

Informe de investigación

Publicado: Septiembre 2025

PROBLEMAS DE SEGURIDAD:

- Alivio atmosférico bifásico
- Descarga en ubicación segura
- Preparación para emergencias





Consejo de Investigación de Seguridad Química y Peligros de los Estados Unidos

La misión del Consejo de Investigación de Seguridad Química y Peligros de los Estados Unidos (CSB, por sus siglas en inglés) es impulsar la excelencia en la seguridad química mediante investigaciones independientes para proteger a las comunidades, a los trabajadores y al medio ambiente.

El CSB es una agencia federal independiente encargada de investigar, determinar y comunicar al público por escrito los hechos, las condiciones, las circunstancias y la causa o causa probable de cualquier liberación química accidental que resulte en una muerte, una lesión grave o daños materiales significativos.

El CSB emite recomendaciones de seguridad basadas en datos y análisis derivados de investigaciones y estudios de seguridad. Asimismo, el CSB promueve la adopción de estos cambios para prevenir la ocurrencia o minimizar las consecuencias de liberaciones químicas accidentales.

Se puede acceder a más información sobre el CSB y sus productos en www.csb.gov o comunicándose con:

U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board

470 L'Enfant Plaza SW, Suite 604 #23278

Washington, DC 20026

(202) 261-7600

El CSB fue creado por las Enmiendas de la Ley de Aire Limpio de 1990, y recibió su primer financiamiento e inició operaciones en 1998. El CSB no es un organismo de cumplimiento ni regulador. Ninguna parte de las conclusiones, hallazgos o recomendaciones del Consejo relacionadas con una liberación accidental o con su investigación podrá ser admitida como prueba ni utilizada en ninguna acción o demanda por daños derivados de cualquier asunto mencionado en dicho informe. 42 U.S.C. § 7412(r)(6)(G).

CONTENTS

ABREVIATURAS	5
Resumen Ejecutivo	7
1 ANTECEDENTES	12
1.1 <i>CUISINE SOLUTIONS</i>	12
1.2 <i>ORGANIZACIÓN DE LA PLANTA DE STERLING</i>	14
1.3 <i>PROPIEDADES DEL AMONÍACO</i>	15
1.4 <i>DESCRIPCIÓN DEL PROCESO</i>	15
1.4.1 <i>SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR AMONÍACO EN CUISINE SOLUTIONS</i>	15
1.4.2 <i>INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TANK FARM 5</i>	17
1.4.3 <i>VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DE EMERGENCIA</i>	19
1.5 <i>REGULACIONES FEDERALES DE SEGURIDAD</i>	22
1.5.1 <i>NORMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PROCESOS DE OSHA</i>	22
1.5.2 <i>NORMA DEL PROGRAMA DE GESTIÓN DE RIESGOS DE LA EPA</i>	23
1.6 <i>INSTITUTO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN CON REFRIGERANTES NATURALES</i>	24
1.7 <i>DESCRIPCIÓN DEL ÁREA CIRCUNDANTE</i>	25
2 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE	27
2.1 <i>PERTURBACIÓN DEL PROCESO DE AGUA ENFRIADA</i>	27
2.2 <i>LIBERACIÓN DE AMONÍACO</i>	27
2.3 <i>EVACUACIÓN</i>	30
2.4 <i>RESPUESTA DE EMERGENCIA</i>	33
2.5 <i>CONSECUENCIAS DEL INCIDENTE</i>	36
3 ANÁLISIS TÉCNICO	37
3.1 <i>SE ABRIÓ UNA VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN DE EMERGENCIA</i>	37
3.2 <i>ESCENARIOS POTENCIALES DE SOBREPRESIÓN</i>	39
3.3 <i>NUBE DE AMONÍACO</i>	42
3.3.1 <i>CONCENTRACIONES DE AMONÍACO</i>	42
3.3.2 <i>CONDICIONES METEOROLÓGICAS</i>	43
3.3.3 <i>NUBE VISIBLE</i>	44
3.3.4 <i>AEROSOL LÍQUIDO EN LA LIBERACIÓN</i>	44
3.3.5 <i>CANTIDAD DE LIBERACIÓN</i>	48
3.3.6 <i>EFFECTOS DE ESTELA DEL EDIFICIO</i>	49
3.4 <i>ESCENARIOS POTENCIALES DE LÍQUIDO EN LA DESCARGA DE ALIVIO</i>	52

3.5	IMPACTO DE LA TUBERÍA DE DESCARGA DEL ALIVIO	54
4	ASUNTOS DE SEGURIDAD	59
4.1	ALIVIO ATMOSFÉRICO BIFÁSICO	59
4.2	DESCARGA HACIA UN LUGAR SEGURO.....	62
4.2.1	MITIGACIÓN DE UNA LIBERACIÓN DE LÍQUIDO O AEROSOL	63
4.2.2	ORIENTACIÓN DE ANSI/IIAR 2 SOBRE TUBERÍA DE DESCARGA	67
4.2.3	TUBERÍA DE DESCARGA DE CUISINE SOLUTIONS	70
4.3	PREPARACIÓN PARA EMERGENCIAS	73
4.3.1	PLAN DE ACCIÓN DE EMERGENCIA	73
4.3.2	SIMULACROS DE EMERGENCIA	80
4.3.3	SENSORES Y ALARMAS DE AMONÍACO.....	82
4.3.4	PARO DE EMERGENCIA	84
5	CONCLUSIONES	89
5.1	HALLAZGOS.....	89
5.2	CAUSA.....	92
6	RECOMENDACIONES	93
6.1	INSTITUTO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN TOTALMENTE NATURAL (IIAR).....	93
6.2	CUISINE SOLUTIONS, INC., SITIO DE STERLING.....	93
7	LECCIONES CLAVE PARA LA INDUSTRIA.....	96
8	REFERENCIAS.....	98

ABREVIATURAS

Abreviatura	Término en inglés	Traducción al español
AHJ	Authority Having Jurisdiction	Autoridad Competente
ANSI	American National Standards Institute	Instituto Nacional Estadounidense de Normalización
API	American Petroleum Institute	Instituto Americano del Petróleo
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado
ASME	American Society of Mechanical Engineers	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Mecánicos
ASTI	Ammonia Safety & Training Institute	Instituto de Seguridad y Capacitación en Amoníaco
CCPS	Center for Chemical Process Safety	Centro para la Seguridad de los Procesos Químicos
CFR	Code of Federal Regulations	Código de Reglamentos Federales
CSB	U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board	Consejo de Investigación de Riesgos y Seguridad Química de los Estados Unidos
EAP	Emergency Action Plan	Plan de Acción de Emergencia
EPA	Environmental Protection Agency	Agencia de Protección Ambiental
EPCS	Emergency Pressure Control System	Sistema de Control de Presión de Emergencia
ERPG	Emergency Response Planning Guideline	Guía de Planificación de Respuesta a Emergencias
HAZMAT	Hazardous Materials	Materiales Peligrosos
HMI	Human Machine Interface	Interfaz Hombre-Máquina
HPR	High-Pressure Receiver	Receptor de Alta Presión
HTA	High-Temperature Accumulator	Acumulador de Alta Temperatura
HVAC	Heating, Ventilation, and Air Conditioning	Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado
IAD	Washington Dulles International Airport	Aeropuerto Internacional Washington Dulles
ICC	International Code Council	Consejo Internacional de Códigos
IDLH	Immediately Dangerous to Life or Health	Inmediatamente Peligroso para la Vida o la Salud
IIAR	International Institute of All-Natural Refrigeration	Instituto Internacional de Refrigeración con Refrigerantes Naturales
IMC	International Mechanical Code	Código Mecánico Internacional
IRC	Industrial Refrigeration Consortium	Consortio de Refrigeración Industrial
MAWP	Maximum Allowable Working Pressure	Presión Máxima de Trabajo Permitida
NFPA	National Fire Protection Association	Asociación Nacional de Protección contra Incendios

Abreviatura	Término en inglés	Traducción al español
NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health	Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	Administración de Seguridad y Salud Ocupacional
PHAST	Process Hazards Analysis Software Tool	Herramienta de Software para el Análisis de Riesgos de Procesos
PPE	Personal Protective Equipment	Equipo de Protección Personal
ppm	Parts per Million	Partes por Millón
PPMV	Parts per Million by Volume	Partes por Millón en Volumen
PRD	Pressure Relief Device	Dispositivo de Alivio de Presión
PRV	Pressure Relief Valve	Válvula de Alivio de Presión
psig	Pounds per Square Inch gauge	Libras por Pulgada Cuadrada (manométricas)
PSM	Process Safety Management	Gestión de la Seguridad de los Procesos
RAGAGEP	Recognized and Generally Accepted Good Engineering Practice	Prácticas de Ingeniería Reconocidas y Generalmente Aceptadas
RMP	Risk Management Program	Programa de Gestión de Riesgos
SDS	Safety Data Sheet	Hoja de Datos de Seguridad
UMC	Uniform Mechanical Code	Código Mecánico Uniforme

RESUMEN EJECUTIVO

El 31 de julio de 2024, aproximadamente a las 8:20 p. m., se produjo una liberación accidental de amoníaco anhidro, una sustancia tóxica, en la instalación de procesamiento de alimentos de Cuisine Solutions, Inc. (“Cuisine Solutions”) en Sterling, Virginia, cuando una válvula de alivio de presión de emergencia (VAPE) realizó una descarga a la atmósfera. El amoníaco liberado formó una nube tóxica. Mientras el personal evacuaba la instalación, muchas personas inhalaban vapor de amoníaco y resultaron lesionadas, cuatro de ellas de gravedad.

La planta de Cuisine Solutions en Sterling produce productos alimenticios cocidos y envasados para hoteles, aerolíneas y restaurantes, así como para otras industrias y consumidores [1, 2]. Las instalaciones de procesamiento y almacenamiento de alimentos de la planta requieren un proceso de refrigeración a escala industrial que utiliza amoníaco como refrigerante. El proceso de refrigeración enfría el agua para las líneas de producción de alimentos y mantiene las temperaturas de refrigeradores y congeladores para el almacenamiento.

En algún momento durante la noche del 31 de julio de 2024, se inició una perturbación del proceso de refrigeración probablemente en uno de los procesos de intercambio de calor, lo que finalmente provocó una sobrepresión^a en un recipiente denominado Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 aproximadamente a las 8:20 p. m. Como resultado, la VAPE del recipiente se abrió y realizó una descarga de amoníaco a la atmósfera. Debido a que el amoníaco descargado contenía un alto contenido de líquido, parte del amoníaco descendió rápidamente hasta el nivel del suelo. Poco después, el gerente de producción ordenó la evacuación del sitio. Sin embargo, durante todo el incidente no se activó ninguna de las alarmas del sistema de detección de amoníaco instalado en las áreas de producción de la planta, ni se activó ninguna alarma de evacuación general del sitio. Además, durante el incidente nadie utilizó los botones de paro de emergencia que podrían haber limitado la liberación de amoníaco.

Durante la evacuación, algunos miembros del personal inhalaban vapor de amoníaco y resultaron lesionados. Cuando los servicios de emergencia llegaron al lugar, encontraron a más de diez personas inconscientes. Treinta y tres trabajadores fueron trasladados a hospitales del área para recibir tratamiento. Cuatro de ellos fueron hospitalizados, incluido uno que fue ingresado en una unidad de cuidados intensivos.

En el momento del incidente, la planta de Cuisine Solutions en Sterling empleaba aproximadamente a 716 empleados y contratistas, y 286 se encontraban en el sitio. El CSB estima que la liberación fue de aproximadamente 275 libras de amoníaco anhidro^b. Cuisine Solutions estimó los daños a la propiedad, incluida la pérdida de uso, en aproximadamente 3 millones de dólares. Una de las líneas de producción de alimentos estuvo detenida durante aproximadamente 16 días, y otra línea de producción estuvo detenida durante aproximadamente 38 días.

^a Una sobrepresión es una condición en la que se supera la presión máxima permisible dentro de un recipiente [34, p. 14].

^b Esta liberación representa aproximadamente el 1,3 por ciento en peso del inventario total de amoníaco anhidro de la planta de Sterling. La Cantidad Reportable de amoníaco anhidro es de 100 libras, tanto ante la Agencia de Protección Ambiental (EPA) como ante la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA).

PROBLEMAS DE SEGURIDAD

La investigación del CSB identificó los siguientes problemas de seguridad.

- **Descarga atmosférica bifásica.** El sistema de refrigeración por amoníaco de la planta de Cuisine Solutions en Sterling contaba con sistemas de alivio de presión de emergencia que descargaban amoníaco a la atmósfera. La descarga atmosférica probablemente dio lugar a concentraciones de amoníaco Inmediatamente Peligrosas para la Vida o la Salud (IPVS) a nivel del suelo, con base en escenarios de alivio modelados por el CSB que involucraban aerosoles líquidos o flujo bifásico (líquido y vapor) en la descarga atmosférica. En situaciones modeladas de alivio por sobrepresión que involucraban aerosoles líquidos o flujo bifásico en la descarga del colector de alivio común, el resultado fueron concentraciones de amoníaco a nivel del suelo consideradas IPVS (**Sección 4.1**).
- **Descarga en una ubicación segura.** Un principio fundamental de diseño para un sistema de alivio de presión de emergencia es garantizar que el sistema descargue en una ubicación segura y que ninguna persona resulte lesionada. Durante este incidente, la descarga atmosférica se ventiló junto al estacionamiento de empleados y el edificio, lo que restringió la capacidad de evacuar de manera segura, causó daños a personas y afectó a un receptor público cercano, el Servicio de Inspección Postal ubicado al otro lado de la vía frente al sitio de Sterling (**Sección 4.2**).
- **Preparación para emergencias.** La noche del incidente, el personal presente en el sitio ejecutó en términos generales el Plan de Acción de Emergencia (PAE) conforme a lo establecido por escrito. Sin embargo, el CSB identificó varias deficiencias en el PAE y en la preparación general para emergencias del sitio, entre ellas: no considerar la dirección del viento; no diferenciar entre liberaciones de amoníaco en interiores y en exteriores; no contar con procedimientos escritos de paro de emergencia que los empleados pudieran seguir antes o durante la evacuación; simulacros ineficaces para liberaciones de amoníaco; falta de comunicación efectiva durante una liberación, incluida la ausencia de una alarma de evacuación durante el incidente; y planificación y capacitación inadecuadas en el uso de la función de paro de emergencia del sistema de refrigeración. Estas deficiencias dieron lugar a una evacuación tardía y desorganizada, lo que probablemente incrementó el riesgo de inhalación de amoníaco por parte del personal de la planta (**Sección 4.3**).

CAUSA

El CSB determinó que la causa del incidente fue una sobrepresión en un recipiente que liberó una nube tóxica de amoníaco a través de una VAPE que se abrió cerca del estacionamiento de empleados. La nube de amoníaco contenía un componente significativo de líquido, lo que provocó que gran parte de esta descendiera rápidamente hasta el nivel del suelo, exponiendo a los trabajadores durante la evacuación.

Contribuyó al incidente la falta de descarga de esta VAPE hacia una ubicación segura y la ausencia de controles de ingeniería o administrativos, como un paro automatizado de emergencia del sistema de refrigeración, que podrían haber minimizado la presencia de líquido o aerosol en la liberación de amoníaco.

La insuficiente preparación para emergencias de la planta de Cuisine Solutions en Sterling, incluido un PAE que no garantizaba que los trabajadores pudieran evacuar de manera segura en caso de una liberación de amoníaco en exteriores, la falta de simulacros efectivos y la ausencia de un paro de emergencia eficaz, contribuyeron a la gravedad del incidente.

RECOMENDACIONES

Al Instituto Internacional de Refrigeración con Refrigerantes Naturales (IIAR)

2024-03-I-VA-R1

Actualizar ANSI/IIAR 2^a para incluir directrices destinadas a prevenir o mitigar descargas atmosféricas líquidas o bifásicas provenientes de sistemas de alivio de presión de emergencia, como las orientaciones contenidas en la norma API 521, *Pressure-relieving and Depressuring Systems*. Como mínimo, las directrices deberán:

- a. Identificar escenarios de riesgo, como recipientes horizontales de acumulación y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor;
- b. Abordar consideraciones y controles de diseño para reducir la probabilidad de que los escenarios identificados conduzcan a sobrepresión o falla de equipos, y garantizar la separación vapor-líquido (es decir, la separación del vapor y el líquido) durante el alivio de presión en los escenarios identificados; y
- c. Exigir salvaguardas de mitigación en los casos en que la separación vapor-líquido durante el alivio de presión no pueda garantizarse de manera confiable. Esto también deberá incluir sistemas alternativos de disposición cuando corresponda.

2024-03-I-VA-R2

Actualizar ANSI/IIAR 2 para incluir el requisito de evaluar si los dispositivos de alivio de presión de emergencia descargan en una ubicación segura, por ejemplo, mediante un análisis de dispersión.

A Cuisine Solutions, Inc., Sitio Sterling

^a El IIAR ha emitido una serie de normas y directrices, algunas de las cuales han sido adoptadas por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI), entre ellas ANSI/IIAR 2 [13, p. v].

2024-03-I-VA-R3

Reducir la probabilidad o mitigar las consecuencias de descargas atmosféricas líquidas o bifásicas provenientes del sistema de alivio de presión de emergencia del sistema de refrigeración por amoníaco en la planta de Sterling. Como mínimo:

- a. Identificar escenarios de liberación líquida o bifásica, en particular para tambores acumuladores de sobrepresión horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor;
- b. Implementar controles de ingeniería para reducir la probabilidad de escenarios de alto nivel de líquido, sobrellenado o sobrepresión por ebullición; y
- c. Implementar controles de ingeniería para mitigar las consecuencias de estos escenarios cuando su probabilidad no pueda reducirse de manera aceptable, por ejemplo, mediante sistemas de control de presión de emergencia, tambores separadores atmosféricos (*knockout drums*) o sistemas de paro automático.
- d. Contratar a un tercero competente para auditar los sistemas de alivio de presión. La auditoría deberá garantizar que (i) se hayan identificado todos los escenarios de alivio relevantes, (ii) los controles de ingeniería preventivos y de mitigación aborden adecuadamente los peligros, y (iii) los controles de ingeniería se mantengan de tal manera que funcionen correctamente cuando se requieran.

2024-03-I-VA-R4

Implementar un sistema electrónico de historial y gestión de datos del proceso para asegurar que los parámetros críticos del proceso se recopilen, supervisen y almacenen. El sistema deberá estar disponible para los técnicos de refrigeración, a fin de que puedan monitorear el sistema de refrigeración y responder e investigar perturbaciones del proceso.

2024-03-I-VA-R5

Actualizar el PAE del sitio de Cuisine Solutions en Sterling utilizando orientaciones como la *Critical Task Guidance for Ammonia Refrigeration System Emergency Planning* (Guía de medidas críticas para la planificación de emergencias en sistemas de refrigeración por amoníaco) del IIAR. Como mínimo, el plan actualizado deberá:

- a. Abordar por separado las liberaciones de amoníaco en interiores y exteriores, incluidas las alarmas y respuestas diferenciadas;
- b. Especificar claramente las rutas de evacuación y los puntos de reunión, incluidos los alternativos;

- c. Proporcionar orientación sobre el uso de mangas de viento^a para mantenerse a barlovento de una liberación durante la evacuación;
- d. Implementar estrategias de **refugio en el lugar**, equipos de protección de emergencia y paros de emergencia, según corresponda; y
- e. Incluir requisitos para realizar simulacros anuales de liberación de amoníaco que incluyan a todo el personal presente en el sitio (incluidos empleados corporativos). Los simulacros anuales deberán incluir escenarios separados de liberación en interiores y exteriores, y abordar el uso de mangas de viento para determinar rutas de evacuación, rutas alternas, puntos de reunión y la consideración de la decisión de aplicar refugio en el lugar. Asimismo, los simulacros deberán poner a prueba cada alarma de evacuación, los equipos de protección de emergencia y los paros de emergencia, cuando corresponda.

2024-03-I-VA-R6

Incorporar una o más alarmas específicas para liberaciones de amoníaco, de modo que los trabajadores puedan responder adecuadamente ante una liberación. La respuesta a la alarma deberá documentarse en el PAE actualizado y podrá incluir múltiples alarmas y respuestas diferenciadas, como una para refugio en el lugar y otra para evacuación.

^a Una manga de viento es “un tubo de tela fijado en un extremo a un poste que indica la dirección del viento...” [53].

1 ANTECEDENTES

1.1 CUISINE SOLUTIONS

Cuisine Solutions, Inc. (“Cuisine Solutions”) es una corporación privada estadounidense con sede en Sterling, Virginia. Además de su planta en Sterling, Virginia, donde ocurrió el incidente, la empresa también cuenta con plantas en San Antonio, Texas, y Alexandria, Virginia. La sede corporativa de Cuisine Solutions también se encuentra dentro del mismo sitio de Sterling, Virginia [3] (el “sitio de Sterling”) ^a, tal como se muestra en la **Figura 1**. Las oficinas corporativas incluyen una cocina de pruebas y una escuela de cocina, lo que incrementó el número de personal presente en el sitio, de manera independiente a la población de la planta.

La planta de Cuisine Solutions en Sterling (la “planta de Sterling”) ^b produce productos alimenticios cocidos y envasados para hoteles, aerolíneas y restaurantes, así como para otras industrias y consumidores [1, 2]. El método de cocción utilizado en la planta de Sterling se denomina sous vide, término francés que significa “al vacío” [1]. Durante este proceso industrial de cocción a gran escala, las porciones de alimentos se colocan en bolsas selladas al vacío y se cocinan lentamente en un baño de agua a baja temperatura [1].

Cuisine Solutions inició operaciones en la planta de Sterling, Virginia, en 2013 y amplió significativamente sus líneas de producción en 2017. Esta expansión también requirió un aumento en la capacidad de refrigeración. En 2013, el inventario de amoníaco de la planta era de aproximadamente 13.000 libras. En 2017, dicho inventario aumentó a casi 21.000 libras, cantidad que se mantenía al momento del incidente. La liberación de amoníaco anhidro del 31 de julio de 2024 ocurrió en un área conocida como Tank Farm 5, la cual fue incorporada en 2017. El marcador naranja en la Figura 1 muestra la ubicación aproximada de la liberación ocurrida en julio de 2024.

^a A lo largo de este informe, el “**sitio de Sterling**”, o simplemente “**el sitio**”, se refiere al conjunto de la ubicación, que incluye la planta y las oficinas corporativas, entre otros elementos.

^b A lo largo de este informe, la “**planta de Sterling**” se refiere específicamente a la planta de manufactura.

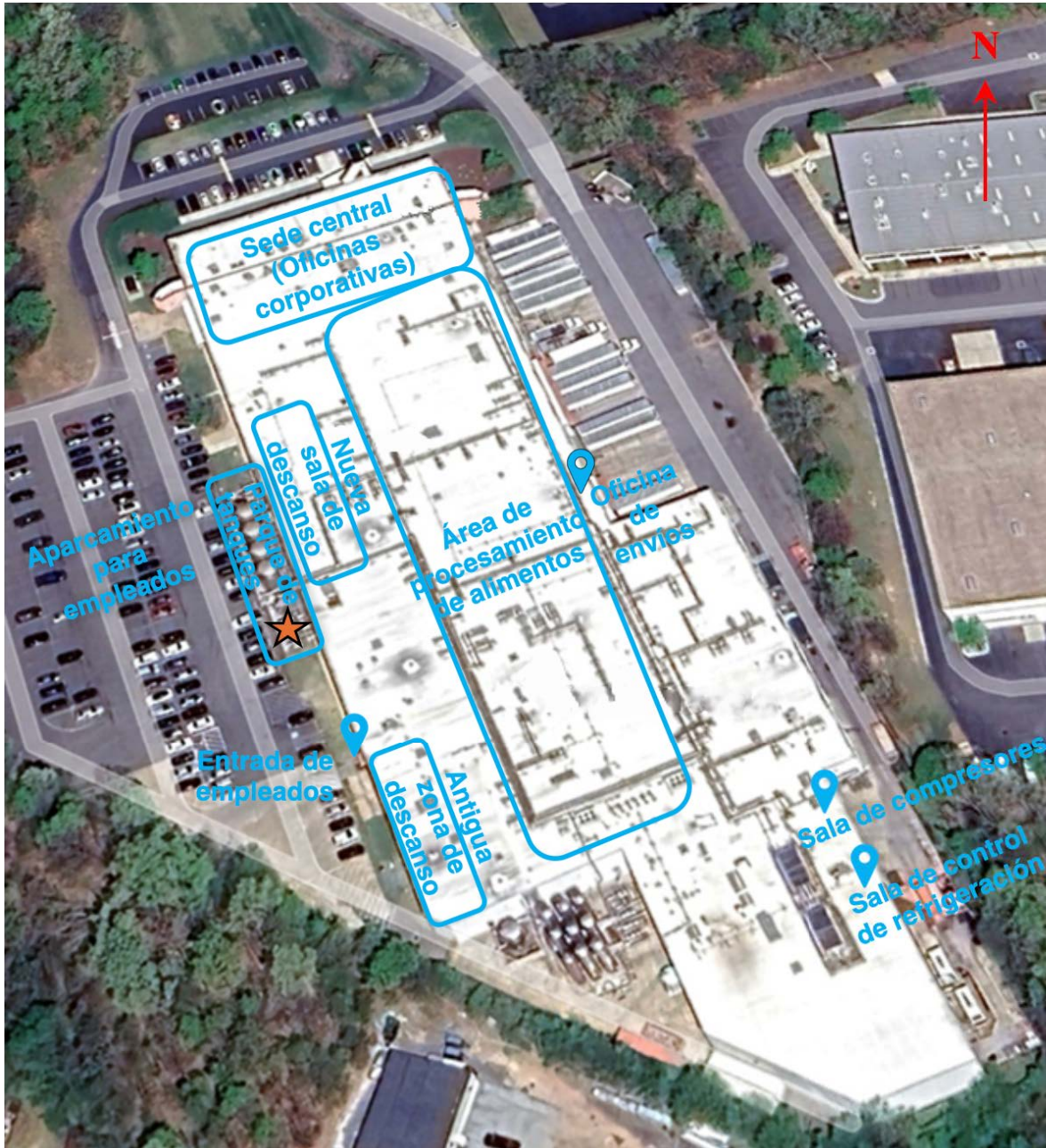


Figura 1: Una vista aérea del emplazamiento de Sterling muestra la ubicación de la liberación (marcador naranja). (Crédito: Google Earth, con anotaciones de la CSB)

La planta de Sterling cuenta con instalaciones de procesamiento y almacenamiento de alimentos que requieren refrigeración industrial, la cual utiliza amoníaco como refrigerante. El proceso de refrigeración enfría el agua para las líneas de producción *sous vide* y mantiene las temperaturas de refrigeradores y congeladores para el almacenamiento de alimentos. La mayor parte del equipo de refrigeración y la mayor parte del almacenamiento de amoníaco se encontraban en la sala de compresores (**Figura 1**). Junto a la sala de compresores, la sala de control de refrigeración albergaba una Interfaz Hombre-Máquina (IHM) mediante la cual el personal de refrigeración podía supervisar y realizar ajustes al proceso de refrigeración y responder a las alarmas del sistema de refrigeración.

En el momento del incidente, la planta de Sterling empleaba aproximadamente a 716 trabajadores en total. Los empleados de la planta trabajaban en uno de tres turnos de 8 horas. Al momento del incidente, 286 trabajadores se encontraban en la planta, laborando en el segundo turno.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA PLANTA DE STERLING

La **Figura 2** muestra parte del organigrama de la planta de Sterling, el cual incluye al personal de producción, mantenimiento y refrigeración del segundo turno.

Durante el segundo turno, el grupo de mantenimiento brindaba principalmente apoyo al grupo de producción en el Área de Procesamiento de Alimentos (**Figura 1**), mientras que el técnico de refrigeración era responsable del sistema de refrigeración, incluidos los Tank Farms, la sala de compresores y la sala de control de refrigeración (**Figura 1**). No obstante, era una práctica habitual que el grupo de mantenimiento colaborara con el técnico de refrigeración cuando fuera necesario. Un técnico de mantenimiento del segundo turno, con cierta capacitación en refrigeración, fungía como respaldo del técnico de refrigeración cuando se requería, por ejemplo, durante los descansos para comer.

El técnico de refrigeración reportaba al gerente de refrigeración. El gerente de refrigeración generalmente trabajaba en horarios que se superponían con los turnos primero y segundo.

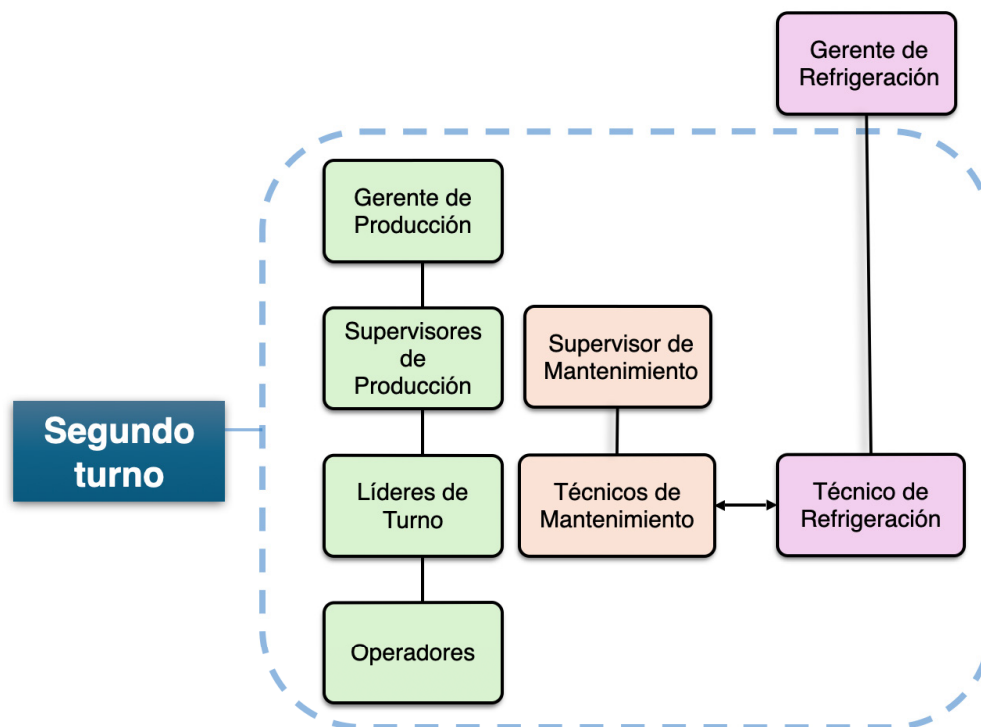


Figura 2: El organigrama parcial de la planta de Sterling describe los grupos de producción (en verde), mantenimiento (en naranja) y refrigeración (en morado) del segundo turno de la planta (en el recuadro). (Crédito: CSB)

1.3 PROPIEDADES DEL AMONÍACO

El amoníaco anhidro, que es amoníaco sin agua, es esencialmente puro (> 99 por ciento en peso) NH_3 [4]. Es tóxico cuando se inhala, con una concentración Inmediatamente Peligrosa para la Vida o la Salud (IPVS) de 300 partes por millón (ppm) o superior [5, 6, pp. 4, 5]. La exposición al amoníaco por debajo de 300 ppm puede causar dolores de cabeza, náuseas, vómitos, tos, sibilancias e irritación de la nariz, la boca y la garganta [7, p. 1.2]. El umbral de olor del amoníaco anhidro es de 5 a 50 ppm [4].

Las propiedades naturales de refrigeración del amoníaco lo hacen altamente adecuado para aplicaciones de refrigeración. Hierve a -28 grados Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) a presión atmosférica y se almacena en recipientes presurizados para evitar una evaporación rápida [4]. Cuando la presión se reduce, el amoníaco líquido se evapora mientras absorbe calor de los alrededores más cálidos, como el aire o el agua. Esta absorción de calor reduce la temperatura del entorno circundante, lo que hace que el amoníaco sea útil para aplicaciones de enfriamiento [4].^a

Una liberación de amoníaco anhidro puede absorber humedad de la atmósfera y formar una nube blanca densa y visible que puede permanecer cerca del suelo [7, p. 1.2]. Una nube tóxica de amoníaco puede no ser visible si no existe suficiente humedad atmosférica que se condense para hacer visible la nube.

Cuando se mezcla con aire, el amoníaco tiene un límite inferior de inflamabilidad de 16 por ciento en peso en aire y un límite superior de inflamabilidad de 25 por ciento en peso en aire [4]. Esto significa que el vapor de amoníaco es combustible si su concentración en el aire se encuentra dentro de este intervalo. Una Hoja de Datos de Seguridad del amoníaco señala que “en exteriores, el amoníaco no suele representar un peligro de incendio” [6, pp. 3, 5].

1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

En el proceso de cocción *sous vide*, los alimentos se sellan al vacío en una bolsa y se cocinan lentamente en un baño de agua utilizando una receta predeterminada. Una vez alcanzado el punto de cocción deseado, el proceso se detiene mediante un baño de agua enfriada. Después de que los alimentos se enfrían, se almacenan en congeladores y se preparan para su transporte a los clientes. En la planta de Sterling, el sistema de refrigeración por amoníaco regulaba las temperaturas del agua enfriada y las temperaturas requeridas para los congeladores de almacenamiento y otras áreas refrigeradas de la planta [8, pp. 549-552].

1.4.1 SISTEMA DE REFRIGERACIÓN POR AMONÍACO EN CUISINE SOLUTIONS

Al igual que muchas empresas de la industria alimentaria, Cuisine Solutions utiliza un sistema de refrigeración por amoníaco en la planta de Sterling para enfriar el sistema de agua enfriada, los congeladores y los enfriadores [8, pp. 549-552]. Para satisfacer todas las necesidades de refrigeración de la planta, Cuisine Solutions opera un proceso de refrigeración a tres presiones diferentes, lo que

^a El amoníaco tampoco agota la capa de ozono y tiene un potencial mínimo de calentamiento global [28, p. 417].

suministra amoníaco a tres temperaturas distintas: el circuito de alta presión a 30 °F, el circuito de presión intermedia a 12 °F y el circuito de baja presión a -48 °F. Un esquema simplificado del circuito de alta presión del proceso de refrigeración se muestra en la **Figura 3**.

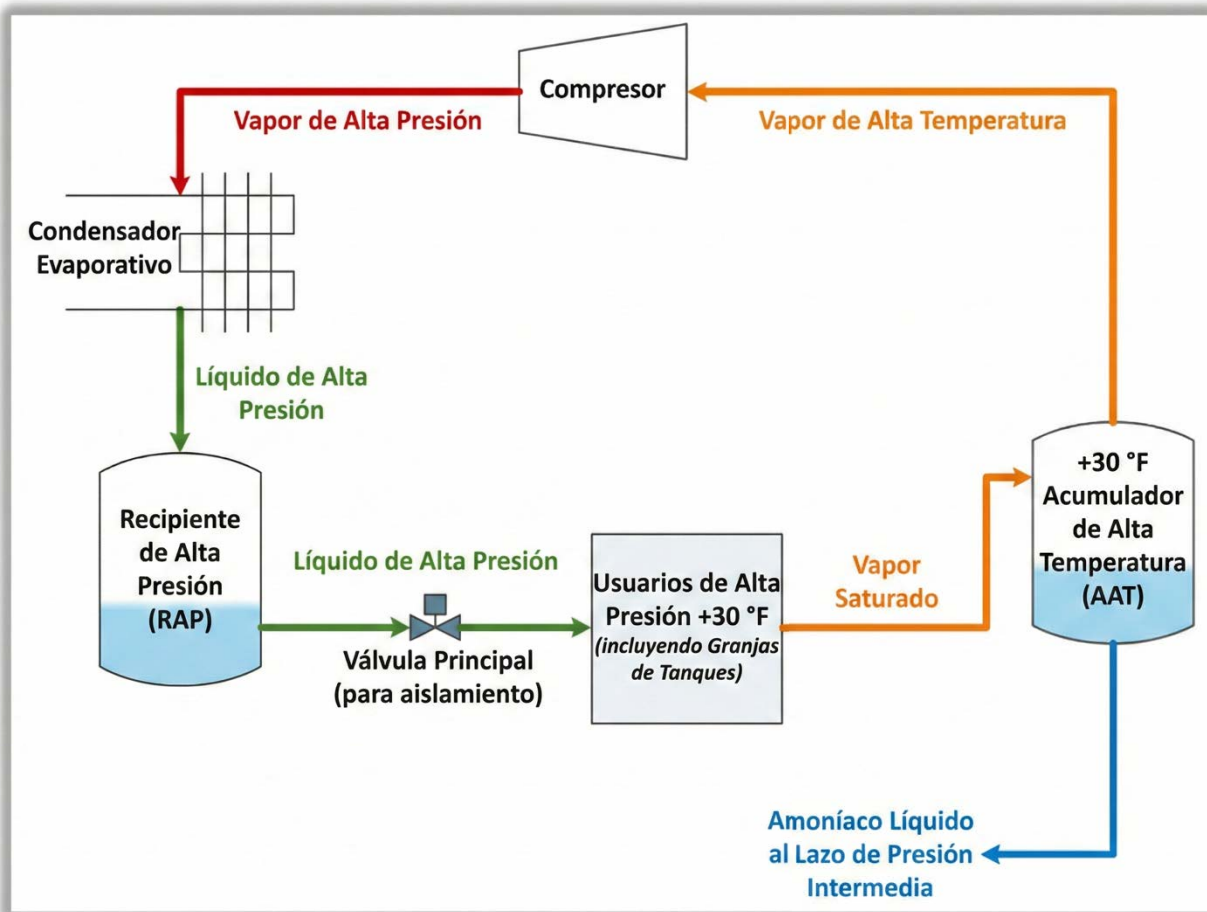


Figura 3: Descripción simplificada del ciclo de refrigeración por amoníaco de la planta Sterling. (Crédito: CSB)

El amoníaco líquido se almacena a alta presión en el Recipiente de Alta Presión (RAP). El RAP también puede contener el volumen del sistema si es necesario en una emergencia. El amoníaco líquido caliente a alta presión sale del RAP y pasa a través de la válvula principal de aislamiento (también denominada válvula de cierre)^a. La función principal de esta válvula es detener el flujo de amoníaco y aislar secciones del sistema de refrigeración en caso de emergencia.

Después de pasar por la válvula principal de aislamiento, parte del líquido caliente a alta presión se dirige a diversos usuarios de amoníaco de alta presión a +30 °F, incluidos los ubicados en el área de parque de tanques 5 (Tank Farm 5). El amoníaco líquido reduce su presión al ingresar al equipo de enfriamiento del

^a Según el Instituto Internacional de Refrigeración Totalmente Natural, “la válvula de cierre del sistema principal se conoce a menudo como la válvula principal. Se utiliza para detener o iniciar el flujo de amoníaco líquido desde el receptor hacia todo el sistema. Las válvulas principales suelen estar situadas en el lado de salida de líquido del receptor de alta presión” [54, p. 4].

circuito, lo que también reduce la temperatura. El amoníaco se evapora en el equipo, y el vapor saturado^a resultante a 30 °F ingresa al Acumulador de Alta Temperatura (AAT). El amoníaco líquido alimenta el circuito de presión intermedia, mientras que el vapor de amoníaco restante de alta temperatura fluye hacia los compresores. Una vez comprimido, el vapor de alta presión se condensa nuevamente en amoníaco líquido caliente a alta presión. El amoníaco líquido retorna al RAP y el ciclo de refrigeración comienza de nuevo.

1.4.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR DE TANK FARM 5

En 2017, Cuisine Solutions amplió su procesamiento sous vide en la planta de Sterling, incluido su sistema de refrigeración por amoníaco. Tank Farm 5 y algunas áreas de procesamiento de alimentos se construyeron como parte de esta expansión (**Figura 1**).

Tank Farm 5 contenía tanques de almacenamiento de agua enfriada, así como tambores acumuladores de sobrepresión e intercambiadores de calor del sistema de refrigeración por amoníaco (**Figura 4**). Tal como se describe en la **Sección 1.4.1**, parte del líquido caliente a alta presión proveniente del RAP, a aproximadamente 80 °F y 150 libras por pulgada cuadrada manométricas (psig), se dirigía a diversos usuarios de amoníaco de alta presión, incluidos los tambores acumuladores. En los tambores acumuladores, la presión del amoníaco descendía a aproximadamente 40 psig a través de las válvulas de entrada de líquido, lo que también reducía la temperatura del amoníaco a aproximadamente 30 °F. Los tambores acumuladores inundaban los intercambiadores de calor con amoníaco líquido saturado a 30 °F para promover la transferencia de calor entre el amoníaco líquido y la corriente de agua, lo que provocaba la evaporación del amoníaco. El vapor de amoníaco saturado se devolvía posteriormente al AAT en la sala de compresores (**Figura 5**). Cada tanque de agua enfriada se controlaba a una temperatura distinta para satisfacer las necesidades del procesamiento de alimentos. El parque de tanques 4 (Tank Farm 4), una disposición similar pero independiente de Tank Farm 5, se encontraba en el extremo sur del sitio de Cuisine Solutions.

^a A lo largo de este informe, «vapor saturado» o «líquido saturado» se refiere al vapor y al líquido en equilibrio termodinámico entre sí. En los sistemas de refrigeración por amoníaco, no es raro que el vapor saturado contenga cierta cantidad de líquido y viceversa [29, p. 3.4].



Figura 4: Los tanques de agua enfriada, los tambores de expansión y los intercambiadores de calor en el Tank Park 5. (Crédito: CSB)

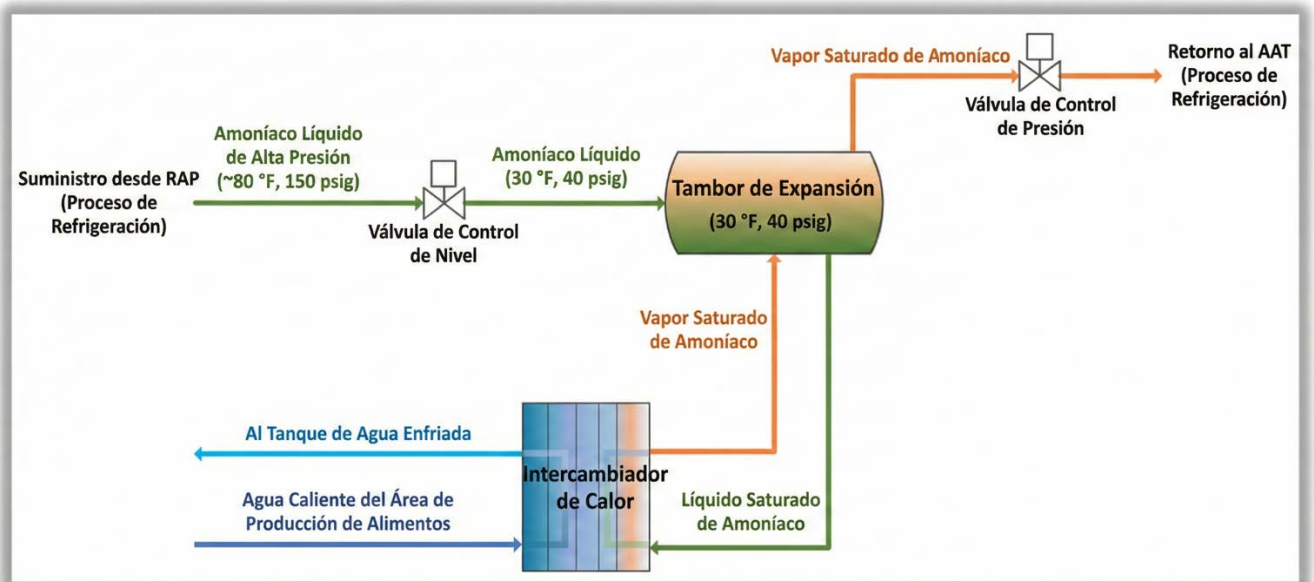


Figura 5: Diagrama simplificado del proceso del intercambiador de calor 5 y su tambor de expansión en el Tank Park 5. (Crédito: CSB)

1.4.3 VÁLVULAS DE ALIVIO DE PRESIÓN DE EMERGENCIA

El Código de Calderas y Recipientes a Presión de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) exige que los recipientes a presión cuenten con válvulas de alivio de presión de emergencia diseñadas para abrirse a una presión igual o inferior a la presión máxima de trabajo permitida (MAWP)^a, con el fin de prevenir daños a los equipos y fallas catastróficas [9, p. 94]. Cada recipiente a presión en Tank Farm 5 incluía al menos una VAPE^b. El conjunto del sistema de alivio utilizado en los tambores acumuladores incluía una válvula selectora de tres vías^c con dos VAPE acopladas (**Figura 6**). Este tipo de disposición garantizaba que una VAPE estuviera en servicio, mientras que la VAPE de respaldo permanecía aislada hasta que se accionara la válvula selectora de tres vías. Las VAPE descargaban hacia un colector de alivio común, el cual descargaba a la atmósfera, como se muestra en la **Figura 7**.

^a El Código ASME para Calderas y Recipientes a Presión, Sección VIII, define la MAWP como “la presión máxima admisible en la parte superior del recipiente en su posición normal de funcionamiento a la temperatura coincidente designada especificada para esa presión” [52, p. 78].

^b Los recipientes del Tank Farm 5 que se consideran recipientes a presión son: intercambiador de calor 4, tambor de compensación 4, depósito de aceite del tambor de compensación 4, intercambiador de calor 5, tambor de compensación 5, depósito de aceite del tambor de compensación 5, intercambiador de calor 6, tambor de compensación 6, depósito de aceite del tambor de compensación 6, receptor de baja temperatura 2 y depósito de aceite del receptor de baja temperatura 2.

^c La válvula selectora de tres vías, o válvula de conmutación, es “una válvula de tres vías (o desviadora) con un puerto de entrada y dos puertos de salida diseñada para aislar cualquiera de los dos puertos de salida del puerto de entrada, pero no ambos simultáneamente durante cualquier modo de funcionamiento” [46 p. 95].



Figura 6: Conjunto de VAPE para un tambor de compensación en el Tank Park 5, que incluye dos válvulas de alivio de presión de emergencia (verde) y la válvula selectora de tres vías (naranja). (Crédito: CSB)

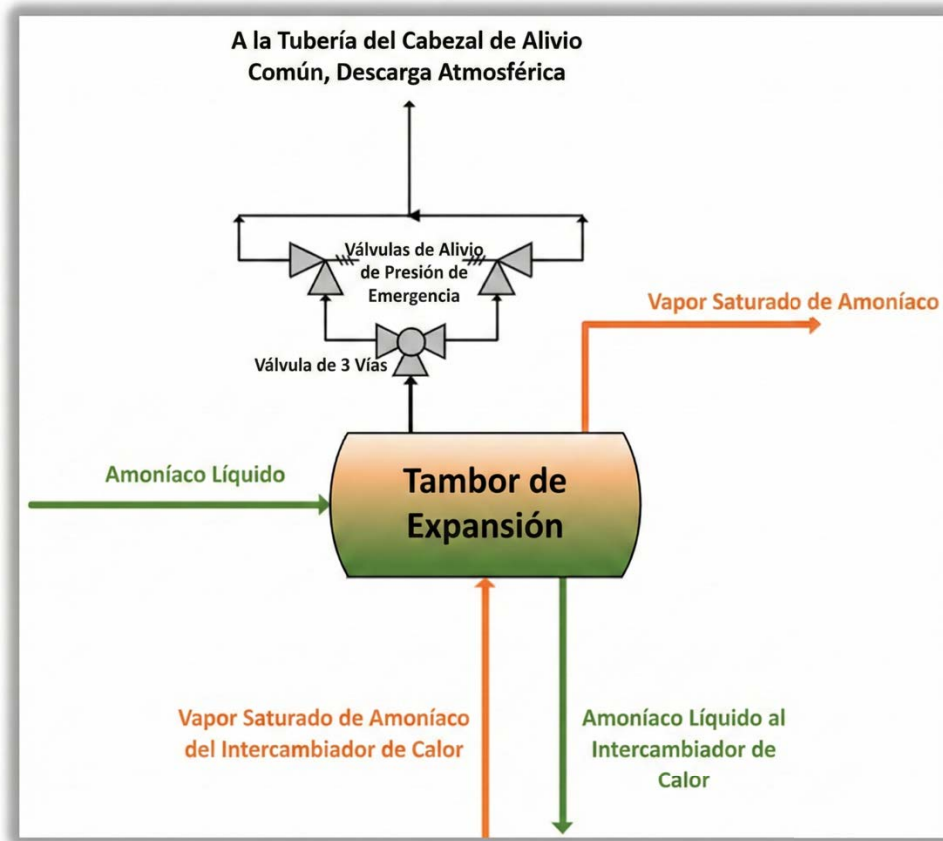


Figura 7: Conjunto de válvula de alivio de presión de emergencia en un tambor de expansión.
(Crédito: CSB)

En total, se instalaron 18 VAPE en Tank Farm 5. Estas válvulas protegían los equipos asociados contra condiciones de presión excesiva. Cuando se activaba cualquiera de las VAPE, descargaba amoníaco a la atmósfera a través de un difusor en T (**Figura 8**) ubicado al final del colector de alivio común.

El colector de alivio común también incluía un sensor para detectar amoníaco dentro de la tubería. Este sensor alertaba a los técnicos de refrigeración cuando una VAPE presentaba una fuga y requería mantenimiento, o cuando había sido activada durante un evento de sobrepresión.

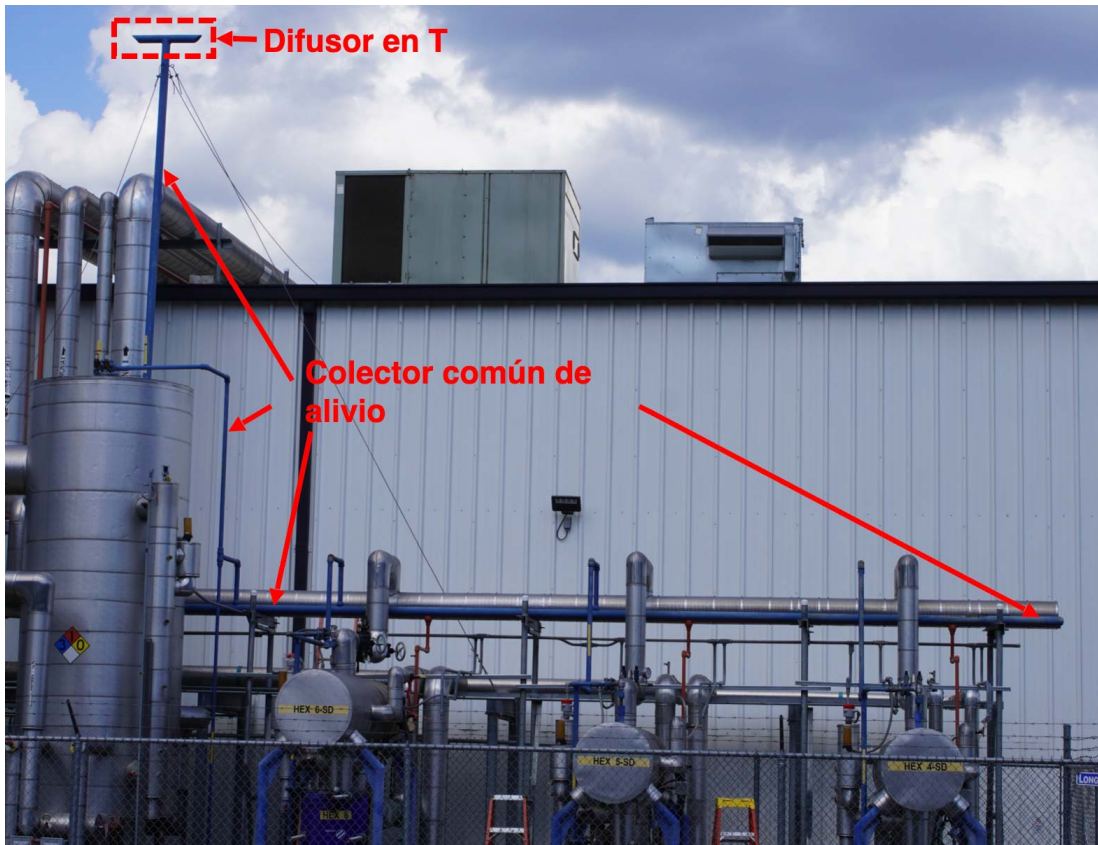


Figura 8: El colector común de alivio de amoníaco en el Tank Park 5 con difusor en T de descarga a la atmósfera. Las tuberías del colector común de alivio están pintadas de azul. (Crédito: CSB)

1.5 REGULACIONES FEDERALES DE SEGURIDAD

Los registros de Cuisine Solutions muestran que el sistema de refrigeración por amoníaco anhidro de la planta de Sterling, que contenía hasta 21.000 libras de amoníaco anhidro, estaba sujeto a la norma de Gestión de Seguridad de Procesos (GSP)^a de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA) y a la norma del Programa de Gestión de Riesgos (PGR) de la Agencia de Protección Ambiental (EPA)^b.

1.5.1 NORMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD DE PROCESOS DE OSHA

La norma de GSP de OSHA fue implementada el 26 de mayo de 1992. Según OSHA, la norma de GSP:

“[E]stabelece procedimientos para la gestión de la seguridad de procesos que protegerán a los empleados al prevenir o minimizar las consecuencias de accidentes químicos que involucren sustancias químicas altamente peligrosas. Los empleados han estado y continúan estando expuestos a los peligros de toxicidad, incendios y explosiones derivados de liberaciones catastróficas de sustancias químicas altamente peligrosas en sus lugares

^a 29 C.F.R. § 1910.119, Appendix A

^b 40 C.F.R. § 68.130

de trabajo. Los requisitos de esta norma tienen como objetivo eliminar o mitigar las consecuencias de dichas liberaciones” [10].

El inventario de amoníaco de la planta de Sterling, de aproximadamente 21.000 libras, superaba el umbral de 10.000 libras establecido en 29 C.F.R. 1910.119—Apéndice A—Lista de Sustancias Altamente Peligrosas. Por lo tanto, el proceso de refrigeración por amoníaco estaba sujeto al cumplimiento de los requisitos de la GSP de OSHA para la manipulación del amoníaco y la prevención y minimización de liberaciones de amoníaco.

OSHA citó a Cuisine Solutions por diez infracciones a la norma de GSP y a otros requisitos de OSHA, e impuso a la empresa una multa de 131.535 dólares en relación con el incidente del 31 de julio de 2024^a.

1.5.2 NORMA DEL PROGRAMA DE GESTIÓN DE RIESGOS DE LA EPA

El inventario de amoníaco de la planta de Sterling superaba el umbral de 10.000 libras establecido en la norma del PGR de la EPA^b. La norma del PGR exige que el propietario u operador de una fuente estacionaria con un inventario superior a la cantidad umbral de una sustancia regulada elabore un plan de gestión de riesgos.

Según la EPA, un plan de gestión de riesgos debe:

- identificar los efectos potenciales de un accidente químico;
- identificar las medidas que la instalación está adoptando para prevenir un accidente; y
- detallar los procedimientos de respuesta a emergencias en caso de que ocurra un accidente [11].

Además, la norma del PGR de la EPA define tres niveles de Programa (Programa 1, 2 o 3) en función de las posibles consecuencias para el público y del esfuerzo necesario para prevenir accidentes [12, p. 1]. El Programa 1 es el menos estricto de estos niveles y el Programa 3 es el más riguroso.

Para los procesos del Programa 3, la empresa debe presentar un único plan de gestión de riesgos para todos los procesos cubiertos, que incluya al menos un análisis de liberación de peor caso y un análisis alternativo para todas las sustancias tóxicas que superen la cantidad umbral. Asimismo, la empresa debe implementar todos los elementos del programa de prevención del Programa 3 (información de seguridad de procesos, análisis de riesgos de procesos, procedimientos operativos estándar, capacitación, integridad mecánica, auditorías de cumplimiento, investigaciones de incidentes, gestión de cambios, revisiones previas a la puesta en marcha, contratistas, participación de los empleados y permisos de trabajo en

^a https://www.osha.gov/ords/imis/establishment.inspection_detail?id=1765826.015. En el momento de publicar este informe, el caso sigue abierto y las citaciones están siendo impugnadas.

^b [40 C.F.R. § 68.130](#)

caliente [para trabajos peligrosos]), desarrollar un plan y programa de acción o respuesta ante emergencias y coordinarse con los servicios de respuesta locales [12, pp. 18-20].

Cuisine Solutions clasificó su proceso de refrigeración por amoníaco en la planta de Sterling como Programa 3 debido a su proximidad a receptores públicos cercanos al límite de concentración tóxica^a para un escenario de liberación de peor caso y porque la norma de GSP de OSHA ya cubría el proceso [12, p. 12]. El plan de gestión de riesgos elaborado en nombre de la empresa en julio de 2024 identificó 17 receptores públicos dentro de un radio de 1,1 millas, incluidos la Oficina Postal de Ashburn, varios parques industriales, dos sitios históricos, un cementerio, un club de golf y otros receptores.

1.6 INSTITUTO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN CON REFRIGERANTES NATURALES

Tal como se analiza en la **Sección 1.5**, los sistemas de refrigeración por amoníaco que contienen más de 10.000 libras de amoníaco anhidro deben cumplir con los requisitos de la norma de GSP de OSHA y de la norma del PGR de la EPA. No obstante, los sistemas de menor tamaño son comunes en los Estados Unidos, y todos los sistemas de refrigeración por amoníaco deben seguir las Prácticas de Ingeniería Reconocidas y Generalmente Aceptadas (PIRGA) [7, p. 3.1].

Si bien el Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME continúa siendo aplicable a la industria de la refrigeración [13, p. 43], la mayoría de los sistemas de refrigeración siguen las normas emitidas por el Instituto Internacional de Refrigeración con Refrigerantes Naturales (IIAR)^b como PIRGA [7, p. 3.1]. El IIAR ha emitido una serie de normas y directrices, algunas de las cuales han sido adoptadas por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) [13, p. v]. Una de estas normas, ANSI/IIAR 2-2021, *Standard for Design of Safe Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems [Norma para el diseño de sistemas de refrigeración por amoníaco de circuito cerrado seguros]* (“ANSI/IIAR 2”), proporciona orientación para el diseño de sistemas de alivio en aplicaciones de refrigeración por amoníaco [13, p. 51].

Diversas organizaciones de normalización, como la American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) y el International Code Council (ICC), han delegado en el IIAR las normas de refrigeración por amoníaco. El IIAR ha señalado en su sitio web:

“A partir de los códigos modelo de 2021, el *International Mechanical Code (IMC)*, *ASHRAE-15*, el *Uniform Mechanical Code (UMC)* y la *National Fire Protection Association (NFPA)* acordaron remitir a IIAR-2 y a otras normas del IIAR como base integral para la regulación del amoníaco...” [14].

La EPA y OSHA también hacen referencia a las normas del IIAR como PIRGA. La EPA cita las normas del IIAR en sus orientaciones para el cumplimiento del PGR [7, p. 3.1]. OSHA destaca las normas del

^a La EPA define el “punto final tóxico” como “la concentración máxima en el aire por debajo de la cual se cree que casi todas las personas pueden estar expuestas durante un máximo de una hora sin experimentar ni desarrollar efectos o síntomas irreversibles u otros efectos graves para la salud que puedan mermar la capacidad de una persona para tomar medidas de protección”. En el caso del amoníaco, la concentración del punto final tóxico es de 200 ppm [24, pg. 4].

^b El Instituto se conocía anteriormente como Instituto Internacional de Refrigeración por Amoníaco, y algunos documentos a los que se hace referencia en este informe se publicaron con ese nombre.

IIAR y otros documentos relacionados con la refrigeración por amoníaco en una página web dedicada específicamente a este tema [15].

1.7 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA CIRCUNDANTE

La **Figura 9** muestra el área circundante a la planta de Sterling. Los círculos están trazados a una milla (azul), tres millas (naranja) y cinco millas (amarillo) desde la planta. Los datos demográficos resumidos para el área aproximada dentro de un radio de cinco millas alrededor de la planta de Sterling se presentan a continuación en la Tabla 1. Dentro de un radio de cinco millas de la planta residen más de 50.000 personas en más de 18.000 unidades habitacionales, la mayoría de las cuales son viviendas unifamiliares. El área también incluye el [Aeropuerto Internacional Washington Dulles](#), la estación [Loudoun Gateway](#) de la Línea Plateada del metro y una Oficina Postal de los Estados Unidos. Los datos demográficos detallados se incluyen en el **Apéndice B**.



Figura 9: Área circundante a la planta de Sterling. (Crédito: Google Earth, con anotaciones de CSB)

Tabla 1: Resumen de datos demográficos (Crédito: CSB utilizando datos obtenidos de [Census Reporter](#)^a)

^a Esta información se recopiló utilizando los datos del censo de 2020 presentados por Census Reporter [50]. Census Reporter es un proyecto independiente cuyo objetivo es facilitar el uso de los datos de la Encuesta sobre la Comunidad Estadounidense. No está afiliado a la Oficina del Censo de los Estados Unidos [51].

Población	Raza y etnia (%)		Ingresos per cápita (\$)	Pobreza (%)	Número de viviendas	Tipos de unidades de vivienda (%)	
50.926	Blanco	39	57.924	4,6	18.431	Unidad individual	71
	Negro	7				Unidad múltiple	29
	Nativo	0				Casa móvil	0
	Asiático	26				Barco, autocaravana, furgoneta, etc.	0
	Isleño	0					
	Otro	1					
	Dos o más	3					
	Hispano	24					

2 DESCRIPCIÓN DEL INCIDENTE

2.1 PERTURBACIÓN DEL PROCESO DE AGUA ENFRIADA

En la tarde del 31 de julio de 2024, aproximadamente entre las 5:00 p. m. y las 5:30 p. m., el técnico de refrigeración del segundo turno recibió una llamada por radio indicando que las tres bombas de agua en Tank Farm 5 que suministraban agua enfriada al proceso *sous vide* estaban apagadas. El técnico consideró que las bombas se habían apagado debido a la alta temperatura dentro de un gabinete eléctrico exterior que estaba expuesto directamente a la luz solar de la tarde.

Aproximadamente a las 5:40 p. m., el técnico de refrigeración llegó a Tank Farm 5 y confirmó que ninguna de las bombas de agua enfriada estaba operando. El técnico abrió una puerta del gabinete eléctrico exterior y pudo sentir el calor que salía de este. El técnico intentó restablecer las bombas de agua enfriada, pero tan pronto como se restablecieron los motores, las bombas se apagaron nuevamente. Entonces, el técnico dejó abiertas las puertas del gabinete eléctrico para reducir la temperatura interna. A medida que se ponía el sol, el técnico observó que la temperatura cerca del gabinete eléctrico se estaba volviendo notablemente más fresca. Aproximadamente a las 6:14 p. m., el técnico reinició las bombas de agua enfriada y, en esta ocasión, las bombas continuaron operando.

Después de aproximadamente las 8:00 p.m., el técnico de refrigeración recibió otra llamada por radio, indicando que existía un problema con la temperatura del agua enfriada de Tank Farm 5 para el proceso *sous vide*. Aproximadamente a las 8:17 p. m., el técnico regresó a Tank Farm 5 y revisó los tres intercambiadores de calor del circuito de refrigeración. Posteriormente, el técnico informó al CSB que, en ese momento, las presiones de amoníaco se encontraban dentro del rango normal de operación. Además, todas las mirillas de los tambores acumuladores de sobrepresión indicaban un nivel estable y normal de amoníaco líquido, y el equipo de refrigeración parecía estar funcionando correctamente. El técnico recordó haber dicho por radio en ese momento: “Oigan, todo se ve bien de este lado [...] revisen cuántos lotes están cocinando...”. Luego, el técnico salió del sitio de Sterling para un descanso de comida aproximadamente a las 8:19 p. m.

2.2 LIBERACIÓN DE AMONÍACO

Aproximadamente a las 8:23 p. m., un empleado de control de calidad regresó a la planta de Sterling después de tomar un descanso. Mientras caminaba de regreso a la entrada principal de empleados, como se muestra en la **Figura 10**, el empleado entró en “algo que olía y se sentía como una nube química”. El empleado informó a los investigadores del CSB que esa noche no había ninguna nube visible ni nada que se viera diferente en el exterior, pero sintió que sus ojos “comenzaron a lagrimear con fuerza” y que su nariz y garganta se “obstruían”. El empleado también señaló que se encontraba en un “estado inmediato de confusión” al entrar en la planta.

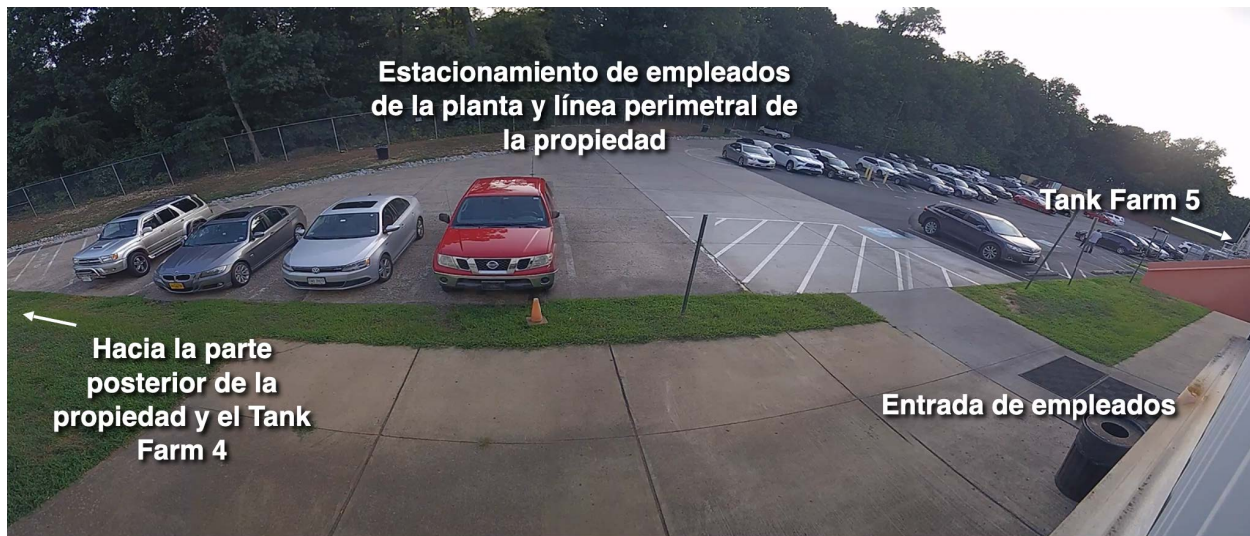


Figura 10: Entrada para empleados y estacionamiento de la planta Sterling. (Crédito: Cuisine Solutions, anotado por CSB)

El empleado fue a la oficina y le indicó a un gerente asistente lo que acababa de experimentar afuera y lo fuerte que era el olor. El gerente asistente solicitó por radio apoyo del personal de mantenimiento para ayudar a identificar el olor. Uno de los técnicos de mantenimiento recordó haber escuchado por radio a alguien decir: “Necesito a un técnico de mantenimiento. La gente dice que huele a gas en el estacionamiento...”.

Aproximadamente a las 8:27 p. m., el personal de mantenimiento llegó al estacionamiento de empleados de la planta para investigar y observó una nube blanca saliendo del difusor en T del colector de alivio común del sistema de refrigeración por amoníaco (**Sección 1.4.3**), como se muestra en la **Figura 11**. Un empleado de mantenimiento describió haber visto amoníaco salir de la tubería de ventilación con extremo abierto “como una nube de burbujas, como bajando, ya sabes, cayendo. Y luego se detenía, y luego volvía otra vez, y luego se detenía”. Otro empleado de mantenimiento dijo a los investigadores del CSB: “Se podía ver la nube de amoníaco. Era, o sea, como digo, era una nube. Era algo que nunca había visto antes. Ya sabes. Lo hueles y sabes que es malo. Pero por lo que me han dicho, cuando lo ves, es realmente malo”. En concordancia con estos informes, las grabaciones de la cámara de seguridad mostraron una nube visible formándose y disipándose, y una segunda nube formándose a medida que avanzaba la liberación.



Figura 11: Nube de amoníaco visible durante la liberación (izquierda) y el punto de liberación (marcado con un círculo, derecha) a través de un difusor horizontal en forma de T. (Crédito: Empleados de Cuisine Solutions, anotado por CSB)

Aproximadamente al mismo tiempo, uno de los empleados de mantenimiento que respondieron llamó al técnico de refrigeración que se encontraba fuera del sitio para informarle que había olor a amoníaco en el estacionamiento de empleados. El gerente de refrigeración también recibió una llamada que describía la liberación de amoníaco, tras lo cual comenzó a conducir desde su casa hacia la planta de Sterling.

Mientras tanto, trabajadores dentro del edificio, en una cafetería y área de descanso adyacentes al punto de liberación de amoníaco, como se muestra en la **Figura 12**, recordaron haber identificado y reportado un olor a amoníaco en ese momento.

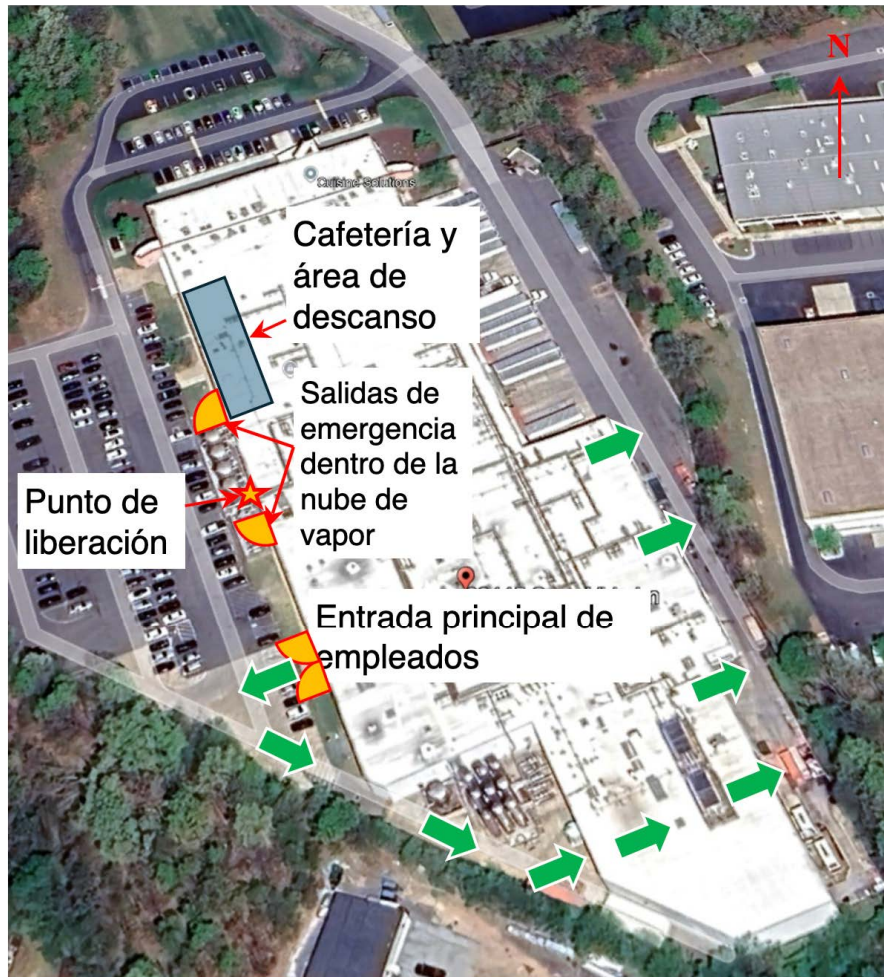


Figura 12: Vista aérea de las instalaciones de Sterling, en la que se indica la zona de descanso (rectángulo azul), las salidas de emergencia comprometidas y algunas rutas de evacuación de uso común (flechas verdes). (Crédito: Google Earth, con anotaciones de la CSB).

2.3 EVACUACIÓN

Aproximadamente a las 8:27 p. m., el gerente de producción^a indicó por radio a los empleados que evacuaran el edificio por el lado opuesto (este) del edificio, como se muestra en la **Figura 12**. El gerente de producción informó al CSB que sabía que las puertas de salida de emergencia del lado oeste del edificio conducían directamente hacia la nube blanca.

Debido a que solo los supervisores y técnicos de la planta portaban radios, muchos trabajadores no recibieron directamente el mensaje de evacuación por radio. Los videos de vigilancia mostraron que a muchos trabajadores en las áreas de producción se les indicó evacuar en persona y lo hicieron de inmediato. Otros trabajadores que ya se encontraban afuera y cerca del punto de liberación de amoníaco

^a Como se muestra en la **sección 1.2**, el gerente de producción era el empleado de mayor rango en la planta durante el segundo turno y era responsable de todas las operaciones de ese turno.

hicieron señas a través de las ventanas a los trabajadores que estaban adentro. Algunos trabajadores salieron del edificio cerca de la nube blanca de amoníaco o hacia ella y probablemente inhalaron el gas tóxico. Partes de la nube tóxica de vapor de amoníaco no eran visibles, y el amoníaco afectó a algunos evacuados porque caminaron hacia las porciones invisibles de la nube antes de darse cuenta de que estaba allí.

Varios trabajadores informaron posteriormente a los investigadores del CSB que olieron amoníaco mientras evacuaban por el lado este del edificio y a lo largo de la ruta de evacuación indicada por el gerente de producción, como se muestra en la Figura 12. Los relatos de testigos presenciales y las grabaciones de cámaras de seguridad confirmaron que no había nube visible en el lado este del edificio.

La dirección y velocidad del viento local en el momento del incidente^a eran del sur-sureste a aproximadamente 7,5 millas por hora, aunque el viento cambió ligeramente durante la hora^b. El “Punto de reunión inicial” de la **Figura 13** se abandonó de inmediato debido a los olores a amoníaco. Posteriormente, muchos evacuados se trasladaron al lugar marcado como “Punto de reunión reubicado” en la **Figura 13**, el cual se encontraba aproximadamente a 1/3 de milla del punto de reunión inicial, para alejarse del olor a amoníaco.

^a La estación meteorológica más cercana al emplazamiento se encontraba en el Aeropuerto Internacional de Dulles, aproximadamente a 2,7 millas al sur de la planta.

^b Apéndice D en la página 42.



Figura 13: La ruta de evacuación (flechas verdes) que siguieron la mayoría de los evacuados por el lado este del edificio para evitar

El técnico de refrigeración regresó al estacionamiento de empleados desde su descanso de comida fuera del sitio aproximadamente a las 8:40 p.m., momento en el que la evacuación estaba prácticamente completa.

Durante todo el incidente, no se activó ninguna de las alarmas del sistema de detección de amoníaco en las áreas de producción, ni sonó ninguna alarma de evacuación general del sitio^a. Sin embargo, el técnico de refrigeración informó posteriormente a los investigadores del CSB que el sensor de amoníaco en la tubería de descarga del alivio de presión de emergencia de Tank Farm 5 estaba registrando 10.000 partes por millón (ppm) en la pantalla de la IHM de la planta de Sterling en algún momento después de las 8:40 p.m.

^a No había sensores de amoníaco en el exterior del edificio, donde se produjo la liberación.

2.4 RESPUESTA DE EMERGENCIA

Aproximadamente a las 8:31 p.m., el Centro de Comunicaciones de Emergencia del Condado de Loudoun recibió una llamada al 911 de un empleado de la planta de Sterling que reportó un olor a amoníaco “saliendo de las tuberías” [16]. Poco después, el supervisor del [Servicio de Inspección Postal](#) ubicado al otro lado de la vía frente al sitio de Sterling llamó al 911. El supervisor le dijo al operador del 911: “apenas se puede respirar afuera” y pidió orientación sobre la situación en desarrollo. El Departamento de Bomberos y Rescate del Condado de Loudoun, incluido el Equipo de Respuesta a Materiales Peligrosos (el “equipo HAZMAT”), llegó al lugar^a, confirmó que la fuga era de amoníaco y observó y atendió a numerosas personas que parecían haber estado expuestas [16]. Los primeros servicios de emergencia en responder reportaron “sin peligros visibles desde el exterior” del edificio al llegar. También respondieron y brindaron apoyo unidades de Bomberos y Rescate del Condado de Fairfax, del Condado de Prince William y de la Metropolitan Washington Airports Authority; el mando del incidente del Condado de Loudoun indicó que se identificaron “más de diez personas inconscientes”.

El técnico de refrigeración se encontró con respondedores de emergencia que ingresaban al edificio aproximadamente a las 8:46 p.m. El técnico de refrigeración y uno de los respondedores regresaron a la sala de compresores de amoníaco y, a sugerencia del equipo de respuesta de emergencia, el técnico apagó cada compresor mediante sus paneles de control locales, con lo cual detuvo el sistema de refrigeración.

El gerente de refrigeración llegó a la planta y cerró la válvula principal de aislamiento (**Figura 3**, arriba) aproximadamente a las 8:55 p.m. El gerente de refrigeración había sido informado de que los compresores ya habían sido apagados mediante una llamada telefónica con el técnico de refrigeración. Tras cerrar la válvula principal de aislamiento, el gerente de refrigeración se reunió con los respondedores de emergencia y se preparó para ingresar al área de Tank Farm 5 para intentar aislar la fuente de la liberación de amoníaco.

Aproximadamente a las 9:29 p.m., con la orientación y el apoyo del equipo HAZMAT, el gerente de refrigeración accionó la válvula selectora de tres vías del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 para aislar la VAPE que había liberado el amoníaco y poner en servicio la VAPE de respaldo (**Figura 14**). Posteriormente, el gerente informó al CSB que determinó cuál VAPE estaba descargando amoníaco a la atmósfera con base en su observación de acumulación de escarcha en el exterior de la tubería y la VAPE.

^a La llamada inicial al 911 se realizó a las 8:31 p.m. El Departamento de Bomberos y Rescate del Condado de Loudoun fue enviado a las 8:36 p.m. El primer vehículo de emergencia llegó al lugar aproximadamente a las 8:42 p.m.



Figura 14: Imagen del vídeo de la escena del incidente. Los servicios de emergencia colaboran con un empleado de la planta Sterling para aislar de forma segura el amoníaco. (Crédito: WTVR-TV [17])

Debido a la exposición al vapor de amoníaco, algunas personas presentaron dolores de cabeza, náuseas, vómitos e irritación de la nariz y la garganta, lo que provocó tos y sibilancias, de manera consistente con la inhalación de amoníaco, durante la evacuación. Tal como se analiza en la **Sección 2.3**, los evacuados se trasladaron al lugar marcado como “Punto de reunión reubicado” en la **Figura 13** para alejarse del olor a amoníaco. La **Figura 15** muestra una imagen aérea del punto de reunión reubicado durante la respuesta al incidente.



Figura 15: Imagen del vídeo de la escena del incidente que muestra a los evacuados y al personal de emergencia reunidos en el punto de encuentro reubicado al norte de las instalaciones de Sterling. (Crédito: WTVR-TV [17])

Debido al número de pacientes potenciales y al tipo de condiciones médicas observadas, el comandante del incidente solicitó una alarma por Incidente con Múltiples Víctimas (IMV), lo que derivó el despliegue de 10 unidades adicionales de transporte de servicios médicos de emergencia, 10 unidades de supresión, un autobús ambulancia móvil, apoyo del personal de mando y otros recursos que respondieron al lugar [16].

El equipo de Bomberos y Rescate del Condado de Loudoun ventiló el edificio para retirar el amoníaco residual y posteriormente devolvió el control de la escena a Cuisine Solutions aproximadamente a las 11:46 p.m. Mientras tanto, funcionarios de Cuisine Solutions verificaron el paradero de todas las 286 personas presentes en el sitio durante el incidente.

Un resumen de los eventos clave se muestra en la **Figura 16**.

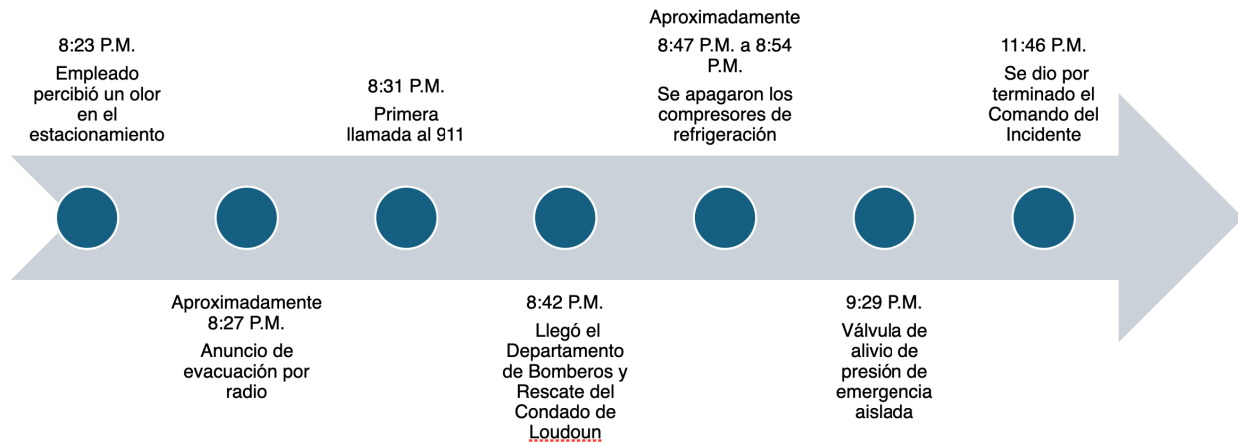


Figura 16: Cronología de los acontecimientos más importantes. (Crédito: CSB)

2.5 CONSECUENCIAS DEL INCIDENTE

Los respondedores de emergencia evaluaron a 267 trabajadores y trasladaron a 33 trabajadores a hospitales del área la noche del incidente. Cuatro de esos trabajadores fueron hospitalizados y uno de ellos fue ingresado en una unidad de cuidados intensivos. Cuisine Solutions informó que otras siete personas acudieron por cuenta propia a hospitales locales y centros de atención urgente después del incidente, y que todos los pacientes fueron dados de alta en el transcurso de una semana. Además, Cuisine Solutions estimó pérdidas comerciales y de propiedad en aproximadamente 3 millones de dólares. Una de las líneas de producción de alimentos estuvo detenida durante aproximadamente 16 días, y otra línea de producción estuvo detenida durante aproximadamente 38 días.

3 ANÁLISIS TÉCNICO

3.1 SE ABRIÓ UNA VÁLVULA DE ALIVIO DE PRESIÓN DE EMERGENCIA

Durante el incidente, el amoníaco salió del proceso de refrigeración a través del colector de alivio común en Tank Farm 5, que era la ruta de descarga de 18 VAPE (**Sección 1.4.3**). El gerente de refrigeración informó al CSB que determinó cuál VAPE se abrió con base en la presencia de escarcha en el exterior de la tubería de descarga. El amoníaco líquido o vapor saturado a presión atmosférica se encuentra a $-28\text{ }^{\circ}\text{F}$, y la humedad atmosférica se congela al entrar en contacto con la tubería fría [13, p. 13, 18, p. A.4]. El gerente de refrigeración rastreó la fuente de la liberación hasta la VAPE del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 utilizando la escarcha como guía. Posteriormente, el gerente de refrigeración accionó la válvula selectora de tres vías para sacar de servicio la VAPE que se había abierto y poner en servicio la VAPE de respaldo. Sin embargo, para el momento en que se realizó el cambio, aproximadamente a las 9:29 p.m., el evento de sobrepresión ya había concluido y ninguna de las dos VAPE se abrió.

De las 18 VAPE conectadas al colector de alivio común de Tank Farm 5 al momento del incidente, 15 eran del mismo tamaño y modelo y tenían la misma presión de ajuste de 300 psig, incluidas las instaladas en el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5^a. Además, las etiquetas en las VAPE indicaban que probablemente habían estado en servicio durante aproximadamente siete años y tenían dos años de atraso respecto del reemplazo o prueba^b. La norma ANSI/IIAR 6 (2019), *Standard for Inspection, Testing, and Maintenance of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems* (“ANSI/IIAR 6”), exige que las VAPE se prueben o reemplacen cada cinco años [19, p. 43]. Por estas razones, el CSB hizo que las 15 VAPE fueran probadas en un taller independiente certificado para probar este tipo de dispositivos.^c

Los resultados de las pruebas del CSB se resumen en la **Figura 17** y se detallan en el **Apéndice C**. Cada VAPE se probó tres veces para determinar la presión a la cual se abría. Según el Industrial Refrigeration Consortium (IRC), el desempeño aceptable es que una VAPE permanezca cerrada y mantenga la presión hasta el 90 por ciento de la presión de ajuste [20, p. 15]. Las 15 VAPE funcionaron conforme a su diseño y ninguna se abrió de manera prematura.

^a Todas las 15 VAPE eran del modelo 800 QR de Cyrus Shank, fabricadas en acero inoxidable 316, con una entrada de $\frac{1}{2}$ pulgada y una salida de $\frac{3}{4}$ pulgada de tamaño nominal.

^b Aunque algunas de las VAPE aún tenían etiquetas que indicaban que se habían instalado como parte del proyecto de instalación del parque de tanques 5 en 2017, faltaban algunas etiquetas. En consecuencia, la CSB no pudo verificar la vida útil de las 15 VAPE. El personal de Cuisine Solutions creía que todas las VAPE del parque de tanques 5 se instalaron en 2017 y permanecieron en servicio hasta el 1 de agosto de 2024, pero no se encontraron registros que lo verificaran. Tras el incidente, la empresa sustituyó todas las VAPE del parque de tanques 5.

^c El Consejo Nacional de Inspectores de Calderas y Recipientes a Presión ofrece un “sello VR para la reparación de válvulas de alivio de presión”. El taller utilizado para probar las VAPE de la planta de Sterling tenía un sello VR.

También se registró en cada prueba la presión a la que cada válvula volvió a cerrarse después de abrirse, conocida como presión de cierre (blowdown). Los resultados de blowdown indicaron que todas las VAPE probadas volvieron a cerrarse dentro del rango esperado de presión de cierre especificado por el fabricante [21, p. 61]. Una VAPE fallida o defectuosa podría permanecer abierta muy por debajo de la presión de cierre, incrementando la cantidad de amoníaco liberado, pero no parece que ese haya sido el caso en este incidente.

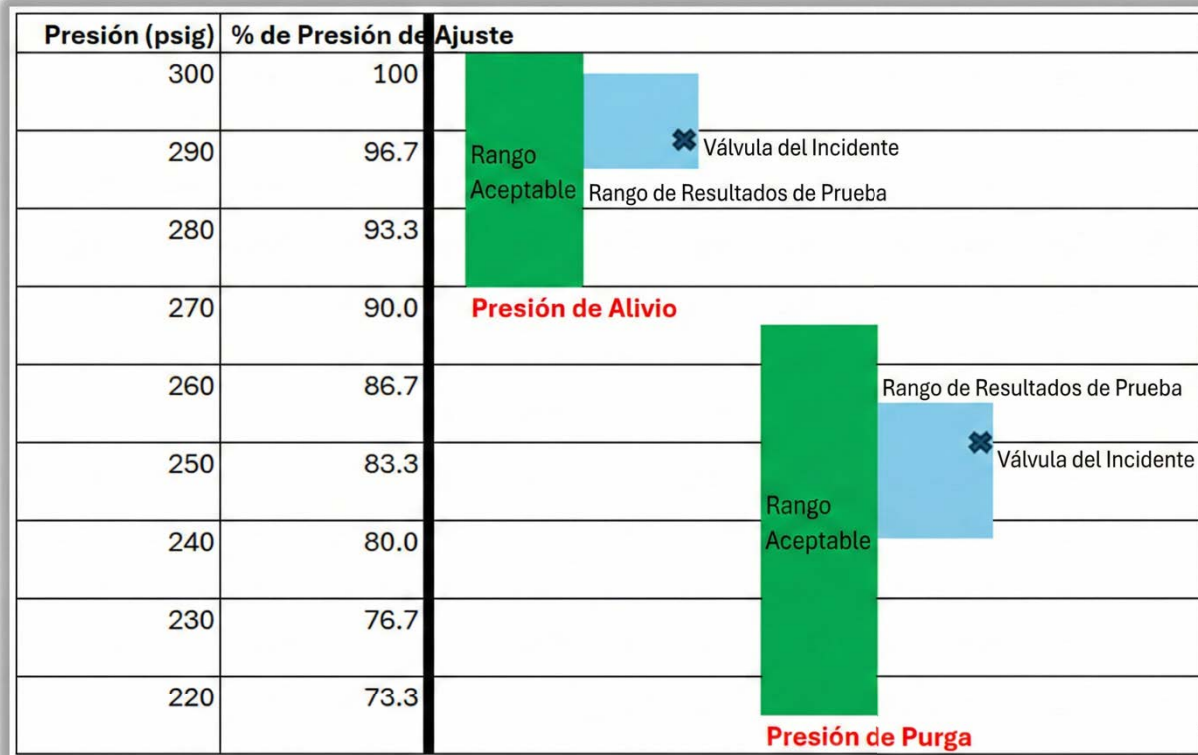


Figura 17: Resultados de las pruebas de la VAPE, con un promedio de tres pruebas para cada dispositivo. Las cruces azules representan el dispositivo que se cree que se abrió durante el incidente. (Crédito: CSB)

El CSB concluye que, aunque las VAPE de Tank Farm 5 probablemente estaban más allá de la frecuencia de reemplazo o prueba de cinco años, la falta de prueba o reemplazo oportunos no fue causal del incidente.

Con base en los resultados de prueba anteriores mostrados en la **Figura 17**, se pudo descartar una falla prematura de las VAPE. Esto significa que ocurrió una sobrepresión en el tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5, lo que provocó que la VAPE se abriera.

El CSB concluye que la liberación de amoníaco fue resultado de la apertura de una VAPE en el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 debido a un evento de sobrepresión, y que la VAPE funcionó conforme a su diseño y propósito en este evento.

3.2 ESCENARIOS POTENCIALES DE SOBREPRESIÓN

Cuisine Solutions no registraba datos históricos del proceso para el sistema de refrigeración por amoníaco más allá de las temperaturas de almacenamiento de alimentos, de enfriadores o de congeladores requeridas por consideraciones de inocuidad alimentaria. Mediante entrevistas posteriores al incidente, el CSB supo que, unas horas antes del incidente, las bombas de agua se apagaron en Tank Farm 5, aparentemente debido al sobrecalentamiento del gabinete eléctrico de las bombas, tal como se describe en la **Sección 2.1**. Para Tank Farm 5 solo se contaba con datos de nivel y temperatura de los tanques de agua. Los datos indicaron algunas fluctuaciones de temperatura y temperaturas elevadas del agua en la tarde previa al incidente, pero esto comenzó horas antes de que ocurriera el incidente, y el CSB no pudo verificar si los datos de temperatura a granel de los tanques de agua estaban relacionados con la sobrepresión del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 en ausencia de otros datos del proceso. La IHM de la planta de Sterling^a incluía una página de resumen de alarmas, pero, según Cuisine Solutions, se perdió cualquier registro de las alarmas ocurridas durante el incidente. Esta falta de datos históricos del proceso y de historial de alarmas del proceso de refrigeración limitó la investigación del CSB sobre la causa de la apertura de la VAPE. En consecuencia, el CSB no pudo determinar la causa específica de la sobrepresión o de la condición de perturbación del proceso.

No obstante, el CSB consideró escenarios posibles que podrían generar una sobrepresión en el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5. Algunos escenarios pudieron descartarse y se pudieron extraer conclusiones con base en eventos que claramente no ocurrieron, aun en ausencia de datos del proceso:

- Dado que no hubo evidencia de que ocurriera un incendio, se pudieron descartar escenarios que involucraran fuego^b, como un incendio de charco debajo del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5.
- Dado que no hubo evidencia de sobrepresión en otros recipientes del sistema de refrigeración — como la activación de otras VAPE o la ocurrencia de otras liberaciones de amoníaco—, la sobrepresión tuvo que estar localizada en el Intercambiador de Calor 5 y/o en su tambor acumulador de sobrepresión.

LECCIÓN CLAVE

Las empresas deben asegurarse de medir y almacenar los datos de los procesos para que, cuando se produzca un incidente o una alteración en el proceso, puedan analizar los datos, determinar las causas y realizar cambios para detener la alteración o evitar otro incidente. La imposibilidad de acceder a dichos datos de proceso puede ocultar graves problemas de control del proceso. Los empleados no pueden responder a una alteración del proceso ni prevenir futuras alteraciones si no pueden ver cómo se desarrolló dicha alteración. Investigar un incidente sin datos suficientes sobre el proceso dificulta la investigación y aumenta la probabilidad de que se repita el incidente.

^a Interfaz hombre-máquina, descrita en la **sección 1.1**.

^b Un incendio en una piscina es un “charco de líquido en llamas” [34, p.7]

- Debido a que los recipientes de amoníaco aguas arriba (RAP) y aguas abajo (AAT) del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 no presentaron sobrepresión ni activaron sus VAPE, la alta presión no pudo haberse originado en recipientes aguas arriba o aguas abajo en magnitud suficiente para sobrepresionar el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5. De hecho, tanto el RAP como el AAT tenían VAPE ajustadas a una presión menor (250 psig) que la presión de ajuste de la VAPE del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 (300 psig).
- Después del incidente, se realizó un protocolo de pruebas a los intercambiadores de calor de Tank Farm 5. Ninguno de los intercambiadores de calor presentó fugas. Por lo tanto, el agua enfriada no se filtró hacia el lado del amoníaco en los intercambiadores de calor, y el amoníaco no se filtró hacia el agua enfriada.
- Una sobrepresión hidrostática, también conocida como sobrepresión por expansión térmica del líquido, en la que el tambor acumulador de sobrepresión estaría aislado y lleno de líquido, probablemente no ocurrió porque el líquido podía salir del tambor a través de la línea de venteo de vapor y no podía generar una sobrepresión simplemente por estar lleno de líquido. Si la tubería de venteo estuviera bloqueada/cerrada, podría ocurrir una sobrepresión hidrostática, pero no sería sostenible de manera que causara una liberación que durara más de unos pocos segundos. Tan pronto como se aliviara un volumen muy pequeño de líquido, la presión se disiparía y la liberación se habría detenido después de que se descargaran solo unas pocas onzas de líquido. Se observó que la liberación duró aproximadamente 10 minutos, lo cual no es indicativo de una sobrepresión hidrostática simple.

El CSB determinó que, para que ocurriera cualquier evento de sobrepresión en este incidente, la válvula de control de presión o la tubería de salida de vapor del tambor acumulador de sobrepresión tenía que estar cerrada o restringida (**Figura 18**, abajo). Este escenario podría incluir que el dimensionamiento del orificio de la válvula de control de presión fuera simplemente demasiado pequeño para ventear con suficiente rapidez la presión generada en el tambor y evitar la sobrepresión.

Aun con el venteo cerrado o restringido, el amoníaco líquido saturado en el tambor acumulador de sobrepresión tenía que alcanzar 126 °F para lograr 300 psig, con base en las propiedades de equilibrio vapor-líquido del amoníaco [18, p. A.7]. De lo contrario, incluso si el intercambiador de calor no hubiera operado adecuadamente, no podría ocurrir una sobrepresión.

Es posible que agua anormalmente caliente ingresara al intercambiador de calor desde la línea *sous vide* y que, con el venteo del tambor cerrado o restringido^a, el agua caliente hubiera aportado la energía necesaria para que el lado de amoníaco del intercambiador de calor alcanzara 126 °F o más, causando una sobrepresión por ebullición del líquido o sobrepresión bifásica. La **Figura 18** ilustra este escenario potencial de sobrepresión.

^a En este contexto, el tamaño insuficiente de la válvula de control para este proceso específico también podría haber “restringido” la ventilación del tambor de compensación.

Sin embargo, otras perturbaciones del proceso también podrían haber causado la sobrepresión, junto con un venteo insuficiente a través de la línea de venteo para prevenirla. Sin datos del proceso, el CSB no pudo descartar múltiples escenarios potenciales de perturbación del proceso.

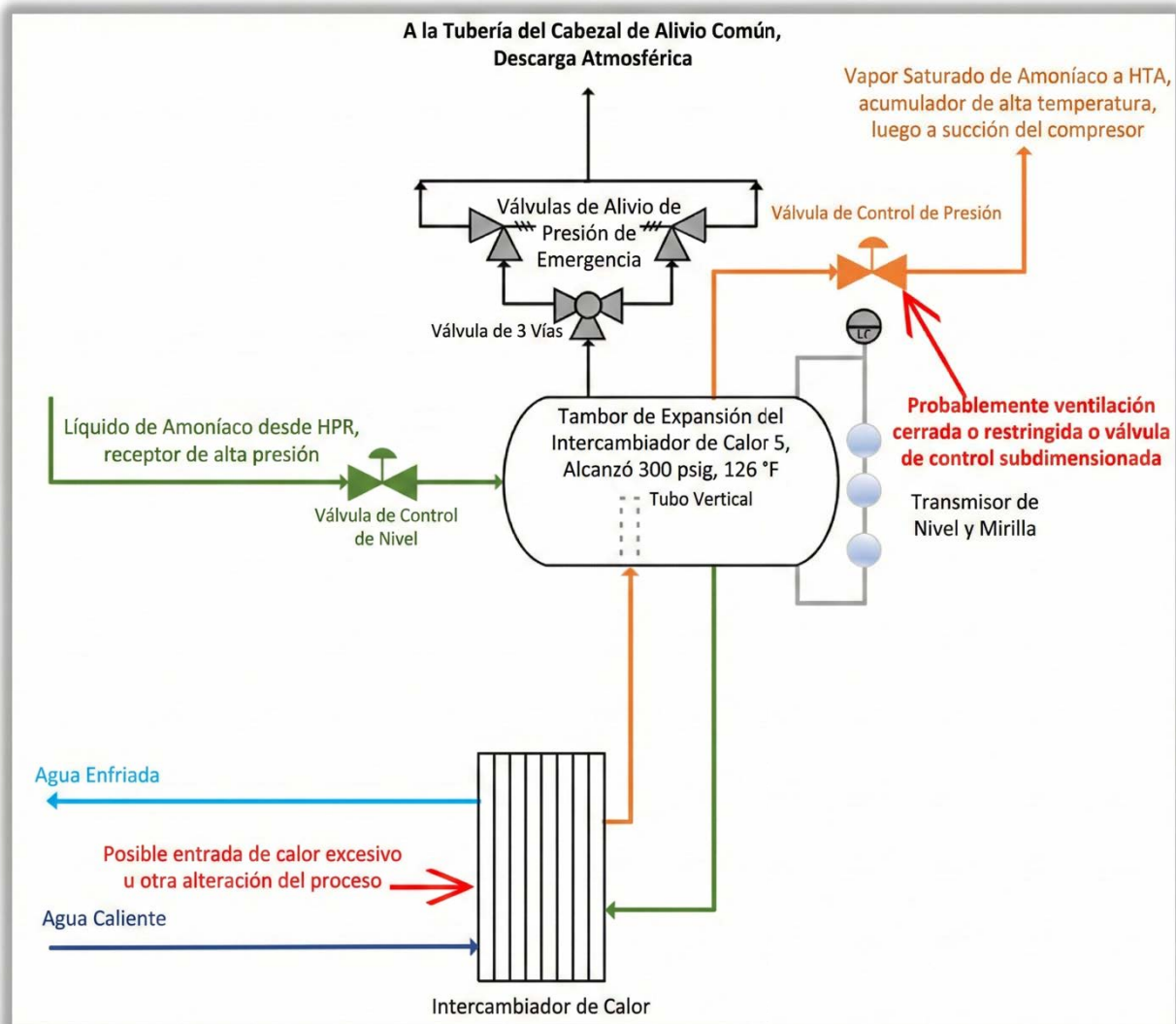


Figura 18: Escenario de sobrepresión potencial en el tambor de expansión del intercambiador de calor 5; ventilación cerrada o restringida combinada con una entrada de calor anómala. (Crédito: CSB)

El CSB concluye que la liberación de amoníaco fue resultado de un evento de sobrepresión y que una salida cerrada o restringida en el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5, combinada con una perturbación del proceso, probablemente inició el evento. No obstante, sin datos del proceso disponibles para análisis, no pudo determinarse la causa específica de la perturbación del proceso.

3.3 NUBE DE AMONIACO

El CSB contrató a un tercero independiente para realizar un análisis de dispersión de la liberación de amoníaco. Un análisis de dispersión es “una evaluación del resultado previsto de un incidente y de cómo afecta al equipo y a las personas en el entorno” [22]. El análisis incluye el mapeo de la posible nube de vapor resultante de una liberación tóxica.

El propósito del análisis de dispersión fue determinar las condiciones que podrían causar la nube de amoníaco observada a nivel del suelo y estimar las concentraciones de exposición de los evacuados. El análisis utilizó el modelo Process Hazards Analysis Software Tool (PHAST) versión 9.0 para representar visualmente los contornos de la nube de amoníaco y explicar el comportamiento de la nube. El informe detallado del estudio de modelación se incluye en el Apéndice D. El caudal de liberación para cada caso se basó en las condiciones modeladas para cada caso (Tabla 2 del Apéndice D). La modelación consideró varios factores que se esperaba afectarían las concentraciones de amoníaco a nivel del suelo, incluidos:

- las condiciones meteorológicas al momento del incidente;
- la cantidad de líquido aerosolizado^a en la liberación;
- la velocidad de descarga;
- la configuración de la tubería de descarga; y
- la elevación de la liberación de amoníaco.

En los casos de modelación que involucraban un difusor en T en la terminación de la tubería, el modelo PHAST no puede modelar ambas descargas de la T. En consecuencia, para estos casos solo se modeló y graficó la mitad orientada hacia el sur de la T. El lado sur de la T daba hacia la entrada de empleados y una de las rutas de evacuación. En la realidad, también existiría una descarga en imagen espejo a 180 grados de la descarga modelada, formando una nube de dos lóbulos, aunque no necesariamente simétrica. Los gráficos a continuación ilustran el modelo de dispersión únicamente para un lado de las descargas de la T. A lo largo de este informe, estos gráficos se denominan curvas de “media nube”^b.

3.3.1 CONCENTRACIONES DE AMONIACO

Los análisis de dispersión pueden utilizar diversas guías de concentración establecidas para determinar los efectos en humanos durante una liberación.

Algunas de estas se denominan Guías de Planificación para Respuesta a Emergencias (GPPE) y se clasifican en tres categorías:

^a Una liberación accidental puede incluir nubes de aerosol, que suelen estar formadas por gotas de líquido, vapor y aire. Las gotas de aerosol pueden ser pequeñas, de 5 micras o menos [27, p. 36].

^b Véase Apéndice D, en la página 6.

- GPRE-1 es “la concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas podrían estar expuestas hasta por 1 hora sin experimentar más que efectos adversos leves y transitorios para la salud”. Para el amoníaco, el valor de GPRE-1 es 25 ppm [23, pp. 780-781].
- GPRE-2 es “la concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas podrían estar expuestas hasta por 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos o síntomas irreversibles u otros efectos graves para la salud que pudieran afectar la capacidad de una persona para tomar medidas de protección”. Para el amoníaco, el valor de GPRE-2 es 150 ppm [23, pp. 780-781].
- GPRE-3 es “la concentración máxima en el aire por debajo de la cual casi todas las personas podrían estar expuestas hasta por 1 hora sin experimentar o desarrollar efectos para la salud que pongan en peligro la vida”. Para el amoníaco, el valor de GPRE-3 es 1.500 ppm [23, p. 781].

Otra guía de uso común es la concentración Inmediatamente Peligrosa para la Vida o la Salud (IPVS) establecida por el Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (NIOSH)^a para muchas sustancias químicas, a fin de caracterizar escenarios de exposición de alto riesgo. Según NIOSH, “los valores IPVS se establecen para garantizar que el trabajador pueda escapar de un entorno contaminado determinado en caso de falla del equipo de protección respiratoria e indicar un nivel máximo por encima del cual solo se permite un aparato de respiración altamente confiable, que proporcione la máxima protección al trabajador” [23, p. 783]. Las concentraciones IPVS se utilizan para proteger a los trabajadores y al público de exposiciones químicas de corto plazo y eventos poco frecuentes [23, p. 784]. La concentración IPVS para el amoníaco es 300 ppm [6, pp. 4-5].

Para los reportes de análisis de consecuencias del PGR de la EPA, la EPA define el “límite de concentración tóxica” de manera idéntica a la concentración GPRE-2 definida anteriormente [24, p. 4]. No obstante, aunque las definiciones son las mismas, los valores de concentración son diferentes. La EPA utiliza 200 ppm como límite de concentración tóxica para el amoníaco [24, p. 4], en lugar de los 150 ppm de la GPRE-2.

3.3.2 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

La modelación de dispersión del CSB utilizó las condiciones reales registradas por la estación meteorológica del Aeropuerto Internacional Washington Dulles lo más cercanas posible al momento de la liberación. El aeropuerto se encuentra aproximadamente a 2,7 millas del sitio de Sterling, lo que proporcionó al modelo de dispersión datos meteorológicos realistas sobre los cuales basar la modelación. En los momentos más cercanos antes y después del incidente, el viento provenía del sur-sureste con un promedio de 7,5 millas por hora, la temperatura promedio era de 85 °F y la humedad relativa promedio era de 60 por ciento.

^a El NIOSH “es el instituto federal responsable de realizar investigaciones y formular recomendaciones para la prevención de lesiones y enfermedades relacionadas con el trabajo”. [49]. <https://www.cdc.gov/niosh/about/index.html>

Todos los casos ejecutados en la modelación de dispersión utilizaron las mismas condiciones meteorológicas. Por lo tanto, los resultados de la modelación no pueden extrapolarse a otras condiciones, sino que estaban destinados a estimar la nube real ocurrida durante el incidente del 31 de julio de 2024.

3.3.3 NUBE VISIBLE

Tal como se describe en la **Sección 1.3**, el amoníaco anhidro condensa la humedad atmosférica cuando el amoníaco frío entra en contacto con aire cálido y húmedo [25, p. 29]. Durante el incidente, la humedad condensada hizo que la nube de amoníaco fuera brevemente visible (desde unos pocos segundos hasta unos pocos minutos) después de salir de la tubería de descarga del alivio. Debido a que la humedad atmosférica era alta en ese momento, la nube de amoníaco fue visible en videos de la liberación. La visibilidad de la nube fue una pista clave sobre las propiedades de la nube de amoníaco y las condiciones del proceso que pudieron haberla generado.

3.3.4 AEROSOL LÍQUIDO EN LA LIBERACIÓN

En la 36ª reunión anual del IIAR en 2014, se presentó un estudio de modelación de descargas atmosféricas exteriores de alivio de presión de emergencia de amoníaco, titulado *Modeling of Releases from Ammonia Refrigeration Pressure Relief Valves Using Dispersion Modeling Software* (“Technical Paper #6”)^a. Este estudio examinó el impacto de factores como gotas de líquido arrastradas en la liberación, denominadas “aerosoles”, la orientación de la liberación (vertical hacia arriba, horizontal o hacia abajo), la velocidad de descarga y la elevación de descarga [26, p. 1]. Este estudio de modelación utilizó una versión más antigua de PHAST, pero fue similar al análisis de dispersión realizado para este incidente. A lo largo de este informe, los hallazgos del Technical Paper #6 se utilizan como referencia y comparación con el análisis de dispersión del CSB y con normas de la industria y buenas prácticas.

Las primeras observaciones de los videos de la liberación de amoníaco en la planta de Sterling fueron que gran parte de la nube visible descendió hasta el nivel del suelo cerca del punto de liberación y que al menos parte de la nube lo hizo en cuestión de pocos segundos. La presencia de amoníaco líquido en la descarga aumenta la densidad de la nube debido tanto a la alta densidad del líquido como a las bajas temperaturas generadas por gotas que destellan. Incluso una pequeña cantidad de líquido o aerosol en una liberación puede crear mayores riesgos de exposición, porque una nube más fría y densa puede descender hasta el nivel del suelo, potencialmente entrando en contacto con las personas. **La Tabla 2** ilustra este punto. Al modelar varios escenarios de liberación para amoníaco refrigerante, el Technical Paper #6 señaló una diferencia significativa de propiedades entre una liberación de vapor cálido, una liberación de vapor frío y una liberación con aerosol, a medida que el amoníaco sale por la descarga de alivio. Por ejemplo, el vapor de amoníaco cálido tiene una gravedad específica relativa al aire de 0,58, lo que significa que sería flotante en el aire. Una liberación de amoníaco con 12 por ciento en peso de aerosol líquido tiene una gravedad específica de 6,04 (resaltada en la **Tabla 2**), lo que significa que descendería hasta el suelo antes de que el amoníaco pudiera mezclarse lo suficiente con el aire circundante [26, pp. 18-19]. Con el tiempo, el amoníaco puede calentarse hasta la temperatura atmosférica a medida que se mezcla con el aire circundante y absorbe suficiente calor para evaporarse, convirtiéndose en vapor cálido

^a A lo largo del resto de este informe, este estudio se denominará “Technical Paper #6”

y flotante. En el incidente de la planta de Sterling, hubo evidencia de un arrastre significativo de líquido o de flujo bifásico, dada la tasa de descenso observable de la nube inicial de amoníaco, como se muestra en la **Figura 19** y en los resultados del análisis de dispersión.

Tabla 2: Propiedades del vapor y el aerosol de amoníaco a partir del Modelo de emisiones de válvulas de alivio de presión de refrigeración por amoníaco utilizando software de modelización de dispersión . (Crédito: Timm)

Fluido	Condición	Temperatura (°F)	Gravedad específica (relativa al aire a 77 °F)
Amoníaco antes de mezclarse con el aire	Vapor caliente	77	0.58
	Vapor frío	-28	0.74
	Vapor de amoníaco con gotas líquidas, fracción másica del 12 %	-28	6.04
Amoníaco en el aire	Aerosol de amoníaco en aire, 0.0001 % de masa líquida remanente, 118.000 ppm de amoníaco	-90	1.38



Figura 19: Parte del amoníaco liberado cayó rápidamente al nivel del suelo en un radio de entre 6 y 9 metros horizontales desde el punto de liberación. (Crédito: Cuisine Solutions)

El modelo de dispersión del Apéndice D comparó diversas composiciones de la corriente de alivio, desde 100 por ciento en peso de líquido en la entrada de la VAPE hasta 100 por ciento en peso de vapor en la entrada, así como algunos casos intermedios. Ninguno de los casos de solo vapor mostró el comportamiento de la nube observado durante el incidente en la planta de Sterling. La **Figura 20** muestra la media nube del modelo que representa la liberación en la noche del incidente si la liberación hubiera sido de 100 por ciento en peso de vapor. En este modelo, la concentración a nivel del suelo se encuentra por debajo de 25 ppm (curva azul) y las concentraciones IPVS (300 ppm, curva roja) se mantendrían al menos 30 pies por encima del suelo. Para este escenario, el modelo no predijo ningún descenso de la nube hasta el nivel del suelo. Dado que el descenso de la nube hasta el nivel del suelo se observó claramente en los videos del incidente, puede descartarse una liberación solo de vapor, ya que no explica adecuadamente la dinámica de la liberación real.

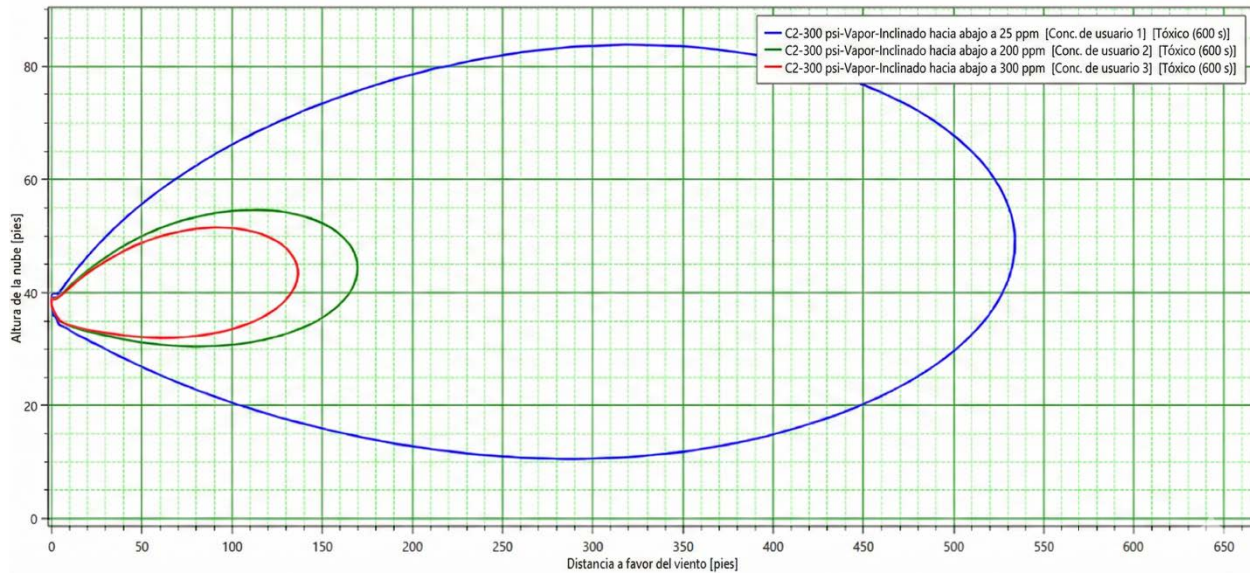


Figura 20: Modelo de media nube de una liberación solo de vapor en la noche del incidente. Dado que esta nube permanece en altura, es poco probable que se haya producido una liberación solo de vapor. (Crédito: CSB)

El CSB concluye que la liberación de amoníaco no estaba completamente vaporizada en la descarga a la atmósfera, porque la modelación de dispersión de una liberación solo de vapor no concuerda con las observaciones de la nube de amoníaco durante el incidente.

El análisis de dispersión concluyó que la liberación real probablemente contenía un componente significativo de aerosol líquido. Con base en observaciones de los videos de la nube visible y en los resultados de los escenarios del análisis de dispersión, el caso del análisis que más se asemejó al comportamiento real de la nube fue 100 por ciento en peso de líquido en la entrada de la VAPE y 69 por ciento en peso de líquido en la descarga de la tubería de alivio (caso 1 del Apéndice D)^a. Esta diferencia en la fracción líquida en el modelo representa el destello del amoníaco a través del orificio de la VAPE, a través de la tubería de descarga del alivio y durante la expansión inicial a presión atmosférica en el punto de descarga. El caso de solo vapor mostrado en la **Figura 20** indicó que las concentraciones IPVS permanecían aproximadamente 30 pies por encima del suelo, mientras que el caso con líquido en la **Figura 21** indicó que había concentraciones IPVS a nivel del suelo hasta aproximadamente entre 50 y 160 pies a sotavento. El análisis de dispersión del Apéndice D también indicó

LECCIÓN CLAVE

Aunque un análisis de dispersión no relaciona la nube visible con la nube tóxica, el análisis, cuando se combina con un vídeo de la nube visible, muestra claramente que gran parte de una nube tóxica de amoníaco también puede ser invisible. NO se acerque a una nube de amoníaco sin el equipo de protección personal (EPP) adecuado.

^a El objetivo del modelo de dispersión no era cuantificar la fracción líquida en la fuga. El caso citado se utilizó simplemente para demostrar que, cualitativamente, era probable que el líquido fuera predominante en la fuga. No se debe sobreinterpretar el modelo en este escenario.

que el área expuesta a concentraciones IPVS a nivel del suelo aumentaba a medida que aumentaba el contenido de líquido en la descarga.^a

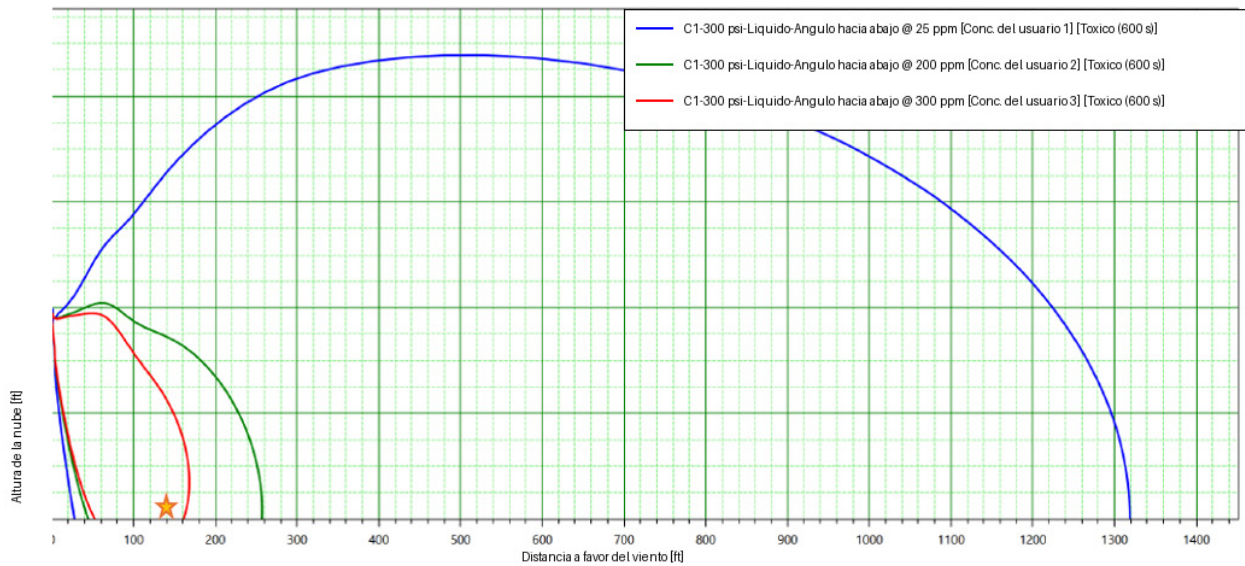


Figura 21: Media nube del caso modelado que más se asemejaba a las observaciones reales de las nubes. La curva roja es el límite IDLH de 300 ppm, la verde es de 200 ppm y la azul es de 25 ppm. La estrella naranja indica la ubicación aproximada de la entrada principal de los empleados. (Crédito: CSB)

La entrada de empleados se encontraba aproximadamente a 128 pies horizontales del punto de liberación. La Figura 21 muestra que esta puerta de entrada (estrella naranja) podría haber estado dentro de la nube IPVS, lo que significa que decenas de evacuados que salieron del edificio por el lado oeste podrían haber estado expuestos a vapores de amoníaco que excedían la concentración IPVS durante la evacuación. Al menos dos puertas de salida de emergencia estaban más cerca de la liberación que la entrada de empleados, pero fueron utilizadas por solo aproximadamente seis personas durante la evacuación.

El CSB concluye que la liberación de amoníaco contenía aerosol líquido, lo que resultó en una nube de amoníaco que descendió rápidamente y alcanzó el nivel del suelo. La nube a nivel del suelo probablemente contenía concentraciones IPVS de amoníaco en áreas por las que los trabajadores pasaron durante la evacuación, incluso en el exterior de algunas de las puertas de salida de emergencia de la planta.

3.3.5 CANTIDAD DE LIBERACIÓN

Durante el incidente, la liberación de amoníaco probablemente se detuvo después de que el técnico de refrigeración detuvo los compresores y el gerente de refrigeración cerró la válvula principal de

^a Véase, por ejemplo, la figura 19 del apéndice D.

aislamiento (Sección 2.4). Con base en las grabaciones de cámaras de seguridad y en entrevistas con empleados, el CSB estima que la liberación duró al menos 10 minutos.

Con base en una liberación estimada de 10 minutos, el CSB estima que la cantidad total liberada fue de aproximadamente 275 libras de amoníaco, utilizando una tasa de liberación de 1.647 libras por hora. Esta es la tasa de liberación para el caso con líquido que más coincidió con las observaciones reales del incidente en la modelación de dispersión (caso 1 del Apéndice D)^a.

El CSB concluye que la cantidad liberada fue de aproximadamente 275 libras, con base en la tasa de alivio prevista para un escenario de alivio con líquido, que fue el que mejor representó el evento real.

Esta determinación indica el impacto significativamente mayor que puede tener una liberación que contiene aerosol líquido en comparación con una liberación completamente en vapor. Para un proceso del Programa 3 como el de la planta de Sterling, la norma del PGR de la EPA exige un análisis de liberación de peor caso y al menos un análisis alternativo adicional [12, p. 2.18]. El caso alternativo de Cuisine Solutions fue una liberación completamente en vapor de 900 libras de amoníaco desde el área de la sala de compresores, lo que no indicó efectos previstos fuera del sitio, pero sí predijo límites de concentración tóxica en el estacionamiento de empleados y a lo largo de rutas de evacuación. Aun con una cantidad significativamente menor de amoníaco, una liberación con aerosol puede tener consecuencias similares o peores.

3.3.6 EFECTOS DE ESTELA DEL EDIFICIO

Durante un evento de liberación, una pluma que de otro modo podría elevarse o permanecer en altura puede ser arrastrada hacia una región de estela de baja presión en o cerca del lado a sotavento (o lado de abrigo) de un obstáculo como un edificio, y ser llevada hacia el suelo [27, p. 35]. Tales fenómenos se conocen como efectos de estela del edificio. Por lo tanto, el personal a nivel del suelo puede estar expuesto a una nube tóxica incluso si la fuente está elevada y en el lado opuesto de un edificio. La **Figura 22** muestra una vista generalizada de cómo puede formarse la región de estela a sotavento de una liberación en el lado de abrigo de un edificio.

^a Cuisine Solutions estimó que la cantidad liberada fue de 170 libras de amoníaco anhidro. Esto se corresponde con la capacidad de alivio de vapor de la VAPE, multiplicada por una duración de liberación de 20 minutos. La estimación de liberación de la CSB es mayor en parte debido al contenido líquido de la liberación.

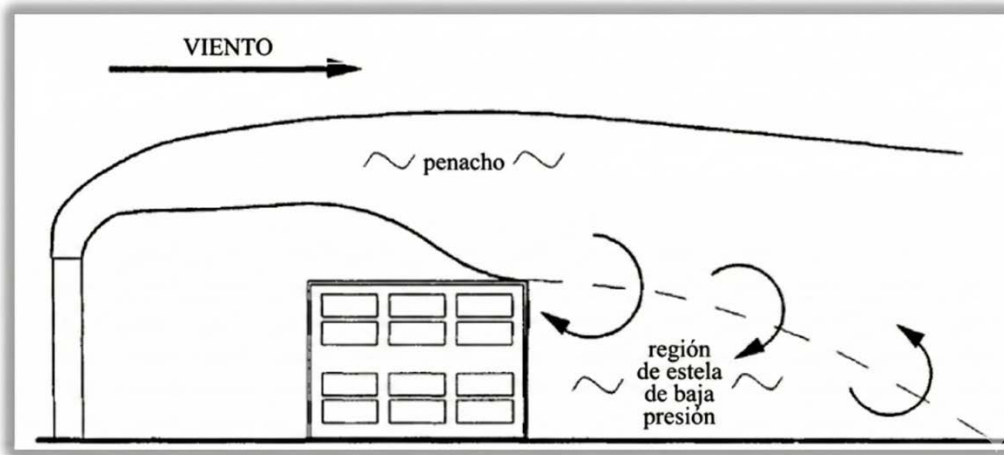


Figura 22: Ilustración generalizada de la estela de un edificio en el lado de sotavento, con la columna de humo descendiendo hasta el nivel del suelo [27, p. 35]. (Crédito: CCPS)

En la noche del incidente, aunque una parte significativa de la nube de amoníaco descendió inicialmente hasta el nivel del suelo, una porción de la nube visible permaneció en altura y se desplazó sobre el techo del edificio, aun cuando no se observó nube visible en el lado este del edificio, tal como se describe en la **Sección 2.3**. No obstante, el video de la nube indicó que parte del vapor visible de amoníaco se desplazó sobre el techo hacia los lados norte o este del edificio, como se muestra en la **Figura 23**. Además, los fuertes olores a amoníaco reportados dentro del edificio se debieron a que el amoníaco migró al interior, probablemente a través de una toma de una unidad de Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) en el techo cerca de la ubicación de descarga del alivio (recuadro rojo en la **Figura 23**), a partir de esta porción flotante de la liberación.



Figura 23: Gran parte del amoníaco liberado cayó al suelo (parte inferior izquierda), pero parte permaneció en el aire sobre el tejado del edificio (óvalo rojo). Obsérvese la unidad de climatización en la nube visible (recuadro rojo). (Crédito: Empleados de Cuisine Solutions, con anotaciones de la CSB).

El CSB preguntó a varios evacuados dónde habían oído amoníaco durante la evacuación. Todos los evacuados entrevistados por el CSB olieron amoníaco cerca de la esquina noreste del edificio, y algunos señalaron que el olor era más fuerte allí^a. Las grabaciones de cámaras de seguridad mostraron a algunos evacuados dudando mientras evacuaban y a algunos retrocediendo temporalmente en esta área durante la evacuación, probablemente debido al olor. No había nube visible en el lado este del edificio, pero al menos un evacuado comenzó a tener dificultad para caminar y respirar en esta área. La Figura 24 ilustra las observaciones de los evacuados sobre el olor, en comparación con la ruta de evacuación.

El supervisor del edificio del Servicio de Inspección Postal ubicado al otro lado de la vía frente al sitio de Sterling llamó al 911 durante el incidente y reportó un olor fuerte afuera del edificio (**Sección 2.4**). El

^a Sin embargo, es posible que estos empleados no hayan estado cerca de la fuga en el lado oeste del edificio en ningún momento.

supervisor le dijo al operador del 911: “apenas se puede respirar afuera”, lo que indica que al menos parte del olor cruzó la vía y salió del sitio de Sterling de Cuisine Solutions.

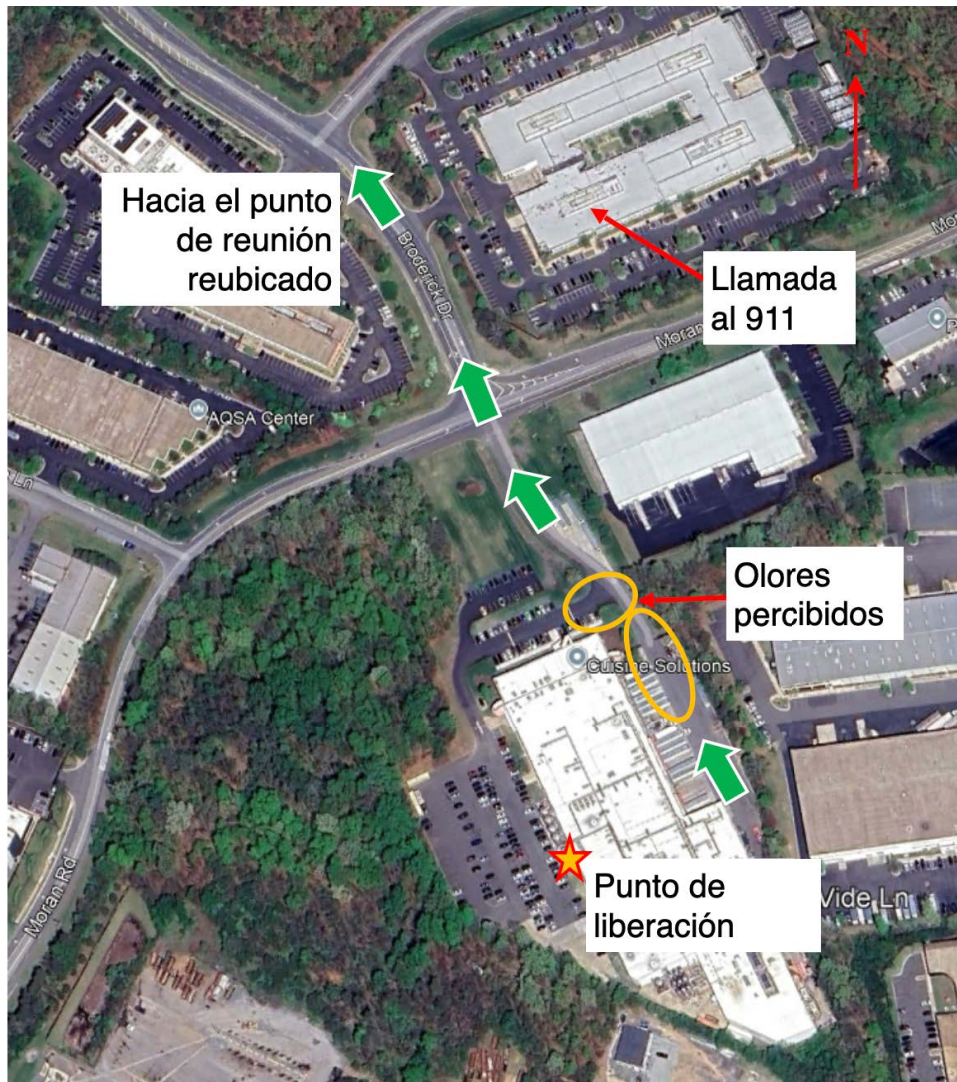


Figura 24: Observaciones de olores realizadas por los evacuados (óvalos) en el lado este del edificio, por donde caminaron los evacuados (flechas verdes). (Crédito: Google Earth, anotado por CSB)

El CSB concluye que, aunque la liberación ocurrió en el lado oeste del edificio, los efectos de estela del edificio probablemente contribuyeron a la presencia de olores a amoníaco a nivel del suelo a lo largo de la ruta de evacuación en el lado este del edificio.

3.4 ESCENARIOS POTENCIALES DE LÍQUIDO EN LA DESCARGA DE ALIVIO

Muchos sistemas de alivio de presión de emergencia en refrigeración por amoníaco están diseñados para aliviar únicamente vapor, y no líquido, desde el espacio de vapor de los recipientes [26, p. 14]. Sin

embargo, es posible que en algunos escenarios de alivio se descarguen gotas de líquido o aerosoles junto con el vapor. Estos escenarios pueden incluir: (i) que un recipiente se sobrellene de líquido, (ii) que el hinchamiento del líquido conduzca a un arrastre de líquido debido a una reducción súbita de presión en un recipiente cuando se abre una VAPE, o (iii) que exista un espacio de vapor insuficiente en el recipiente para la separación vapor-líquido [26, pp. 14, 18].^a

Los tambores acumuladores de sobrepresión de Tank Farm 5 eran recipientes cilíndricos horizontales, de 20 pulgadas de diámetro y 96 pulgadas de longitud. En operación normal, habría habido aproximadamente 17 pulgadas de espacio de vapor dentro de los recipientes; sin embargo, si el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 presentaba un nivel alto de líquido al momento del incidente o ebullición rápida en el intercambiador de calor o en el tambor acumulador de sobrepresión, la altura y el volumen disponibles para la separación vapor-líquido podrían haber sido mucho menores. Además, un tambor acumulador de sobrepresión con un nivel y temperatura de líquido anormalmente altos generaría mayor turbulencia interna, similar a una olla de agua hirviendo rápidamente en una estufa. Si una VAPE se abriera bajo tales circunstancias, la presión dentro del tambor disminuiría, creando un escenario en el que burbujas de amoníaco que se vaporizan rápidamente son forzadas hacia arriba a través de un líquido saturado, arrastrando gotas de líquido con las burbujas. El concepto se ilustra en la **Figura 25**.

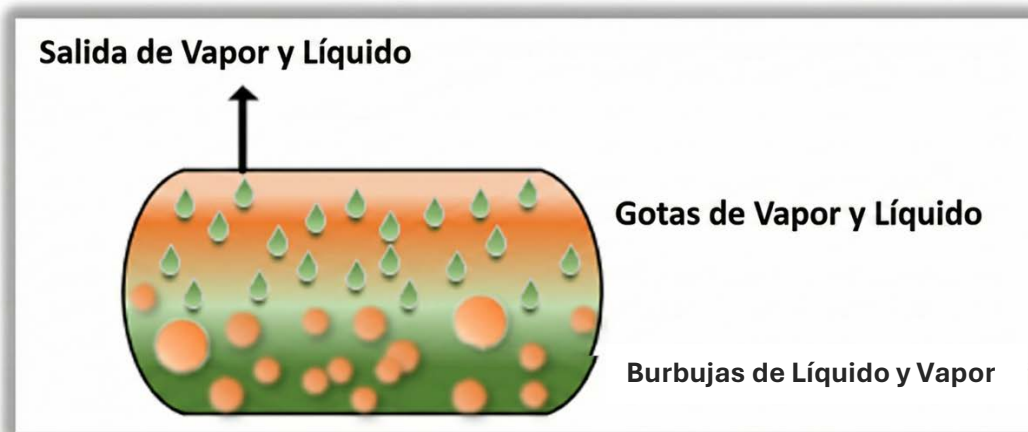


Figura 25: Arrastre de líquido en un recipiente de ebullición generalizada [28, p. 466]. (Crédito: CSB, adaptado del Manual de refrigeración industrial)

El CSB concluye que, la noche del incidente, la liberación de amoníaco contenía aerosol líquido proveniente del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5, probablemente debido a (1) sobrellenado con líquido en ebullición, (2) arrastre de líquido causado por un nivel alto de líquido y una caída súbita de presión cuando se abrió la VAPE, o (3) espacio de vapor insuficiente para la separación vapor-líquido, o una combinación de estos factores. Como resultado, la liberación de amoníaco, que contenía aerosol líquido, permitió que concentraciones Inmediatamente Peligrosas para la Vida o la Salud (IPVS) alcanzaran el nivel del suelo cerca del edificio y de las rutas de evacuación.

^a Una corriente de aerosol incluye gotas de líquido y vapor [38, p. 2].

3.5 IMPACTO DE LA TUBERÍA DE DESCARGA DEL ALIVIO

En un análisis de dispersión, normalmente hay tres variables^a que son importantes: (i) la velocidad de descarga del material al salir de la tubería de alivio, (ii) la configuración de la tubería de descarga, como descargar verticalmente hacia arriba o en ángulo, o si se descarga a través de una sola tubería o de una T, y (iii) la elevación de la descarga. Estos elementos de diseño pueden ayudar a la dispersión de una liberación tóxica, pero con limitaciones. Aun así, deben cumplirse otros requisitos de diseño, como las limitaciones de contrapresión para el tipo específico de VAPE utilizada. El diseño de la tubería de descarga del alivio debe optimizar y equilibrar todas estas variables y requisitos.

La modelación de dispersión del Apéndice D analizó el efecto que cambios en el diseño de la tubería de descarga podrían haber tenido en la dispersión de la nube del incidente en la planta de Sterling. El análisis tuvo como propósito determinar únicamente los efectos potenciales en la dispersión de la nube tóxica, y no evaluó otros requisitos de diseño como la contrapresión en los dispositivos de alivio.

Velocidad de descarga

En los sistemas existentes de refrigeración por amoníaco, los dispositivos de alivio de presión de emergencia a menudo descargan hacia un colector de alivio común [26, p. 21], como en la disposición de Tank Farm 5. Esto inevitablemente da lugar a múltiples velocidades de descarga, dependiendo de qué dispositivos se activen y de los diámetros de tubería involucrados en una liberación determinada.

La descarga del colector de alivio común de Tank Farm 5 era una tubería de 3 pulgadas en el difusor en T. La noche del incidente, la VAPE que se abrió tenía una entrada de ½ pulgada y una salida de ¾ de pulgada, con una capacidad de aproximadamente 9 libras por minuto de vapor de amoníaco. Esta combinación de caudal más bajo y una tubería de descarga más grande significa que la velocidad de descarga fue baja, aproximadamente de 26 a 31 pies por minuto (casos 1 y 2 del Apéndice D)^b.

En el caso de liberación con aerosol líquido, aumentar la velocidad de descarga hasta aproximadamente 465 pies por segundo —o aproximadamente 15 veces la velocidad real durante el incidente— no habría evitado que concentraciones IPVS de 300 ppm o superiores alcanzaran el nivel del suelo (caso 17 del Apéndice D), incluso si hubiera existido una descarga vertical única en lugar de una T, como se muestra en la **Figura 26** abajo.

^a Estas no son las únicas tres variables importantes en el análisis de dispersión.

^b Este rango en la velocidad de descarga refleja la diferencia entre una liberación totalmente gaseosa y una liberación predominantemente líquida. Dado que se desconoce el contenido líquido exacto, se indica el rango de velocidades. Véase el apéndice D, en la página 13, casos 1 y 2.

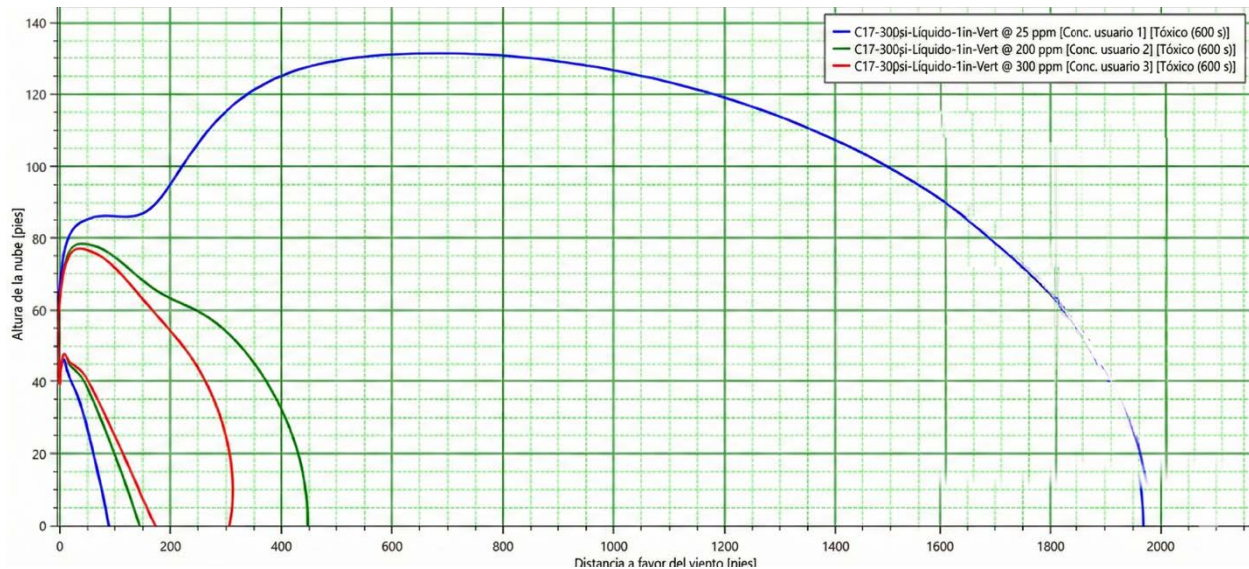


Figura 26: Nube de liberación de amoníaco con una tubería de descarga vertical de 1 pulgada. Con líquido en la descarga, las concentraciones IDLH (300 ppm, curva roja) y el punto final tóxico (200 ppm, curva verde) aún podrían alcanzar el nivel del suelo.^a (Crédito: CSB)

El Technical Paper #6 estimó la velocidad de descarga adecuada para un aerosol de 12 por ciento en peso:

- 250 pies por segundo es adecuado a 10 libras por minuto;
- 500 pies por segundo es adecuado a 100 libras por minuto; y
- 750 pies por segundo es adecuado a 500 y 1.000 libras por minuto [26, p. 31].

En la modelación de dispersión de este incidente, una mayor velocidad de descarga y una tubería única de descarga vertical de 1 pulgada (caso 17) mejoraron la dispersión de la nube antes de alcanzar el nivel del suelo, en comparación con el caso base 1 de la **Figura 21** arriba. No obstante, en el caso 17, una nube a concentración IPVS aún alcanzó el nivel del suelo y podría afectar a los evacuados a aproximadamente 100 pies o más del punto de liberación. Dado que las puertas de entrada de empleados en la planta de Sterling se encontraban aproximadamente a 128 pies al sur del punto de liberación, los evacuados que salieron por esa puerta aún podrían haber ingresado en una nube IPVS durante la evacuación, aunque fuera brevemente. Si bien el caso 17 cumplió con las directrices del Technical Paper #6 anteriores para velocidad de descarga, también probablemente tenía un contenido de líquido significativamente mayor^b que el utilizado en el Technical Paper #6 y, por ello, la nube aun así descendió hasta el nivel del suelo.

Configuración de la tubería de descarga

^a Caso 17 en el Apéndice D.

^b El contenido líquido del caso 17 era del 69 % en peso, mientras que el aerosol modelado en el documento técnico n.º 6 era del 12 % en peso.

El colector de alivio común de Tank Farm 5 terminaba en un difusor en T de 3 pulgadas con corte biselado a 60 grados (**Figura 8** arriba). Esta configuración probablemente contribuyó a que la nube de amoníaco descendiera y alcanzara a los evacuados de varias maneras:

- El gran diámetro de la tubería de descarga en relación con el tamaño del orificio de la VAPE limitó la velocidad del material que salía de la descarga de alivio;
- La división hacia el difusor en T de 3 pulgadas redujo aún más la velocidad de descarga;
- Las dos descargas horizontales eliminaron el impulso ascendente del material que salía de la descarga de alivio; y
- El corte biselado de 60 grados en la descarga horizontal dirigió aún más hacia abajo el material que salía de la descarga de alivio. Este fenómeno se detalla en el Apéndice D.

La **Figura 27** muestra las diferencias modeladas entre el difusor en T con corte biselado instalado al momento del incidente (azul); otros difusores en T con extremos orientados horizontalmente (morado), hacia arriba a 45 grados (rosa) y verticalmente hacia arriba (azul claro); y una descarga única de 1 pulgada con mayor velocidad de descarga como se analizó anteriormente (marrón). Para una descarga de alivio que contiene una fracción líquida significativa, los cambios en la orientación de descarga aún resultan en concentraciones IPVS de amoníaco a nivel del suelo en todos los casos^a. Si bien la descarga vertical con una sola tubería (curva marrón en la **Figura 27**) mostró una mejora marginal, las medias nubes para los difusores en T en todas las orientaciones son similares.

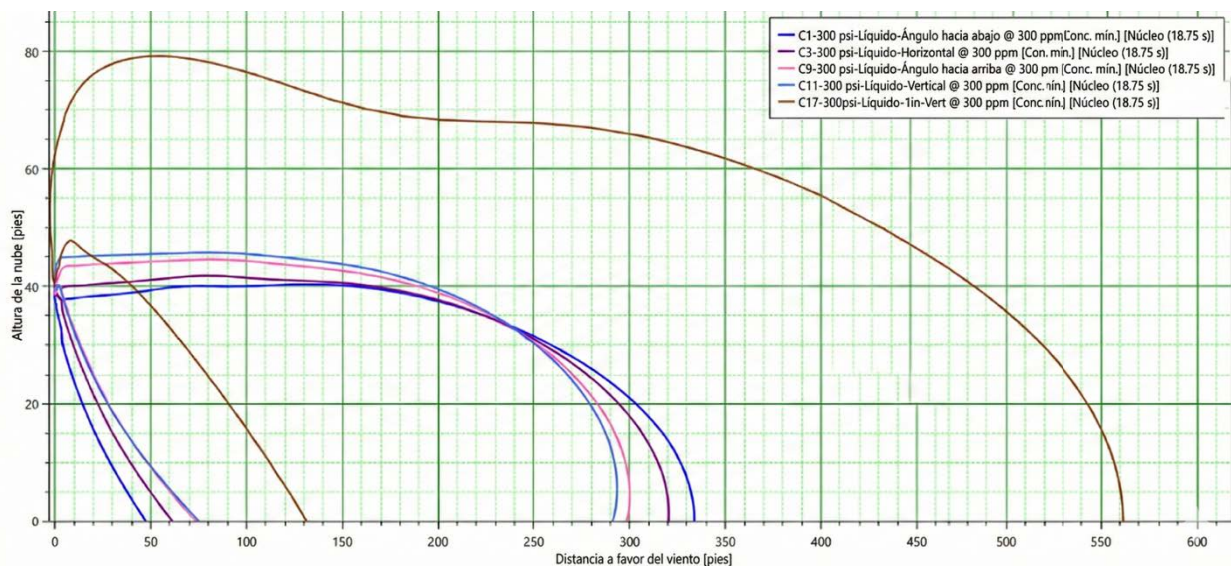


Figura 27: Medias nubes que muestran curvas de 300 ppm para cuatro orientaciones del difusor en T, en comparación con la nube completa para una sola descarga vertical a mayor velocidad de descarga (curva marrón). (Crédito: CSB)

^a Véase casos 1, 3, 9, 11, y 17 en Apéndice D.

Elevación de la liberación

Al momento del incidente, la descarga del colector de alivio común de Tank Farm 5 se encontraba aproximadamente a 39 pies sobre el nivel del suelo, o aproximadamente 15 pies por encima de un techo de 24 pies. Aun así, gran parte de la liberación de amoníaco alcanzó el nivel del suelo en cuestión de segundos, como se observa en videos (**Figura 19**).

Todos los casos del modelo de dispersión del Apéndice D, excepto uno, se completaron a 39 pies sobre el nivel del suelo, igual que las condiciones reales en la noche del incidente. Se ejecutó un caso del modelo a una elevación de 55 pies para determinar si una elevación de descarga mayor podría haber reducido la concentración de amoníaco a nivel del suelo durante el incidente.

El análisis de dispersión muestra que, aun si Cuisine Solutions hubiera instalado una descarga de 1 pulgada en orientación vertical hacia arriba y a una elevación de 55 pies, una liberación predominantemente líquida aún resultaría en concentraciones IPVS de amoníaco a nivel del suelo, aunque en un área menor^a. La **Figura 28** compara dicha liberación, con las mismas condiciones meteorológicas y líquido arrastrado, con el caso del modelo más similar a la nube de amoníaco del incidente real^b. La **Figura 28** muestra que los cambios en la tubería de descarga podrían haber mitigado marginalmente la exposición del personal durante el incidente, pero aun así se habrían presentado concentraciones IPVS a nivel del suelo. La configuración original de la tubería resultó en dos nubes IPVS a nivel del suelo de aproximadamente 300 pies de ancho (la curva azul es media nube), mientras que la tubería mejorada resultó en una sola nube de tamaño aproximadamente similar (curva morada).

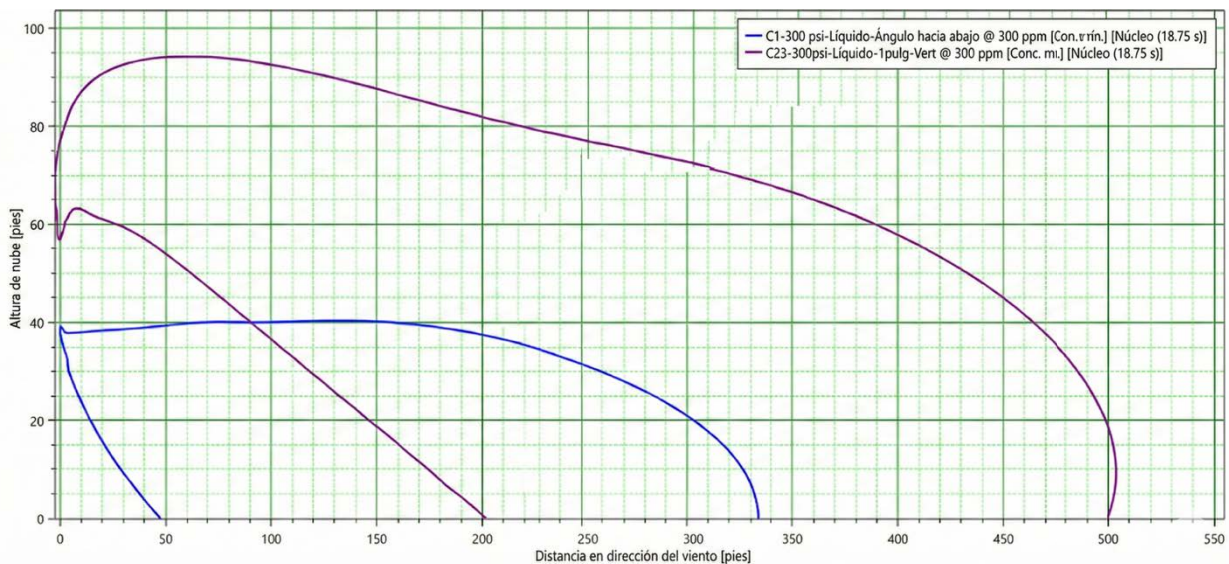


Figura 28: Modelo de media nube más parecido a la liberación real (azul), comparado con una liberación similar, pero con una velocidad de descarga, orientación y elevación mejoradas (nube

^a Como se ha señalado anteriormente en esta sección, el modelo de dispersión no tuvo en cuenta los requisitos de contrapresión de las VAPE convencionales ni de otros tipos de VAPE. El análisis tenía por objeto determinar únicamente los posibles efectos sobre la dispersión de nubes tóxicas.

^b El caso 23 es el caso idealizado de tuberías, con una alta velocidad de descarga, una sola tubería de descarga vertical y una elevación de 55 pies, en comparación con el caso 1, el caso más cercano a la nube real observada, en el Apéndice D.

completa, morado). Las curvas corresponden a concentraciones IDLH (300 ppm). (Crédito: CSB) El CSB concluye que, la noche del incidente, el líquido en la descarga de alivio fue el factor más crítico en las condiciones IPVS a nivel del suelo, y que cambios factibles en la velocidad de descarga, la orientación y la elevación probablemente no habrían evitado que las concentraciones IPVS alcanzaran el nivel del suelo.

De manera consistente con el análisis de dispersión para la liberación de amoníaco en la planta de Sterling, el Technical Paper #6 predijo que, para aerosoles líquidos de 12 por ciento en peso liberados a 250 pies por segundo o menos, una elevación de descarga de 15 a 30 a 45 pies indicaba “[s]olo una reducción marginal (mejora) en la distancia a sotavento” [26, pp. 25-26] a medida que aumentaba la elevación de descarga^a.

El CSB concluye que, cuando hay líquido presente en la descarga de alivio, la velocidad de descarga, una orientación de descarga vertical y una elevación mayor pueden ser insuficientes para contrarrestar la densidad de una liberación bifásica de amoníaco y prevenir concentraciones inseguras de amoníaco a nivel del suelo.

^a Incluso para emisiones de vapor caliente (77 °F), el Documento Técnico n.º 6 predijo que «una mayor elevación de la descarga no proporciona una mejora constante en la distancia a favor del viento hasta 200 PPMV» cuando la descarga es superior a 100 libras por minuto [26, p. 29].

4 ASUNTOS DE SEGURIDAD

Las siguientes secciones analizan los asuntos de seguridad que contribuyeron al incidente, incluidos:

- Alivio atmosférico bifásico
- Descarga hacia un lugar seguro
- Preparación para emergencias

El **Apéndice A** contiene el mapa del accidente (AcciMap), que presenta un análisis gráfico de este incidente.

4.1 ALIVIO ATMOSFÉRICO BIFÁSICO

El sistema de refrigeración por amoníaco de la planta de Sterling contaba con sistemas de alivio de presión de emergencia que descargaban amoníaco a la atmósfera, como se analizó en la **Sección 1.4**. En Tank Farm 5, la descarga atmosférica ventilaba junto al estacionamiento de empleados y al edificio, lo que restringió la capacidad de evacuar al personal de manera segura durante el incidente. Como se muestra en la **Sección 3.3**, aunque esta configuración podría haber sido aceptable para una liberación de vapor cálido, en escenarios de alivio que involucraban aerosoles líquidos o flujo bifásico (líquido y vapor) desde la descarga del colector de alivio común, dio como resultado concentraciones Inmediatamente Peligrosas para la Vida o la Salud (IPVS) de amoníaco a nivel del suelo.

Como se analiza en la **Sección 3.3.4**, en la planta de Sterling, el factor más significativo en la rápida tasa de descenso de la nube de amoníaco fue la presencia de aerosol líquido en la descarga. La tasa de descenso fue evidencia de que la descarga de la VAPE contenía líquido por una o una combinación de las siguientes causas:

- sobrellenado de líquido en el Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5;
- arrastre a través de la tubería de alivio del Tambor acumulador de sobrepresión del Intercambiador de Calor 5 debido a un nivel alto de líquido y una reducción súbita de presión cuando se abrió la VAPE; o
- espacio de vapor insuficiente para la separación vapor-líquido (**Sección 3.4**).

Respecto a los aerosoles de amoníaco, el *Stoecker's Ammonia Refrigeration Handbook* señala:

Probablemente la liberación de amoníaco más traicionera es en forma de aerosol [...]. Pequeñas gotas de líquido se dispersan en todo el vapor, y la vaporización de este líquido desarrolla una combinación fría y densa que por lo general se adhiere al suelo, en lugar de elevarse rápidamente y alejarse de las personas y la vegetación [28, p. 467].

El *Refrigeration Piping Handbook* del IIAR (2019) indica que la descarga de alivio de presión de emergencia y la dispersión a la atmósfera es el método principal de disposición: “Descargue a la atmósfera las válvulas de alivio de vapor siempre que sea posible; ANSI/IIAR 2 prefiere este método” [29, p. 6.14]. El IIAR explica que la descarga de vapor de amoníaco a la atmósfera es benigna para el ambiente y que los riesgos de exposición a altas concentraciones del amoníaco liberado son muy bajos cuando los sistemas de alivio se instalan conforme a las normas de la industria y cuando están vigentes todas las demás medidas exigidas por código para controlar las presiones del sistema [30]. Por lo tanto, es crucial prevenir la presencia de líquido y aerosoles en la descarga atmosférica de alivio de presión de emergencia.

El fenómeno del sobrellenado de líquido o del arrastre de líquido no es nuevo y se ha discutido anteriormente en publicaciones sobre refrigeración por amoníaco. Sin embargo, rara vez se ha aplicado a la prevención de escenarios de alivio con aerosol en sistemas de refrigeración por amoníaco [28, pp. 465-466, 31, pp. 304-305, 32, pp. 11, 33-34]. El estudio de modelación del Technical Paper #6 seleccionó específicamente una liberación con aerosol líquido de 12 por ciento en peso para su análisis, explicando:

La condición de aerosol frío se seleccionó intencionalmente para asegurar la formación de una pluma inicialmente más densa que el aire ambiente, pero con líquido insuficiente para que ocurra precipitación (“rainout”) y se forme un charco de líquido [26, p. 14].

El estudio de modelación del Technical Paper #6 incluyó aerosoles de manera explícita para examinar factores de mitigación en liberaciones con aerosol [26, p. 18], lo cual se analiza más adelante en la **Sección 4.2.1**. Para la liberación de la planta de Sterling, también es valioso considerar cómo podría haberse prevenido la liberación con aerosol en primer lugar. Prevenir una liberación atmosférica de aerosol líquido probablemente habría resultado en consecuencias menos graves, incluso si la VAPE se hubiera activado de todos modos (**Sección 3.3**).

El IIAR Technical Paper #9 (2002), *What the Heck Do I Do with My Relief Valves?*, señaló la importancia de evitar líquido en una descarga de alivio de vapor, indicando:

Las conexiones de alivio de vapor deben ubicarse lo suficientemente por encima del nivel de líquido para que grandes cantidades de amoníaco líquido o aceite no sean arrastradas por el flujo de vapor. Qué tan por encima es debatible... [31, p. 305]

La posibilidad de perturbaciones del proceso, como sobrellenado de líquido o arrastre de líquido en una descarga de alivio en escenarios que de otro modo serían solo de vapor, es conocida en la industria de la refrigeración, así como por el IIAR, como se muestra arriba. Sin embargo, ANSI/IIAR 2 no proporciona orientación para prevenir el sobrellenado de líquido o el arrastre de líquido en escenarios de alivio atmosférico.

La Sección 15.4.6 de ANSI/IIAR 2, *Standard for Design of Safe Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems*, prohíbe descargar amoníaco líquido “en un sistema común de tuberías de alivio usado para transportar vapor de amoníaco” [13, p. 59], pero no explica cómo debe lograrse esto. La Sección 15.3.3 establece requisitos para “recipientes a presión destinados a operar completamente llenos de amoníaco líquido” [13, p. 53], pero no menciona recipientes llenos de líquido de manera no intencional. La Sección

15.3.10 exige que “[l]os recipientes a presión u otra pieza de equipo con sello ASME que se espere opere completamente llena de líquido debe estar equipada con dispositivos de alivio de presión certificados diseñados para alivio de presión de líquido conforme al Código ASME B&PV...” [13, p. 56].

ANSI/IIAR 2 no analiza casos de sobrellenado de líquido ni de alivio bifásico, ni el potencial de presencia de líquido en casos de alivio que se espera sean liberaciones solo de vapor a la atmósfera. No obstante, este peligro es común en pequeños recipientes horizontales de sobrepresión que contienen un refrigerante líquido saturado con poco espacio de vapor, como los tambores acumuladores de sobrepresión de Tank Farm 5 descritos en la **Sección 3.4**. Estos recipientes pueden llenarse rápidamente de líquido durante un evento de perturbación y pueden arrastrar líquido en la descarga de alivio cuando hay líquido en ebullición dentro del recipiente, como ocurre con frecuencia en sistemas de refrigeración [28, p. 43].

El CSB concluye que ANSI/IIAR 2 no contempla escenarios potenciales de sobrellenado de líquido, arrastre de líquido o liberación con aerosol, y no proporciona a los usuarios orientación ni requisitos de diseño para prevenir líquido o aerosol en descargas atmosféricas.

Como ejemplo de buena orientación en diseño de alivio, el American Petroleum Institute (API) publica la norma API 521 Séptima Edición (2020), *Pressure-relieving and Depressuring Systems* (“API 521”). API 521 especifica requisitos para sistemas de alivio de presión de emergencia, incluyendo examinar causas de sobrepresión, determinar tasas de alivio y “seleccionar y diseñar sistemas de disposición, incluidos componentes como tuberías, recipientes, antorchas y chimeneas de venteo” [33, p. 1, 34, p. 1].

API 521 incluye una sección sobre “Causas de sobrepresión y sus tasas de alivio”, incluyendo el sobrellenado, y una subsección sobre diseño de sistemas de disposición, incluyendo disposición a la atmósfera, indicando:

La decisión de descargar hidrocarburos u otros vapores inflamables o peligrosos a la atmósfera requiere atención cuidadosa para asegurar que la disposición pueda realizarse sin crear un peligro potencial ni causar otros problemas, como la formación de mezclas inflamables a nivel del suelo o en estructuras elevadas, la exposición del personal a vapores tóxicos o químicos corrosivos... [34, p. 125]

API 521 además señala:

Un PRD [dispositivo de alivio de presión] que maneja un líquido en equilibrio vapor-líquido o un fluido de fase mixta produce vapor debido al destello a medida que el fluido atraviesa el dispositivo. La generación de vapor puede reducir la capacidad efectiva de flujo másico de la válvula y debe considerarse. El arrastre de líquido puede resultar de espumamiento o de una separación vapor-líquido inadecuada [énfasis añadido] [34, p. 78].

Debe considerarse cualquier cambio de fase, ya sea vaporización del líquido o condensación del vapor, que ocurra cuando se reduce la presión o como resultado del enfriamiento. Con autorefrigeración, la vaporización de líquidos volátiles puede ser incompleta a menos que existan instalaciones para aportar el calor necesario para la vaporización [34, p. 80].

Específicamente para liberaciones líquidas o bifásicas, API 521 añade que “[t]odas las posibilidades que puedan permitir que el líquido ingrese al PRV [válvula de alivio de presión] deben determinarse y deben adoptarse salvaguardas apropiadas para prevenir esta ocurrencia” [34, p. 132].

ANSI/IIAR 2 no incluye una lista completa de causas de sobrepresión. Aunque analiza escenarios como incendio externo, cargas internas en intercambiadores de calor, sobrepresión hidrostática y protección de compresores de desplazamiento positivo [13, pp. 54-56], no analiza otras causas de sobrepresión del sistema como las identificadas en la **Sección 3.2** como causas probables en la planta de Sterling. Aunque los recipientes de sistemas de refrigeración, como los tambores acumuladores de sobrepresión de Tank Farm 5, contienen rutinariamente líquidos saturados, ANSI/IIAR 2 no proporciona advertencias ni orientación contra el arrastre de líquido o la separación vapor-líquido inadecuada, a diferencia de API 521.

El CSB concluye que, si ANSI/IIAR 2 hubiera identificado escenarios potenciales y exigido una evaluación de posibles eventos de sobrellenado de líquido, arrastre de líquido o liberación con aerosol, la probabilidad del incidente en la planta de Sterling podría haberse reducido.

El CSB recomienda que el IIAR actualice ANSI/IIAR 2 para incluir orientación para prevenir descargas atmosféricas de líquido o bifásicas desde sistemas de alivio de presión de emergencia, como la orientación de la norma API 521, *Pressure-relieving and Depressuring Systems*. Como mínimo, la orientación debería:

- a. Identificar escenarios de riesgo, como recipientes de sobrepresión horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor; y
- b. Abordar consideraciones y controles de diseño para reducir la probabilidad de que los escenarios identificados conduzcan a sobrepresión o falla de equipo y asegurar la separación vapor-líquido (separación del vapor del líquido) durante el alivio de presión para los escenarios identificados.

4.2 DESCARGA HACIA UN LUGAR SEGURO

En su libro de 1990, *Critical Aspects of Safety and Loss Prevention*, el Dr. Trevor Kletz advirtió a los lectores que consideraran qué ocurrirá cuando los sistemas de alivio de presión de emergencia funcionen conforme a su diseño, enfatizando que estos sistemas de seguridad deben descargar hacia un lugar seguro. Kletz advirtió:

Las válvulas de alivio están diseñadas para levantarse y, cuando lo hacen, no deberían crear un peligro al descargar material sobre personas o sobre la planta... [35, p. 146].

Asegurar que no se cause daño a las personas confirmando que los sistemas de seguridad descargan hacia un lugar seguro es un principio fundamental de diseño de sistemas de alivio de presión de emergencia. Por lo tanto, un “lugar seguro” puede definirse como uno que garantice que no haya daño a las personas.

Por lo general, múltiples escenarios potenciales pueden causar alta presión dentro del equipo de refrigeración industrial, y el diseño del sistema de alivio de presión de emergencia debe abordar dichos escenarios. Los sistemas de alivio de presión de emergencia no solo deben proteger el equipo, sino también a las personas. Es esencial asegurar que los empleados estén al tanto cuando la presión de operación de un sistema se acerca a un límite de diseño. Muchos escenarios de alta presión pueden ocurrir durante el arranque, el paro o la operación normal de un sistema de refrigeración por amoníaco, en los que, aunque los técnicos de refrigeración quizá no tengan tiempo de actuar para prevenir una sobrepresión, el sistema de alivio de presión de emergencia se activaría de todos modos para proteger el equipo. En consecuencia, para proteger a las personas, los sistemas de alivio de presión de emergencia deben descargarse hacia un lugar seguro.

El API establece que un lugar inseguro es aquel que puede causar daño a las personas. El documento guía del API, *Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries (Third Edition, 2021)* (“API RP 754”), define un lugar inseguro (peligroso) para descargar materiales tóxicos desde sistemas de alivio de presión de emergencia como:

Una descarga atmosférica de un PRD [dispositivo de alivio de presión o VAPE] o una emisión por perturbación del proceso, o una descarga de un dispositivo destructivo aguas abajo, que resulte en un peligro potencial para el personal, esté presente o no, debido a la formación de mezclas inflamables a nivel del suelo o en estructuras elevadas de trabajo, la presencia de materiales tóxicos o corrosivos a nivel del suelo o en estructuras elevadas de trabajo, o efectos de radiación térmica a nivel del suelo o en estructuras elevadas de trabajo por ignición de corrientes de alivio en el punto de emisión, según se especifica en la Sección 5.8.4.4 de API 521 [34, p. 135, 36, p. 10].

El incidente en la planta de Sterling demuestra que la descarga del sistema de alivio de presión de emergencia de Tank Farm 5 cumplía con los criterios de API RP 754 para un lugar inseguro.

4.2.1 MITIGACIÓN DE UNA LIBERACIÓN DE LÍQUIDO O AEROSOL

En casos de alivio de presión de emergencia en los que el arrastre de líquido o los aerosoles líquidos en la descarga de alivio podrían no ser totalmente o confiablemente prevenibles, pueden requerirse medidas de mitigación para asegurar que el amoníaco líquido no alcance una descarga atmosférica ni cause daño. En algunos casos, los controles preventivos pueden no ser factibles, como en un sistema existente de refrigeración por amoníaco. Además, no siempre es evidente si ocurrirán arrastre de líquido, separación vapor-líquido o aerosoles bajo condiciones variables del proceso. Incluir medidas de mitigación agrega capas de protección contra liberaciones tóxicas a la atmósfera durante un evento de alivio de presión de emergencia.

Como se analizó en la **Sección 4.1**, ANSI/IIAR 2 fomenta la descarga atmosférica de alivio de presión de emergencia siempre que sea posible. La descarga atmosférica de alivio es un diseño común y económico, siempre que no cree peligros adicionales [34, p. 125]. Para líquidos y vapores tóxicos como el amoníaco, esto requiere atención cuidadosa para verificar una descarga segura a la atmósfera [34, p. 125], lo cual típicamente puede realizarse mediante un análisis de dispersión.

ANSI/IIAR 2 establece requisitos sobre la configuración de la tubería de descarga de alivio, analizados más adelante en la **Sección 4.2.2**, diseñados para dispersar una descarga atmosférica de vapor. En el Apéndice A^a, aunque ANSI/IIAR 2 señala que “[e]xisten programas de modelación de liberaciones para ayudar a evaluar consecuencias fuera del sitio” [13, p. 90], no se exige realizar un análisis de dispersión ni se menciona de otra manera.

En contraste, API 521 proporciona orientación en la Sección 5.8.3.1 para el manejo seguro de descargas atmosféricas de vapor tóxico, indicando: “El diseño de dispositivos de alivio ventilados a la atmósfera no deberá exponer al personal de la planta ni al público a riesgos intolerables por descargas de vapor tóxico” [34, p. 132]. Además, la Sección 5.8.3.1 de API 521 ofrece orientación sobre variables a considerar en un análisis de dispersión y establece dos enfoques de evaluación: basado en consecuencias y basado en riesgo. API 521 explica:

En cualquiera de los enfoques, el usuario deberá establecer criterios de aceptación para descargas atmosféricas de vapor tóxico desde PRD [dispositivos de alivio de presión].

Si se aplica un enfoque basado en consecuencias, entonces deberá aplicarse lo siguiente para PRD que descargan vapor tóxico a la atmósfera:

a) Las concentraciones de vapores tóxicos, en el límite de propiedad de la empresa, no deberán exceder niveles que causen efectos para la salud que pongan en peligro la vida [p. ej., GPPE-3 o equivalente]. [...]

b) Para el personal dentro de la planta, la capacidad de escape es un factor crítico para determinar el límite de exposición. Para personal capacitado, con una ruta de escape sin obstrucciones, puede utilizarse un criterio de exposición más alto.

Si se aplica un enfoque basado en riesgo, entonces una evaluación de riesgos [p. ej., LOPA, análisis de árbol de fallas, etc.] deberá utilizarse para determinar la idoneidad de la descarga atmosférica.

Si cualquiera de los enfoques indica potencial de exposición por encima de los criterios de aceptación, entonces se recomienda una o más de las siguientes mitigaciones:

[...]

b) realizar una evaluación más rigurosa para estimar mejor la carga de alivio y/o duración (p. ej., análisis dinámico);

^a Como se ha mencionado anteriormente, el material del apéndice de las normas ANSI/IIAR es meramente informativo y explicativo, y no forma parte de las RAGAGEP [13, p. 71]

- c) modificar condiciones de operación para reducir la base de dimensionamiento del PRV;
- d) rediseñar equipos;
- e) dirigir la corriente efluente del dispositivo de alivio de vuelta al proceso o a un sistema de tratamiento;
- f) modificar el sistema de descarga atmosférica para mejorar la dispersión (p. ej., chimenea más alta, mayor velocidad de descarga) [34, pp. 132-133].

API 521 además analiza escenarios y consecuencias de arrastre de líquido:

La ubicación de chimeneas de venteo que descargan a la atmósfera debe considerar la salud y seguridad del personal, ruido, olor potencial, concentraciones potenciales a nivel del suelo, arrastre potencial de líquido, fuentes de ignición y radiación térmica [énfasis añadido]. La modelación de dispersión, el análisis de consecuencias y/o el análisis de riesgos son herramientas valiosas para evaluar si los vapores descargados desde la chimenea de venteo representan peligros inflamables, tóxicos u otros para el personal [34, p. 138].

Como se muestra en la **Sección 3.3.6**, la noche del incidente los efectos de estela del edificio probablemente también contribuyeron a exposición del personal o demoras en la evacuación. Estas consideraciones complejas de flujo también deben contemplarse cuando corresponda [27, p. 35], particularmente cuando pueden afectar una evacuación, como en el sitio de Sterling.

El Technical Paper #6 recomendó que:

Las normas y códigos modelo deberían exigir que las chimeneas de descarga vertical no solo descarguen 15 pies por encima del nivel del suelo o de plataformas cercanas, sino también una altura mínima por encima de techos o muros cercanos, para minimizar la re-entrada de vapor de amoníaco en la zona de baja presión a sotavento de tales obstáculos... [énfasis añadido] [26, p. 32].

Esta recomendación también podría abordar el potencial de efectos de estela del edificio.

El CSB concluye que ANSI/IIAR 2 no garantiza ausencia de daño a las personas en escenarios potenciales de sobrellenado de líquido, arrastre de líquido o alivio con aerosol, y no proporciona a los usuarios orientación y requisitos efectivos para determinar con precisión el potencial y las consecuencias de líquido o aerosol en descargas de alivio.

El CSB recomienda que el IIAR actualice ANSI/IIAR 2 para incluir el requisito de evaluar si los dispositivos de alivio de presión de emergencia descargan hacia un lugar seguro, por ejemplo mediante un análisis de dispersión.

Incluso en un escenario de alivio que potencialmente contenga líquido, una liberación de líquido o aerosol puede mitigarse mediante sistemas de disposición u otros controles de ingeniería una vez que las consecuencias potenciales se comprendan bien mediante un análisis de dispersión. Si bien ANSI/IIAR 2 indica que las VAPE deben descargar vapor directamente a la atmósfera [13, p. 59], permite excepciones cuando lo apruebe o lo exija la Autoridad Competente (AHJ) (por ejemplo, autoridades de códigos de construcción y contra incendios), incluyendo descarga a través de un sistema de tratamiento, sistema de antorcha, sistema de difusión en agua u otros medios aprobados [13, p. 59]. Sin embargo, algunos de estos sistemas no están permitidos por ANSI/IIAR 2 para recibir líquido, como un tanque de difusión en agua [13, p. 61].

Existen múltiples opciones de mitigación cuando el líquido puede llegar a la entrada de la VAPE. Algunos ejemplos incluyen:

- *Sistemas de Control de Presión de Emergencia (SCPE)*: descritos en el Apéndice I de ANSI/IIAR 2, estos sistemas alivian una sobrepresión hacia otra parte del sistema de refrigeración a una presión ligeramente menor que la presión de ajuste de la VAPE atmosférica, redirigiendo el flujo dentro del sistema y evitando una descarga de alivio a la atmósfera. Sin embargo, aún se requiere una VAPE, y la parte del sistema hacia la que alivia el SCPE debe poder aceptar el material desviado sin crear condiciones peligrosas no intencionales [13, pp. 90, 119].
- *Tambores separadores atmosféricos (knockout drums)*: descritos en API 521, Sección 5.8.7.2, un tambor separador atmosférico es un recipiente simple con una chimenea abierta a la atmósfera, diseñado para recibir descargas de VAPE y luego “separar” cualquier gota de líquido para evitar concentraciones peligrosas en áreas sensibles [34, pp. 135-136]. Es una opción simple y económica para separación vapor-líquido antes de descargar a la atmósfera. Aun así, se requeriría un análisis de dispersión para verificar que la liberación de vapor desde el tambor separador no pueda dañar a las personas.
- *Controles automáticos de mitigación*: sistemas de control que toman acción mitigadora de forma automática sin intervención humana. Por ejemplo, el sistema de refrigeración podría apagarse automáticamente si los sensores detectaran la activación de una VAPE. Aunque esto no evitaría una sobrepresión, podría minimizar la cantidad liberada y sus consecuencias.

El CSB describió otro ejemplo de sistemas de alivio de presión de emergencia de refrigeración por amoníaco que causaron daño a personas en el Informe de Incidente^a correspondiente a una descarga de una VAPE que ocurrió en la instalación de procesamiento avícola Pilgrim’s Pride Canton, en Canton, Georgia, en enero de 2022 [37, pp. 21-22]. En ese incidente, se liberaron aproximadamente 4.500 libras de amoníaco a través de la descarga de una VAPE debido a una falla de una válvula deslizante durante el arranque de un compresor. Dos empleados resultaron gravemente lesionados por inhalación de amoníaco

^a Este informe sobre el incidente del Pilgrim’s Pride se publicó en julio de 2025 como parte del [Volumen III](https://www.csb.gov/assets/1/6/Incident_Reports_Volume_3_2025-07-22.pdf) de los Informes de incidentes de la CSB, que se encuentra en https://www.csb.gov/assets/1/6/Incident_Reports_Volume_3_2025-07-22.pdf.

LECCIÓN CLAVE

Los efectos de estela de los edificios y otras consideraciones complejas relacionadas con el flujo también deben evaluarse en los análisis de dispersión, cuando proceda, para garantizar una descarga segura a la atmósfera y una evacuación segura cuando sea necesario.

durante la evacuación debido a que el amoníaco permaneció suspendido fuera del edificio [37, p. 21]. Al igual que en el incidente de la planta de Sterling, la tubería de descarga de alivio en la instalación de Pilgrim's Pride no garantizó que no hubiera daño para los evacuados. Después del incidente, la empresa redirigió la descarga de la VAPE hacia un recipiente que contenía amoníaco [37, pp. 21-22] en lugar de a la atmósfera.

ANSI/IIAR 2 enumera algunas posibilidades para mitigar descargas de vapor a la atmósfera, como sistemas de tratamiento, sistemas de antorcha y sistemas de difusión en agua [13, p. 59], pero no analiza la mitigación para casos en los que puedan ocurrir descargas de alivio a la atmósfera con líquido o aerosol [13]. Actualmente, ANSI/IIAR 2 exige la descarga directa a la atmósfera, con excepciones, para alivio de vapor [13, p. 59], sin requerir análisis que demuestre que el venteo es seguro y sin esfuerzos mitigadores para asegurar una descarga atmosférica segura.

El CSB concluye que ANSI/IIAR 2 no exige salvaguardas para mitigar una liberación de líquido o aerosol a la atmósfera en escenarios de alivio y no proporciona a los usuarios orientación respecto a descargar aerosoles hacia un lugar seguro.

El CSB recomienda que el IIAR actualice ANSI/IIAR 2 para incluir orientación para mitigar descargas atmosféricas de líquido o bifásicas desde sistemas de alivio de presión de emergencia, como la orientación de la norma API 521, *Pressure-relieving and Depressuring Systems*. Como mínimo, la orientación debería:

- a. Identificar escenarios de riesgo, como recipientes de sobrepresión horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor; y
- b. Exigir salvaguardas de mitigación en casos en los que no pueda garantizarse confiablemente la separación vapor-líquido (separación del vapor del líquido) durante el alivio de presión. Esto también debería incluir sistemas alternativos de disposición cuando corresponda.

4.2.2 ORIENTACIÓN DE ANSI/IIAR 2 SOBRE TUBERÍA DE DESCARGA

Como se analizó en la **Sección 4.2.1**, ANSI/IIAR 2 no exige controles de ingeniería de mitigación, aun si el líquido o aerosoles no pueden eliminarse de las entradas de las VAPE, ni exige un análisis de dispersión para asegurar una descarga atmosférica segura. En su lugar, ANSI/IIAR 2 se basa en la configuración y ubicación de la tubería de descarga de alivio, y presume que los sistemas de alivio de presión de emergencia liberarán únicamente vapor a la atmósfera.

ANSI/IIAR-2 establece los siguientes requisitos para la terminación atmosférica de sistemas de alivio de presión de emergencia de vapor de amoníaco:

1. La tubería de descarga debe dimensionarse para evitar contrapresión excesiva [§15.5.1.1].
2. La terminación de la tubería de alivio debe estar al menos 15 pies por encima del nivel del suelo y al menos 20 pies de aberturas hacia un edificio [§15.5.1.2].

3. La terminación de la tubería de alivio debe estar al menos 7,25 pies por encima de un techo o plataforma adyacente, o del techo dentro de 20 pies horizontales de la descarga, lo que sea más alto [§15.5.1.3 y §15.5.1.4].
4. La terminación debe estar dirigida hacia arriba y dispuesta para evitar rociar amoníaco sobre personas en las inmediaciones [§15.5.1.5].
5. Debe preverse el drenaje de humedad de la tubería de descarga y mitigar la entrada de lluvia o nieve [§15.5.1.6 y §15.5.1.7] [13, pp. 60-61].

Además, el Apéndice A de ANSI/IIAR 2, que es solo material explicativo informativo y no forma parte de la norma, señala:

Se considera que la terminación de la descarga corresponde a los últimos pies de la tubería de alivio. El extremo de venteo de la tubería de alivio puede incluir un diseño para evitar la entrada de lluvia y nieve. [...] El diseño del extremo de venteo puede ser un difusor de “doble 45 grados”, un difusor tipo “cuernos de toro”, una “tapa abatible autoconclusiva” o una “cubierta tipo capucha” [13, p. 89].

La **Sección 3.5** describe los efectos de la velocidad de descarga, la orientación y la elevación de la descarga de tubería de alivio sobre la dispersión del amoníaco. En general, se logrará mejor dispersión con mayor velocidad de descarga, orientación vertical hacia arriba y mayor elevación. Sin embargo, estas variables por sí solas no garantizan una descarga hacia un lugar seguro, como lo demuestran el incidente de la planta de Sterling, así como el incidente de Pilgrim’s Pride analizado en la **Sección 4.2.1**.

Describir con precisión el comportamiento de liberaciones tóxicas es importante en el diseño de sistemas de alivio de presión de emergencia [38, p. 6]. Por ejemplo, una revisión de buenas prácticas de la industria (1990) sobre condiciones de salida de VAPE determinó que una velocidad de descarga de 100 pies por segundo podría no crear suficiente dilución de gases tóxicos para asegurar que una concentración peligrosa no regrese al nivel del suelo [38, p. 2]. Para el amoníaco específicamente, el Technical Paper #6 señaló que, para una liberación con aerosol líquido de 12 por ciento en peso del orden de 10 libras por minuto, se requiere una velocidad de descarga de aproximadamente 250 pies por segundo para dispersar la liberación en la atmósfera [26, p. 33]^a. En contraste, la velocidad de descarga estimada en la planta de Sterling la noche del incidente fue de 26 a 31 pies por segundo^b.

ANSI/IIAR 2 no menciona la velocidad de descarga desde una VAPE como consideración, ni siquiera en el material de orientación opcional [13]. Aunque muchos códigos, incluido ANSI/IIAR 2, limitan la velocidad de descarga de forma indirecta mediante límites a la contrapresión permisible en VAPE, monitorear la velocidad de descarga podría al menos anticipar un posible problema de seguridad de dispersión y detonar un análisis de dispersión. Por ejemplo, podrían considerarse análisis adicionales o

^a El autor del Technical Document #6 también señaló: “Esto no es un permiso para liberar amoníaco líquido a la atmósfera. Esta recomendación se aplica a situaciones en las que una pequeña fracción de masa de líquido puede quedar atrapada en el vapor de ventilación debido a altas velocidades, ebullición, formación de espuma, etc., durante los eventos de liberación” [26, p. 33].

^b Esto se muestra en el Apéndice D, para los casos 1 y 2, en la página 13.

estrategias de diseño alternativas cuando exista una velocidad de descarga baja. Como se señala en la Sección 3.5, el Technical Paper #6 discutió posibles directrices.

Como indicó el Technical Paper #6:

La práctica de descargar hacia un sistema de colector común tiende a aumentar el rango de caudales que puede experimentarse al descargar el colector de alivio a la atmósfera. Esto a menudo se hace por razones económicas y para reducir la complejidad y el número de recorridos de tubería dentro de una instalación. Combinar un gran número de válvulas de alivio en un solo colector de descarga puede resultar en una velocidad de descarga muy baja cuando solo se activa una válvula de alivio [26, p. 21].

Como se analizó en la **Sección 1.4.3**, Tank Farm 5 incluía 18 VAPE que descargaban a través de un colector de alivio común hacia la atmósfera. Esto no es inusual en la industria de refrigeración y puede gestionarse si la tubería del colector común está dimensionada adecuadamente y descarga hacia un lugar seguro. La velocidad de descarga podría utilizarse para determinar si ciertas VAPE deberían descargar hacia un colector común o si algunos dispositivos requieren una tubería de descarga dedicada para asegurar que descarguen hacia un lugar seguro.

API 521 dedica una sección completa a la descarga segura de vapores, incluidos vapores peligrosos, desde sistemas de alivio de presión de emergencia hacia la atmósfera [33, pp. 144-152, 34, pp. 125-141]. Esta sección es relevante para evaluar el incidente de la planta de Sterling porque el API aporta una perspectiva sobre lo que la industria considera necesario para asegurar que los sistemas de alivio de presión de emergencia descarguen hacia un lugar seguro [33, p. 144, 34, p. 125].

Aunque los requisitos de ANSI/IIAR 2 abordan la orientación, ubicación y elevación de la descarga atmosférica, no analizan la posibilidad de aerosoles líquidos o gotas en una liberación. ANSI/IIAR 2 tampoco analiza la velocidad de descarga como un factor clave potencial en la dispersión de la nube de amoníaco. Para algunas liberaciones de amoníaco, los requisitos actuales de ANSI/IIAR 2 podrían no ser suficientes para prevenir la exposición de transeúntes o evacuados en un evento de alivio.

Si bien ANSI/IIAR 2 se basa en la orientación, la elevación y una distancia horizontal de al menos 20 pies respecto de aberturas hacia el edificio para asegurar que el vapor de amoníaco descargue hacia un lugar seguro, el análisis de dispersión del CSB, el incidente de Pilgrim's Pride, el Technical Paper #6 y otras guías como API 521 demuestran que estas variables por sí solas no garantizan concentraciones seguras de amoníaco a nivel del suelo en las inmediaciones. Como se analizó en la Sección 3.3.6, la porción flotante de la liberación de amoníaco en la planta de Sterling ingresó a la unidad HVAC y permitió que el amoníaco fuera arrastrado hacia el interior del edificio, a pesar de que la toma de la unidad HVAC estaba a 20 pies del punto de liberación.

LECCIÓN CLAVE

En los sistemas de alivio de refrigeración por amoníaco, la fracción líquida en una liberación de aerosol, la velocidad de descarga, la orientación de la descarga y la elevación de la descarga están íntimamente relacionadas y deben estudiarse en cualquier caso de alivio atmosférico para garantizar que las válvulas de alivio de presión de emergencia descarguen a la atmósfera de forma segura.

El CSB concluye que, aunque ANSI/IIAR 2 contiene varios requisitos sobre orientación, elevación y ubicación de descarga de alivio, estos requisitos pueden no ser suficientes para asegurar que las corrientes de alivio descarguen hacia un lugar seguro. Se requiere un análisis de dispersión para determinar el impacto potencial sobre rutas de evacuación y receptores públicos en escenarios de alivio atmosférico.

4.2.3 TUBERÍA DE DESCARGA DE CUISINE SOLUTIONS

Implementar algunas medidas preventivas, como rediseñar o reubicar un sistema, puede ser difícil en sistemas existentes de refrigeración por amoníaco. Aun así, se pueden añadir controles de ingeniería a cualquier sistema para prevenir un escenario de sobrepresión mediante controles mejorados de presión, temperatura o nivel, por ejemplo. También puede incorporarse acción mitigadora automatizada —en lugar de depender de intervención humana en una emergencia— en sistemas de refrigeración de cualquier antigüedad.

Después del incidente, Cuisine Solutions modificó la tubería de descarga atmosférica de alivio de presión de emergencia de la planta de Sterling reubicando las descargas en Tank Farm 5 y en otros puntos, como se muestra en la **Figura 29**. Los cambios incluyeron alejar la descarga de la toma de HVAC cercana y orientar la descarga hacia arriba a 45 grados. La descarga más pequeña, de una sola tubería (recuadro en la **Figura 29**), puede incrementar la velocidad de descarga. Estos cambios cumplen o exceden los requisitos actuales de ANSI/IIAR 2 para tubería de descarga.



Figura 29: Tubería de descarga atmosférica del Tank Park 5, antes (izquierda, marcado con un círculo) y después (derecha, y recuadro) del incidente. (Crédito: CSB)

El análisis de dispersión del incidente en la planta de Sterling presentado en la **Sección 3.3** demostró que una descarga orientada verticalmente hacia arriba, junto con una alta velocidad de descarga, podría haber dispersado mejor una liberación de amoníaco la noche del incidente. Sin embargo, tales cambios de

tubería por sí solos probablemente habrían sido insuficientes para dispersar una liberación con un alto componente líquido y prevenir concentraciones IPVS a nivel del suelo, como se muestra en la **Figura 30**. Aunque, al momento del incidente, la descarga de la tubería de alivio de presión de emergencia no cumplía con todos los requisitos de ANSI/IIAR 2 porque no terminaba hacia arriba [13, p. 61]^a, la modelación de dispersión indica que, aun si lo hubiera hecho, los resultados probablemente habrían sido similares, dado el alto contenido líquido de la liberación de amoníaco^b.

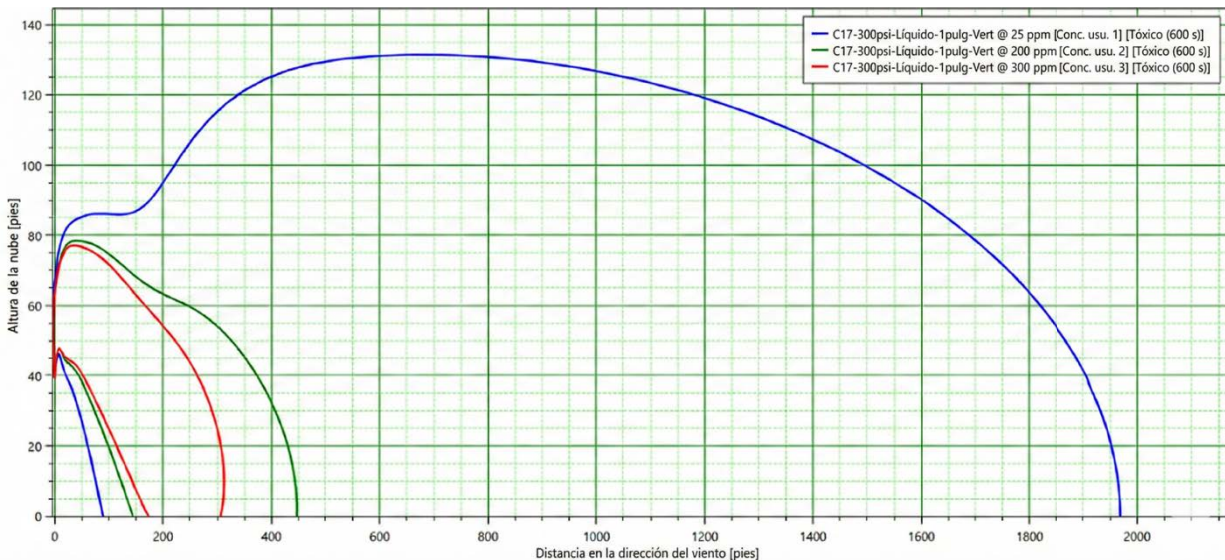


Figura 30: Caso del modelo de dispersión más parecido a la liberación real durante el incidente, pero con tuberías de descarga verticales de 1 pulgada. Las concentraciones IDLH (300 ppm, curva roja), así como el punto final tóxico (200 ppm, curva verde), probablemente aún habrían alcanzado el nivel del suelo. (Crédito: CSB)

Si una perturbación del proceso similar a la ocurrida en la planta de Sterling el 31 de julio de 2024 se repitiera—particularmente en un recipiente horizontal como los de Tank Farm 4 o Tank Farm 5—el líquido o aerosol en la descarga de alivio todavía podría causar que una porción significativa de la nube de amoníaco descendiera hasta el nivel del suelo. Con base en la modelación de dispersión, la liberación en la planta de Sterling aún probablemente habría resultado en concentraciones IPVS a nivel del suelo, incluso con una descarga vertical de una sola tubería de 1 pulgada y cumpliendo todos los requisitos de descarga atmosférica de ANSI/IIAR 2.

El CSB concluye que el diseño de la tubería de descarga atmosférica de la planta de Sterling puede no ser suficiente para mitigar condiciones IPVS a nivel del suelo y asegurar la descarga hacia un lugar seguro. Como lo demuestra el incidente y el análisis de dispersión del CSB, se requiere un análisis de dispersión

^a El diseño original de las tuberías se ajustaba a la edición de 2014 de la norma ANSI/IIAR 2, que también incluía este requisito [55, p. 62].

^b Los casos 9 y 11 del apéndice D muestran la liberación de amoníaco con una descarga en T tipo “megáfono”, orientada 45 grados hacia arriba (caso 9) y verticalmente hacia arriba (caso 11). Ambos casos dieron lugar a concentraciones IDLH de amoníaco (300 ppm) a la altura de los ojos y concentraciones tóxicas finales (200 ppm) a nivel del suelo.

para determinar el impacto potencial sobre rutas de evacuación y receptores públicos en escenarios de alivio atmosférico, incluidos escenarios de alivio con líquido o aerosol y efectos de estela del edificio.

Después del incidente, Cuisine Solutions añadió múltiples sistemas para alertar al personal sobre una atmósfera peligrosa en varias ubicaciones alrededor de la planta. Sin embargo, Cuisine Solutions no abordó el potencial de alivio con líquido o bifásico ni implementó salvaguardas automatizadas para los escenarios potenciales de sobrepresión analizados en la **Sección 3.2**, presumiblemente porque las normas del IIAR no lo exigen.

Además, para asegurar operación confiable cuando sea necesaria, cualquier sistema de mitigación de seguridad también debería cumplir con ANSI/IIAR 6, *Standard for Inspection, Testing, and Maintenance of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems*. Esta norma establece “requisitos mínimos de inspección, prueba y mantenimiento aplicables a sistemas seguros de refrigeración por amoníaco de circuito cerrado” [19, p. v].

El CSB concluye que Cuisine Solutions no proporcionó mitigación para el alivio de amoníaco con líquido o bifásico en Tank Farm 5. Si hubieran existido salvaguardas de mitigación efectivas, Cuisine Solutions podría haber logrado asegurar que no hubiera daño a las personas.

El CSB recomienda que Cuisine Solutions reduzca la probabilidad o mitigue las consecuencias de descargas con líquido o bifásicas del sistema de alivio de presión de emergencia de refrigeración por amoníaco en la planta de Sterling. Como mínimo:

- a. Identificar escenarios de liberación con líquido o bifásica, particularmente para tambores acumuladores de sobrepresión horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor;
- b. Implementar controles de ingeniería para reducir la probabilidad de escenarios de nivel alto de líquido, sobrellenado o ebullición que deriven en sobrepresión; y
- c. Implementar controles de ingeniería para mitigar las consecuencias de estos escenarios cuando su probabilidad no pueda reducirse a un nivel aceptable, como mediante sistemas de control de presión de emergencia, tambores separadores atmosféricos o sistemas de apagado automático;
- d. Contratar a un tercero competente para auditar los sistemas de alivio de presión. La auditoría debe asegurar que (i) se hayan identificado todos los escenarios de alivio pertinentes, (ii) los controles de ingeniería preventivos y de mitigación aborden adecuadamente los peligros, y (iii) los controles de ingeniería se mantengan de modo que funcionen correctamente cuando se requieran.

Como se analizó en la **Sección 3.2**, la planta de Sterling no registraba datos históricos del proceso del sistema de refrigeración por amoníaco más allá de las temperaturas de almacenamiento de alimentos, enfriadores o congeladores requeridas por consideraciones de inocuidad alimentaria. Si una perturbación del proceso similar a la que ocurrió en la planta de Sterling el 31 de julio de 2024 se repitiera, probablemente permanecería sin detectar hasta que ocurriera otra sobrepresión, y podría ocurrir un incidente similar. Al igual que en este incidente, una investigación probablemente no podría determinar la causa específica de la sobrepresión o de la condición de perturbación del proceso sin datos del proceso.

El CSB concluye que, sin datos más amplios del sistema de refrigeración en un historiador de datos de proceso, la planta de Sterling podría experimentar una perturbación del proceso no detectada, similar a los eventos que condujeron al incidente. La ausencia de dichos datos disponibles para monitoreo del desempeño puede ocultar problemas serios de control del proceso, dificultar la investigación de un incidente o un cuasiaccidente y aumentar la probabilidad de que ocurra un incidente repetido.

El CSB recomienda que la planta de Sterling implemente un sistema electrónico de historiador y gestión de datos de proceso para asegurar que los parámetros críticos del proceso se recopilen, se rastreen y se almacenen. El sistema debe estar disponible para los técnicos de refrigeración para que puedan monitorear el sistema de refrigeración y responder e investigar perturbaciones del proceso.

4.3 PREPARACIÓN PARA EMERGENCIAS

Las empresas que manejan materiales peligrosos como el amoníaco anhidro deben considerar la posibilidad de pérdida de contención, descargas de emergencia a la atmósfera u otros incidentes, como el ocurrido en la planta de Sterling. La norma de Gestión de la Seguridad de Procesos (PSM) de OSHA enumera la planificación y la respuesta ante emergencias como uno de sus 14 elementos^a. La norma RMP de la EPA también exige planificación de emergencias^b. En consecuencia, Cuisine Solutions estaba obligada a definir escenarios de emergencia y desarrollar planes para gestionarlos.

4.3.1 PLAN DE ACCIÓN DE EMERGENCIA

Las instalaciones como el sitio de Sterling, con sistemas de refrigeración por amoníaco que forman parte del Programa de Procesos RMP – Nivel 3 de la EPA (**Sección 1.5.2**) y de la norma PSM de OSHA, deben documentar un Plan de Acción de Emergencia (PAE)^c para abordar liberaciones de amoníaco [39, 40]. Si una empresa también tiene la intención de responder a una liberación de amoníaco, debe contar además con un PAE^d que incluya los procedimientos requeridos para los empleados que participan en la respuesta [39, p. 3]. Las instalaciones que tienen la intención de evacuar a su personal y permitir que los servicios de emergencia externos gestionen una liberación química aún deben desarrollar un PAE [41]. El sitio de Sterling utilizaba un PAE desde que el amoníaco fue introducido por primera vez en el sitio en 2013, y contaba con un PAE el día del incidente.

Un PAE eficaz facilita y organiza las acciones del personal durante emergencias laborales, reduciendo las consecuencias de dichos eventos. Los requisitos mínimos de un PAE incluyen:

- procedimientos para reportar un incendio u otra emergencia;
- procedimientos para evacuación de emergencia, incluido el tipo de evacuación y la asignación de rutas de salida; y

^a [29 C.F.R § 1910.119\(n\)](#)

^b [40 C.F.R. § 68.93](#)

^c [29 C.F.R § 1910.38](#)

^d [29 C.F.R § 1910.120](#)

- procedimientos que deben seguir los empleados que permanezcan para operar funciones críticas de la planta antes de evacuar^a.

La Guía de Tareas Críticas del IIAR para la Planificación de Emergencias en Sistemas de Refrigeración por Amoníaco (la “Guía de Tareas Críticas”), publicada en 2021, aborda tres tareas críticas asociadas con la respuesta a un incidente no planificado con amoníaco: (i) Preparación, (ii) Escape y control de emergencia del sistema, y (iii) Rescate [42, p. 1]. La Guía de Tareas Críticas es únicamente informativa y no constituye una norma obligatoria del IIAR. Su objetivo es “ayudar a empleadores, reguladores gubernamentales y equipos de respuesta de seguridad pública a preparar procedimientos de emergencia para evitar y atender incidentes con amoníaco” [42, p. 1].

Como parte de la Tarea Crítica 1, Preparación, la guía recomienda que todo el personal en el sitio “comprenda el significado de términos de evacuación como punto de reunión, áreas peligrosas y ruta de escape lateral/a barlovento” [42, p. 15]. La capacitación y las políticas, incluidos estos conceptos, deben integrarse con antelación en el PAE de la instalación [42, p. 15].

Como parte de la Tarea Crítica 2, Escape y control de emergencia del sistema, la guía indica que durante una evacuación posterior a una liberación química, el personal de la instalación debe comprender los patrones de viento fuera de la instalación y sus efectos sobre las rutas de escape, los puntos de reunión y las ubicaciones de refugio en sitio. La guía añade que también es importante comprender cómo escapar lateralmente y a barlovento de nubes visibles y vapores invisibles según las condiciones del viento a nivel de los ojos [42, p. 16].

Plan de Acción de Emergencia escrito de Cuisine Solutions

El PAE del sitio de Sterling incluía un plan de acción específico para una liberación de amoníaco, además de otros escenarios de emergencia. El plan de acción para una liberación de amoníaco incluía varios pasos:

1. Cualquier persona que observe una posible liberación química debe alertar a un supervisor o a mantenimiento.
2. Mantenimiento “investigará la presunta liberación”.
3. Mantenimiento informará al gerente de planta o de producción si la liberación se clasifica como pequeña o grande^b.
4. Cuando el gerente de planta o de producción determine que se requiere una evacuación, “utilizará teléfonos celulares y comunicación verbal para señalar que se necesita evacuar”.

^a [29 C.F.R. § 1910.38\(c\)](#)

^b El PAE definió las emisiones pequeñas y grandes, pero la distinción no es relevante en este caso.

5. Los supervisores evacuarán a todo el personal al punto de reunión designado o a un punto de reunión secundario, si es necesario^a.
6. Se realizará un conteo de personal y cualquier persona faltante se reportará a las autoridades para rescate, según sea necesario.

El PAE también indicaba: “Los técnicos de mantenimiento solo podrán responder a liberaciones pequeñas que no requieran una evacuación de emergencia. Todos los empleados y contratistas evacuarán a una concentración de 250 ppm de amoníaco y se llamará al equipo HAZMAT del [Condado de Loudoun]”^b.

La noche del incidente, transcurrieron solo de tres a cuatro minutos desde que un empleado detectó por primera vez un olor no identificado en el estacionamiento hasta que el gerente de producción decidió evacuar. Sin embargo, el CSB identificó varias deficiencias en el PAE tal como estaba redactado y en la planificación de emergencias de Cuisine Solutions en general, incluidas: (i) no considerar la dirección del viento, (ii) no diferenciar entre liberaciones de amoníaco en interiores y exteriores, (iii) comunicación ineficaz de la decisión de evacuar y (iv) no proporcionar procedimientos específicos para que los empleados los sigan antes o durante la evacuación (**Sección 4.3.4**).

Dirección del viento

El PAE no incluía ningún requisito para que los trabajadores verificaran la dirección del viento a fin de asegurar que la evacuación se mantuviera a barlovento de una liberación de amoníaco. En cambio, el PAE solo mencionaba el viento en relación con emergencias meteorológicas. Además, no había suficientes mangas de viento visibles en el sitio de Sterling para que fueran de utilidad real en el momento del incidente, y los trabajadores no habían recibido capacitación para determinar la dirección del viento durante una liberación de amoníaco. Como se analizó en la **Sección 3.3**, algunos trabajadores inhalaban amoníaco durante la evacuación como resultado.

Después del incidente, Cuisine Solutions instaló varias mangas de viento nuevas en el sitio de Sterling. Sin embargo, el CSB no encontró evidencia de capacitación de empleados para utilizarlas en un evento de liberación de amoníaco. Tampoco se realizaron actualizaciones al PAE con respecto a la dirección del viento o a la necesidad de que el personal se mantuviera a barlovento de una liberación durante la evacuación.

Puntos de reunión, evacuación y refugio en sitio

El PAE del sitio de Sterling incluía únicamente instrucciones generales para evacuar a todo el personal hacia un punto de reunión, sin especificar una ruta de evacuación concreta ni considerar si alguna ruta específica seguiría siendo viable durante una liberación de amoníaco. Además, el PAE no distinguía entre

^a El punto de reunión especificado era la intersección de Sous Vide Lane y Moran Road, como se muestra a continuación en la **Figura 33**. El punto de reunión secundario era la intersección de Broderick Road y Dresden Street, también mostrada en la **Figura 33**.

^b El PAE no especificó dónde debía medirse la concentración para esta evacuación, pero probablemente fuera en las áreas de producción del edificio donde se encontraban los sensores de amoníaco, como se explica más adelante en la **sección 4.2.3**.

diferentes situaciones de liberación de amoníaco, como los distintos peligros que presenta una liberación en interiores frente a una en exteriores.

El sitio de Sterling estaba cercado por los lados este, oeste y sur (representados por líneas grises en la **Figura 31**), lo que restringió las rutas de evacuación seguras disponibles a barlovento durante el incidente del 31 de julio de 2024. Ambos puntos de reunión designados se encontraban al norte del sitio, como se muestra en la **Figura 31**, y no eran necesariamente adecuados para todos los escenarios de liberación de amoníaco en exteriores. Las flechas verdes en la **Figura 31** muestran las rutas de evacuación típicas utilizadas. No se designaron puntos de reunión alternativos en caso de que estos quedaran comprometidos durante una liberación de amoníaco. El PAE no consideró el refugio en sitio como una medida potencial para evitar que los trabajadores quedaran expuestos a la nube de amoníaco, ni la empresa proporcionó respiradores de escape de emergencia o capuchas para proteger a los trabajadores de la exposición durante la evacuación. El día del incidente, el punto de reunión designado estaba generalmente a sotavento de la liberación de amoníaco, y la ruta de evacuación que siguieron muchos evacuados estaba contaminada con amoníaco. Como resultado, algunos trabajadores inhalaban amoníaco a lo largo de la ruta de evacuación, y los evacuados continuaron caminando más allá de ambos puntos de reunión designados para evitar el olor a amoníaco. Algunos evacuados informaron un fuerte olor a amoníaco durante la evacuación y algunos se detuvieron o regresaron cerca de la esquina noreste del edificio, como se muestra en la **Figura 31** (óvalo rojo).



Figura 31: Los evacuados se alejaron más del lugar de lo indicado en el PAE debido al olor a amoníaco. (Crédito: Google Earth, anotado por CSB)

Según evaluaciones del Ammonia Safety & Training Institute (ASTI)^a, refugiarse en sitio dentro de un edificio puede ser más seguro que salir hacia una nube de vapor de amoníaco [25, p. 49]. La Guía de Tareas Críticas del IIAR alienta a evaluar peligros, riesgos y amenazas en un plan de acción para incidentes durante la fase de Preparación [42, p. 9]. Además, la guía señala que los empleadores pueden proporcionar capuchas de escape “para apoyar el refugio en sitio o... para escapar a través de una condición IPVS hacia un lugar seguro” [42, p. 12].

^a La ASTI es una organización dedicada a la formación y la planificación de respuestas de emergencia relacionadas con la seguridad del amoníaco [47].

La Guía de Tareas Críticas recomienda que la capacitación incluya la comprensión “del valor de las rutas de escape, el refugio en sitio, los puntos de reunión y las áreas de concentración para evacuación, así como medios secundarios de egreso...” [42, p. 16], y señala:

Los puntos de reunión de evacuación, áreas de concentración y la parte de refugio en sitio del programa deben revisarse para incluir ubicaciones (si se modifican o no están incluidas actualmente) y el potencial del amoníaco de difundirse hacia lugares donde pueda haber personas [42, p. 19].

El PAE del sitio de Sterling permitió que el personal sufriera daños durante la evacuación. No incluyó consideraciones para una evacuación segura en el caso de una liberación de amoníaco en exteriores.

El CSB concluye que el Plan de Acción de Emergencia del sitio de Sterling no siguió la guía del IIAR y no abordó adecuadamente posibles liberaciones de amoníaco fuera del edificio, incluyendo rutas de evacuación y puntos de reunión alternativos basados en la dirección del viento, mangas de viento visibles, distancia adecuada para asegurar que los puntos de reunión sean seguros, consideración de una posible estrategia de refugio en sitio o equipo de protección de escape de emergencia para la evacuación. Como resultado, durante el incidente, algunos empleados evacuaron a través de la nube de amoníaco o se reunieron en el punto de reunión designado demasiado cerca de la liberación, lo que provocó la inhalación de gas amoníaco tóxico.

Comunicaciones de evacuación

OSHA exige que las instalaciones con un PAE mantengan un sistema de alarma para empleados que utilice señales distintivas para diferenciar entre tipos de emergencias^a. Aunque el sitio de Sterling contaba con un sistema de alarma contra incendios, no tenía un tono de alarma de evacuación específico para liberaciones de amoníaco. En su lugar, el PAE simplemente instruía a los trabajadores a usar “teléfonos celulares y comunicación verbal para indicar que se necesita evacuar”.

^a [29 C.F.R § 1910.38\(d\)](#)

El día del incidente, el gerente de producción inició la evacuación dentro de los tres a cuatro minutos posteriores a que un empleado informara por primera vez un olor desconocido en el estacionamiento, y dentro de un minuto después de que la nube de amoníaco se hiciera visible para los trabajadores. Sin embargo, la comunicación dentro de la planta se retrasó porque no existía una alarma general del sitio para alertar a todos los trabajadores al mismo tiempo sobre una liberación de amoníaco en exteriores ni sobre la decisión de evacuar la planta. En consecuencia, muchos trabajadores no supieron que había ocurrido una liberación de amoníaco^a hasta que esta se convirtió en una nube de vapor tóxico o hasta que fueron notificados verbalmente en persona de que el proceso de evacuación ya había comenzado. En lugar de comunicar la evacuación de inmediato en toda la planta, como lo habría hecho una alarma general, se tardaron entre 10 y 16 minutos en comunicar la evacuación en todo el sitio. Supervisores y otros empleados y contratistas tuvieron que ir de sala en sala para comunicar la evacuación, exponiéndose a un mayor riesgo.

A pesar de realizar cambios en sus sensores de amoníaco y sistemas de seguridad, el sitio de Sterling no actualizó sus procedimientos de evacuación por amoníaco en el PAE después del incidente del 31 de julio de 2024. Según el conocimiento del CSB, el sitio de Sterling aún carece de una alarma de evacuación designada para liberaciones de amoníaco, y su procedimiento de evacuación sigue dependiendo de los teléfonos celulares personales de los empleados y del boca a boca para comunicar una evacuación.

El CSB concluye que, aunque la decisión de evacuar se tomó dentro de un minuto después de que apareció una nube visible, la comunicación de las instrucciones de evacuación fue ineficaz, en parte porque no existía una alarma de evacuación para alertar a todos los empleados al mismo tiempo sobre la orden de evacuar. En su lugar, la radio y el boca a boca transmitieron la noticia y las instrucciones, lo que prolongó la evacuación y provocó que algunos evacuados salieran del edificio en dirección a la liberación.

El CSB recomienda que el sitio de Sterling de Cuisine Solutions actualice su Plan de Acción de Emergencia utilizando guías como la Guía de Tareas Críticas del IIAR para la Planificación de Emergencias en Sistemas de Refrigeración por Amoníaco. Como mínimo, el plan actualizado debería:

- a. Abordar por separado las liberaciones de amoníaco en interiores y exteriores, incluyendo alarmas y respuestas distintas;
- b. Especificar claramente rutas de evacuación y puntos de reunión adecuados, incluidos alternativos;

^a Como se menciona en la sección 2.3, el director de producción ordenó la evacuación por radio varias veces, pero solo algunos empleados tenían radios.

LECCIÓN CLAVE

Las alarmas distintivas o específicas para cada tipo de fuga permiten a los trabajadores responder adecuadamente y con rapidez ante una fuga. Los diferentes tipos de fuga deben documentarse en el Plan de Acción de Emergencia y pueden incluir múltiples alarmas y respuestas distintas, como una para refugiarse en el lugar y otra para evacuar.

- c. Proporcionar orientación sobre el uso de mangas de viento para mantenerse a barlovento de una liberación durante la evacuación; y
- d. Implementar estrategias de refugio en sitio, equipo de protección de emergencia y paros de emergencia, según corresponda.

El CSB recomienda que el sitio de Sterling de Cuisine Solutions agregue una o más alarmas específicas para liberaciones de amoníaco, de modo que los trabajadores puedan responder adecuadamente. La señal distintiva de cada alarma debe documentarse en el Plan de Acción de Emergencia actualizado y puede incluir múltiples alarmas y respuestas diferenciadas, como una para refugio en sitio y otra para evacuación.

4.3.2 SIMULACROS DE EMERGENCIA

Como parte de los procedimientos de evacuación de emergencia, la norma PSM de OSHA exige que las instalaciones con un PAE “designen y capaciten a empleados para asistir en una evacuación segura y ordenada de otros empleados”^a y “revisen el Plan de Acción de Emergencia con cada empleado cubierto por el plan”^b. De manera similar, la norma RMP de la EPA exige que los procesos del Programa 3, como el de la planta de Sterling, realicen ejercicios de los mecanismos de notificación de respuesta a emergencias [43, p. 1]^c. Sean o no obligatorios, muchas instalaciones realizan simulacros de emergencia de manera regular para asegurar que sus trabajadores sepan cómo evacuar de forma segura en una emergencia [28, p. 470].

El PAE del sitio de Sterling mencionaba simulacros en la sección del “plan de prevención de incendios”, pero no exigía simulacros para liberaciones de amoníaco. En consecuencia, la planta de Sterling realizaba simulacros anuales de incendio, pero no realizaba simulacros de emergencia para liberaciones de amoníaco en interiores o exteriores. Como describieron muchos empleados a los investigadores del CSB, los simulacros de incendio consistían en salir del edificio por la salida más cercana, reunir a todo el personal en los mástiles con banderas frente al edificio (**Figura 32**), el punto de reunión identificado para incendios, y realizar el conteo de personal. Cuisine Solutions capacitó a los trabajadores para salir por la salida de emergencia más cercana. El plan de evacuación por incendio también se utilizaba para fugas pequeñas o en interiores de amoníaco, pero no existían simulacros enfocados específicamente en liberaciones de amoníaco. Un trabajador describió los simulacros a la CSB:

Durante el simulacro, cada uno de nosotros tiene una salida por la que debe salir. Depende de la zona en la que trabajes. Y nos dicen que vayamos allí, al aparcamiento donde están las banderas.

[...]

No, la formación no es específica para el amoníaco. Es para cualquier emergencia.

^a [29 C.F.R. § 1910.38\(e\)](#)

^b [29 C.F.R. § 1910.38\(f\)](#)

^c [40 C.F.R. § 68.90\(b\)\(3\)](#); [40 C.F.R. § 68.96\(a\)](#)

El día del incidente, es probable que se repitieran los comportamientos aprendidos en los simulacros de incendio. Como resultado, varios trabajadores inhalaron amoníaco tóxico durante la evacuación, probablemente debido a la salida utilizada, al primer punto de reunión o a ambos. La **Figura 32** muestra la ubicación de los puntos de reunión, incluidos los mástiles con banderas utilizados en los simulacros.

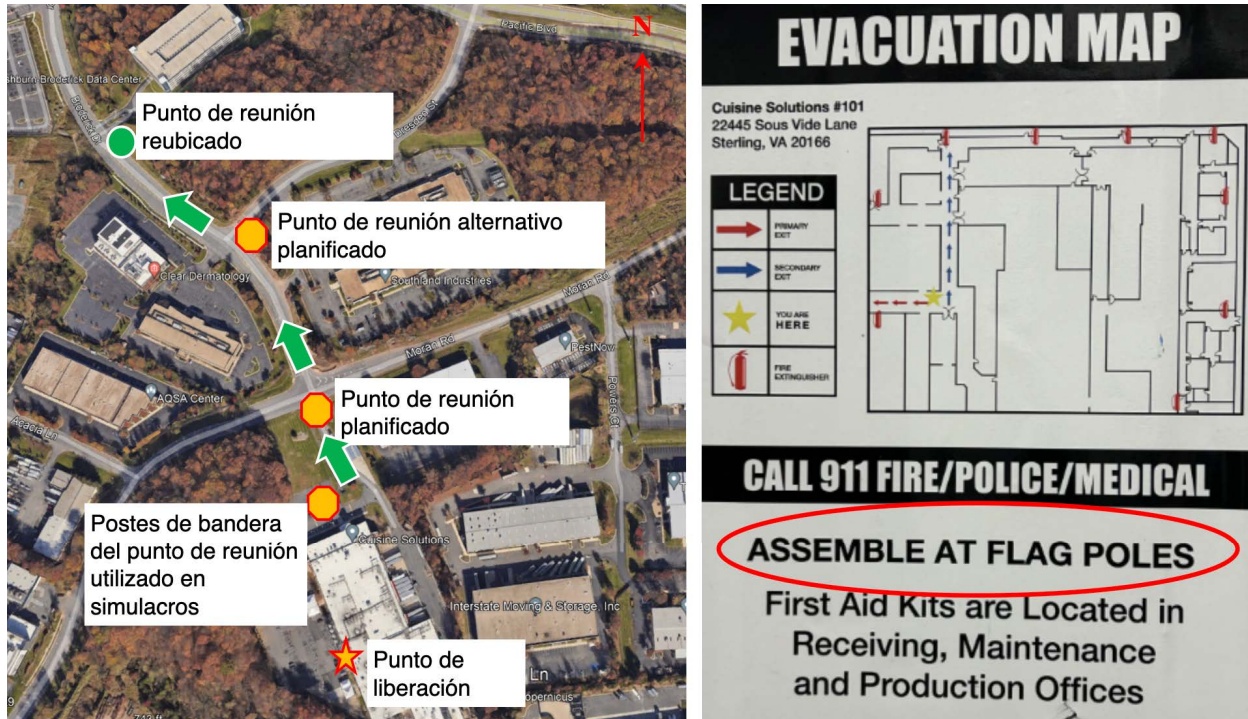


Figura 32: Izquierda, punto de reunión para simulacros junto a los postes de las banderas, en comparación con el EAP y los puntos de reunión reubicados. Derecha, ejemplo de mapas de evacuación en el edificio. (Izquierda, crédito: Google Earth, anotado por CSB. Derecha, crédito: CSB)

Aunque la Guía de tareas críticas del IIAR no establece específicamente que sea necesario realizar simulacros de evacuación para los empleados, sí sugiere que los empleados, contratistas, visitantes y transeúntes dependerán de su formación y comprensión de cómo escapar de una fuga de amoníaco durante una emergencia [42, p. 11]. La Guía de tareas críticas contiene listas de numerosos elementos que deben incluirse en la formación, como el autorrescate, la comprensión de los planes de evacuación de amoníaco de todas las ubicaciones dentro de las instalaciones y cómo escapar lateralmente y a barlovento de una liberación de amoníaco [42, pp.15-16]. Los simulacros son una forma eficaz de garantizar que las personas que se encuentran en las instalaciones durante una fuga recuerden su formación en caso de emergencia.

A nivel local, en el condado de Loudoun (Virginia), el Comité Local de Planificación de Emergencias (LEPC) también ofrece las siguientes directrices de preparación en su Plan de Respuesta a Emergencias con Materiales Peligrosos:

Los propietarios, operadores y empleados de las instalaciones deben poner en práctica sus políticas, planes y procedimientos, así como realizar simulacros con equipos, habilidades y actividades de emergencia para garantizar que todas las personas que puedan verse involucradas en la fuga de un material peligroso estén preparadas y sean capaces de tomar las medidas adecuadas [énfasis añadido].

Estas directrices deben seguirse, incluso si tomar las medidas adecuadas significa una simple evacuación.

La planta de Sterling no realizó simulacros de emergencia eficaces para preparar a su personal para responder a una fuga de amoníaco al aire libre. En consecuencia, algunos trabajadores permanecieron cerca o a sotavento de la fuga, sin saber muy bien hacia dónde evacuar durante el incidente. Como se ha comentado anteriormente en la sección 4.3.1, dado que no había alternativas a los puntos de reunión establecidos en el EAP, como evacuar a barlovento de la fuga o refugiarse en el lugar, ningún simulacro abordaba adecuadamente una fuga de amoníaco fuera del edificio.

El CSB concluye que, si bien los simulacros de emergencia de la planta de Sterling abordaban un incendio, no abordaban una liberación de amoníaco. Durante el incidente, muchos evacuados utilizaron la salida más cercana tal como lo hacían en los simulacros, lo que en algunos casos los llevó a evacuar a través de la nube de amoníaco.

El CSB recomienda que el sitio de Sterling de Cuisine Solutions actualice su Plan de Acción de Emergencia utilizando guías como la Guía de Tareas Críticas del IIAR para la Planificación de Emergencias en Sistemas de Refrigeración por Amoníaco. Como mínimo, el plan actualizado debería incluir el requisito de realizar simulacros anuales de liberación de amoníaco que incluyan a todo el personal en el sitio (incluidos empleados corporativos). Los simulacros anuales deben incluir escenarios separados de liberación de amoníaco en interiores y exteriores y abordar el uso de mangas de viento para determinar rutas de evacuación, rutas alternativas, puntos de reunión y la consideración de la decisión de refugio en sitio. Además, los simulacros deben poner a prueba cada alarma de evacuación y el equipo de protección de emergencia cuando corresponda.

4.3.3 SENSORES Y ALARMAS DE AMONÍACO

Cuisine Solutions había instalado múltiples sensores de amoníaco en la planta de Sterling, tanto en algunos colectores comunes de alivio, como en Tank Farm 5, como en las áreas de producción para detección de fugas en interiores. Las normas del IIAR no exigen sensores de amoníaco en colectores comunes de alivio como los de Tank Farm 5. Aunque los sensores estaban instalados, el CSB no encontró documentación que indicara qué función cumplían ni cuál debía ser la respuesta cuando detectaran amoníaco.

Alarma del colector común de alivio de Tank Farm 5

Como se analizó en la Sección 1.4.3, se instaló un sensor de amoníaco en el colector común de alivio de Tank Farm 5 para detectar eventos de alivio de amoníaco. Cuando este sensor detectaba concentraciones altas, se activaba una alarma en la HMI de la sala de control de refrigeración, pero no existía una acción

correctiva planificada en respuesta a esta alarma, ni mediante control automático ni mediante un procedimiento operativo para intervención humana.

El técnico de refrigeración informó al CSB que la noche del incidente escuchó la alarma en la HMI después de regresar a la planta, cuando se encontraba en la sala de control de refrigeración. Sin embargo, cuando la alarma sonó inicialmente, no había nadie en la sala de control para escucharla o responder. En cualquier caso, poco después de que el primer empleado reportara olor a amoníaco, se hizo visualmente evidente que el amoníaco estaba saliendo del colector común de alivio de Tank Farm 5. Además, cuando el técnico regresó a la planta, ya conocía la fuente de la liberación por llamadas telefónicas. Después de que los servicios de emergencia llegaron y solicitaron que se apagara el sistema de refrigeración, el técnico detuvo los compresores. Por lo tanto, la alarma en la HMI no tuvo utilidad durante el incidente.

Alarma e interbloqueo del colector común de la sala de compresores

De manera similar al diseño del colector común de Tank Farm 5, el colector común de alivio en la sala de compresores, por el cual descargaban todas las válvulas de alivio de presión de emergencia de esa sala, también incluía un sensor de amoníaco en el colector de descarga. Sin embargo, esta alarma sí activaba interbloqueos. Si el sensor detectaba 10.000 ppm, el sistema de control detenía automáticamente todos los compresores y cerraba la válvula principal (*king valve*). No existía una función de interbloqueo equivalente para Tank Farm 5.

Alarmas interiores de amoníaco

La planta de Sterling también contaba con 29 sensores cerca de posibles fuentes interiores de fuga de amoníaco, como evaporadores y congeladores, distribuidos por las áreas de producción^a. Aunque algo de amoníaco ingresó al edificio, probablemente a través de una toma de HVAC en el techo cercana al punto de descarga de alivio, ninguno de los sensores interiores activó alarmas durante el incidente. Dado que el área de descanso donde los trabajadores reportaron olor a amoníaco estaba separada de las áreas de producción donde se ubicaban los sensores, es probable que estos nunca detectaran concentraciones suficientes para alarmar. Ninguna persona entrevistada por el CSB reportó luces intermitentes o alarmas audibles en el edificio la noche del incidente, más allá de la alarma en la HMI mencionada por el técnico de refrigeración.

Cada uno de los 29 sensores interiores estaba diseñado para activar una alarma local y una luz de advertencia para alertar a los trabajadores de una fuga interior de amoníaco. Sin embargo, no existía equipo configurado para alertar a los trabajadores de una liberación de amoníaco fuera del edificio. Por lo tanto, no había alarmas audibles ni luces de advertencia para alertar al personal dentro del edificio sobre una liberación exterior.

El CSB concluye que la planta de Sterling no contaba con alarmas locales ni con otra indicación audible o visual en Tank Farm 5, donde ocurrió la liberación, ni en las puertas de salida de emergencia adyacentes a Tank Farm 5, y que algunos empleados desconocían la ubicación de la liberación y evacuaron hacia la nube de amoníaco durante el incidente.

^a Estos sensores de amoníaco para interiores se instalaron en 2019.

Después del incidente, Cuisine Solutions instaló sensores adicionales de amoníaco en la planta de Sterling, incluidos sensores junto a las puertas de salida de emergencia que activaban luces para indicar si era seguro evacuar por esa puerta.

4.3.4 PARO DE EMERGENCIA

La planta de Sterling contaba con botones de paro de emergencia fuera de la sala de compresores. Estos botones podían apagar remotamente los compresores de amoníaco y cerrar la válvula principal (*king valve*).

El día del incidente, el técnico de mantenimiento^a en sitio no apagó el sistema de refrigeración utilizando los botones de paro de emergencia. Cuando comenzó la evacuación, ayudó a evacuar a los trabajadores sin tomar ninguna acción relacionada con el sistema de amoníaco. Cuando el técnico de refrigeración regresó a la planta, apagó los compresores individualmente aproximadamente 25 a 30 minutos después de que comenzó la liberación, pero no cerró la válvula principal. La noche del incidente, nadie utilizó los botones de paro de emergencia, cuya ubicación se muestra en la **Figura 33**, aunque decenas de personas pasaron junto a ellos durante la evacuación y los botones no estaban cerca de la liberación. Activar los botones de paro de emergencia al inicio de la liberación de amoníaco podría haber detenido inmediatamente los compresores y cerrado la válvula principal, aislando la mayor parte del inventario de amoníaco de la válvula de alivio de presión de emergencia abierta y limitando la cantidad liberada.

^a El técnico de mantenimiento era el sustituto del técnico de refrigeración, que se encontraba fuera del lugar de trabajo en su pausa para comer cuando se produjo el incidente.

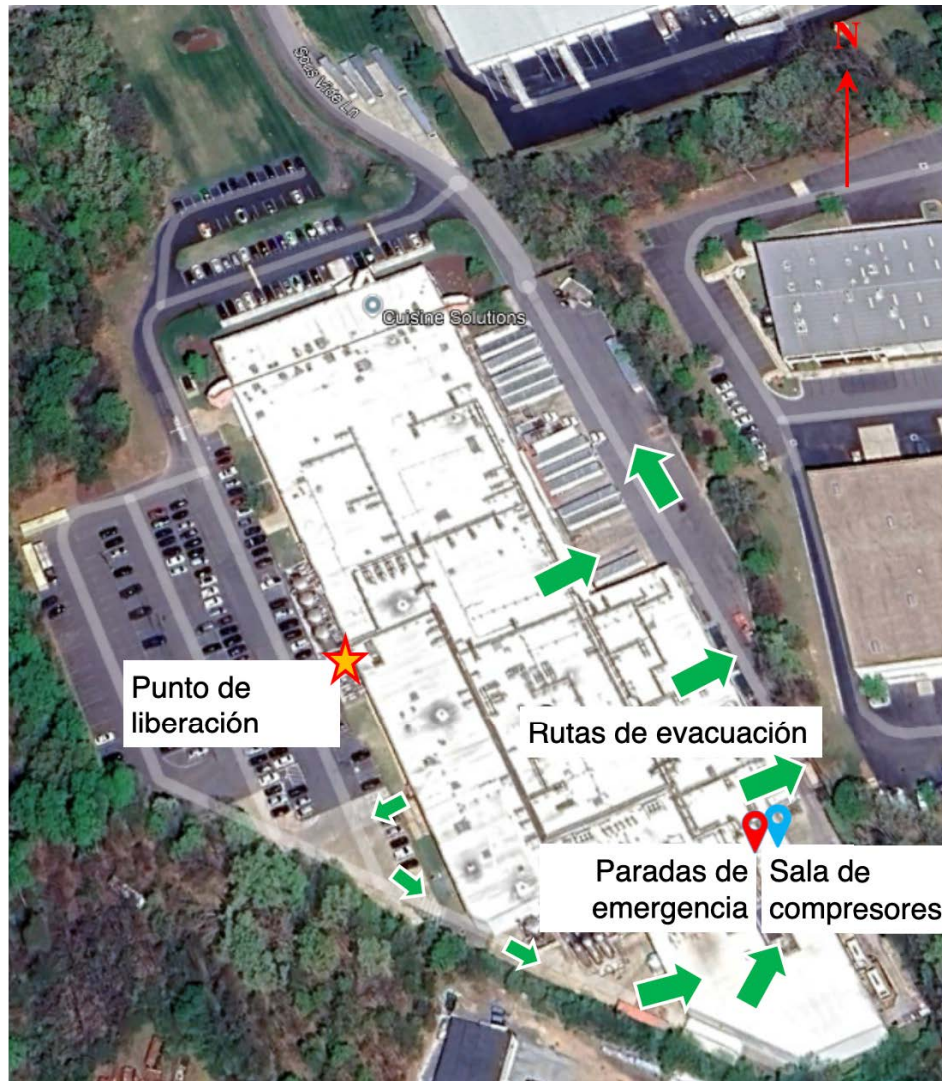


Figura 33: Botones de parada de emergencia (marcador rojo) fuera de la sala de compresores (marcador azul), accesibles durante la evacuación. (Crédito: Google Earth, anotado por CSB)

Durante entrevistas con trabajadores, el CSB fue informado de que solo el gerente de refrigeración, quien trabajaba en turno diurno, estaba capacitado para utilizar los botones de paro de emergencia. El PAE del sitio de Sterling ni siquiera mencionaba los botones de paro de emergencia. Además, ningún procedimiento operativo de la planta instrúa a los empleados sobre cuándo utilizar los botones de paro de emergencia, aunque existían procedimientos de paro de emergencia para equipos individuales. El CSB no encontró evidencia de que los paros de emergencia a nivel de todo el sistema se incluyeran en algún programa de capacitación en la planta de Sterling.

OSHA exige que los lugares de trabajo con un PAE desarrollen “procedimientos que deben seguir los empleados que permanezcan para operar funciones críticas de la planta antes de evacuar”^a. Tanto la norma PSM de OSHA como la norma RMP de la EPA exigen que los procedimientos operativos incluyan “el paro de emergencia, incluidas las condiciones bajo las cuales se requiere el paro de emergencia y la asignación de la responsabilidad de paro a operadores calificados para asegurar que el paro de emergencia se ejecute de manera segura y oportuna”^b. Para instalaciones que utilizan sistemas de refrigeración por amoníaco, los procedimientos típicos de emergencia incluyen apagar los compresores y cerrar la válvula principal para detener el flujo de amoníaco [28, p. 468]. Sin embargo, la planta de Sterling no proporcionó a sus trabajadores procedimientos operativos ni capacitación sobre cómo o cuándo utilizar los botones de paro de emergencia.

ANSI/IIAR 7 (2019), *Developing Operating Procedures for Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems*, exige documentar “los pasos para operar el sistema de seguridad bajo operaciones de emergencia, como cuando ocurre una liberación de amoníaco en la instalación” [44, p. 26]. Además, en el material informativo del apéndice, ANSI/IIAR 7 recomienda desarrollar “procedimientos de paro de emergencia y de operación para todo el sistema, por ejemplo, después de una liberación grande de amoníaco...” [44, p. 39].

En la Guía de Tareas Críticas del IIAR (2021), se recomienda que, utilizando un respirador purificador de aire y bajo condiciones seguras:

Un operador o técnico capacitado puede asistir a una víctima o tomar medidas simples para mitigar la liberación mientras escapa [énfasis añadido]. Dichas medidas consisten en emplear los medios más apropiados y disponibles para reducir el impacto de una liberación de amoníaco, como el uso de ventilación, el paro del sistema u otras medidas de control [42, p. 17].

El CSB había destacado previamente la importancia de utilizar un botón de paro de emergencia para detener la circulación de amoníaco en un sistema de refrigeración en un Boletín de Seguridad publicado en 2015, que analizaba una liberación de amoníaco en Millard Refrigerated Services, Inc., en Theodore, Alabama, ocurrida en agosto de 2010^c [45], donde tres empleados resultaron expuestos mientras intentaban mitigar la fuga en lugar de activar el botón de paro de emergencia.

^a 29 C.F.R. § 1910.38(c)(3); 29 C.F.R. § 1910.119(n)

^b 29 C.F.R. § 1910.119(f)(1)(i)(D); 40 C.F.R. § 68.69(a)(1)(iv)

^c El Boletín de Seguridad se encuentra en el sitio web del CSB, en <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=5933>.

LECCIÓN CLAVE

Se debe capacitar a varios empleados para que realicen tareas sencillas, como utilizar un dispositivo de apagado de emergencia. Un plan de acción de emergencia bien diseñado debe incluir procedimientos sencillos que los empleados suplentes puedan llevar a cabo en caso de que los empleados especializados no estén disponibles o no puedan actuar durante la emergencia. La implementación eficaz de un plan de acción de emergencia debe incluir elementos como el uso del botón de parada de emergencia, si se puede acceder a él de forma segura, junto con simulacros periódicos para garantizar que todo el personal presente en las instalaciones comprenda claramente sus funciones en caso de emergencia, incluso si dichas funciones solo incluyen la evacuación segura.

La planta de Sterling no contaba con un procedimiento de paro a nivel de todo el sistema de refrigeración por amoníaco en caso de una liberación en interiores o exteriores. Por lo tanto, ningún trabajador estaba capacitado para activar los botones de paro de emergencia para detener el sistema de amoníaco, como recomienda ANSI/IIAR 7 [44, p. 39]. La noche del incidente, utilizar los botones de paro de emergencia de manera temprana podría haber minimizado la cantidad de amoníaco liberado y reducido la gravedad del incidente. En este caso, los botones de paro de emergencia eran fácilmente accesibles para el personal durante la evacuación e incluso antes de que esta comenzara.

LECCIÓN CLAVE

Las empresas deben asegurarse de que implementan plenamente todos los elementos y requisitos de PSM en sus programas, y garantizar que se subsanen cualquier deficiencia.

El CSB concluye que la planta de Sterling no contaba con un procedimiento de paro de emergencia a nivel de todo el sistema de amoníaco y no incluyó los botones de paro de emergencia en su Plan de Acción de Emergencia. Como resultado, nadie en el sitio fue designado ni capacitado para activar los botones de paro de emergencia la noche del incidente. Si personal seleccionado hubiera sido capacitado para utilizar los botones de paro de emergencia y lo hubiera hecho dentro de los primeros minutos del inicio de la liberación, la gravedad del incidente podría haberse reducido.

El CSB no emite una recomendación específica a Cuisine Solutions sobre este punto porque la empresa ya está obligada a contar con procedimientos de paro de emergencia conforme a la norma PSM^a.

Confiar únicamente en la intervención humana a veces resulta ineficaz, como ocurrió en Millard Refrigerated Services y en Cuisine Solutions, y como lo demostró el incidente del 31 de julio de 2024 en la planta de Sterling. Las personas pueden dudar en activar un paro de emergencia o pueden no ser capaces de alcanzarlo durante una emergencia. Para liberaciones tóxicas, la mitigación inmediata tras detectar la liberación es clave para reducir las consecuencias, y dicha mitigación suele ser más rápida cuando es automatizada. Para mitigar el peligro en este incidente, Cuisine Solutions podría haber vinculado el sensor de amoníaco del colector común de alivio de Tank Farm 5 a la función de paro de emergencia, automatizando el paro del sistema. Dado que esta función ya existía para el sensor del colector común de la sala de compresores, Cuisine Solutions también podría haber incluido el sensor del colector común de Tank Farm 5.

LECCIÓN CLAVE

Cuando se instalan, las medidas de emergencia automatizadas pueden acelerar la respuesta ante una liberación, minimizando así la cantidad liberada y las consecuencias de una fuga en un sistema de refrigeración por amoníaco.

Independientemente de cualquier acción mitigadora automatizada incorporada en un sistema de refrigeración, el personal seleccionado aún debe estar capacitado para realizar de manera segura y manual un paro de emergencia. Un paro automatizado puede fallar o pueden ocurrir eventos imprevistos que no tengan una respuesta automática correspondiente.

^a 29 C.F.R. § 1910.119(f)(1)(i)(D)

El CSB concluye que la planta de Sterling no contaba con un paro automatizado del sistema de refrigeración por amoníaco en caso de una liberación de amoníaco y dependía de la intervención humana, la cual no ocurrió durante el incidente ni la evacuación.

El CSB recomienda que el sitio de Sterling de Cuisine Solutions actualice su Plan de Acción de Emergencia utilizando guías como la Guía de Tareas Críticas del IIAR para la Planificación de Emergencias en Sistemas de Refrigeración por Amoníaco. Como mínimo, el plan actualizado debería:

- a. Implementar el uso de paros de emergencia, según corresponda; y
- b. Incluir requisitos para realizar simulacros anuales de liberación de amoníaco que incluyan a todo el personal en el sitio (incluidos empleados corporativos). Los simulacros anuales deben incluir la práctica del uso de paros de emergencia, cuando corresponda.

5 CONCLUSIONES

5.1 HALLAZGOS

Análisis técnico

1. Aunque las válvulas de alivio de presión de emergencia de Tank Farm 5 probablemente excedían la frecuencia de reemplazo o prueba de 5 años, no haberlas probado o reemplazado a tiempo no fue causal del incidente.
2. La liberación de amoníaco fue consecuencia de la apertura de una válvula de alivio de presión de emergencia en el tambor de compensación del Intercambiador de Calor 5 debido a un evento de sobrepresión, y la válvula de alivio de presión de emergencia funcionó según lo diseñado y previsto en este evento.
3. La liberación de amoníaco fue consecuencia de un evento de sobrepresión, y una salida cerrada o restringida en el tambor de compensación del Intercambiador de Calor 5, combinada con una alteración del proceso, probablemente inició el evento. Sin embargo, sin datos del proceso disponibles para su análisis, no pudo determinarse la causa específica de la alteración del proceso.
4. La liberación de amoníaco no se vaporizó completamente en la descarga a la atmósfera, ya que el modelado de dispersión de una liberación solo de vapor no coincide con las observaciones de la nube de amoníaco durante el incidente.
5. La liberación de amoníaco contenía aerosol líquido, lo que provocó una nube de amoníaco que se abatió rápidamente y alcanzó el nivel del suelo. Es probable que la nube a nivel del suelo contuviera concentraciones IPVS de amoníaco en zonas por las que transitaban los trabajadores durante la evacuación, incluso fuera de algunas puertas de salida de emergencia de la planta.
6. La cantidad liberada fue de aproximadamente 275 libras, con base en la tasa de alivio prevista para un escenario de alivio con líquido, que fue el que más se asemejó al evento real.
7. Aunque la liberación ocurrió en el lado oeste del edificio, los efectos de estela del edificio probablemente contribuyeron a la presencia de olores a amoníaco a nivel del suelo a lo largo de la ruta de evacuación en el lado este del edificio.
8. La noche del incidente, la liberación de amoníaco contenía aerosol líquido procedente del tambor de compensación del Intercambiador de Calor 5, probablemente debido a (1) sobrellenado con líquido en ebullición, (2) arrastre de líquido causado por un alto nivel de líquido y una caída súbita de presión cuando se abrió la válvula de alivio de presión de emergencia, o (3) espacio de vapor insuficiente para el desprendimiento vapor-líquido, o una combinación de estos factores. Como resultado, la liberación de amoníaco, que contenía aerosol líquido, permitió que concentraciones IPVS alcanzaran el nivel del suelo cerca del edificio y de las rutas de evacuación.

9. La noche del incidente, el líquido en la descarga de alivio fue el factor más crítico para las condiciones IPVS a nivel del suelo, y es probable que cambios factibles en la velocidad de descarga, orientación y elevación no hubieran evitado que las concentraciones IPVS alcanzaran el nivel del suelo.
10. Cuando hay líquido presente en la descarga de alivio, la velocidad de descarga, una orientación de descarga vertical hacia arriba y una mayor elevación pueden ser insuficientes para superar la densidad de una liberación bifásica de amoníaco y para evitar concentraciones inseguras de amoníaco a nivel del suelo.

Alivio atmosférico bifásico

11. ANSI/IIAR 2 no contempla posibles escenarios de sobrellenado con líquido, arrastre de líquido o alivio por liberación de aerosoles, y no proporciona a los usuarios orientación de diseño ni requisitos para prevenir líquido o aerosol en descargas a la atmósfera.
12. Si ANSI/IIAR 2 hubiera identificado escenarios potenciales y requerido una evaluación de posibles eventos de sobrellenado con líquido, arrastre de líquido o liberación de aerosoles, la probabilidad del incidente de la planta de Sterling podría haberse reducido.

Descarga a una ubicación segura

13. ANSI/IIAR 2 no garantiza que no haya daño a las personas para posibles escenarios de sobrellenado con líquido, arrastre de líquido o alivio por aerosoles, y no proporciona a los usuarios orientación y requisitos eficaces para determinar con precisión el potencial y las consecuencias de líquido o aerosol en descargas de alivio.
14. ANSI/IIAR 2 no exige salvaguardas para mitigar una liberación de líquido o aerosol a la atmósfera en escenarios de alivio y no proporciona a los usuarios orientación sobre la descarga de aerosoles a una ubicación segura.
15. Si bien ANSI/IIAR 2 contiene varios requisitos sobre orientación, elevación y ubicación de la descarga de alivio, estos requisitos pueden no ser suficientes para asegurar que las corrientes de alivio de amoníaco se descarguen a una ubicación segura. Se requiere un análisis de dispersión para determinar el impacto potencial en rutas de evacuación y receptores públicos para escenarios de alivio a la atmósfera.
16. El diseño de la tubería de descarga a la atmósfera de la planta de Sterling puede no ser suficiente para mitigar condiciones IPVS a nivel del suelo y asegurar la descarga a una ubicación segura. Como lo demostraron el incidente y el análisis de dispersión del CSB, se requiere un análisis de dispersión para determinar el impacto potencial en rutas de evacuación y receptores públicos para escenarios de alivio a la atmósfera, incluidos escenarios de alivio con líquido o aerosol y efectos de estela del edificio.

17. Cuisine Solutions no proporcionó mitigación para alivio de amoníaco con líquido o bifásico en Tank Farm 5. Si hubieran existido salvaguardas mitigadoras eficaces, Cuisine Solutions podría haber logrado evitar daños a las personas.
18. Sin datos de proceso más extensos del sistema de refrigeración en un historial de datos del proceso, la planta de Sterling podría experimentar una alteración del proceso no detectada, similar a los eventos que condujeron al incidente. La falta de dichos datos de proceso disponibles para el monitoreo del desempeño puede ocultar problemas graves de control del proceso, dificultar la investigación de un incidente o cuasi-incidente y aumentar la probabilidad de un incidente recurrente.

Preparación para emergencias

19. El Plan de Acción de Emergencia del sitio de Sterling no siguió la guía del IIAR ni abordó adecuadamente posibles liberaciones de amoníaco fuera del edificio, incluidas rutas de evacuación y puntos de reunión alternativos basados en la dirección del viento, mangas de viento visibles, distancia adecuada para asegurar que los puntos de reunión sean seguros, consideración de una posible estrategia de refugio en sitio o equipo de protección de escape de emergencia para la evacuación. Como resultado, durante el incidente, algunos empleados evacuaron a través de la nube de amoníaco o se reunieron en el punto de reunión designado demasiado cerca de la liberación, lo que provocó la inhalación de gas amoníaco tóxico.
20. Aunque la decisión de evacuar se tomó dentro de un minuto después de que apareció una nube visible, la comunicación de las instrucciones de evacuación fue ineficaz, en parte porque no existía una alarma de evacuación para alertar a todos los empleados al mismo tiempo sobre la orden de evacuar. En su lugar, la radio y el boca a boca comunicaron la noticia de la evacuación y las instrucciones sobre por dónde salir del edificio. Esto prolongó la evacuación y provocó que algunos evacuados salieran del edificio en dirección a la liberación.
21. Si bien los simulacros de emergencia de la planta de Sterling abordaban un incendio en el sitio, no abordaban una liberación de amoníaco. Durante el incidente, muchos evacuados utilizaron la salida más cercana tal como lo hacían en los simulacros, lo que en algunos casos los llevó a evacuar a través de la nube de amoníaco.
22. La planta de Sterling no contaba con alarmas locales ni con otra indicación audible o visual en Tank Farm 5 donde ocurrió la liberación ni en las puertas de salida de emergencia adyacentes a Tank Farm 5, y algunos empleados desconocían la ubicación de la liberación y evacuaron hacia la nube de amoníaco durante el incidente.
23. La planta de Sterling no contaba con un procedimiento de emergencia para un paro del sistema de amoníaco a nivel de toda la instalación y no incluyó los botones de paro de emergencia en su Plan de Acción de Emergencia. Como resultado, nadie en el sitio fue designado ni capacitado para activar los botones de paro de emergencia la noche del incidente. Si personal seleccionado hubiera sido capacitado para utilizar los botones de paro de emergencia y lo hubiera hecho dentro

de los primeros minutos del inicio de la liberación, la gravedad del incidente podría haberse reducido.

24. La planta de Sterling no contaba con un paro automatizado del sistema de refrigeración por amoníaco en caso de una liberación de amoníaco y dependía de la intervención humana, la cual no ocurrió durante el incidente ni la evacuación.

5.2 CAUSA

El CSB determinó que la causa del incidente fue una sobrepresión en un recipiente que liberó una nube tóxica de amoníaco a través de una válvula de alivio de presión de emergencia que se abrió cerca del estacionamiento de empleados. La nube de amoníaco contenía un componente líquido significativo, lo que provocó que gran parte de ella descendiera rápidamente al nivel del suelo, exponiendo a los trabajadores durante la evacuación.

Contribuyó al incidente la falta de descarga de esta válvula de alivio de presión de emergencia hacia una ubicación segura y la ausencia de controles de ingeniería o administrativos—como un paro automatizado de emergencia del sistema de refrigeración—que pudieran haber minimizado la presencia de líquido o aerosol en la liberación de amoníaco.

La preparación insuficiente para emergencias en la planta de Sterling de Cuisine Solutions—incluido el Plan de Acción de Emergencia del sitio, que no aseguraba que los trabajadores pudieran evacuar de forma segura ante una liberación de amoníaco en exteriores, la falta de simulacros eficaces y la falta de un paro de emergencia eficaz—contribuyó a la severidad del incidente.

6 RECOMENDACIONES

Para prevenir futuros incidentes químicos y con el fin de impulsar la excelencia en seguridad química para proteger a las comunidades, a los trabajadores y al medio ambiente, el CSB emite las siguientes recomendaciones de seguridad:

6.1 INSTITUTO INTERNACIONAL DE REFRIGERACIÓN TOTALMENTE NATURAL (IIAR)

2024-03-I-VA-R1

Actualizar ANSI/IIAR 2 para incluir orientación destinada a prevenir o mitigar descargas atmosféricas con líquido o bifásicas provenientes de sistemas de alivio de presión de emergencia, como la orientación contenida en la Norma API 521, *Pressure-relieving and Depressuring Systems*. Como mínimo, la orientación debería:

- a. Identificar escenarios de riesgo, tales como recipientes de compensación horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor;
- b. Abordar consideraciones de diseño y controles para reducir la probabilidad de que los escenarios identificados deriven en sobrepresión o falla de equipos y para asegurar el desprendimiento vapor-líquido (la separación del vapor y el líquido) durante el alivio de presión en los escenarios identificados; y
- c. Exigir salvaguardas mitigadoras en los casos en que no pueda garantizarse de manera confiable el desprendimiento vapor-líquido durante el alivio de presión. Esto también debería incluir sistemas alternativos de disposición cuando corresponda.

2024-03-I-VA-R2

Actualizar ANSI/IIAR 2 para incluir un requisito de evaluación que determine si los dispositivos de alivio de presión de emergencia descargan hacia una ubicación segura, por ejemplo mediante un análisis de dispersión.

6.2 CUISINE SOLUTIONS, INC., SITIO DE STERLING

2024-03-I-VA-R3

Reducir la probabilidad o mitigar las consecuencias de descargas atmosféricas con líquido o bifásicas del sistema de alivio de presión de emergencia de la refrigeración por amoníaco en la planta de Sterling. Como mínimo:

- a. Identificar escenarios de liberación con líquido o bifásicos, en particular para tambores de compensación horizontales y otros recipientes que contengan líquido saturado con poco espacio de vapor;
- b. Implementar controles de ingeniería para reducir la probabilidad de escenarios de alto nivel de líquido, sobrellenado o sobrepresión por ebullición; y
- c. Implementar controles de ingeniería para mitigar las consecuencias de estos escenarios cuando su probabilidad no pueda reducirse a un nivel aceptable, por ejemplo mediante sistemas de control de presión de emergencia, tambores separadores atmosféricos (*atmospheric knockout drums*) o sistemas de paro automático.
- d. Contratar a un tercero competente para auditar los sistemas de alivio de presión. La auditoría deberá asegurar que (i) se hayan identificado todos los escenarios de alivio relevantes, (ii) los controles de ingeniería preventivos y mitigadores aborden adecuadamente los peligros y (iii) los controles de ingeniería se mantengan de manera tal que funcionen correctamente cuando se requieran.

2024-03-I-VA-R4

Implementar un historiador electrónico de datos de proceso y un sistema de gestión para asegurar que los parámetros críticos del proceso se recopilen, se supervisen y se almacenen. El sistema debe estar disponible para los técnicos de refrigeración a fin de que puedan monitorear el sistema de refrigeración y responder a, y analizar, alteraciones del proceso.

2024-03-I-VA-R5

Actualizar el Plan de Acción de Emergencia del sitio de Sterling de Cuisine Solutions utilizando orientación como la *Critical Task Guidance for Ammonia Refrigeration System Emergency Planning* del IIAR. Como mínimo, el plan actualizado debería:

- a. Abordar por separado las liberaciones de amoníaco en interiores y exteriores, incluidos los distintos tipos de alarmas y las respuestas correspondientes;
- b. Especificar claramente las rutas de evacuación y los puntos de reunión apropiados, incluidos los alternativos;
- c. Proporcionar orientación sobre el uso de mangas de viento para mantenerse a barlovento de una liberación durante la evacuación;
- d. Implementar estrategias de refugio en sitio, equipo de protección de emergencia y paros de emergencia, según corresponda; y
- e. Incluir requisitos para realizar simulacros anuales de liberación de amoníaco que incluyan a todo el personal presente en el sitio (incluidos los empleados corporativos). Los simulacros anuales

deben incluir escenarios separados de liberación de amoníaco en interiores y exteriores y abordar el uso de mangas de viento para ayudar a determinar rutas de evacuación, rutas de evacuación alternas, puntos de reunión y la consideración de la decisión de refugiarse en sitio. Además, los simulacros deben poner a prueba cada alarma de evacuación, el equipo de protección de emergencia y los paros de emergencia, cuando corresponda.

2024-03-I-VA-R6

Agregar una o más alarmas específicas para liberaciones de amoníaco, de modo que los trabajadores puedan responder adecuadamente a una liberación. La señal distintiva de cada alarma deberá documentarse en el Plan de Acción de Emergencia actualizado y podrá incluir múltiples alarmas y respuestas diferenciadas, como una para refugio en sitio y otra para evacuación.

7 LECCIONES CLAVE PARA LA INDUSTRIA

Para prevenir futuros incidentes químicos y con el fin de impulsar la excelencia en seguridad química para proteger a las comunidades, a los trabajadores y al medio ambiente, el CSB insta a las empresas a revisar las siguientes lecciones clave:

1. Las empresas deben asegurarse de medir y almacenar datos de proceso de modo que, cuando ocurra un incidente o una alteración del proceso, puedan analizar los datos, determinar las causas y realizar cambios para detener la alteración o prevenir otro incidente. La imposibilidad de acceder a dichos datos de proceso puede ocultar problemas graves de control del proceso. Los empleados no pueden responder a una alteración del proceso ni prevenir futuras si no pueden ver cómo se desarrolló dicha alteración. Investigar un incidente sin datos de proceso suficientes dificulta la investigación y hace más probable que se repita un incidente.
2. Si bien un análisis de dispersión no relaciona la nube visible con la nube tóxica, dicho análisis, cuando se combina con un video de la nube visible, muestra claramente que gran parte de una nube tóxica de amoníaco también puede ser invisible. NO se acerque a una nube de amoníaco sin el equipo de protección personal (EPP) adecuado.
3. Los efectos de estela de edificaciones (*building wake effects*) y otras consideraciones complejas de flujo también deben evaluarse en los análisis de dispersión, cuando corresponda, para asegurar una descarga segura a la atmósfera y una evacuación segura cuando sea necesaria.
4. En los sistemas de alivio de refrigeración por amoníaco, la fracción líquida en una liberación en aerosol, la velocidad de descarga, la orientación de la descarga y la elevación de la descarga están estrechamente interrelacionadas y deben estudiarse en cualquier caso de alivio atmosférico para asegurar que las válvulas de alivio de presión de emergencia descarguen de manera segura a la atmósfera.
5. Las alarmas distintivas o las alarmas específicas para determinados escenarios de liberación permiten que los trabajadores respondan adecuadamente y con rapidez ante una liberación. Los distintos escenarios de liberación deben documentarse en el Plan de Acción de Emergencia y pueden incluir múltiples alarmas y respuestas diferenciadas, como una para refugio en sitio y otra para evacuación.
6. Se debe capacitar a múltiples empleados para realizar tareas simples, como el uso de un dispositivo de paro de emergencia. Un Plan de Acción de Emergencia bien diseñado debe incluir procedimientos simples que empleados de respaldo puedan ejecutar en caso de que el personal especializado no esté disponible o quede incapacitado durante la emergencia. La implementación eficaz de un Plan de Acción de Emergencia debe incluir elementos como el uso del botón de paro de emergencia cuando se pueda acceder a él de manera segura, junto con simulacros periódicos para asegurar que todo el personal presente en el sitio comprenda claramente sus funciones en una emergencia, aun cuando dichas funciones se limiten a una evacuación segura.

7. Las empresas deben asegurarse de implementar plenamente todos los elementos y requisitos del PSM en sus programas y de que cualquier brecha sea abordada.
8. Cuando estén instaladas, las acciones de emergencia automatizadas pueden acelerar la respuesta ante una liberación, minimizando así la cantidad liberada y las consecuencias de una liberación del sistema de refrigeración por amoníaco.

8 REFERENCIAS

- [1] Cuisine Solutions, Inc., "About Cuisine Solutions," 2024. [Online]. Disponible en: <https://mycuisinesolutions.com/pages/about-cuisine-solutions>. [Accessed 26 September 2024].
- [2] Cuisine Solutions, Inc., "Industries We Serve," Cuisine Solutions, 2024. [Online]. Disponible en: <https://cuisinesolutions.com/industry/>. [Accessed 27 September 2024].
- [3] Cuisine Solutions, Inc., "Our Global Presence," Cuisine Solutions, 2024. [Online]. Disponible en: <https://cuisinesolutions.com/our-global-presence/>. [Accessed 26 September 2024].
- [4] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Occupational Safety and Health Administration | Ammonia Refrigeration | Properties of Ammonia," [Online]. Disponible en: <https://www.osha.gov/etools/ammonia-refrigeration/ammonia>. [Accessed 14 October 2024].
- [5] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Occupational Safety and Health Administration | Ammonia Refrigeration Overview," [Online]. Disponible en: <https://www.osha.gov/ammonia-refrigeration>. [Accessed 28 September 2024].
- [6] Tanner Industries, Inc., "Anhydrous Ammonia: (SDS) Safety Data Sheet," 19 January 2023. [Online]. Disponible en: <https://tannerind.com/anhydrous-sds.html>. [Accessed 26 September 2024].
- [7] U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Region 7, "Accident Prevention and Response Manual for Anhydrous Ammonia Refrigeration System Operators," June 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/rmp/accident-prevention-and-response-manual-anhydrous-ammonia-refrigeration-system-operators>. [Accessed 27 September 2024].
- [8] P. J. Fellows, "Food Processing Technology - Principles and Practice (5th Edition)," Elsevier, 2022.
- [9] American Society of Mechanical Engineers (ASME), "Section VIII Rules for Construction of Pressure Vessels," in *2021 ASME Boiler and Pressure Vessel Code - An International Code*, New York, 2021, p. 94.
- [10] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Final Rule on Process Safety Management of Highly Hazardous Chemicals; Explosives and Blasting Agents," 26 May 1992. [Online]. Disponible en: <https://www.osha.gov/laws-regs/federalregister/1992-02-24>. [Accessed 15 March 2025].
- [11] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "Risk Management Program (RMP) Rule Overview," USEPA, 10 July 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/rmp/risk-management-program-rmp-rule-overview>. [Accessed 15 March 2025].
- [12] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "General RMP Guidance - Chapter 2: Applicability of Program Levels," April 2004. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/rmp/general-rmp-guidance-chapter-2-applicability-program-levels>. [Accessed 15 March 2025].
- [13] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), "ANSI/IIAR 2-2021 Standard for Design of Safe Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems," IIAR, Alexandria, Virginia, 2021.

- [14] The IIAR Condenser, "International Fire Code to Defer to IIAR for Ammonia Issues," August 2021. [Online]. Disponible en: <https://iiarcondenser.org/international-fire-code-to-defer-to-iiar-for-ammonia-issues/>. [Accessed 22 April 2025].
- [15] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Ammonia Refrigeration - Standards," [Online]. Disponible en: <https://www.osha.gov/ammonia-refrigeration/standards>. [Accessed 28 February 2025].
- [16] Loudoun County Virginia Combined Fire & Rescue System, "News and Announcements," 1 August 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.loudoun.gov/civicalerts.aspx?aid=9269>. [Accessed 16 January 2025].
- [17] WTVR-TV, "Ammonia leak at Virginia food plant sends 33 workers to hospitals," 1 August 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.wtvr.com/news/local-news/cuisine-solutions-ammonia-leak-hospitalizations-aug-1-2024>. [Accessed 25 January 2025].
- [18] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), "Ammonia Data Book," IIAR, Alexandria, Virginia, 2008.
- [19] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), "ANSI/IIAR 6-2019 Standard for Inspection, Testing, and Maintenance of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems," IIAR, Alexandria, Virginia, 2019.
- [20] Industrial Refrigeration Consortium (IRC), "Engineering Safety Relief Systems," University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 2006.
- [21] Cyrus Shank Company, "Cyrus Shank Company Product Catalog; Relief Valves, Manifolds, Hand Valves," August 2013. [Online]. Disponible en: <https://www.cyrusshank.com/shop/>. [Accessed 2 June 2025].
- [22] Mary Kay O'Connor Process Safety Center, "Dispersion Analysis," Texas A&M Engineering Experiment Station, 2025. [Online]. Disponible en: <https://psc.tamu.edu/research/consequence-analysis/>. [Accessed 26 May 2025].
- [23] R. Benintendi, Process Safety Calculations, Second Edition, Amsterdam: Elsevier, 2021.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "General RMP Guidance - Appendix E: Supplemental Risk Management Program Guidance for Ammonia Refrigeration Facilities," May 2004. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/rmp/general-rmp-guidance-appendix-e-supplemental-risk-management-program-guidance-ammonia>. [Accessed 1 October 2024].
- [25] Ammonia Safety and Training Institute (ASTI), "Cooperative Research and Development Agreement (CRADA) between Chemical Security Analysis Center (CSAC) and Ammonia Safety and Training Institute (ASTI)," Ammonia Safety and Training Institute (ASTI), 2024.
- [26] M. L. Timm, "Modeling of Releases from Ammonia Refrigeration Pressure Relief Valves Using Dispersion Modeling Software," in *2014 Industrial Refrigeration Conference & Heavy Equipment Show*, Nashville, 2014.
- [27] G. E. DeVaul, J. A. King, R. J. Lantzy and D. J. Fontaine, Understanding Atmospheric Dispersion of Accidental Releases, New York: American Institute of Chemical Engineers, 1995.
- [28] W. F. Stoecker, Industrial Refrigeration Handbook, McGraw-Hill, 1998.
- [29] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), Refrigeration Piping Handbook, Alexandria, Virginia: IIAR, 2019.

- [30] Resource Compliance, "Resource Compliance: Update on Ammonia Diffusion Tanks," 5 September 2017. [Online]. Disponible en: <https://resourcecompliance.com/wp-content/uploads/2017/03/Position-letter-on-California-Mechanical-Code-re-flaring.pdf>. [Accessed 21 April 2025].
- [31] L. S. Bonebrake and D. R. Kuespert, "What the Heck Do I Do with My Relief Valves?," in *2002 Ammonia Refrigeration Conference*, Kansas City, MO, 2002.
- [32] T. B. Jekel and D. T. Reindl, "Application and Considerations for Internal Relief in Industrial Refrigeration Systems," in *IIAR Natural Refrigeration Conference & Heavy Equipment Expo*, Orlando, 2024.
- [33] American Petroleum Institute (API), "API Standard 521, Pressure-Relieving and Depressuring Systems, 6th edition," 2014.
- [34] American Petroleum Institute (API), "API Standard 521, Pressure-Relieving and Depressuring Systems, Seventh Edition," 2020.
- [35] T. A. Kletz, *Critical Aspects of Safety and Loss Prevention*, London: Butterworths, 1990.
- [36] American Petroleum Institute (API), "Process Safety Performance Indicators for the Refining and Petrochemical Industries: API Recommended Practice 754: Third Edition, August 2021," 2021.
- [37] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), "Volume III of CSB Incident Reports," 22 July 2025. [Online]. Disponible en: https://www.csb.gov/assets/1/6/Incident_Reports_Volume_3_2025-07-22.pdf. [Accessed 25 August 2025].
- [38] J. B. Cornwell, D. W. Johnson and W. E. Martinsen, "Relief Valves and Vents: How Exit Conditions Affect Hazard Zones," 19-22 August 1990. [Online]. Disponible en: <https://www.questconsult.com/papers/relief-valves-vents/>. [Accessed 7 February 2025].
- [39] S. T. Maher, M. G. Monge, K. M. Hall and R. S. Adams, "Ammonia Refrigeration System Emergency Action Plans vs. Emergency Response Plans," [Online]. Disponible en: <https://archive.ammonia21.com/files/ammonia-emergency-action-response-plans.pdf>. [Accessed 25 April 2025].
- [40] U.S. Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Emergency Planning and Response - PSM & RMP 3".
- [41] Integrated Solutions, Inc., "What's the Difference Between the HAZWOPER's Emergency Response Plan and an Emergency Action Plan?," 18 March 2024. [Online]. Disponible en: <https://isienvironmental.com/hazwoper-response-emergency-action-plan-blog/>. [Accessed 25 April 2025].
- [42] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), *Critical Task Guidance for Ammonia Refrigeration System Emergency Planning*, 1st ed., Alexandria, Virginia: IIAR, 2021.
- [43] U.S. Environmental Protection Agency (EPA), "General RMP Guidance - Chapter 8: Emergency Response," December 2021. [Online]. Disponible en: <https://www.epa.gov/rmp/general-rmp-guidance-chapter-8-emergency-response-program>. [Accessed 9 May 2025].
- [44] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), *ANSI/IIAR 7-2019 - Developing Operating Procedures for Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems*, Alexandria, Virginia: International Institute of Ammonia Refrigeration, 2019.

- [45] U.S. Chemical Safety and Hazard Investigation Board (CSB), "Key Lessons for Preventing Hydraulic Shock Anhydrous Ammonia Release at Millard Refrigerated Services, Inc.," 15 January 2015. [Online]. Disponible en: <https://www.csb.gov/file.aspx?DocumentId=5933>. [Accessed 8 May 2025].
- [46] National Board Inspection Code (NBIC), "Part 4: Pressure Relief Devices | 2021," 2021.
- [47] Ammonia Safety & Training Institute (ASTI), "About Us," [Online]. Disponible en: <https://ammonia-safety.com/about-us-2>. [Accessed 21 April 2025].
- [48] National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors (NBBI), "VR Certificate of Authorization," The National Board of Boiler and Pressure Vessel Inspectors, 2025. [Online]. Disponible en: <https://www.nationalboard.org/index.aspx?pageID=115&ID=161>. [Accessed 2 June 2025].
- [49] U.S. Centers for Disease Control and Prevention, "National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)," U.S. Centers for Disease Control and Prevention, 17 January 2024. [Online]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/niosh/about/index.html>. [Accessed 26 May 2025].
- [50] Census Reporter, "Census Reporter," [Online]. Disponible en: <https://censusreporter.org/>. [Accessed 29 October 2024].
- [51] Census Reporter, "About Census Reporter," [Online]. Disponible en: <https://censusreporter.org/about/>. [Accessed 29 October 2024].
- [52] American Society of Mechanical Engineers (ASME), "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII, Division 1," 2021.
- [53] Cambridge University Press & Assessment, "The Cambridge Dictionary," [Online]. Disponible en: <https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/windsock>. [Accessed 16 September 2025].
- [54] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), "Ammonia Refrigeration Education and Training Program Basic Ammonia Refrigeration Module 6 - Shut-Off Valves," IIAR, Alexandria, Virginia, 2004.
- [55] International Institute of Ammonia Refrigeration (IIAR), "ANSI/IIAR 2-2014, Standard for Safe Design of Closed-Circuit Ammonia Refrigeration Systems," IIAR, Alexandria, Virginia, 2014.



Consejo de Investigación de Seguridad Química y Peligros de los Estados Unidos

Miembros del Consejo de Investigación de Seguridad Química y Peligros de los Estados Unidos

Steve Owens
Presidente

Sylvia E. Johnson, Ph.D.
Miembro