EL FACTOR K EN LA EFICIENCIA DE SISTEMAS CONTRA INCENDIOS. ANÁLISIS HIDRÁULICO MEDIANTE SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Cordero Cristina y Di Stefano Luis

Escuela de Ingeniaría Industrial. Facultad de Ingeniería.
Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela

criscordero09@gmail.com, ldistefano13@gmail.com

Resumen: este estudio examina el impacto del factor K en el diseño hidráulico de sistemas de rociadores automáticos contra incendios, en el marco de la normativa NFPA 13. Se propone una metodología basada en simulación computacional, que permite evaluar el comportamiento del sistema ante distintos escenarios de incendio. A través del desarrollo de un simulador, se analizan variables críticas como presión, caudal, tiempo de activación, consumo total de agua, considerando el factor K como una variable de optimización. Los resultados obtenidos evidencian que el tratamiento dinámico del factor K mejora la eficiencia del sistema y permite una respuesta más precisa ante condiciones reales. Asimismo, se plantea la necesidad de actualizar los marcos normativos para incorporar herramientas de simulación avanzadas y fomentar la comparación entre distintos modelos CFD. Esta investigación contribuye al fortalecimiento del diseño técnico de sistemas contra incendios, promoviendo soluciones más seguras y adaptables.

Palabras clave: factor K, diseño hidráulico, simulación computacional.

THE K-FACTOR IN THE EFFICIENCY OF FIRE PROTECTION SYSTEMS. HYDRAULIC ANALYSIS THROUGH COMPUTATIONAL SIMULATION

Abstract: this study examines the impact of the K-factor on the hydraulic design of automatic fire sprinkler systems within the framework of NFPA 13 standards. A computational simulation-based methodology is proposed to evaluate system behavior under various fire scenarios. Through the development of a simulator, critical variables such as pressure, flow rate, activation time, and total water consumption are analyzed, considering the K-factor as an optimization variable. The results demonstrate that treating the K-factor dynamically enhances system efficiency and enables a more accurate response under real conditions. Furthermore, the study highlights the need to update existing regulations to incorporate advanced simulation tools and encourages the comparison of different CFD models in future research. This work contributes to strengthening the technical design of fire protection systems, promoting safer and more adaptable solutions.

Keywords: K-factor, hydraulic design, computational simulation.

Introducción

En el diseño de sistemas de protección contra incendios, los rociadores juegan un papel fundamental. Uno de los aspectos técnicos más relevantes en su selección y funcionamiento es el factor K, una constante que influye directamente en el caudal de agua que entrega cada dispositivo. Aunque tradicionalmente se ha tratado como un valor fijo, hoy en día existen herramientas que permiten analizarlo de forma más dinámica y precisa.

Este artículo explora la relación entre el factor K y los distintos tipos de rociadores, así como el desarrollo de una simulación computacional para optimizar su selección y evaluar su desempeño. A través de un enfoque práctico, se presentan los parámetros evaluados, los resultados obtenidos y la metodología utilizada para desarrollar un simulador capaz de representar escenarios reales. El objetivo es aportar una visión más completa sobre cómo mejorar el diseño hidráulico y fortalecer la respuesta ante incendios, integrando tecnología y análisis en cada etapa del proceso; todo esto dentro del marco normativo de la NFPA 13.

Marco Normativo (NFPA 13), Definición del Factor K

La NFPA 13 (National Fire Protection Association), establece los requisitos mínimos para el diseño e instalación de sistemas de rociadores automáticos. Esta norma realiza la clasificación de los riesgos en tres categorías principales: riesgo ligero, riesgo ordinario y riesgo extraordinario, cada uno con exigencias y condiciones hidráulicas distintas.

El factor K es una constante hidráulica que refleja el diseño físico del rociador, representa la relación que existe entre la presión presente en el rociador y el caudal descargado por él, expresado mediante la ecuación (1):

$$K = \frac{Q}{\sqrt{P}} \quad (1)$$

Donde:

Q, es el caudal de descarga, que puede ser expresado en litros por minuto (L/min) en el sistema métrico o en galones por minuto (gpm) en el sistema inglés.

P, es la presión del agua en la boquilla del rociador, medida en bares (bar) o libras-fuerza por pulgada cuadrada (psi).

K, es el factor K ($\mathbf{gpm/\sqrt{psi}}$), una constante de descarga, que relaciona las propiedades geométricas y de resistencia de la boquilla del rociador.

El factor K se determina de manera experimental mediante ensayos, al medir el caudal de agua que descarga un rociador a una presión de prueba específica. Un valor del factor K más alto indica que el rociador puede descargar un mayor caudal de agua a una presión dada, lo que tiene profundas implicaciones en el diseño del sistema de rociadores contra incendios.

Factor K y su Asociación al Tipo De Rociadores

Los rociadores se clasifican según su factor K, lo que a menudo se correlaciona con el tamaño de su orificio y su aplicación prevista. A partir del desarrollo del rociador con factor k=5.6 $\mathbf{gpm/\sqrt{psi}}$, se desarrollaron rociadores de mayor o menor tamaño como puede apreciarse en la tabla 1.

Tabla 1

Valores de Factor K, de acuerdo a la Norma NFPA 13

Factor K ($gpm/\sqrt{psi}$)	Descripción	Presión mínima (psi)	Aplicación
2.8	Rociadores de respuesta rápida para techos residenciales	7	Residencial
4.2	Rociador de orificio pequeño	7	Residencial y algunos sistemas de oficina
5.6	Rociador estándar	7	Aplicaciones de riesgo ligero y ordinario
8.0	Rociador de orificio grande	7	Almacenamiento y áreas de riesgo ordinario
11.2	Rociador de respuesta rápida, control de supresión de incendios (ESFR)	12	Almacenamiento de altura
14.0	Rociador de orificio extra grande (EO)	12	Almacenamiento de altura y áreas industriales
16.8	Rociador de orificio extra grande (EO)	12	Almacenamiento de altura y áreas industriales
22.4	Rociador de orificio extra grande (EO)	12	Almacenamiento de altura y áreas industriales
25.2	Rociador de orificio extra grande (EO)	12	Almacenamiento de altura y áreas industriales
28.0	Rociador de orificio extra grande (EO)	12	Almacenamiento de altura y áreas industriales

Nota: NFPA 13-2022

El valor del factor K puede variar desde 2.8 hasta 28.0, dependiendo del tipo de rociador y su aplicación.

Rociadores de orificio estándar (Standard Orifice - SO): generalmente con un K=5.6 o K=8.0, son los más comunes para riesgos ligeros y ordinarios.

Rociadores de respuesta rápida de orificio grande (Large Orifice-LO / Quick Response - QR): a menudo con un K=8.0 o K=11.2, diseñados para descargar un mayor volumen de agua en las etapas iniciales de un incendio, mejorando la supresión.

Rociadores de respuesta rápida y orificio extra grande (Extra Large Orifice - EO / QR): con factores K de 14.0 o 16.8, se utilizan en aplicaciones donde se requiere una descarga de agua aún mayor, como en instalaciones de almacenamiento.

Rociadores de control de modo de aplicación específico para almacenamiento (Specific Application Control Mode - ESFR): estos rociadores están diseñados para suprimir incendios en almacenamiento de altura, con valores de K que pueden ser tan altos como 28.0. Su elevado caudal permite un ataque directo y la supresión del fuego en su origen.

La selección de un rociador con un factor K específico no es arbitraria; está directamente vinculada a la densidad de descarga requerida para un área determinada, lo que a su vez depende del tipo de riesgo de incendio. Un factor K alto permite mayor caudal a presión baja, lo que puede ser ventajoso en sistemas con limitaciones hidráulicas. Sin embargo, también implica

mayor demanda de agua, lo que puede afectar el dimensionamiento de bombas y tanques. Aunque el factor K aumenta, la presión mínima no lo hace proporcionalmentm esto se debe a que la ecuación (1), $Q = K\sqrt{P}$ (1), permite que un rociador con mayor K entregue más caudal de agua con la misma presión dada. No obstante, para garantizar un patrón de rociado efectivo y superar la resistencia del sistema, se establece una presión mínima estándar (entre 7 psi a 12 psi). La presión mínima es un requisito de diseño, no necesariamente la presión operativa ideal del rociador. La correcta selección del factor K es crucial para:

- Garantizar una cobertura uniforme en toda el área protegida.
- Optimizar el uso de recursos hidráulicos del sistema.
- Cumplir con los requisitos normativos y de desempeño (NFPA 13-2022).

Factor K y su relación de acuerdo al tipo de rociador

Es importante resaltar que existe una relación entre los factores K, en comparación al factor nominal K=5.6, de tal manera que el caudal descargado por ellos es un porcentaje establecido que se puede comparar al caudal con factor K=5.6. Supongamos para el ejemplo de cálculo una presión de 12 psi y los valores de K=4.2, K=5.6 y K=8.0 respectivamente

K=4.2 y P= 12psi $Q_{(K=4.2)} = 4.2\sqrt{12} = 14.55$ gpm

K=5.6 y P= 12 psi $Q_{(K=5.6)} = 5.6\sqrt{12} = 19.40$ gpm

K=8.0 y P= 12 psi $Q_{(K=8.0)} = 8.0\sqrt{12} = 27.70$ gpm

$\frac{Q_{(K=4.2)}}{Q_{(K=5.6)}}$=0.75 $\frac{Q_{(K=8.0)}}{Q_{(K=5.6)}}$=1.43

Mediante este procedimiento, previamente detallado para cada valor de K, se puede establecer en la tabla 2, la siguiente comparación:

Tabla 2

Comparación del Factor K

Factor K $gpm/\sqrt{psi}$	Relación respecto a K=5.6
2.8	0.5
4.2	0.75
5.6	1.0
8.0	1.4
11.2	2.00
14.0	2.50
16.8	3.00
22.4	4.00
25.2	4.50

Nota: elaboración propia

De esta comparación se puede establecer la relación $\frac{Kactual}{Kbase}$ Donde:

- Kactual: es el valor del rociador que se está analizando.
- Kbase = 5.6 es el valor de referencia (rociador estándar).

Para K=2.8, $\frac{2.8}{5.6} = 0.50$

Este rociador tiene la mitad de la capacidad de descarga que el estándar.

Para K=8.0, $\frac{8.0}{5.6} = 1.43$

Este rociador tiene 43% más capacidad de descarga que el estándar.

Para K=22.4, $\frac{22.4}{5.6} = 4.00$

Este rociador tiene 4 veces la capacidad de descarga del estándar.

Este cálculo es útil para comparar rápidamente el rendimiento hidráulico de distintos rociadores sin necesidad de aplicar la fórmula completa de caudal. Mediante esta comparación se puede seleccionar el tipo de rociador más adecuado según el riesgo de incendio, el tipo de ocupación y las características hidráulicas del sistema. Los rociadores con factores K más altos, como los EO (extra grandes), son ideales para aplicaciones industriales o de almacenamiento en altura, donde se requiere un mayor caudal para controlar incendios más intensos.

Simulación Computacional en la Selección del Factor K

La propuesta este artículo consiste en desarrollar y utilizar una simulación computacional de análisis de riesgo específico para determinar el factor K óptimo en cada escenario de estudio. En lugar de aplicar valores estándar, esta metodología considera: La Carga de fuego, y la Presión disponible con las limitaciones propias del sistema hidráulico.

Mediante el software desarrollado, se pueden obtener valores del caudal de descarga, densidad de descarga, tiempo de activación del rociador y tiempo estimado de control del fuego, esto permite modelar distintos escenarios de incendio y evaluar el comportamiento de diversos rociadores. Esta técnica proporciona un método para seleccionar el factor K que maximice la eficiencia hidráulica sin comprometer la cobertura ni el tiempo de respuesta.

Parámetros de evaluación de la Aplicación Computacional

Tipo de Riesgo: la norma NFPA 13-2022 “Standard for the Installation of Sprinkler Systems”, establece una clasificación de riesgos para diferentes tipos de ocupaciones, La clasificación de riesgo de ocupación provee un medio conveniente de categorización de las cargas de combustible y la severidad del fuego asociado con ciertas operaciones en la edificación; son presentadas como descripciones cualitativas, en vez de medidas cuantificables. Las ocupaciones se clasifican en; Ocupaciones de Riesgo Leve o Ligero, Ocupaciones de Riesgo Ordinario del grupo 1 y grupo 2 y Ocupaciones de Riesgo Extra del grupo 1 y grupo 2.

Temperatura de activación del rociador: representa el punto térmico en el que un rociador automático se activa para liberar agua en caso de incendio, esta temperatura debe coincidir con los valores especificados por el fabricante, generalmente entre 57 °C y 182 °C, dependiendo del tipo de rociador y su aplicación.

RTI (Response Time Index): es un parámetro que mide la sensibilidad térmica de un rociador automático frente a un incendio. Se expresa en metros por raíz cuadrada de segundo ($m \cdot s^{0.5}$) y refleja la rapidez con la que el rociador responde al aumento de temperatura en su entorno, es clave en la clasificación de rociadores como "rápidos" o "estándar", en la siguiente tabla se muestran los valores de RTI típicos:

Temperatura ambiente del recinto a evaluar: es la temperatura promedio que se mantiene en el espacio donde se instalarán los rociadores. Este valor influye directamente en la elección de la temperatura de activación del rociador, la norma NFPA 13-2022 establece que la temperatura de activación del rociador debe ser al menos 30 °C por encima de la temperatura ambiente máxima esperada en el recinto. En recintos con temperatura ambiente controlada (como oficinas o residencias), suele estar entre

18 °C y 25 °C. En espacios industriales o almacenes sin climatización, puede variar ampliamente, desde menos de 0 °C hasta más de 50 °C, dependiendo del clima local y la actividad interna.

Temperatura de gases calientes**:** La temperatura de los gases calientes generados durante un incendio varía según la fase del fuego, el tipo de combustible y las condiciones del recinto, estos gases se acumulan en la parte superior de la edificación ocasionando temperaturas elevadas. En la fase incipiente: del fuego, la temperatura de la llama puede alcanzar hasta 538 °C, pero los gases aún no se acumulan significativamente. En la fase de combustión libre los gases calientes pueden superar los 700 °C, especialmente cerca del techo, donde se concentran por efecto de la convección.

Velocidad del aire caliente**:** este parámetro depende de varios factores como la geometría del espacio, la temperatura, la presión y la dinámica del fuego. En espacios cerrados, la velocidad del aire caliente puede alcanzar entre 2 y 5 m/s en condiciones moderadas. En incendios más intensos o en estructuras verticales (escaleras, ductos), puede superar los 10 m/s (tabla 4).

Tabla 3
RTI típicos (NFPA 13)

Tipo de Rociador	RTI típico ($m \cdot s^{0.5}$)	Características Principales
Respuesta rápida (QR)	≤ 50	Activación veloz, ideal para ocupaciones de riesgo ligero como oficinas, escuelas o residencias.
Respuesta estándar	Entre 80 y 90	Activación más lenta, adecuada para ambientes industriales o comerciales con mayor carga térmica.
Respuesta especial	Entre 50 y 80	Usados en condiciones específicas donde se requiere un equilibrio entre sensibilidad y resistencia al entorno.
ESFR (Early Suppression Fast Response)	≤ 50	Diseñados para suprimir incendios rápidamente en almacenes con alta carga combustible.

Nota: NFPA 13-2022

Tabla 4
Valores Típicos de velocidad del aire caliente (u)

Clasificación del Incendio	Rango Típico de Velocidad (u) m/s	Escenarios de Aplicación
Crecimiento Lento	0.5 - 1.0	Incendios que se desarrollan lentamente, como los que involucran materiales como papel o madera en ambientes con techos bajos.
Crecimiento Medio	1.0 - 2.5	El rango más común para la mayoría de los incendios de riesgo estándar, como los que ocurren en oficinas o tiendas.
Crecimiento Rápido	2.5 - 3.0 o más	Incendios que se propagan muy rápido, como los que involucran líquidos inflamables, plásticos o riesgos industriales de alta peligrosidad.

Nota: fuente: (Hurley et al., 2016)

Área de cobertura del Rociador: El Área de Cobertura por rociador, medida en m² o en pie2, es el área sobre la cual se asume que el rociador va a descargar el agua, para propósitos del cálculo. La norma NFPA 13, establece un Área de Cobertura máxima para rociadores estándar colgantes y montantes, que depende de la clase de riesgo, Tabla 5.

Tabla 5
Área de cobertura del rociador (NFPA 13)

Clase de Riesgo	Área de Cobertura Máxima	
	pie^2	m^2
Ligero	225	20,9
Ordinario	130	12,1
Extra	130*	12,1*
	100**	9,3**

*Para densidades de descarga < de 0,25 gpm/pie^2
** Para densidades >= a 0,25 gpm/pie^2

Presión hidráulica del Rociador**:** es el parámetro que determina la fuerza con la que el agua fluye a través del rociador una vez activado como consecuencia de un incendio. Este parámetro es esencial para garantizar que se descargue el caudal necesario que permite controlar o suprimir el incendio de manera efectiva. La Presión mínima de operación de un rociador es de 7 psi, en la Tabla 1, se pueden apreciar dichos valores.

HRR (Heat Release Rate / Tasa de Liberación de Calor): Representa la cantidad de energía térmica que un incendio libera por unidad de tiempo, normalmente expresada en kilovatios (kW), megavatios (MW) por cada m² y para el sistema ingles en BTU/s·m²**.**

En la tabla 6, se indican algunos valores característicos de HRR para diversos materiales. Estos valores están basados en datos típicos de pruebas con calorímetros realizados en diversos estudios académicos y recopilaciones bibliográficas.

Tabla 6
Valores de HRR

Material	HRR			Observaciones
	(kW/m²)	(MW/m²)	(BTU/s·m²)	
Madera (pino, roble)	200–300	0.2–0.3	682–1024	Alta combustibilidad
Espuma de poliuretano	400–1000	0.4–1.0	1365–3412	Muy inflamable, rápido crecimiento del fuego
Polipropileno (plástico)	500–800	0.5–0.8	1706–2730	Común en muebles y envases
PVC (cloruro de polivinilo)	100–250	0.1–0.25	341–853	Menor HRR, pero produce gases tóxicos
Papel/cartón	150–250	0.15–0.25	512–853	Rápido encendido, HRR moderado
Combustibles líquidos (gasolina, gasoil)	>1000	>1.0	>3412	HRR extremadamente alto

Nota: fuente NFPA 13-2022.

Parámetros Resultantes de la Aplicación Computacional

Tiempo de activación del rociador: Según estudios realizados por Hurley et al., (2016), el tiempo de activación puede estimarse con esta fórmula

$$t_a = \frac{RTI}{\sqrt{u}} . Ln\left(\frac{Tg - T_0}{Tg - Ta}\right) \quad (2)$$

Donde:

- t_a: Tiempo de activación (segundos)
- RTI: Índice de tiempo de respuesta del rociador (m·s^0.5)
- u: Velocidad del aire caliente (m/s)
- Tg: Temperatura del gas caliente (°C)
- T_0: Temperatura ambiente (°C)
- Ta: Temperatura de activación del rociador (°C).

Caudal del rociador (Q): es la cantidad de agua que descarga por unidad de tiempo una vez activado el rociador. Se expresa en galones por minuto (gpm) o litros por minuto (L/min), puede estimarse con la fórmula.

$$Q = K.\sqrt{P} \quad (3)$$

Donde:

- K: Factor K del rociador ($gpm/\sqrt{psi}$)
- Q: Caudal en galones por minuto (gpm)
- P: Presión (psi)

Densidad de Aplicación o Descarga (D): representa un parámetro clave que indica la cantidad de agua que debe aplicarse por unidad de superficie para controlar o extinguir un incendio. Su cálculo se puede hacer utilizando la ecuación 4:

$$D = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Donde:

- D: Densidad (gpm/pie²)
- Q: Caudal (gpm)
- A: Área cubierta (pie²)

Una vez realizado el cálculo del valor numérico de la Densidad de Aplicación, es necesario verificar si el mismo cumple con lo estipulado en la normativa NFPA 13 relativo a Las curvas de densidad/área, las cuales describen gráficamente múltiples puntos de diseño para cada clase de riesgo de ocupación.

Tiempo estimado de control (T): este parámetro se refiere al intervalo de tiempo necesario para que el sistema logre contener o extinguir un incendio una vez que se ha activado. Depende de múltiples factores como el tipo de riesgo, la densidad de aplicación, el caudal, el número de rociadores activados en el área de diseño. Su cálculo se puede hacer utilizando la siguiente ecuación:

$$T = \frac{C}{D} \quad (5)$$

Donde:

- T: Tiempo en segundos (minutos)
- C: Constante ajustada (galones/ pie²)
- D: Densidad aplicada (gpm/pie²)

La constante ajustada C que se usa en la fórmula, del tiempo estimado de control (ecuación 5) no es un valor universal ni fijo en todos los escenarios.

Se puede usar como referencia típica en ciertos estudios o modelos simplificados valores como los mostrados en la tabla 7.

Tabla 7
Valores característicos de C

Tipo de ocupación o riesgo	Valor típico de C		Comentario
	(gal/pie²)	(Litros/m²)	
Riesgo ligero (oficinas, escuelas)	0.15 – 0.20	20–25	Baja carga de combustible
Riesgo ordinario (almacenes, talleres)	0.30 – 0.50	30–35	Carga moderada de materiales combustibles
Riesgo extra (industria química, plásticos)	0.60 – 1.00	40–60	Alta carga térmica y combustibilidad
Almacenamiento en estanterías altas	1.00 – 2.00	60–80	Requiere mayor densidad y volumen por área

Nota: fuente propia

En la práctica el valor de C, se puede calcular a partir de las tablas de densidad de diseño de la NFPA 13-2022 según el riesgo de ocupación, este valor representa el volumen total de agua requerido por unidad de área para controlar un incendio (en gal/pie² o Litros/m²), ajustado según el tipo de riesgo u ocupación.

La estimación precisa del consumo de agua es un parámetro crítico para la planificar la demanda hidráulica en una situación de contingencia. Para tal motivo, resulta indispensable considerar dos variables que inciden directamente en dicho cálculo: el tiempo de operación y el número de rociadores activados.

Tiempo de operación (top**):** representa la duración estimada durante la cual los rociadores estarán descargando agua una vez activados. Este valor depende del tipo de riesgo, la respuesta del cuerpo de bomberos, y la capacidad de control del incendio. esta variable dentro del simulador planteado permite ajustar el consumo total de agua a escenarios más realistas.

Número de rociadores: aunque el cálculo hidráulico suele centrarse en el rociador hidráulicamente más alejado correspondiente al área de diseño, el número total de rociadores activados influye directamente en el volumen de agua requerido. Se puede dar el caso que múltiples rociadores se activan simultáneamente, aumentando el consumo. Incluir esta variable en el simulador permite dimensionar correctamente las reservas de agua y validar la capacidad de las bombas y tanques de almacenamiento. a fórmula utilizada para calcular el consumo de agua por rociador es:

$$\text{Consumo por rociador (gal)} = Q.\frac{top}{60} \qquad (6)$$

Donde:

- Q= Caudal del rociador (gpm)
- top = Tiempo de operación en minutos

La fórmula para el consumo total es:

$$\text{Consumo total (gal)} = Q.\frac{top}{60}.N \qquad (7)$$

Donde:

- N= Número de rociadores activados
- la conversión de galones a litros es de 3,78541 por cada galón.

Metodología para desarrollo del simulador

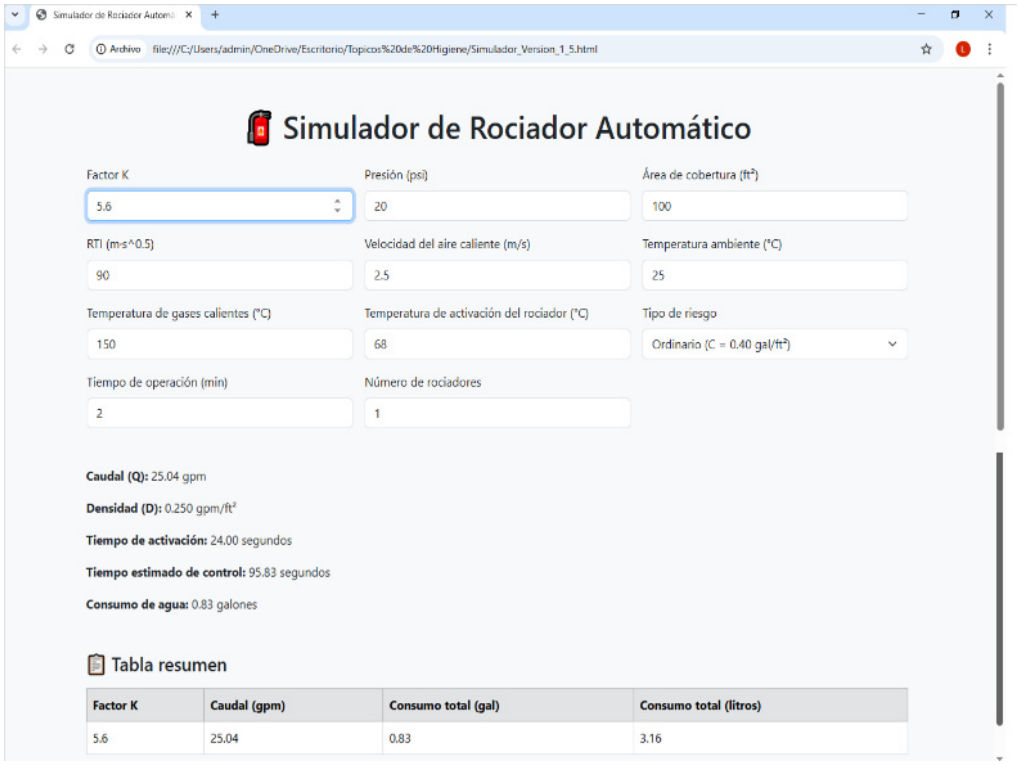
Para este proyecto, desarrollamos un simulador en línea que facilita los cálculos de rociadores automáticos en diferentes escenarios. Se puede considerar una herramienta sencilla, accesible y que se pudiera usar desde cualquier navegador. Por eso, decidimos trabajar con tecnologías web estándar: HTML, CSS y JavaScript.

El primer paso fue el desarrollo de la estructura y el diseño. El HTML se encargó de la arquitectura del simulador, organizando cada campo y etiqueta para que la interfaz fuera intuitiva. Luego, con CSS, definimos el esquema de colores, elegimos la tipografía y nos aseguramos de que el diseño del body sea responsivo y pueda ser usado en cualquier dispositivo.

Con relación a los cálculos, utilizamos JavaScript para escribir las fórmulas que calculan el caudal, la densidad de descarga, los tiempos de activación y control, y el consumo de agua. Se implementaron funciones que ajustan los valores automáticamente, dependiendo del tipo de riesgo que el usuario seleccione; así el simulador se adapta a distintos escenarios de forma inteligente.

El objetivo fue crear una herramienta rápida de usar y fácil de entender, tanto para estudiantes que recién se inician en el tema como para profesionales que necesitan una referencia rápida. Esta herramienta nos permitió realizar un estudio comparativo sobre distintos valores del factor K para obtener conclusiones y recomendaciones que puedan facilitar la escogencia del mismo.

Figura 1
Interfaz gráfica del simulador



Simulación de Escenario

Para ilustrar el funcionamiento del simulador y evaluar el desempeño hidráulico de un sistema de rociadores automáticos, se plantea un escenario representativo de riesgo ordinario con condiciones térmicas y de flujo típicas en espacios industriales o comerciales. Los parámetros definidos permiten analizar el tiempo de activación del rociador, el tiempo estimado de control del incendio y el consumo total de agua requerido.

Parámetros del escenario

- Temperatura de activación del rociador: 68 °C Valor estándar para rociadores de respuesta rápida, comúnmente utilizados en oficinas, almacenes y talleres.
- RTI (Índice de respuesta térmica): 90 m·(s)^0.5 Representa la sensibilidad del rociador al aumento de temperatura. Un RTI de 90 m·(s)^0.5 indica una respuesta moderadamente rápida.
- Temperatura ambiente: 25 °C Condición inicial del entorno antes del desarrollo del incendio.
- Temperatura de gases calientes: 150 °C Temperatura alcanzada en el techo durante el incendio, influenciada por la tasa de liberación de calor.
- Velocidad del aire caliente: 2.5 m/s Velocidad ascendente de los gases.
- Área de cobertura: 100 ft² Superficie protegida por cada rociador, utilizada para calcular la densidad de descarga.
- Presión hidráulica: 20 psi Presión disponible en el rociador, utilizada para calcular el caudal de descarga según el factor K.
- HRR (Heat Release Rate): 300 kW Tasa de liberación de calor del incendio, que influye en la temperatura de gases y la activación del rociador.
- Factor K: se utilizaron para efectos de comparación tres (03) valores, 5.6, 8.0 y 11.2 respectivamente.
- Tiempo de operación (top): Para efectos de la simulación se establece en 5 minutos.

Resultados de la Simulación

Los resultados de la simulación realizada del escenario, se pueden apreciar en la tabla 8:

Tabla 8
Resultados de la simulación

K	Caudal (gpm)	Densidad (gpm/ft²)	Tiempo			Consumo Total	
			de activación (s)	estimado de control (s)	de operación (min)	(gal)	(litros)
5.6	25.06	0.251	13.95	95.57	5	2.09	7.91
8.0	35.78	0.358	13.95	67.01	5	2.98	11.27
11.2	50.09	0.501	13.95	47.91	5	4.17	15.81

Nota. fuente propia

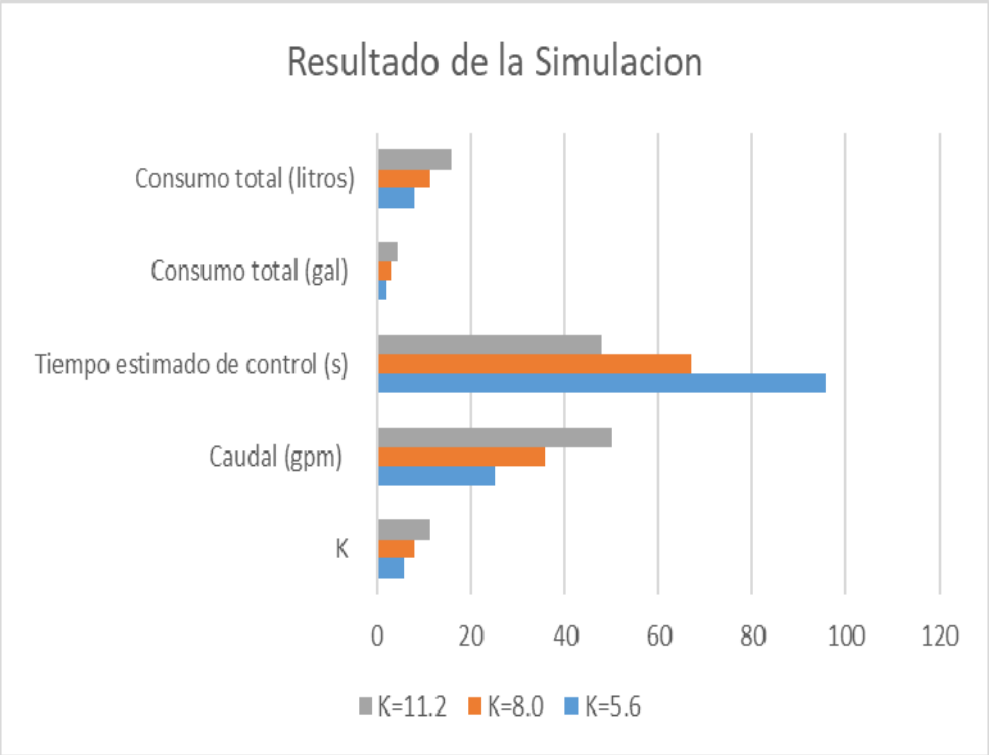
El caudal de descarga aumenta proporcionalmente con el aumento de valor del factor K, dado que este define la capacidad del rociador para liberar agua bajo una presión determinada. A una presión constante de 20 psi, el caudal varía desde 25.06 gpm (K=5.6 $\mathrm{gpm}/\sqrt{\mathrm{psi}}$) hasta 50.09

gpm (K=11.2 $gpm/\sqrt{psi}$). Esta variación impacta directamente en la densidad de aplicación sobre el área cubierta (100 ft²), incrementando de 0.251 gpm/ft² a 0.501 gpm/ft². Una mayor densidad favorece el control rápido del fuego, especialmente en escenarios de alta carga térmica.

La eficiencia en el control del fuego mejora con el aumento del factor K. El tiempo estimado de control disminuye de 95.57 segundos (K=5.6 $gpm/\sqrt{psi}$) a 47.91 segundos (K=11.2 $gpm/\sqrt{psi}$), lo que demuestra que una mayor densidad de agua permite sofocar el fuego más rápidamente.

El volumen total de agua descargada durante los 5 minutos de operación también se incrementa con el valor de K, pasando de 2.09 galones (7.91 litros) a 4.17 galones (15.81 litros). Aunque esto implica un mayor consumo de recursos, se compensa con una reducción significativa en el tiempo de control, lo que puede evitar la propagación del fuego y minimizar daños estructurales.En la Figura 2, se puede apreciar un resumen visual de la simulación realizada.

Figura 2
Gráfico de simulación



Si el número de rociadores activados aumenta, esto tiene un efecto directo sobre el consumo total de agua, la demanda hidráulica y la capacidad de respuesta del sistema. Aunque el desarrollo hidráulico suele centrarse en el rociador correspondiente al área de diseño hidráulicamente más alejado, múltiples rociadores pueden activarse en paralelo, consumiendo mayores recursos, el simulador permite incrementar el número de rociadores.

Conclusiones

El factor K, lejos de ser una constante estática, puede convertirse en una herramienta dinámica para optimizar el diseño de sistemas compuestos por rociadores. La integración de simulaciones computacionales y análisis de riesgo permite seleccionar valores más precisos, adaptados a cada entorno.

La visualización de una serie de variables en el simulador permite realizar estimaciones más precisas en el consumo hidráulico, adaptadas a distintos escenarios de riesgo. Ignorar estos factores podría llevar a una subestimación del caudal necesario, comprometiendo la seguridad del sistema y la efectividad de la respuesta ante incendios. Los rociadores de mayor factor K demostraron una capacidad superior para controlar el fuego en menor tiempo, gracias a su mayor caudal a menor presión. Sin embargo, esto tiene implicaciones, un consumo de agua más alto, lo que podría representar una gran limitación en sistemas con capacidad hidráulica restringida. También implica costos adicionales por el aumento de la capacidad de almacenamiento de agua para combatir la contingencia.

La escogencia de un mayor valor en el factor K puede aumentar los costos, pero también puede optimizar el sistema si se diseña correctamente. Todo depende del equilibrio entre presión, caudal, cobertura y componentes del sistema.

El número de rociadores activados en la zona de contingencia, es una variable crítica que influye directamente en el consumo de agua y la exigencia hidráulica del sistema. Visualizar esta variable en simulaciones permite anticipar escenarios de alta demanda, validar la capacidad de los equipos con el fin de garantizar que el sistema pueda operar eficazmente bajo condiciones reales de incendio.

Estos hallazgos respaldan la necesidad de incorporar herramientas de simulación en el diseño técnico, así como de actualizar los criterios de la NFPA 13 para incluir enfoques más flexibles y adaptativos.

Recomendaciones

La incorporación de herramientas de simulación y CFD (Computational Fluid Dynamics o Dinámica de Fluidos Computacional), en el estudio y diseño hidráulico representa una evolución necesaria en la práctica contemporánea. Estas tecnologías permiten analizar con mayor profundidad el comportamiento de los sistemas y sus componentes, permiten optimizar soluciones y reducir incertidumbres en la toma de decisiones. Su uso no solo mejora la eficiencia del diseño, sino que también contribuye a desarrollar sistemas más seguros, robustos, sostenibles y adaptados a las condiciones reales de operación. Por tanto, se recomienda su integración como parte esencial del proceso de diseño, promoviendo una ingeniería más precisa y orientada a resultados.

Es fundamental promover la actualización de la norma NFPA 13 para que contemple metodologías dinámicas en el diseño y análisis de sistemas de protección contra incendios. La evolución de las herramientas de simulación permite evaluar con mayor precisión el comportamiento real de los sistemas bajo condiciones variables, lo que se traduce en diseños más seguros, eficientes y adaptados a los desafíos actuales.

Sería muy útil fomentar la comparación entre distintos simuladores CFD en futuros

trabajos de investigación. Esto permitiría identificar sus ventajas, limitaciones y niveles de precisión en diferentes escenarios y situaciones de contingencia. Al tener una noción más clara de cómo se comporta cada herramienta, los investigadores podrán tomar decisiones más acertadas al seleccionar el software adecuado para sus estudios, además de contribuir al desarrollo de metodologías más robustas y confiables.

REFERENCIAS

National Fire Protection Association. (2022). NFPA 13: Standard for the Installation of Sprinkler Systems. NFPA.

Grimwood, P., Smith, M., & Lees, M. (2020). Fire Protection Systems. Routledge.

Pérez, V., Medina, E., (2024). Herramientas y técnicas modernas de protección contra incendios. Una Revisión Bibliográfica actualizada

Gutiérrez, R. (13 de febrero de 2020). Simulación computacional de incendios: innovando la gestión de emergencias. Universidad de las Américas

Klote, J. H., & Milke, J. A. (2019). Design of Smoke Control Systems. ASHRAE.

Buchanan, A. H., & Abu, A. K. (2017). Structural Design for Fire Safety. Wiley.

Meacham, B. J. (2021). Performance-Based Fire Safety Design. Springer.

Hurley, M. J., Gottuk, D. T., Hall, J. R., Jr., Harada, K., Kuligowski, E. D., Puchovsky, M. J., & Torero, J. L. (Eds.). (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (5ª ed.). Springer.

Díaz, J. M., & Rodríguez, L. A. (2019). Diseño de simuladores educativos en línea: fundamentos y aplicaciones. Editorial Académica Española.

Fernández, R. (2021). Fundamentos de desarrollo web con HTML, CSS y JavaScript. Alf

Fecha de recepción: 01 de mayo de 2025

Fecha de aceptación: 03 octubre de 25