DOI: 10.21134/1ebazq49

CYTEF XII Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frio
Universidad Miguel Hernández de Elche
26-06 28-06/2024
UNIVERSITAS Miguel Hernández

CÁLCULO DE DISTANCIAS DE SEGURIDAD PARA LAS PRUEBA DE PRESIÓN DE RESISTENCIA Y DE ESTANQUEIDAD DE UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA PARA UN CENTRO LOGÍSTICO

Galindo Muñoz, Mª Teresa[1]*, Martínez Gómez, Jerónimo[2]

1: Departamento de Prevención de Riesgos Laborales, Tefrigo Refrigeración, S.L.
C/ Paraguay – Parc 14/5 Pol Ind Oeste 30820 Alcantarilla (MURCIA).
e-mail: mariateresa.galindo@tefrigo.es
2: Departamento de ingeniería.

Resumen:

Cuando se ejecuta una nueva instalación frigorífica previa a la puesta en servicio, es obligatorio realizar una comprobación de que la instalación es segura y estanca. Para ello el RD 552/2019, en la "Instrucción F-09 ensayos, pruebas y revisiones previas a la puesta en servicio", nos especifica los ensayos de la instalación. Los componentes deberán ser sometidos a una prueba de resistencia y las tuberías requieren un ensayo a presión neumática. Los valores adoptados para la prueba de resistencia y estanqueidad varían en función de las líneas a probar. En materia de seguridad y salud es necesario establecer las medidas preventivas necesarias para garantizar la seguridad de los trabajadores, tanto aquellos que intervienen en dichos trabajos como los adyacentes. Para ello se realiza el cálculo de las distancias de seguridad de las líneas a considerar durante las pruebas en la instalación en un centro logístico consistente en un sistema de enfriamiento de tipo indirecto cerrado que utiliza R-717 (NH_3) como refrigerante y una disolución acuosa de etilenglicol al 35% en volumen. Además, la instalación frigorífica contará con una central compresora, compuesta por compresores semiherméticos los cuales utilizan R-744 (CO_2) como refrigerante para abastecer a los servicios frigoríficos pertenecientes al régimen de congelados. Para ello se ha utilizado el criterio conforme la Norma ASME PCC-2-2018. Reparación de equipos a presión y tuberías. Apéndices 501-II. y 501-III.

Palabras clave: Ensayo a presión neumática, resistencia, estanqueidad, instalación frigorífica, líneas de tubería, distancias de seguridad.

1. INTRODUCCIÓN

El Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias, define una instalación frigorífica como un conjunto de los componentes de uno o varios sistemas de refrigeración y de todos los elementos necesarios para su funcionamiento (cuadro y cableado eléctrico, circuito de agua, etc.) Incluye los sistemas de refrigeración de cualquier dimensión, comprendidos los utilizados en acondicionamiento de aire y en bombas de calor, así como los sistemas secundarios de enfriamiento y los de calefacción generada por equipos frigoríficos (incluidas las bombas de calor) [1]. Por ello cuando se lleva a cabo la ejecución de una instalación frigorífica, hay que tener en cuenta que, cada componente de la misma como válvulas, compresores, condensadores, tubería, etc. llevan consigo el correspondiente certificado de producto por el que el fabricante garantiza que cumple con las especificaciones de fabricación y que por tanto es seguro mediante una serie de ensayos y protocolos de calidad que ha debido superar en fábrica.

De la misma manera, cuando el instalador ejecuta una nueva instalación frigorífica, previo a la puesta en servicio, es obligatorio realizar una comprobación de que la instalación es segura y estanca. Para ello el RD 552/2019, en la "*Instrucción F-09 ensayos, pruebas y revisiones previas a la puesta en servicio*", nos especifica los ensayos de la instalación. Los componentes deberán ser sometidos a una prueba de resistencia, y las tuberías requieren un ensayo a presión neumática, salvo excepciones especificadas [1]. Los valores adoptados para la prueba de resistencia y estanqueidad varían en función de las líneas a probar.

Las pruebas de presión puedes ser bien hidrostáticas o neumáticas. En materia de seguridad y salud, siempre es preferible realizar las pruebas hidrostáticas puesto que la energía almacenada por unidad de volumen de agua a presión de prueba es muy insignificante [2]. Las pruebas de presión neumáticas se utilizan para probar sistemas de tuberías cuando la presencia de humedad no es deseable o no se puede lograr convenientemente la eliminación del agua residual.

La energía almacenada de un gas comprimido es significativamente mayor y, por lo tanto, la ruptura de un sistema de tuberías durante una prueba neumática puede liberar grandes cantidades de energía potencial almacenada en energía cinética, lo que resulta en una rápida expansión (explosión) y lo hace muy inseguro. Cuando se produce una fuga, el intervalo de tiempo de ésta hasta llegar a producirse una grieta es muy pequeño, por lo que es inviable tomar las medidas necesarias para eliminarla. La sobrepresión de explosión es el aumento de la presión del aire provocado por una onda de choque provocada por una explosión. La sobrepresión puede causar lesiones al personal y daños a las instalaciones de la planta circundante [3]. También es necesario tener en cuenta la proyección de elementos de la instalación a consecuencia de dicha explosión.

Este tipo de instalaciones objeto de este artículo, debido a los componentes que la integran y el tipo de refrigerantes que se utilizan, requieren la realización de pruebas neumáticas. Por ello, en materia de seguridad y salud tal y como exige la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales [4], es necesario establecer las medidas preventivas necesarias para garantizar la seguridad de los trabajadores, tanto aquellos que intervienen en dichos trabajos como los adyacentes.

Dado que no existe normativa europea para el cálculo de la distancia de seguridad a la hora de realizar pruebas de presión neumáticas, hay que recurrir al criterio que indica la Norma ASME PCC-2-2018. Reparación de equipos a presión y tuberías. Apéndices 501-II. y 501-III [5].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Instalación frigorífica

Se ha ejecutado la instalación frigorífica para un centro logístico consistente en un sistema de enfriamiento de tipo indirecto cerrado que utiliza R-717 (NH_3) como refrigerante y una disolución acuosa de etilenglicol al 35% en volumen. Además, la instalación cuenta con una central compresora, compuesta por compresores semiherméticos los cuales utilizan R-744 (CO_2) como refrigerante para abastecer a los servicios frigoríficos pertenecientes al régimen de congelados.

Las líneas objeto de las pruebas de presión son:

Línea de NH_3.

- El sector de alta discurre sobre la cubierta (encima de la sala de máquinas).
- El sector de baja, en sala de máquinas.

Línea de CO_2.

- El sector de alta discurre sobre los techos de cámaras, conexión a evaporadores, en sala de máquinas

y cubierta.
- El sector de baja, en sala de máquinas, sobre techos de cámara y la conexión a evaporadores.

2.2. Pruebas de presión y estanqueidad.

Conforme el RD 552/2019 en la IF-09, las tuberías de interconexión de los sistemas frigoríficos serán sometidas a una prueba neumática a 1,1 por la presión máxima admisible y deberá mantenerse en el valor requerido durante al menos 30 minutos. Después deberá reducirse hasta la presión de prueba de estanqueidad. Es necesario tener en consideración que para este tipo de tuberías previamente se deberán llevar a cabo una serie de ensayos no destructivos conforme indica este real decreto. Para los sistemas de tuberías de los fluidos secundarios deberán ser sometidos a una prueba neumática con una presión de 1,3 veces la máxima de servicio, debiendo mantenerse estable durante 4 horas [1].

2.2. Procedimiento de ejecución de las pruebas a presión.

Materiales a emplear.
1 Compresor equipado con dispositivo deshidratador para obtener aire con una temperatura de rocío de –20ºC.
1 Juego de válvulas manorreductoras.
1 Juego de latiguillos de conexión.
1 Manómetro contrastado con el rango y la presión nominal adecuados.
1 Válvula de seguridad tarada a una presión superior a la presión de prueba.
El fluido a utilizar será aire.
Procedimiento de pruebas de presión neumática.
De forma resumida podemos describir el procedimiento de las pruebas del siguiente modo.
La elevación de la presión se llevará a cabo de la siguiente manera:
- Realizar una primera prueba a 1,5 bar, con el objeto de localizar y corregir fugas importantes.
- Subir la presión de la tubería gradualmente hasta un 50% del valor final de la prueba.
- A partir de éste punto la presión se irá incrementando en un 10%, hasta que se alcance el valor prescrito para la prueba.
- Se mantendrá la presión de ensayo durante 30 minutos mínimo

Durante la duración de la prueba, se vigilará que la presión no se incremente por encima de los valores indicados, debido a la variación de temperatura. En el caso de que esto suceda, se deberá aliviar dicha presión a través de la válvula correspondiente.
De requerirse realizar alguna reparación, esta se hará siempre sin presión, procediéndose posteriormente a repetir la prueba.

2.3. Metodología para el cálculo de las distancias de seguridad.

Para el cálculo de las distancias de seguridad se utilizará el criterio conforme la Norma ASME PCC-2-2018. *Repair of Pressure Equipment and Piping. Mandatory Appendix 501-II. Stored Energy Calculations for Pneumatic Pressure Test. Mandatory Appendix 501-III. Safe Distance Calculations for Pneumatic Presure Test* [5].
Siguiendo el apartado 501-II-1 General. Primeramente, hay que calcular la energía acumulada en la línea de tubería (E) y posteriormente convertirla a Kilogramos de TNT (2,4,6-trinitrotolueno) equivalentes, para ello utilizaremos las siguientes ecuaciones:

$$E = [1/(k-1)] \cdot P_{at} \cdot V\left[1 - (P_a/P_{at})^{[(k-1)/k]}\right] \text{ (J)} \quad (1)$$

$$TNT = \frac{E}{4.266.920} (kg) \quad (2)$$

Donde la energía acumulada (E) se calcula en función del calor específico del fluido utilizado (k) en este caso es aire (k=1,4); la presión atmosférica absoluta (P_a) (kPa); la presión de ensayo absoluta (P_{at})(kPa) y el volumen total bajo presión de la prueba (V) (m^3).
Tal y como indica el apartado 501-III-1 Distancia por onda expansiva, la distancia mínima entre todo el personal y el equipamiento que está siendo ensayado, debe de ser el mayor de los siguientes supuestos:
(a) Cuando:
  (1) R = 30m para E ≤ 135.500.000 J
  (2) R = 60m para 135.500.000 J < E ≤ 271.000.000 J

(b) Conforme la ecuación:

$$R = R_{scaled}(2TNT)^{1/3} \quad (3)$$

Donde R es la distancia actual desde los equipos a ensayar y R_{scaled} es el factor de escala de consecuencia. Éste factor debe de ser como mínimo de 20 m/kg$^{1/3}$, tal y como indica la tabla 501-III-1-1 Valores alternativos para R_{scaled} [5].
En los sistemas donde el valor de E > 271.000.000 J, hay que recurrir obligatoriamente a la ecuación descrita en el supuesto b).
Cuando exista el riesgo de que se puedan producir fragmentos y proyecciones que puedan impactar al personal, la distancia mínima entre todo el personal y el equipamiento que está siendo ensayado será la indicada en la tabla 501-III-2-1 Consideraciones de distancias mínimas para proyecciones de fragmentos [5].

2.4. Medidas preventivas para la realización de la prueba de carga.

Se indican algunas consideraciones a tener en cuenta previamente a la hora de realizar pruebas de presión neumáticas:

- Deberán localizarse medios, salidas y teléfonos de emergencia.
- Se informará por escrito de la operación al responsable de área y a todo el personal presente en las zonas de especial riesgo.
- Se delimitará la zona de seguridad colocando la señalización de advertencia y peligro y de restricción del acceso a la zona de especial riesgo con cinta de señalización.
- El perímetro de seguridad mínimo para el acceso de personas, será de definido conforme al resultado de los cálculos realizados.
- Comprobar que todos los elementos necesarios para realizar la prueba (manorreductores, mangueras, válvulas de carga, etc.), resisten adecuadamente las condiciones de presión y temperatura a las que van a ser sometidos.
- Desmontar las válvulas de seguridad del sector a probar, cuya presión de tarado sea inferior a la de prueba, sustituyendo estas por tapones o bridas ciegas. En el caso de que estas válvulas dispongan de un dispositivo de corte o válvula previo, bastará con cerrar este.
- Se ubicará una válvula de seguridad cerca del equipo generador de presión.
- El equipo de presión será manipulado permanentemente durante la prueba solo por personal autorizado.
- Utilizar los equipos de protección adecuados, como guantes, gafas de protección contra partículas sólidas, etc.

Figura 1. Cartel de señalización de advertencia de peligro y de restricción del acceso.

3. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

A continuación, se muestran las tablas resumen de las distintas líneas de tubería ensayadas con los resultados obtenidos.

Tabla 1. Resultados cálculo de la distancia de seguridad de la línea de NH_3.

Línea de NH_3								
Diám. de la tubería	Espesor tubería	Longitud	Presión de la prueba	valor energía almacenada, E	E almacenada equivalente en kg de TNT	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-1(a) [5]	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-1(b) [5]	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-2-1 [5]
Línea de alta presión								
DN 150	7,11mm	12 m	23,1 bar	804.546 J	0,19 kg	30 m	14,49 m	50 m
DN 15	2,77mm	12 m	23,1 bar	8.268 J	0,00 kg	30 m	00,00 m	50 m
Línea de baja presión								
DN 250	9,27mm	12 m	17,6 bar	1.605.412 J	0,38 kg	30 m	18,25 m	N/A
DN 15	2,77mm	12 m	17,6 bar	6.050 J	0,00 kg	30 m	00,00 m	N/A

Tabla 2. Resultados cálculo de la distancia de seguridad de la línea CO_2.

Línea de CO_2								
Diám. de la tubería	Espesor tubería	Longitud	Presión de la prueba	valor energía almacenada	E almacenada equivalente en kg de TNT	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-1(a) [5]	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-1(b) [5]	Distancia mínima segura ASME PCC-2-2018 sección 501-III-2-1 [5]
Línea de alta presión								
DN 15	2,11 mm	90 m	49,5 bar	175.159 J	0,04 kg	30 m	8,62 m	50 m
DN 20	2,11 mm	90 m	49,5 bar	303.552 J	0,07 kg	30 m	10,38 m	50 m
DN 25	2,77 mm	90 m	49,5 bar	466.806 J	0,11 kg	30 m	12,07 m	50 m
DN 40	2,77 mm	90 m	49,5 bar	1.098.568 J	0,26 kg	30 m	16,08 m	50 m
Línea de baja presión								
DN 15	2,11 mm	90 m	33 bar	111.088 J	0,03 kg	30 m	7,83 m	N/A
DN 20	2,11 mm	90 m	33 bar	1.925.17 J	0,05 kg	30 m	9,28 m	N/A
DN 25	2,77 mm	90 m	33 bar	296.055 J	0,07 kg	30 m	10,38 m	N/A
DN 40	2,77 mm	90 m	33 bar	696.727 J	0,16 kg	30 m	13,68 m	N/A
DN 50	2,77 mm	90 m	33 bar	1.143.236 J	0,27 kg	30 m	16,29 m	N/A

En la instalación frigorífica objeto de este estudio, la energía almacenada y por tanto la energía equivalente en kg de TNT no es muy elevada. Teniendo en cuenta los valores obtenidos en esta instalación con los dos sistemas, vemos que la instalación con mayor energía almacenada (E) se corresponde con línea de baja presión de NH_3 consistente en la tubería de DN 250, con espesor de 9,27 mm y sometida a una presión de prueba de 17,6 bar, con un valor de 1.605.412 J y su E almacenada equivalente en kg de TNT es de 0,38 kg (tabla 1). Analizando dicho resultado conforme el apartado 501-III-1 [5], 1.605.412 J < 135.500.000 J, por lo que el radio de la distancia de seguridad (R) es de 30m.

Otro factor importante a la hora de considerar la distancia de seguridad es el lugar por donde discurren las líneas de ambos sistemas. Tal y como se especifica en el apartado 2.1. Instalación frigorífica de este artículo, el sector de alta para ambos sistemas tiene común que discurre por la zona de la cubierta. Este lugar se caracteriza por ser diáfano sin tener estructuras que puedan limitar el confinamiento de proyección de partículas en caso de producirse una explosión debida a un fallo de la instalación durante las pruebas a presión. En cuanto a las líneas de baja presión para ambos sistemas, se caracteriza porque en general discurre por el interior de la nave (sala de máquinas, sobre techos de cámara y la conexión a evaporadores). Por lo que se puede considerar que el riesgo de proyección de partículas en caso de explosión accidental, queda confinado por la propia estructura de la edificación.

Es por ello, que para el cálculo de la distancia de seguridad (R), hay que tener en consideración la tabla 501-III-2-1 Consideraciones de distancias mínimas para proyecciones de fragmentos de la Norma ASME PCC-2-2018 [5]. Tal y como podemos observar en las tablas 1 y 2. La información que nos indica la tabla 501-III-2-1, refiere que para unos valores de E almacenada equivalente en kg de TNT de 0 a 3, la distancia mínima de seguridad será de 50 m [5].

De esta manera, podemos observar que se ha tenido en consideración los valores de R de la tabla 501-III-2-1 [5] solamente para las líneas de alta presión de ambos sistemas de refrigeración, al discurrir éstas por la cubierta.
En cuanto al análisis de las líneas de alta presión, la energía almacenada y por tanto la energía equivalente en kg de TNT tampoco es muy elevada para ambos sistemas de la instalación frigorífica. La línea que contiene mayor E, se corresponde con la de CO_2 consistente en la tubería de DN 40, con espesor de 2,77 mm y sometida a una presión de prueba de 49,5 bar, con un valor E de 1.098.568 J y su E almacenada equivalente en kg de TNT de 0,26 kg (tabla 2). Analizando dicho resultado conforme el apartado 501-III-1 [5], 1.098.568 J < 135.500.000 J, y teniendo en cuenta el criterio conforme a la tabla 501-III-2-1 [5] donde E almacenada equivalente en kg de TNT $0 \leq 0{,}23 \leq 3$, se tomará la distancia de seguridad más restrictiva entre los resultados de R de ambos criterios sección 501-III-1(a) [5] donde R de 30 m y sección 501-III-2-1 [5] y R es de 50 m. Por lo que la distancia de seguridad en las líneas de alta presión para ambos sistemas es de 50 m.
Considerando el apartado 501-III-1 Distancia por onda expansiva, la distancia mínima entre todo el personal y el equipamiento que está siendo ensayado [5], observamos que todos los valores de E resultantes de todas las líneas a ensayar (NH_3 y de CO_2) que componen la instalación frigorífica, cumplen con el supuesto a) donde, $E \leq 135.500.000$ J.
La presión de prueba de las líneas de NH_3 es más baja que la presión de prueba en las líneas de CO_2.
El valor de E se mantiene en rangos bajos en ambos tipos de líneas ya que en las líneas de NH_3 se combinan bajas presiones con altos diámetros, y en las líneas de CO_2 tenemos diámetros muy pequeños sometidos a una mayor presión de prueba.

4. CONCLUSIONES

Las pruebas de presión neumáticas suponen un riesgo mucho más elevado que las pruebas hidrostáticas debido a la energía que se acumula en el interior de la instalación.
La distancia mínima de seguridad según las consideraciones de onda expansiva conforme a la ASME PCC-2-2018 es el valor mayor entre los supuestos del apartado 501-III-1 (a)/(b) [5] siendo esta distancia de 30m en las líneas de baja presión.
En cuanto a las líneas de alta presión, debido al riesgo de proyección de fragmentos dado que discurren por la cubierta de la nave, se tomará una distancia de seguridad de 50m según indica la tabla 501-III-2-1 [5].
Se considerará la distancia indicada en la tabla 501-III-2-1 [5] en las líneas en las que exista el riesgo de que se creen fragmentos de tubería y componentes y que impacten en el personal. Dichas líneas se caracterizan porque transcurren por zonas abiertas donde no es posible su confinamiento. Son aquellas que discurren por la cubierta de la nave, y corresponden con las líneas de alta presión.
En cuanto a las líneas de baja presión, no se contempla la consideración de la tabla 501-III-2-1 [5], debido a que al transcurrir por el interior de la nave la posibilidad de impacto de fragmentos queda confinada.
Es importante respetar las medidas preventivas de las pruebas en general, y en particular las correspondientes con las distancias de seguridad, debido a que en caso de rotura las consecuencias pueden ser incluso mortales.

REFERENCIAS

[1] España. Real Decreto 552/2019, de 27 de septiembre, por el que se aprueban el Reglamento de seguridad para instalaciones frigoríficas y sus instrucciones técnicas complementarias. BOE núm. 256, de 24/10/2019.
[2] Creus Solé, A. *Neumatica e hidráulica*. Marcombo Ediciones Técnicas, 2ª ed., 2011.
[3] Galán Fontela, S (2012). *Explosión de equipos a presión. Análisis de riesgos y consecuencias.* De Merlo Rodríguez, G. Tesis. Universidad politécnica de Cataluña.
[4] España. Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales. BOE núm. 269, de 10/11/1995.
[5] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (2018). *Repair of Pressure Equipment and Piping*. ASME PCC-2-2018. Two Park Avenue New York, NY 10016 USA.