  |
| 4 Std.                   | 4.026                    | 5.71       | 16.21  |
| 4 XH                     | 3.826                    | 5.34       | 14.64  |
| 5 Std.                   | 5.047                    | 7.54       | 25.47  |
| 5 XII                    | 4.813                    | 7.14       | 23.16  |
| 6 Std.                   | 6.065                    | 9.50       | 36.78  |
| 6 XH                     | 5.761                    | 8.92       | 33.19  |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-62

Para sistemas con almacenaje de alta presión, el flujo debe calcularse sobre la base de un promedio de la presión de almacenaje de 750 psi durante la descarga para almacenaje normal a temperatura ambiente.

La presión de diseño de las boquillas, debe ser mayor o igual a 300 psi.

La tasa de descarga a través de orificios equivalentes debe basarse en los valores dados en la Tabla 8.

**TABLA IX** Tasa de descarga por pulgada cuadrada de área de orificio equivalente para almacenaje de alta presión

| Presión en el Orificio |      | Velocidad de descarga    |                        |
|------------------------|------|--------------------------|------------------------|
| psi                    | kPA  | lb/min-pulg <sup>2</sup> | kg/min-mm <sup>2</sup> |
| 750                    | 5171 | 4630                     | 3.258                  |
| 725                    | 4999 | 3845                     | 2.706                  |
| 700                    | 4826 | 3415                     | 2.403                  |
| 675                    | 4654 | 3090                     | 2.174                  |
| 650                    | 4481 | 2835                     | 1.995                  |
| 625                    | 4309 | 2615                     | 1.840                  |
| 600                    | 4137 | 2425                     | 1.706                  |
| 575                    | 3964 | 2260                     | 1.590                  |
| 550                    | 3792 | 2115                     | 1.488                  |
| 525                    | 3620 | 1985                     | 1.397                  |
| 500                    | 3447 | 1860                     | 1.309                  |
| 475                    | 3275 | 1740                     | 1.224                  |
| 450                    | 3103 | 1620                     | 1.140                  |
| 425                    | 2930 | 1510                     | 1.063                  |
| 400                    | 2758 | 1400                     | 0.985                  |
| 375                    | 2586 | 1290                     | 0.908                  |
| 350                    | 2413 | 1180                     | 0.830                  |
| 325                    | 2241 | 1080                     | 0.760                  |
| 300                    | 2068 | 980                      | 0.690                  |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-22

El orificio estándar deber ser un orificio que tenga una entrada redonda con un coeficiente de descarga no menor de 0.98.

Además, debe permitirse el uso de tamaños de orificio distintos de aquellos mostrados en la Tabla 9 y deben marcarse como equipo de orificios decimales:

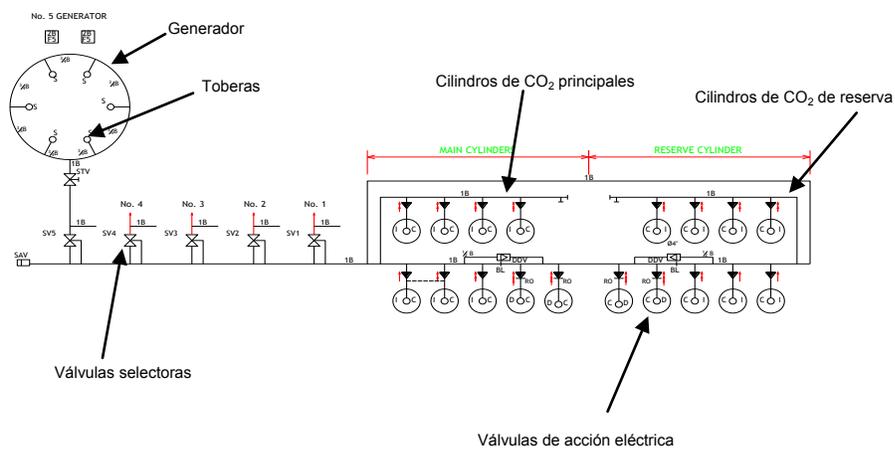
**TABLA X** Tasa de descarga por pulgada cuadrada de área de orificio equivalente para almacenaje de alta presión

| Código de Orificio No. | Diámetro equivalente del orificio único |       | Área equivalente del orificio único |                 |
|------------------------|---|-------|-------------------------------------|-----------------|
|                        | Pulg                                    | mm    | Pulg <sup>2</sup>                   | mm <sup>2</sup> |
| 1                      | 1/32                                    | 0.79  | 0.0008                              | 0.49            |
| 1.5                    | 3/64                                    | 1.19  | 0.0017                              | 1.11            |
| 2                      | 1/16                                    | 1.59  | 0.0031                              | 1.98            |
| 2.5                    | 5/64                                    | 1.98  | 0.0047                              | 3.09            |
| 3                      | 3/32                                    | 2.38  | 0.0069                              | 4.45            |
| 3.5                    | 7/64                                    | 2.78  | 0.0094                              | 6.06            |
| 4                      | 1/8                                     | 3.18  | 0.0123                              | 7.94            |
| 4.5                    | 9/64                                    | 3.57  | 0.0155                              | 10.00           |
| 5                      | 5/32                                    | 3.97  | 0.0192                              | 12.39           |
| 5.5                    | 11/64                                   | 4.37  | 0.0232                              | 14.97           |
| 6                      | 3/16                                    | 4.76  | 0.0276                              | 17.81           |
| 6.5                    | 13/64                                   | 5.16  | 0.0324                              | 20.29           |
| 7                      | 7/32                                    | 5.56  | 0.376                               | 24.26           |
| 7.5                    | 15/64                                   | 5.95  | 0.0431                              | 27.81           |
| 8                      | ¼                                       | 6.35  | 0.0491                              | 31.68           |
| 8.5                    | 17/64                                   | 6.75  | 0.0554                              | 35.74           |
| 9                      | 9/32                                    | 7.14  | 0.0621                              | 40.06           |
| 9.5                    | 19/64                                   | 7.54  | 0.0692                              | 44.65           |
| 10                     | 5/16                                    | 7.94  | 0.0767                              | 49.48           |
| 11                     | 11/32                                   | 8.73  | 0.0928                              | 59.87           |
| 12                     | 3/8                                     | 9.53  | 0.1105                              | 71.29           |
| 13                     | 13/32                                   | 10.32 | 0.1296                              | 83.61           |
| 14                     | 7/16                                    | 11.11 | 0.1503                              | 96.97           |
| 15                     | 15/32                                   | 11.91 | 0.1725                              | 111.29          |
| 16                     | ½                                       | 12.70 | 0.1964                              | 126.71          |
| 18                     | 9/16                                    | 14.29 | 0.2485                              | 160.32          |
| 20                     | 5/8                                     | 15.88 | 0.3068                              | 197.94          |
| 22                     | 11/16                                   | 17.46 | 0.3712                              | 239.48          |
| 24                     | ¾                                       | 19.05 | 0.4418                              | 285.03          |
| 32                     | 1                                       | 25.40 | 0.785                               | 506.45          |
| 48                     | 1 ½                                     | 38.40 | 1.765                               | 1138.71         |
| 64                     | 2                                       | 50.80 | 3.14                                | 2025.80         |

Fuente: *NFPA 12, Norma sobre sistemas de extinción de dióxido de carbono, edición 2008*. Pág. 12-43

## 4.5 Aplicación de sistema de extinción a base de CO<sub>2</sub> en unidades generadoras de Planta Hidroeléctrica Chixoy

**Figura 54** Sistema de Combate de Incendios a Base de CO<sub>2</sub> en Hidroeléctrica Chixoy



Fuente: **Manual Técnico de Sistema de Combate de Incendios de Planta Hidroeléctrica Chixoy.**

El sistema consiste en dos bancos de cilindros, uno principal y otro de reserva, cada uno de los cuales a su vez se subdivide en dos grupos de cilindros: uno que proporcionará la concentración mínima (30%) en un plazo máximo de 2 minutos y otro que proveerá la concentración de diseño (50%) en un plazo de 7 minutos.

El diseño del sistema cumple con los requerimientos de NFPA 12 y actualmente se encuentra operativo.

Se desconoce si las condiciones de flujos de entrada y salida de aire, en los generadores, han cambiado, por lo que se hace necesario hacer un estudio para determinar si los caudales másicos de CO<sub>2</sub> son los correctos para lograr las concentraciones adecuadas en los tiempos estipulados según NFPA 12.

## CONCLUSIONES

1. Un sistema de combate de incendios a base de dióxido de carbono, debe constar de un sistema de almacenaje de alta presión, es decir, cilindros, debido a que los volúmenes de agente extintor necesarios en los generadores hidráulicos, por no tener excesivas dimensiones, no justifican utilizar almacenaje a baja presión, el cual tiene mayor capacidad, siendo ya pocas empresas que fabrican CO<sub>2</sub> a baja presión.
2. El sistema deberá contar con un panel de control que monitoreará las condiciones dentro de los generadores, por medio de detectores múltiples, los cuales detectarán humo, llama y radiación. Los sistemas electrónicos en el panel deberán tomar decisiones basadas en las condiciones normales que han sido registradas, para no provocar descargas innecesarias. A su vez, el panel tendrá el control de las válvulas de accionamiento de los bancos de cilindros y válvulas selectoras, para dirigir el gas al generador que pueda estar incendiándose.
3. Las ventajas termodinámicas del agente extintor dióxido de carbono radican en su rápida expansión a presión atmosférica, lo que garantiza un desplazamiento de oxígeno eficiente. Otras características importantes son su no conductividad, no produce subproductos después de la descarga y provoca transferencia de calor hacia él, lo cual ayuda a reducir la temperatura del material que se está incinerando, por debajo de su temperatura de ignición.
4. La probabilidad de ocurrencia de incendio en generadores eléctricos siempre estará presente, a pesar del cambio de aislamiento. A esto se debe agregar

la severidad de ocurrencia de incendio, que es alta, considerando que sin el generador no se puede producir energía eléctrica, altos costos de reposición de equipo, lucro cesante, etcétera.

5. Las propiedades termodinámicas de un material son importantes para determinar la cantidad de energía necesaria para que este produzca vapores inflamables y subsecuentemente genere llama.
  
6. Las interacciones de calor en un material en llamas, que determinan el flujo másico de gases de combustión despedidos al ambiente, son el cociente de la diferencia entre el flujo de calor de la flama a la superficie menos el flujo de la superficie cedido al ambiente y el calor de gasificación propio del material, por lo que la transferencia de calor es determinante en el proceso de incineración.

## RECOMENDACIONES

1. Diseñar e implementar sistemas de extinción automática de incendios en generadores eléctricos de las diferentes plantas de generación estatales, debido a la importancia que estos tienen en el proceso de producción de energía a bajo costo a nivel nacional.
2. Cuando los devanados del generador eléctrico estén aislados por medio de materiales termoplásticos estos deberán ser reemplazados por materiales aislantes termoestables.
3. Realizar un estudio para determinar si los caudales máxicos de CO<sub>2</sub> en el sistema de extinción en Planta Hidroeléctrica Chixoy, son los correctos para lograr las concentraciones adecuadas en los tiempos estipulados, según NFPA 12. Esto para garantizar la efectividad del sistema.
4. Implementar procedimientos en caso de descarga automática o manual, con el fin de evacuar al personal a sitios seguros ya establecidos.
5. Realizar inspecciones, mantenimientos y pruebas de funcionamiento a los sistemas de extinción para generadores ya existentes.
6. Realizar un análisis de riesgo de incendio para la totalidad de las plantas hidroeléctricas, con el fin de tomar las acciones correctivas que se consideren viables.



## BIBLIOGRAFÍA

1. **ANSUL.** Ansul Preferred Carbon Dioxide System Application CD.
2. **ANSUL.** High Pressure Carbon Dioxide Systems CD: Components, Design, Installation, Recharge and Maintenance.
3. **ANSUL.** Low Pressure Carbon Dioxide Systems Design Manual.
4. Avallone, Eugene A. y Theodore Baumeister III. **Manual de Ingeniero Mecánico.** 9ª ed. México: McGraw-Hill, 1995.
5. Avner, Sidney H. **Introducción a la Metalurgia Física.** 2ª ed. México: McGraw-Hill, 1988.
6. Creus Solé, Antonio. **Instrumentación Industrial.** 6ª ed. México: Alfaomega Grupo Editor, 1998.
7. **FIRE PROTECTION HANDBOOK,** U.S.A.: National Fire Protection Association, 2008.
8. González Canales, Erwin Oswaldo. Sistemas de Prevención de Explosión y Fuego de Transformadores de Potencia, por el Método de Drenaje de Sobre Presiones e Inyección de Nitrógeno. Tesis Ing. Eléc. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2005. 183 pp.

9. Manual Técnico de Sistema de Combate de Incendios de Planta Hidroeléctrica Chixoy.
10. **NFPA 12 Norma sobre Sistemas de Extinción de Dióxido de Carbono**, EE.UU.: National Fire Protection Association, 2008. 77 pp.
11. **NFPA 72 Código Nacional de Alarmas de Incendio**, EE.UU.: National Fire Protection Association, 2007. 269 pp.
12. **NFPA 851 Práctica Recomendada para Protección contra Incendios para Plantas de Generación Hidroeléctrica**, EE.UU.: National Fire Protection Association, 2005. 34 pp.
13. Orille Fernández, Ángel Luis. **Centrales Eléctricas II**. España: Edicions UPC, 1993.
14. Robb, Luis A. **Diccionario para Ingenieros**. 2<sup>a</sup> ed. México: Compañía Editorial Continental, 1997.
15. Wark, Kenneth y Donald E. Richards. **Termodinámica**. 6<sup>a</sup> ed. España: McGraw-Hill, 2001. 1048 pp.