

**REVISIÓN CRÍTICA**

**DEFLAGRACIÓN: ESTUDIO DE CASOS DE EXPLOSIONES  
UTILIZANDO LA METODOLOGÍA ESTABLECIDA EN LA NFPA  
921 EDICIÓN 2024**

*Mario Ernesto Ramírez Saavedra<sup>1</sup>*

<https://orcid.org/0009-0002-1194-8078>

Debido al crecimiento poblacional en las grandes ciudades, cada vez más personas residen en edificios, que no solo son más altos, sino que albergan una mayor cantidad de habitantes. Estos edificios modernos suelen estar equipados con sistemas de gas para el funcionamiento de calentadores de agua, secadoras de ropa y estufas, esenciales para las actividades cotidianas.

Para comprender mejor los riesgos asociados a la ocupación de edificios altos, es crucial definir, según las normativas, qué se considera un edificio de gran altura en términos de seguridad y respuesta ante emergencias. De acuerdo con la NFPA 101, edición 2024, capítulo 3.3.37.7, un edificio de gran altura es aquel que tiene un piso ocupable a más de 75 pies (23 metros) por encima del nivel más bajo de acceso para vehículos del departamento de bomberos.

---

<sup>1</sup>CEO - Chief Executive Officer – Fire & Chem. Maestro en Ingeniería Química. Profesor Universidad de Panamá. Ciudad de Panamá - Panamá. Email: [mario@firechemconsultants.com](mailto:mario@firechemconsultants.com)

En cuanto a los rascacielos, se considera que un edificio califica como tal cuando su altura supera los 100 metros (328 pies). Sin embargo, algunos expertos elevan esta definición a partir de los 150 metros (492 pies). Hoy en día, existen muchos rascacielos que superan los 400 metros (1,300 pies) de altura, lo que plantea desafíos cada vez más complejos en términos de seguridad y protección contra incendios, así como en la respuesta ante emergencias.

Las explosiones causadas por fugas de gas en edificios habitacionales se han vuelto cada vez más comunes. Los sistemas de gas son vulnerables a defectos en los equipos, malas prácticas de instalación y la negligencia de los usuarios al utilizar estos sistemas. Este tipo de incidentes plantea un riesgo considerable para los ocupantes de los edificios y resalta la importancia de mantener altos estándares en la instalación, uso y mantenimiento de los sistemas de gas.

Para comprender mejor este fenómeno, la NFPA 921, edición 2024, capítulo 22.1.3 define una explosión como la conversión repentina de energía potencial, ya sea química o mecánica, en energía cinética, con la liberación de gases a alta presión. Estos gases, generados por la explosión, realizan un trabajo mecánico que puede destruir su estructura de confinamiento, así como mover, cambiar o romper materiales cercanos.

Una explosión tiene como primer protagonista la onda de presión explosiva, la cual genera la mayoría de los daños en la estructura durante su desarrollo. En una explosión ideal, la onda de presión sería esférica, expandiéndose uniformemente en todas direcciones desde el epicentro.

Sin embargo, en situaciones reales, factores como el confinamiento, la obstrucción, la ubicación del punto de ignición, la forma de la nube de gas y la distribución de la concentración alteran la dirección, la forma y la fuerza de la onda de presión. Estos elementos contribuyen a que los efectos destructivos de la explosión varíen en intensidad y alcance, complicando su predicción y

control. Este conocimiento es clave para comprender los patrones de daño en las estructuras y para diseñar medidas de seguridad más efectivas en entornos de riesgo.

Los investigadores de incendios y explosiones enfrentan nuevos desafíos al determinar las causas y el origen de las explosiones provocadas por fugas de gas en edificios de gran altura. Sin embargo, la NFPA, a través de su documento **NFPA 921: Guía para la investigación de incendios y explosiones**, proporciona lineamientos claves que ayudan a los investigadores a establecer sus objetivos y metodologías al abordar este tipo de escenarios complejos.

Estos edificios, debido a su tamaño y características, presentan dificultades adicionales, como el análisis de la dispersión del gas, los patrones de daño estructural y la identificación precisa de las fuentes de ignición. La guía de la NFPA ofrece herramientas fundamentales para investigar estos incidentes de manera efectiva, minimizando el margen de error y ayudando a desarrollar medidas de prevención más adecuadas.

Entre los objetivos generales de una investigación de explosiones, estos no difieren significativamente de los de una investigación de incendios. Los pasos claves incluyen:

- Determinar el origen (epicentro): Identificar el punto exacto donde comenzó la explosión.
- Identificar el combustible y la fuente de ignición: Establecer que sustancia fue la causante de la explosión y que factor la encendió.
- Describir la secuencia de encendido: Entender cómo y en qué orden ocurrió la ignición.
- Determinar la causa: Definir qué factores contribuyeron a que la explosión se desencadenara.
- Establecer la responsabilidad por el incidente: Investigar si hubo negligencia o falla humana, y asignar la responsabilidad correspondiente.

Estos objetivos son fundamentales para esclarecer lo sucedido, identificar lecciones aprendidas y, cuando sea necesario, establecer medidas preventivas o correctivas en el futuro.

El aspecto más crucial en una investigación de incendios es determinar el método adecuado a seguir; sin embargo, en una escena de explosión, es aún más relevante que el perito establezca un enfoque sistemático para examinar la escena. A diferencia de los incendios, las explosiones suelen generar escenas más amplias y con mayor grado de perturbación. Por ello, si las tareas de investigación se realizan sin un enfoque previamente planificado, la complejidad de las explosiones puede hacer que la investigación sea más difícil o incluso imposible de ejecutar de manera efectiva.

El primer deber de los investigadores en una escena de explosión es asegurar el área afectada. Una vez hecho esto, el investigador debe realizar una evaluación preliminar para identificar el tipo de incidente al que se enfrenta. Antes de proceder con las tareas investigativas, el perito debe contactar a la Unidad Técnica de Explosivos para que esta determine, a través de sus procedimientos de búsqueda, si la explosión fue causada por un artefacto explosivo o un arma de destrucción masiva. Si se detecta la presencia de algún artefacto o resto de material explosivo, los peritos deben retirarse y entregar el control de la escena a los agentes especializados de la unidad de explosivos para su investigación criminal.

En caso de que la unidad técnica no encuentre rastros de explosivos, el equipo de investigación de incendios y explosiones puede proceder con una evaluación detallada de la escena. El investigador comenzará analizando los daños exteriores y la estructura de la escena, con el apoyo de expertos en estructuras, y posteriormente realizará un análisis más detallado de los daños internos, incluyendo el movimiento de paredes y vidrios dentro del área afectada por la explosión.

El análisis detallado de una escena de explosión implica identificar los efectos de la explosión, los daños causados por incendios anteriores o posteriores, y la recolección de evidencias. Un aspecto crucial es la identificación y análisis de los vectores de fuerza, los cuales se manifiestan en elementos como muros derrumbados, la trayectoria de objetos desplazados y la dispersión de escombros. Estos elementos siguen patrones específicos que indican la dirección y la intensidad de la explosión. Observar la dirección y el origen de estos vectores es esencial para delimitar el área donde se originó la explosión.

Para determinar el epicentro, el investigador debe rastrear desde las áreas menos dañadas hacia las más afectadas, siguiendo la trayectoria de los vectores de fuerza. Una vez identificado el origen de la explosión, se debe establecer el tipo de combustible involucrado y su posible fuente de ignición.

En el caso de explosiones en edificios residenciales de gran altura, el combustible responsable suele ser gas licuado de petróleo (GLP), utilizado para estufas, calentadores de agua y secadoras. La fuga de este gas, generalmente por instalaciones defectuosas o mal uso, es una de las principales causas de explosiones en este tipo de edificaciones.

En los casos donde se sospecha que una explosión fue causada por gas licuado de petróleo (GLP) utilizado en sistemas de edificios, es fundamental que el investigador realice pruebas de presión para detectar posibles fugas en el sistema. Estas pruebas deben seguir los métodos establecidos en la NFPA 54: Código Nacional de Gas Combustible, específicamente en la sección 8.3.2.1, que define las pruebas de presión como una operación que verifica la integridad de las tuberías de gas después de su instalación o modificación.

Aunque la NFPA 921 (Guía para la investigación de incendios y explosiones) no detalla pruebas adicionales para el sistema de gas, es recomendable también evaluar la concentración de odorante en el GLP. Esto permite determinar si las personas en el lugar de la explosión pudieron percibir

el olor a gas antes del incidente, lo que ayuda a establecer la secuencia de eventos.

Las pruebas de odorante deben ser regidas por un procedimiento científicamente probado para garantizar su validez y confiabilidad, sobre todo si los resultados serán presentados en juicio. Por lo tanto, se sugiere utilizar los métodos de la ASTM, como:

- ASTM D 1265: Método de muestreo de gas propano en tanques.
- CAN/CGSB-3.0 No. 18.5-2015 Parte B: Método para determinar el mercaptano de etilo en gases combustibles.

Los resultados de estas pruebas deben compararse con las normas nacionales o federales de concentración y calidad del gas. En Centroamérica, la referencia es el RTCA 75.01.21:19, que establece especificaciones fisicoquímicas para propano comercial, regulando las concentraciones de odorante entre 12 y 24 mg/m<sup>3</sup>. Sin embargo, en la industria de gas combustible, se maneja una concentración de 14 mg/m<sup>3</sup> para los tanques de GLP comercial.

El **análisis de la fuente de ignición** en una investigación de explosión, especialmente cuando se trata de gases combustibles como propano o butano, es uno de los aspectos más complejos. Esto se debe a la posible presencia de múltiples fuentes de ignición competentes. La cantidad de energía necesaria para iniciar la combustión de estos gases puede provenir de diversas fuentes, como los **arcos de separación** que se generan en un tomacorriente energizado, la chispa de un interruptor de luz al encenderse o apagarse, o incluso al encender un electrodoméstico.

Según la **NFPA 921** (Guía para la investigación de incendios y explosiones), edición 2021, sección 9.9.4.4, define un "**Los arcos de separación** como una descarga breve que se produce cuando se **abre un circuito eléctrico energizado mientras fluye corriente**, como al apagar un

*interruptor o desconectar un enchufe. Por lo general, no se ven arcos en un interruptor, pero se pueden ver cuando se desconecta el enchufe mientras fluye corriente. Los motores con escobillas pueden producir una visualización casi continua de arcos entre las escobillas y el conmutador. A 120/240 V CA, el arco de separación no se mantiene y se extinguirá rápidamente. Los arcos de separación ordinarios en los sistemas eléctricos suelen ser tan cortos y de baja energía que sólo los gases, vapores y polvos combustibles pueden encenderse”.*

Quando el investigador logra determinar tanto la fuente de la fuga de gas como la fuente de ignición dentro del compartimiento afectado, debe establecer la causa de la explosión utilizando los siguientes aspectos clave:

- **Análisis de la línea de tiempo:** Establecer el momento en que ocurrió la fuga de gas, el tiempo que tomó para que el gas se acumulara en concentraciones explosivas, y el momento en que se produjo la ignición.
- **Análisis del patrón de daños:** Examinar los daños causados por la explosión para identificar los puntos de mayor impacto y correlacionar estos con la posible ubicación de la fuga y la ignición.
- **Análisis de escombros:** Evaluar la dispersión y el tipo de escombros, lo que puede indicar la magnitud y dirección de la fuerza explosiva.
- **Correlación del tipo de explosión y la energía con los daños sufridos:** Comparar la naturaleza de la explosión (deflagración, detonación, etc.) y su energía liberada con el daño estructural observado para validar la hipótesis sobre el tipo de explosión.
- **Análisis de elementos y estructuras dañados:** Estudiar cómo las estructuras, objetos y materiales dentro del área afectada han sido dañados para rastrear el camino y la extensión de la onda de presión.
- **Correlación de efectos térmicos:** Observar las marcas de quemaduras, el nivel de carbonización o cualquier otro efecto térmico para

determinar si el fuego jugó un papel en la secuencia de la explosión y cómo los elementos cercanos fueron afectados por el calor.

Este enfoque ayuda a consolidar la causa específica de la explosión al integrar todas las evidencias físicas y las relaciones entre los diferentes factores que influyeron en el incidente.

En la última versión de la **NFPA 921**, la guía sugiere que los investigadores elaboren **más de una hipótesis probable** para determinar la causa de una explosión. Este enfoque múltiple permite una investigación más robusta y exhaustiva, al considerar diferentes escenarios que podrían haber causado el incidente. Entre los aspectos relevantes que se deben tener en cuenta al formular estas hipótesis, se proponen los siguientes:

- La coincidencia de los vectores de fuerza con la posición de la zona de origen (epicentro).
  - La ubicación de la fuga debe coincidir con la zona de origen (epicentro).
  - La dinámica de la onda de presión explosiva debe estar relacionada con la posición de la fuga.
  - Los efectos del viento, la fricción, el derrumbe de paredes y ventanas deben relacionarse con el área de origen y los vectores de fuerza.
  - La evaluación de los electrodomésticos (dispositivos de gas) debe realizarse con cuidado para detectar cualquier daño diferente al de otros dispositivos de gas.

Estas hipótesis deben ser probadas con un enfoque científico, descartando aquellas que no sean sostenibles ante la evidencia disponible, hasta llegar a la explicación más probable de la causa del incidente. Entre

los aspectos científicos que el investigador debe considerar enumeramos los siguientes:

1. Mezcla estequiométrica: La explosión o combustión rápida ocurre cuando la mezcla de gas y aire está cerca de los límites bajos de inflamabilidad.
2. Retroceso de llama: Considera los daños y efectos causados por el retroceso de llama. Este fenómeno puede indicar que la llama regresa al punto de fuga.
3. Efecto de retroceso: Si la llama no regresa al punto de fuga, se deben explicar las razones de este fenómeno.
4. Condiciones de combustión: En explosivos de nubes de vapor (VCE), la combustión puede suceder en condiciones laminares, donde la velocidad de la llama es baja y no produce sobrepresión significativa.
5. Turbulencia y combustión: La turbulencia mejora la velocidad de combustión en deflagraciones, lo que incrementa la presión de la onda explosiva.
6. Escenarios de turbulencia:
- 7 Liberación de gases inflamables que resultan en una nube dispersa explosiva.
- 8 Interacción del flujo de expansión con obstáculos en áreas congestionadas.
- 9 Marcas y patrones de llama: Identificar marcas y patrones de llamas cerca del área de la fuga. Las roturas en paredes no son consideradas patrones de llama.
- 10 Efectos térmicos: Evidenciar los efectos térmicos en áreas cercanas al origen de la explosión.
- 11 Aspectos del combustible:
  - a. Densidad del gas: Puede ser más pesado o ligero que el aire.

b. Efecto de dispersión y dilución del gas en el ambiente, que puede evitar que la nube alcance los límites explosivos.

12 Comportamiento de la nube de vapor: En fugas de gas a flujo constante, la nube puede subir o bajar según su densidad; para gases como GNL y GLP, la dilución con aire puede evitar este comportamiento.

13 Densidad de mezclas: La densidad de mezclas de baja concentración de propano con aire puede permanecer en el área promedio del compartimento, con la tendencia de subir o bajar según el caudal.

14 Dinámica de explosión inestable: En una fuga de nube de vapor, la dispersión del gas hasta alcanzar el límite bajo de inflamabilidad puede generar daños concentrados en el compartimento.

15 Restricciones en la liberación: Las liberaciones pueden estar restringidas por estructuras como losas de concreto, lo que puede causar un flujo lento.

16 Dilución y desconcentración: En liberaciones lentas, se debe considerar la dilución y desconcentración de la mezcla de combustible y aire.

17 Energía de ignición: Conocer la cantidad de energía necesaria para encender el combustible y los elementos que pueden generarla en el compartimento.

18 Frente de llama débil: El combustible puede comenzar a arder de forma laminar cerca de la fuga, aumentando la turbulencia y generando la explosión.

19 Cálculos de presión: Conocer el caudal de gas escapado para realizar cálculos de presión incidente, presión reflejada, tiempo de llegada, impulso incidente, reflexión del impulso y duración de la fase positiva.

Estos aspectos son fundamentales para que el investigador establezca un análisis completo y riguroso que permita determinar la causa de la explosión y sus efectos, asegurando que la investigación sea efectiva y fundamentada.

### **¿Qué debe tener en cuenta un investigador al descartar la hipótesis de una explosión?**

Luego de identificado el origen, el tipo de combustible y la fuente de ignición, el investigador debe analizar y determinar que unió el combustible y la ignición en el origen.

Este proceso implica un análisis cuidadoso de la probable secuencia de ignición y la elaboración de más de dos hipótesis que relacionen las causas y los efectos observados en la escena.

**En la NFPA 921, edición 2021, Prueba de hipótesis en la literatura científica, secciones 19.6.4 y 19.6.4.1. se define como la validación de una hipótesis se sustenta porque todas las variables guardaron una relación causal, manifestándose de manera congruente y estableciéndose una relación causa-efecto directamente vinculada a la causa de la explosión con base en la literatura científica descrita a continuación como lo indica la NFPA 921.**

En el libro de Roberto Sampieri, Metodología de la investigación, edición 2023, indica que *“La hipótesis que establecen relaciones causales: son el tipo de hipótesis que no sólo afirman la relación o relaciones entre dos o más variables y la forma en que se manifiestan, pero también propone un “sentido de comprensión” de las relaciones. Tal significado puede ser más o menos completo, esto depende de la cantidad de variables que se incluyan, pero siempre estableciendo una relación causa-efecto”*.

### **¿Qué no debemos olvidar al preparar el análisis final?**

Hay dos tipos principales de explosiones con las que los investigadores se involucran rutinariamente: mecánicas y químicas, sin

embargo no deben descartar las explosiones **eléctricas, y nuclear como parte de sus posibles causales**. Para el caso de edificios de tipo habitacional donde la causa de la explosión fue clasificada como de tipo químico, debido a la generación de sobrepresión por reacción exotérmica y participación de gas combustible GLP.

Las explosiones químicas más comunes son las provocadas por la quema de hidrocarburos combustibles. Se trata de explosiones de combustión y se caracterizan frecuentemente por la presencia de un combustible con aire como oxidante.

### **¿Cómo se clasifican los daños estructurales en una escena de explosión?**

La comunidad de investigación de incendios caracteriza los daños por explosión utilizando los términos daño de orden superior o daño de orden inferior. Las diferencias en los daños son una función de la carga de explosión aplicada a las superficies y la resistencia de la estructura o recipiente de confinamiento o restricción, en lugar de las presiones máximas que se alcanzan.

Se recomienda esta práctica para reducir la confusión con términos similares utilizados para describir la liberación de energía de los explosivos.

### **¿Cómo se clasifican las explosiones químicas?**

Las explosiones químicas también se conocen como explosiones por combustión y se clasifican como deflagraciones y detonaciones, dependiendo de la velocidad de propagación del frente de llama a través de la mezcla de aire y combustible.

### **¿Es importante identificar si existió un incendio previo a la explosión?**

Los daños por incendio o calor deben identificarse como causados por un incendio preexistente o por el efecto térmico de la explosión.

Al analizar los patrones presentes en una explosión, el primer evento generado fue la fuga de gas. Esta fuga, mezclada con el aire dentro del compartimiento, alcanzó el límite inferior de inflamabilidad. Como resultado de esto, la mezcla aire-propano se encendió y se produjo una explosión, generándose un frente de llama y una onda de presión explosiva. La cadena de eventos determinó que la explosión produjo el frente de llama y no al revés. La cadena de evento puede ser totalmente diferente si el incendio se da previo a la explosión y cambiar todo el formato de la investigación.

### **¿Cuándo y porque es importante evaluar el fenómeno de la reflexión?**

El efecto de reflexión modifica la onda de presión explosiva. Cuando la onda de presión explosiva encuentra objetos en su camino, la onda se puede amplificar debido a su reflexión generando una sobrepresión.

Algunas explosiones pueden considerarse muy fuertes debido a la amplificación de la onda de presión explosiva debido al efecto de reflexión. Este efecto se genera en circunstancias en las que existen obstáculos alrededor del epicentro.

La onda de reflexión impacta con estos obstáculos y regresa con un efecto de rebote hacia la zona de origen.

### **¿Qué otros aspectos se deben considerar al estudiar la escena de la explosión?**

**La onda de presión de fase positiva** afecta a los demás niveles del edificio, ya que la onda de presión explosiva se puede desplazar por los fosos de los ascensores produciendo vibración de toda la estructura del edificio.

**El análisis de las víctimas**, si la explosión ha causado víctimas, ya sea por la exposición al calor de alta intensidad en un corto período de tiempo o por el impacto de la onda de presión, es crucial identificar y analizar las lesiones y los tipos de quemaduras que han sufrido. Esto incluye las heridas causadas tanto por el incendio como por la fuerza de la explosión, ya que ofrecen información valiosa para la investigación.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Guide for Fire and Explosion Investigations, NFPA 921 ed. 2021, chapter 22, explosions.**
- **National Fuel Gas Code Handbook , NFPA 54, ed.2018, chapter 8, Pressure test.**
- **Methods for the calculation of Physical Effects (yellow book), CPR 14E, Editors: C.J.H. van den Bosch, R.A.P.M. Weterings, third ed. 2005.**
- **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis, American Institute of Chemical Engineers, second ed., 2000.**
- **Combustion, from basics to applications, Wiley-vch, Maximilian Lackner, Árpád B. Palotás, and Franz Winter, first ed. , 2013.**
- **NTP 321: “Explosions of unconfined vapor clouds: evaluation of overpressure.**
- **Physico-chemical specifications for commercial propane in the Central American Technical Regulation RTCA 75.01.21:19 – Petroleum products liquefied petroleum gases.**
- **Research Methodology, Roberto Hernández Sampieri, sixth edition, 2018.**