

Metodología de verificación del desempeño de sistemas de agua pulverizada en la etapa de diseño para la industria petroquímica

Methodology for performance verification of fixed water spray systems during the design stage for the petrochemical industry

WILLIAM MAURICIO BERNAL SOTELO¹ - HÉCTOR ALFONSO RODRÍGUEZ DÍAZ²

1. Magister en Ingeniería Civil. Énfasis en Recursos Hídricos y Medio Ambiente.

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1355-4264>

william.bernal-so@mail.escuelaing.edu.co

2. Especialista en Hidrología. Ingeniero Civil. Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6042-8514>

alfonso.rodriguez@escuelaing.edu.co

Recibido: 19/12/2025 Aceptado: 11/01/2026

Disponible en http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista

<http://revistas.escuelaing.edu.co/index.php/reci>

Resumen

Los sistemas de agua pulverizada utilizados en la protección contra incendios en la industria petroquímica se diseñan comúnmente con base en criterios prescriptivos establecidos por estándares internacionales como NFPA 15 y API 2030, los cuales no contemplan la verificación del desempeño real frente a escenarios específicos de incendio o liberación de gases. Esta limitación puede generar sistemas sobredimensionados o, en algunos casos, sistemas que cumplen la normativa, pero resultan ineficientes en condiciones reales de operación.

En el presente artículo se propone una metodología de verificación del funcionamiento de sistemas de agua pulverizada en su etapa de diseño, orientada a evaluar su capacidad para la absorción de radiación térmica y la dispersión de nubes de gases inflamables o tóxicos. La metodología integra modelos físicos validados en la bibliografía técnica —Sahuquillo (2020), Buchlin (1994), Rana (2008), Pasquill-Gifford, Cheung (2009)— y se estructura en dos módulos de cálculo: refrigeración de equipos (criterios C1-C5) y dispersión de gases (criterios D2-D8).

Los resultados demuestran que el cumplimiento normativo constituye una condición necesaria —pero no suficiente— para garantizar la efectividad del sistema. La metodología permite identificar deficiencias de desempeño no evidentes en los enfoques tradicionales y proporciona una herramienta práctica, auditable y aplicable en el contexto profesional colombiano, sin requerir *software* especializado.

Palabras claves: agua pulverizada, protección contra incendios, industria petroquímica, dispersión de gases, radiación térmica, diseño de sistemas hidráulicos, metodología de verificación.

Abstract

Water spray systems used for fire protection in the petrochemical industry are commonly designed based on prescriptive criteria established by international standards such as NFPA 15 and API 2030, which do not include verification of actual performance under specific fire or gas-release scenarios. This limitation may result in oversized systems or, in some cases, systems that comply with applicable regulations but prove ineffective under actual operating conditions.

This article proposes a methodology for verifying the performance of water spray systems during the design stage, aimed at assessing their capacity to absorb thermal radiation and disperse clouds of flammable or toxic gases. The methodology integrates physical models validated in the literature—including Sahuquillo (2020), Buchlin (1994), Rana (2008), Pasquill-Gifford, and Cheung (2009)—and is structured into two calculation modules: equipment cooling (criteria C1–C5) and gas dispersion (criteria D2–D8).

The results show that regulatory compliance is necessary but not sufficient condition for ensuring system effectiveness. The methodology makes it possible to identify performance flaws that are not apparent

through traditional approaches and provides a practical, auditable tool applicable in the Colombian professional context without requiring specialized software.

Keywords: water spray, fire protection, petrochemical industry, gas dispersion, thermal radiation, hydraulic system design, verification methodology.

INTRODUCCIÓN

La protección contra incendios en la industria petroquímica es un elemento crítico para garantizar la continuidad operativa, la integridad de los equipos y la seguridad del personal. Las instalaciones petroquímicas involucran procesos en los que se manejan sustancias inflamables, combustibles, vapores tóxicos y fluidos presurizados que, ante una falla, pueden desencadenar incendios de rápida propagación, explosiones o liberaciones tóxicas con consecuencias graves. En este contexto, los sistemas de agua pulverizada se utilizan ampliamente debido a su capacidad para absorber radiación térmica y actuar como barrera frente a la dispersión de gases (Center of Chemical Process Safety [CCPS], 2010).

Sin embargo, los diseños actuales se fundamentan principalmente en estándares como NFPA 15 (National Fire Protection Association [NFPA], 2019) y API 2030 (American Petroleum Institute [API] (2015), los cuales establecen criterios prescriptivos de presión, densidad de descarga y cobertura. Colombia referencia los títulos J y K de la NSR-10 para protección contra incendios, pero estos resultan insuficientes para las necesidades específicas del sector petroquímico, lo que obliga a los diseñadores a basarse en estándares internacionales sin herramientas de verificación adaptadas a las condiciones del sitio.

Esta situación genera una brecha entre el cumplimiento normativo y el desempeño real del sistema, lo que puede derivar en soluciones sobredimensionadas o en sistemas que, pese a cumplir la norma, no garantizan una protección efectiva. En la bibliografía técnica se ha documentado que variables como el tamaño de gota, la evaporación en vuelo, el viento y la geometría de descarga influyen significativamente en la eficiencia del sistema (Sahuquillo, 2020a; Sahuquillo, 2020b). En estudios como los de Rana (2008) y Cheung (2009), se evidenció que estas variables, ignoradas a menudo en el diseño convencional, tienen incidencia directa en la capacidad de absorción de radiación y dispersión de gases.

En las metodologías actuales no se contempla una verificación integrada de variables críticas, como el tamaño de gota descargada, la geometría del cono, el caudal aplicado, la solubilidad del gas o la intensidad de radiación térmica que se debe absorber. En respuesta a este vacío, en el presente artículo se propone una metodología de verificación que permite evaluar, desde la etapa de diseño, el desempeño real de los sistemas de agua pulverizada frente a escenarios específicos, sin requerir pruebas físicas experimentales.

METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología propuesta se fundamenta en la revisión de normativa internacional (NFPA, API, IP, CCPS), el análisis de escenarios típicos de la industria petroquímica y la integración de modelos físicos disponibles en la bibliografía técnica. Se estructura en dos módulos de verificación secuencial que parten de la definición del escenario de riesgo y convergen en la confirmación de que el sistema tiene capacidad real para cumplir su función específica.

La pregunta de investigación que orienta el trabajo es la siguiente: ¿se realizan las protecciones contra incendio adecuadas siguiendo el estándar de diseño, sin hacer verificaciones en aplicaciones específicas, particularmente en el sector petroquímico?

A continuación, se presenta un diagrama de flujo general, en el que se definen los dos módulos de verificación, dependiendo del uso del sistema de pulverización. Posteriormente, se hace un resumen general de cada módulo y sus variables evaluadas.

Módulo de refrigeración de equipos (C1-C5)

El módulo evalúa la capacidad del sistema para absorber la radiación térmica incidente sobre equipos expuestos, a partir del valor real de radiación térmica incidente, dato que se debe solicitar a los equipos de análisis de riesgos de incendio, y verificando cinco criterios físicos interdependientes en secuencia. A renglón seguido, se sintetizan los criterios, condiciones de aceptación y referencias (tabla 1):

La verificación se ejecuta en seis etapas secuenciales, y cada una alimenta la siguiente:

- **Radiación incidente:** Se calcula la radiación total q_t [kW/m^2] sobre el equipo a partir del análisis de

VERIFICACIÓN DE DESEMPEÑO — SISTEMAS DE AGUA PULVERIZADA
Diagrama maestro · Criterios de cumplimiento por módulo

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 1 de 3
 Diagrama maestro



Figura 1
 Diagrama maestro. Secuencia de verificación del módulo de refrigeración y dispersión de gases.

consecuencias de incendio, y se determina la reducción requerida Δq_{Red} y la energía total $Q_{reducir}$ [kW] que el sistema debe absorber.

- **Boquilla y tamaño de gota (C1-C2):** Se calcula el diámetro mediano dm [mm] = $D_{ori}^{2-3} / P_{kPa}^{1-3}$ (Sahuquillo, 2020). El dm debe estar entre 0,7 y 1,2 mm para instalaciones a la intemperie (C1). La estabilidad en vuelo se verifica mediante el número de Weber $We = \rho_{aire} \cdot U^2 \cdot dm / \sigma$; se requiere $We < 1\,000$ (C2). Gotas fuera de estos límites se fragmentan o evaporan antes de llegar al equipo.
- **Pérdida de masa en vuelo:** Se calcula la evaporación de la gota durante su trayectoria mediante el número de Nusselt Nu y la constante de evaporación K_{ev} [m²/s]. La pérdida de masa Δdm reduce la fracción de agua que efectivamente llega al equipo.
- **Absorción de calor por el sistema (C5):** Se calcula el calor absorbido por gota q_{dh} [kJ] = $\Delta dm \cdot C_{vw} + md \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_a)$, así como la absorción total $Q_{sistema}$ [kW] = $N \cdot m_{boquilla} \cdot q_{dh}$. Se verifica que $Q_{sistema} \geq \Delta q_{Red} \times A_{equipo}$ (C5), criterio definitivo de aprobación del módulo.
- **Densidades ADD y LAD (C3-C4):** Se calculan la densidad descargada ADD [l/min · m²] y la densidad útil LAD [l/min · m²] que efectivamente llega al equipo, descontando las pérdidas. Se verifican $LAD \geq ADD_{diseño}$ (C3) y eficiencia hidráulica = $(LAD/ADD) \times 100 \geq 70\%$ (C4). Una eficiencia

menor indica pérdidas excesivas por evaporación o viento, que pueden llegar a superar el 40 % en instalaciones exteriores (Cheung, 2009).

Módulo de dispersión de gases (D2-D8)

El módulo verifica que la cortina de agua reduce la concentración del gas desde C_0 (sin cortina activa) hasta C_1 (con cortina), de manera que C_1 quede por debajo de los límites de inflamabilidad (LEL) y toxicidad (IDLH) en el punto de evaluación. La selección del tipo de boquilla, el tamaño de gota y el caudal del sistema se deben basar en el mecanismo de acción dominante para el gas específico. La verificación se ejecuta en seis etapas:

- **Solubilidad del gas (D3):** Se determina el tipo de gota recomendado, según la solubilidad del gas en agua: gotas pequeñas ($dm < 350\ \mu m$) para gases muy solubles, como NH_3 o HCl , que actúan por absorción en fase líquida; gotas grandes ($dm > 350\ \mu m$) para gases poco solubles, como H_2S , Cl_2 o propano, que requieren arrastre mecánico por *momentum* de la cortina (Rana, 2008).
- **Caudal másico de fuga (D2):** Se calcula el caudal de gas que escapa Q_m [kg/s] y se verifica el caudal total del sistema $Q_{sis} \geq 5 \times Q_m$ [l/min] (Sahuquillo, 2020), condición mínima para que la cortina tenga suficiente masa de agua frente a la pluma de gas.

Tabla 1
Criterios de verificación del módulo de refrigeración de equipos

Crit.	Parámetro	Condición de aceptación	Si no cumple	Referencia
C1	dm = tamaño de gota mediano	$0,7\ mm \leq dm \leq 1,2\ mm$	Ajustar D_{ori} o presión de operación	Sahuquillo (2020)
C2	We = número de Weber	$We < 1000 \rightarrow$ gota Estable	Reducir presión o aumentar diámetro de orificio	Liu et al. (2006)
C3	LAD vs. ADD de diseño	$LAD \geq ADD_{diseño}$	Aumentar P , K ; reducir $h_{boquilla}$	NFPA 15 §8; Sahuquillo (2020)
C4	η = eficiencia hidráulica	$\eta \geq 70\% \rightarrow$ entrega aceptable	Reducir altura de instalación; ajustar presión	Sahuquillo (2020); Cheung (2009)
C5	Balance energético del sistema	$Q_{sis} \geq \Delta q_{Red} \times A_{equipo}$	Aumentar N boquillas, K o presión	Sahuquillo (2020); NFPA 15

MÓDULO DE REFRIGERACIÓN DE EQUIPOS

Secuencia de verificación y variables de ajuste por criterio

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 2 de 3
Refrigeración

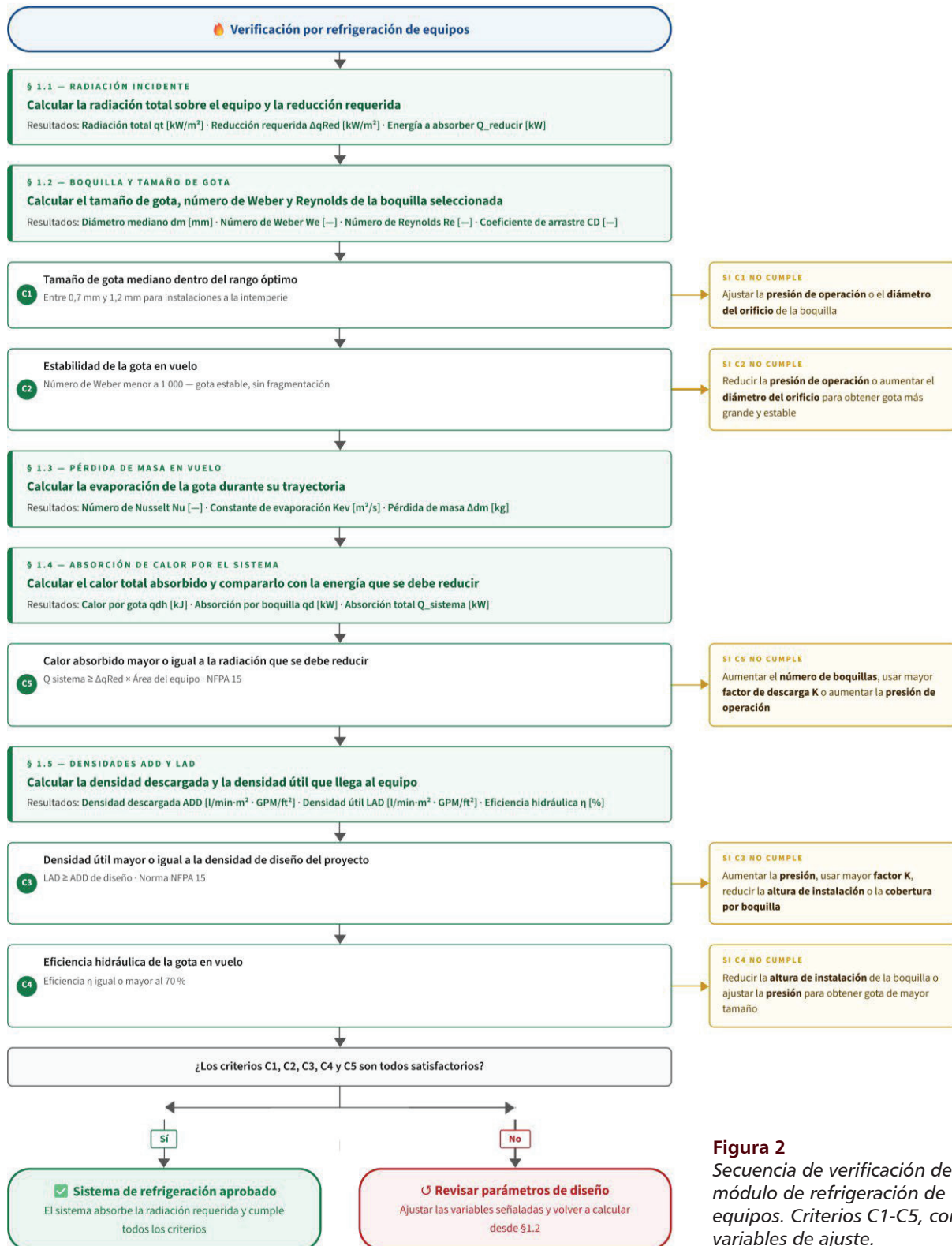


Figura 2
Secuencia de verificación del módulo de refrigeración de equipos. Criterios C1-C5, con variables de ajuste.

MÓDULO DE DISPERSIÓN DE GASES

Secuencia de verificación y variables de ajuste por criterio

Tesis de Maestría · William Bernal · Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito · 2026

Figura 3 de 3
Dispersión

Figura 3
Secuencia de verificación del módulo de dispersión. Criterios D1-D8, con variables de ajuste.

- **Modelo gaussiano (concentración sin cortina C_0) (D4):** Se aplica el modelo de dispersión gaussiana de Pasquill-Gifford para calcular la concentración C_0 [ppm] en el punto de evaluación sin protección activa, en función de la velocidad del viento y la clase de estabilidad atmosférica. C_0 se compara con el LEL (riesgo de inflamabilidad) y el IDLH (riesgo de toxicidad) para determinar la necesidad de cortina activa (D4).
- **Resistencia de la cortina al viento (D5):** Se calcula el balance de fuerzas entre el empuje de la cortina F_{agua} [kg] y la presión del viento F_{viento} [kg], obteniendo el ángulo resultante α [°]. Se requiere $\alpha \geq 60^\circ$ para que la cortina mantenga su cobertura efectiva; por debajo de este umbral, la cortina se derriba y pierde función de barrera (Sahuquillo, 2020).
- **Modelo de Buchlin (eficiencia de mitigación) (D6):** Se calcula el factor de dilución $CR = C_0 / C_1$ en función del coeficiente de eficacia E_f del tipo de boquilla y la longitud de la cortina L (Buchlin, 1994). Se verifica que la eficiencia de mitigación $\eta_{\text{mit}} = (1 - 1/CR) \times 100 \geq 75 \%$.
- **Concentración poscortina C_1 y clasificación del riesgo (D7-D8):** Se calcula $C_1 = C_0 / CR$ y se verifica el criterio definitivo de cumplimiento: $C_1 < \text{LEL}$ si el gas es inflamable, $C_1 < \text{IDLH}$ si es tóxico, y ambos simultáneamente si el gas presenta doble riesgo, como NH_3 o H_2S (D7-D8). La herramienta incluye una tabla automática de propiedades para siete gases industriales, con sus valores de LEL, UEL e IDLH.

Herramienta de cálculo

Los trece criterios se implementan en una hoja de cálculo organizada en cuatro pestañas. La pestaña ESCENARIO es la única hoja de ingreso de datos del proyecto; todas las demás toman sus valores automáticamente desde ella. La pestaña 1-REFRIGERACIÓN ejecuta el cálculo secuencial C1 a C5 con veredicto de cumplimiento por criterio. La pestaña 2-BOQUILLAS hace un comparativo simultáneo de tres boquillas con semáforo de cumplimiento C1 a C5, lo que facilita la selección técnica fundamentada. La pestaña 4-DISPERSIÓN GASES verifica los criterios D2 a D8 e incorpora una tabla automática de propiedades físicas y límites de seguridad para siete gases industriales (NH_3 , HCl , H_2S , Cl_2 , SO_2 , C_3H_8 , gasolina). Todos los cálculos son trazables a la bibliografía citada y la herramienta no

requiere *software* especializado de costo elevado, lo que la hace aplicable en el contexto profesional colombiano.

RESULTADOS

La aplicación sistemática de los módulos de verificación a diferentes configuraciones de boquillas y escenarios de riesgo permitió establecer los siguientes hallazgos principales:

Módulo de refrigeración

La densidad real aplicada al equipo (LAD) puede diferir en forma significativa de la densidad de diseño (ADD) establecida por NFPA 15, debido principalmente a la pérdida de masa por evaporación en vuelo y al arrastre por viento, diferencia que no se capta mediante los procedimientos convencionales. Los análisis efectuados mostraron que el efecto de la evaporación puede reducir la masa efectiva de agua que llega al equipo en condiciones de temperatura ambiental elevada o viento moderado, lo cual genera una eficiencia hidráulica por debajo del 70 % requerido por el criterio C4.

Uno de los hallazgos más relevantes es el empleo frecuente, en la práctica, de valores típicos de radiación de incendio limitados a 37 kW/m^2 como criterio máximo de cálculo, sin verificar si el equipo específico está expuesto a valores superiores. Esta simplificación puede omitir escenarios en los que el sistema resulta insuficiente. La metodología exige partir del valor real de radiación incidente —dato que se debe solicitar a los equipos de análisis de riesgos—, lo que establece un punto de partida más realista y confiable para el diseño.

El criterio C5 —balance energético— es el único que evalúa directamente si la energía total absorbida por el sistema es suficiente para reducir la radiación por debajo del nivel tolerable para el equipo protegido. Este criterio, ausente en los procedimientos de NFPA 15, es el que cierra la cadena de verificación del módulo y trasciende el simple cumplimiento prescriptivo.

Módulo de dispersión de gases

La eficiencia del sistema de dispersión depende no solo del caudal aplicado, sino de la interacción entre tres factores: el mecanismo de acción del agua sobre el gas (absorción vs. arrastre mecánico según solubilidad), las condiciones ambientales (velocidad y dirección del

viento, clase de estabilidad atmosférica) y el tipo de boquilla seleccionada.

Los gases con riesgo simultáneo de inflamabilidad y toxicidad, como el NH_3 (LEL = 15 % vol., IDLH = 300 ppm) y el H_2S (LEL = 4 % vol., IDLH = 50 ppm), requieren verificación doble: $C_1 < \text{LEL}$ y $C_1 < \text{IDLH}$ en forma independiente (criterio D7). Un diseño basado únicamente en el LEL puede resultar insuficiente, dado que el IDLH es varios órdenes de magnitud más restrictivo para estos gases.

El criterio D5 —ángulo de inclinación de la cortina frente al viento ($\alpha \geq 60^\circ$)— se omite con frecuencia en la práctica profesional y puede comprometer la efectividad del sistema en condiciones de viento moderado. Su verificación resulta relativamente simple y tiene impacto directo en la cobertura efectiva de la cortina.

Respecto al tipo de boquilla, el coeficiente de eficacia del *spray* (Ef) diferenciado por geometría muestra, según Buchlin (1994), que las boquillas *flat-fan* o *hydroshield* (Ef = 0,5-0,8) son significativamente más eficientes para dispersión que las de cono completo (*full-cone*, Ef = 0,2-0,4), óptimas para refrigeración. Esta distinción es prácticamente ignorada en los procedimientos convencionales de diseño.

Hallazgo transversal: límite del enfoque prescriptivo

La aplicación de los trece criterios permitió identificar casos en los que sistemas que cumplen con la normativa no alcanzan los niveles de desempeño requeridos, lo que evidencia la necesidad de incorporar procesos de verificación en la etapa de diseño. Esto es consistente con lo documentado por Rana (2008) y Cheung (2009). La herramienta traslada el diseño desde un cumplimiento meramente normativo hacia una verificación basada en condiciones reales de incendio y condiciones ambientales específicas del sitio, mejorando la confiabilidad del sistema.

CONCLUSIONES

- El cumplimiento de los estándares internacionales de diseño (NFPA 15, API 2030) es una condición necesaria, pero no suficiente, para garantizar la efectividad de los sistemas de agua pulverizada. Los módulos de verificación de tamaño de gota, eficiencia de entrega (LAD/ADD) y la relación C_1/C_0 evidencian que un

sistema que cumple la norma puede ser técnicamente insuficiente en condiciones específicas del sitio.

- La eficiencia del sistema depende de variables físicas que no se tienen en cuenta en los enfoques prescriptivos tradicionales: tamaño de gota mediano (dm), pérdida de masa por evaporación en vuelo, efecto del viento sobre la cortina y geometría de descarga de la boquilla. Estas variables se deben integrar en el proceso de diseño para que las decisiones tengan fundamento físico demostrable ante la autoridad competente.
- La metodología propuesta permite integrar estas variables en un procedimiento de cálculo estructurado y auditable, implementado en una herramienta de hoja de cálculo accesible en el contexto profesional colombiano, sin requerir *software* especializado de costo elevado. La trazabilidad explícita hacia Pasquill-Gifford, Buchlin, Sahuquillo y NFPA 15 garantiza la reproducibilidad y auditabilidad de los resultados.
- La diferenciación por tipo de gas, solubilidad, inflamabilidad y toxicidad en el módulo de dispersión permite adaptar la verificación al riesgo específico del escenario, evitando la aplicación de un factor de seguridad único para todos los gases. Para gases con riesgo simultáneo (NH_3 , H_2S), la verificación doble (LEL/IDLH) es determinante.
- Su aplicación contribuye a reducir el riesgo de sobredimensionamiento o subdimensionamiento, al optimizar los recursos hidráulicos y mejorar la seguridad en instalaciones petroquímicas. La herramienta proporciona una verificación técnica intermedia entre el cumplimiento normativo básico y el análisis de riesgo cuantitativo formal.
- La metodología permitió evidenciar que el uso generalizado de valores típicos de radiación térmica de incendio, frecuentemente limitados a 37 kW/m^2 como criterio máximo de cálculo, constituye una simplificación que puede omitir escenarios críticos. El desconocimiento de la radiación térmica real incidente sobre el equipo impide definir con precisión el nivel de mitigación requerido para evitar fallas estructurales, ignición de materiales o pérdida de los fluidos contenidos. La metodología aborda este problema a partir del valor real de radiación térmica incidente, que los diseñadores deben solicitar a las compañías de análisis de riesgos de incendios, estableciendo así un punto de partida más realista.

A partir de este valor se define como objetivo la reducción de la radiación hasta niveles tolerables para el equipo protegido, lo que permite incorporar un criterio de verificación final que evalúa si la radiación residual posterior a la aplicación del sistema de agua pulverizada cumple con los límites permisibles de la instalación.

- La confirmación de la concentración de gas antes (C_0) y después de la cortina (C_1), así como su comparación con los niveles de inflamabilidad (LEL) y toxicidad (IDLH) del gas específico, constituye el criterio definitivo de aprobación del módulo de dispersión. La concentración C_0 calculada mediante el modelo gaussiano de Pasquill-Gifford representa el escenario base sin protección activa y permite diagnosticar si el riesgo es inflamable, tóxico o ambos simultáneamente. La concentración poscortina $C_1 = C_0 / CR$, obtenida mediante el modelo de Buchlin (1994), es la única variable que responde directamente la pregunta de seguridad: ¿el sistema diseñado garantiza que el gas queda por debajo del límite de riesgo en el punto de evaluación? Esta cadena de verificación, ausente en los diseños convencionales, resulta especialmente crítica para gases como NH_3 y H_2S , cuyo IDLH es varios órdenes de magnitud inferior al LEL y cuyo incumplimiento implica riesgo inminente para el personal expuesto.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito y al director del trabajo, el ingeniero Héctor Alfonso Rodríguez Díaz, por el acompañamiento académico y técnico durante el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- American Petroleum Institute (2008). *API RP 521: Guide for Pressure-Relieving and Depressuring Systems* (5.ª ed.). API.
- American Petroleum Institute (2015). *API Publication 2030: Application of Fixed Water Spray Systems for Fire Protection in the Petroleum Industry* (4.ª ed.). API.
- Barcova, K., y Balner, D. (2017). Attenuation of Thermal Radiation Through Water Mist. *Process Safety Progress*, 37(1).
- Buchlin, J. M. (1994). Mitigation of Problem Clouds. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 7(2), 167-174.
- Center of Chemical Process Safety (2010). *Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical and Hydrocarbon Processing Facilities*. AIChE CCPS.
- Cheung, W. (2009). Radiation Blockage of Water Curtains. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 7(2), 167-174.
- Dandrieux, A., y Dusserre, G. (2003). The DVS Model: A New Concept for Heavy Gas Dispersion by Water Curtain. *Environmental Modelling & Software*, 18, 253-259.
- Fitzpatrick, J. M. (1983). Air Entrainment by Water Sprays: Strategies for Application to the Dispersion of Gas Plumes. *Journal of Occupational Accidents*, 5, 121-133.
- National Fire Protection Association (2019). *NFPA 15: Standard for Water Spray Fixed Systems for Fire Protection*. NFPA.
- National Fire Protection Association (2022). *NFPA 1: Fire Code*. NFPA.
- Rana, M. A., y Cormier, B. R. (2008, 28 de octubre). *Experimental Study of Effective Spray Curtain Application in Dispersing Liquefied Natural Gas Vapor Clouds*. Wiley InterScience.
- Sahuquillo, A. (2020a). *Dispersión de fugas de gases y absorción de radiación de un incendio mediante agua pulverizada y cortinas de agua*.
- Sahuquillo, A. (2020b). *Estimación de la radiación absorbida por los sistemas de agua pulverizada que protegen los tanques de combustible*.