

Analysis of Pressure Losses and Flow Rate in Two Types of Fire Sprinkler Systems in an Office Building

Eduardo Jeri¹; Joel Palomino²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 1635373@utp.edu.pe, C19338@utp.edu.pe

Abstract— Real estate growth has transformed cities with high-rise buildings that require robust fire sprinkler systems (FRS). These systems must maintain adequate pressure and flow to ensure fire protection (FP). Global and local fires have evidenced the importance of SRCIs, highlighting their crucial role in fire protection. The study analyzes the hydraulic performance of SRCIs through a simulation using SprinkCALC software comparing two pipe configurations (grill and tree type) in two types of materials (Schedule 40 and CPVC), evaluating pressure, pressure and flow losses. The study was based on a 140 m office building with 44 floors, the SRCI was designed ensuring compliance with NFPA 13 and the two types of piping configurations were modeled in SprinkCALC software, alternating the type of material for each case. The simulations showed that CPVC significantly reduces the pressure loss versus Schedule 40 in grid type systems. In grillage, CPVC operates at 18.68 bar and 980.76 l/min, while Schedule 40 requires 20.11 bar. In tree-type systems, CPVC delivered 987.08 l/min versus 1001.33 l/min for Schedule 40. The design allowed to accurately simulate the piping networks of the tree-type and grill-type systems, complying with NFPA 13. The simulations showed that CPVC had lower hydraulic demand compared to Schedule 40, highlighting how material properties influence hydraulic performance depending on the network configuration.

Keywords— Fire Sprinklers, Simulation, Building.

Análisis de Pérdidas de Presión y Caudal en dos Tipos de Red de Rociadores Contra Incendios en Edificio de Oficinas

Eduardo Jeri¹; Joel Palomino²

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Lima, 1635373@utp.edu.pe, C19338@utp.edu.pe

Resumen– El crecimiento inmobiliario ha transformado las ciudades con edificios de gran altura que requieren sistemas de rociadores contra incendios (SRCI) robustos. Estos sistemas deben mantener una presión y un caudal adecuado para garantizar la protección contra incendio (PCI). Incendios globales y locales han evidenciado la importancia de los SRCI, resaltando su papel crucial en la PCI. El estudio analiza el desempeño hidráulico de los SRCI mediante una simulación utilizando el software SprinkCALC comparando dos configuraciones de tuberías (tipo parrilla y tipo árbol) en dos tipos de materiales (cédula 40 y CPVC), evaluando las pérdidas de presión, presión y caudal. El estudio se basó en un edificio de oficinas de 140 m con 44 pisos, se diseñó el SRCI asegurando el cumplimiento de la norma NFPA 13 y se modeló en el software SprinkCALC los dos tipos de configuraciones de tuberías alternando el tipo de material para cada caso. Las simulaciones mostraron que el CPVC reduce significativamente la pérdida de presión frente a cédula 40 en sistemas tipo parrilla. En parrilla, CPVC opera a 18.68 bar y 980.76 l/min, mientras cédula 40 requiere 20.11 bar. En sistema tipo árbol, CPVC presentó 987.08 l/min frente a 1001.33 l/min de cédula 40. El diseño permitió simular con precisión las redes de tuberías de los sistemas tipo árbol y tipo parrilla, cumpliendo con la NFPA 13. Las simulaciones mostraron que CPVC presentó menor demanda hidráulica en comparación con cédula 40, destacando cómo las propiedades del material influyen en el desempeño hidráulico según la configuración de la red.

Palabras clave — rociadores contra incendio, simulación, edificio.

I. INTRODUCCIÓN

La expansión del sector inmobiliario en los últimos años ha transformado las ciudades metropolitanas, impulsando la construcción de edificios residenciales y comerciales de múltiples niveles. Esto ha dado lugar a edificios de gran altura, caracterizados por estructuras eficientes y sostenibles con una complejidad arquitectónica significativa. Sin embargo, este desarrollo urbanístico trae consigo desafíos únicos en cuanto a la seguridad contra incendios. La altura y el diseño de estos edificios demandan un sistema de agua contra incendios altamente robusto, capaz de responder eficientemente en caso de un siniestro. El funcionamiento de esos sistemas depende principalmente de mantener una presión y un caudal ideal en todos los niveles del edificio por debajo de los 12 bar (175 psi), lo cual es fundamental para garantizar la efectividad de los aspersores y la supresión del fuego. A nivel mundial, se han presentado múltiples incendios en edificaciones de gran altura que han resaltado el fortalecimiento en las medidas de la PCI. Incidentes como el de la Grenfell Tower en Londres (2017), que causó la muerte de 72 personas. Un caso similar se dio en Emiratos Árabes Unidos (2020), la Abbco Tower en Sharjah,

que, aunque no hubo pérdidas humanas, causó grandes daños en la infraestructura del edificio. Otro caso de incendio se dio en Italia y España, en la Torre del Moro (2021) y en un complejo residencial de Valencia (2024).

América Latina no ha sido ajena a este evento catastrófico. En Brasil se incendió un edificio de 24 pisos que colapsó tras la intensidad del fuego. En el 2022, en Ecuador se registró un incendio en un departamento. En Perú, aunque no se hayan registrado incendios en edificios altos, existe una data de casos de incendios ocurridos. En 2001 se produjo un incendio en el centro comercial Mesa Redonda que cobró la vida de 290 personas. En el 2016 se desató un incendio en el cine del centro comercial Larcomar, dejando cuatro personas fallecidas.

Una característica principal entre estos sucesos es que los edificios carecían de sistemas de rociadores. Estos incidentes provocaron una reevaluación en el Código de Seguridad Humana, NFPA 101, sobre implementar rociadores en edificios altos. Aunque todavía no se ha sugerido un requisito retroactivo general de rociadores para este tipo de edificación, algunos comités técnicos cambiaron las normas para sus ocupaciones [1].

En el contexto local, el auge de la infraestructura moderna ha cambiado la capital, con la construcción de grandes edificios como la Torre Banco de la Nación de 140 m de altura, el Westin Lima Hotel & Convention Center de 118 m, el Edificio BBVA Continental de 127 m, el Centro Cívico de Lima con 109 m y la Torre Begonias con una altura de 120 m. Estos edificios de gran altura (EGA) (*high-rise building*, en sus siglas en inglés) han determinado la exigencia de implementar sistemas de aspersores contra incendios que enfrenten desafíos específicos relacionados con la presión y caudal del agua, que conlleva la eficiencia y la seguridad del sistema. En Ref. [2], la altura de los edificios altos genera en la protección contra incendios una presión excesiva en las tuberías, especialmente en los pisos bajos, que conlleva una sobrecarga de demanda de flujo y posibles daños. Al margen de los desafíos convencionales en edificaciones estándar, los EGA presentan dificultades inusuales e intrincadas. Estos problemas involucran la accesibilidad limitada a la intervención del cuerpo de bomberos para mitigar el incendio, la evacuación por medio de escaleras y el control del humo, la alteración arquitectónica del edificio original y la presencia de sistemas de ventilación y aire acondicionado [3] [4]. Estos aspectos hacen que la seguridad en PCI en los EGA exija soluciones de diseño más sofisticadas, donde la protección de SRCI desempeña un papel crucial.

La seguridad contra incendios en EGA es un tema relevante para investigadores y autoridades a nivel global, debido a los riesgos y desafíos especiales que presentan estas construcciones. Investigaciones y tragedias en distintas partes del mundo han demostrado la importancia de optar por medidas más efectivas para prevenir incendios en edificios. A continuación, se presentan algunos antecedentes y estudios clave sobre esta problemática. Ref. [5] menciona que el análisis de evaluación de riesgos de incendio es fundamental para salvaguardar la vida y proteger los bienes privados [...] para optimizar la administración de la PCI en EGA, es necesario realizar una evaluación meticulosamente diseñada que tome en cuenta las particularidades de estos edificios. En ese sentido, se deben aplicar medidas para minimizar el riesgo de incendio en los edificios; si el riesgo no puede ser eliminado, es esencial examinarlo y evaluarlo. La implementación de estos programas de gestión de seguridad debe seguir el cumplimiento normativo [6]. La PCI solo se puede lograr a través de la incorporación de tres factores fundamentales: la prevención, la protección y la supresión de incendios [7].

Dentro de las medidas de protección y supresión de incendios, los SRCI son especialmente eficaces para combatir la propagación del fuego, ya que están diseñados para sofocar incendios en sus primeras etapas. Estos sistemas, además de proteger la propiedad, también mejoran las condiciones para una evacuación más segura, salvaguardando la vida humana. Estudios sobre los SRCI indican que la densidad y la presión de trabajo son fundamentales para extinguir el fuego de forma rápida y eficaz. A medida que se incrementa la densidad, se disminuye el tiempo necesario para la extinción de las llamas y se optimiza el efecto de extinción. Asimismo, un incremento en la presión de trabajo también reduce el tiempo de extinción. Sin embargo, en condiciones de presión mínima de 0.50 bar (7 psi), la densidad resulta insuficiente para extinguir el fuego. En situaciones en donde haya baja presión y caudal, puede surgir un resurgimiento del fuego que dificulte su control y extinción [8]. Los sistemas de aspersión de agua, tales como los rociadores convencionales, continúan siendo reconocidos como una de las herramientas más eficaces y fiables para la extinción de incendios [9]. Estos dispositivos de seguridad están diseñados para activarse automáticamente utilizando agua como agente extintor. Para garantizar altos niveles de eficiencia y fiabilidad, es necesario mantener una presión constante y suficiente en el interior del sistema [10]. Según [11], que cita a Ahrens, aproximadamente el 87% de los sistemas de PCI que se han implementado a nivel global corresponden a sistemas de tubería húmeda, los cuales están llenos de agua presurizada. Además, los avances en la fabricación de dispositivos de extinción de incendios a base de agua han impulsado el desarrollo de tecnologías emergentes, como la aplicación de sistemas de agua nebulizada en edificios. Estudios han demostrado que los sistemas de agua nebulizada pueden apagar mejor las llamas utilizando menos agua [12]. Asimismo, se ha resaltado que estos sistemas funcionan con mayor eficiencia que los aspersores convencionales, reduciendo el impacto ambiental asociado al uso del agua [13]. Esto se logra por medio de las microgotas para optimizar el enfriamiento, desplazar el oxígeno y humectar previamente la superficie, empleando tuberías de

menor diámetro, aunque su operación requiere una presión elevada en el sistema hidráulico [14]. Por otro lado, los rociadores estándar producen gotas más grandes con menor presión en comparación con los sistemas de nebulización de agua. Esto facilita que el rocío de las gotas enfríe directamente la zona de la llama [12]. Entre los sistemas de supresión de incendios más empleados en los edificios, los sistemas de aspersores (convencionales) son los más frecuentes, cuya eficiencia ha sido demostrada [15].

Para evaluar y mejorar el desempeño de estos sistemas, varios autores han recurrido a la metodología del uso de la simulación de dinámica computacional de fluidos (CFD) para estudiar el comportamiento, distribución y desempeño del flujo del agua liberada por los aspersores contra incendios. En Ref. [11] [16], usa este método para realizar simulaciones mediante la resolución de ecuaciones de Navier-Stokes en un modelo discreto de la tubería de rociadores, utilizando el modelo RANS para solucionar la turbulencia. Los experimentos sobre la eficiencia de la supresión de incendios en un escenario de un incendio se pueden sustituir por simulaciones CFD utilizando el simulador de dinámica de incendios (FDS) [17] [18]. De igual manera, herramientas como Flomaster, que utiliza modelos de tuberías de fluidos y simulaciones para calcular las pérdidas hidráulicas, también han sido útiles para modelar y estudiar problemas del mundo real como el exceso de presión en las tuberías de agua contra incendios, lo que ha permitido mejorar el diseño de estos sistemas [19]. Otros autores han realizado pruebas en los SRCI en gran y pequeña escala para mejorar la efectividad en la supresión de incendios, abordando enfoques numéricos y experimentales para evaluar las interacciones entre la pulverización de los rociadores, las llamas, la columna de fuego y las superficies calientes [20]. Por lo general, en el diseño de tuberías, se analizan parámetros como caudal, presión, volumen y pérdidas. Programas como SprinkCALC, PipeNET, SprinkCODE facilitan estos cálculos, especialmente para SRCI. En el diseño de SRCI, se utilizan tres tipos de configuraciones de tuberías: sistema tipo árbol, parrilla y tipo malla [21]. En Ref. [22] el uso de tuberías CPVC reduce las pérdidas por fricción en comparación con las tuberías de acero. Para la tubería de acero, la pérdida fue de 76.64 MPa con un valor C de 120, mientras que para la tubería de CPVC fue de 50.72 MPa con un valor C de 150 [...] esto representa una mejora del 34% en la pérdida por fricción al usar tuberías de CPVC.

Investigaciones centradas en la PCI de EGA han abordado estudios sobre sensores de detección de incendios que activan alarmas y envían notificaciones SMS a las autoridades para una respuesta rápida [23], modelos numéricos de CFD aplicados al control de humo para mejorar la seguridad humana [24], simulaciones numéricas que evalúan cómo la altura del humo afecta la visibilidad y la temperatura durante la evacuación [25]. Sin embargo, estos estudios no han explorado de manera específica el comportamiento hidráulico de los SRCI en los EGA. Esta falta de análisis resalta la necesidad de una investigación exhaustiva que compare el impacto de distintas configuraciones de tuberías en el desempeño de los SRCI en estas edificaciones.

El presente estudio tiene el propósito de evaluar el desempeño hidráulico de los SRCI mediante simulaciones

hidráulicas que abarcan un análisis comparativo de dos configuraciones de disposición de tuberías (tipo parrilla y tipo árbol) y dos tipos de materiales (acero cédula 40 y CPVC) en un edificio de oficinas de 140 m de altura, empleando el *software* SprinkCALC. Los resultados de esta investigación permiten describir y analizar el desempeño hidráulico de los SRCI en EGA, asegurando el cumplimiento con la norma NFPA 13. Asimismo, el uso de la herramienta de cálculo hidráulico SprinkCALC, diseñada específicamente para sistemas contra incendios, valida y respalda la precisión de los resultados obtenidos.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en el capítulo II, se describen las normas y estándares aplicables, haciendo énfasis en el marco normativo peruano y la normativa internacional referente a los sistemas de rociadores contra incendios. En el capítulo III, se detalla el método y herramienta de cálculo, abarcando los principios de cálculo hidráulico según NFPA 13 utilizando el *software* SprinkCALC. El capítulo IV describe el material y método, sustentado en un modelo de un edificio de gran altura, y se detalla el diseño de la red del sistema de rociadores. El capítulo V presenta la simulación hidráulica de los escenarios de estudio y la aplicación del *software* SprinkCALC. A continuación, el capítulo VI presenta los resultados y su análisis, destacando el impacto de las configuraciones del sistema sobre las pérdidas de presión y caudal, en el capítulo VII se desarrolla las discusiones de los resultados. Por último, en el capítulo VIII, se presentan las conclusiones relevantes derivadas de la investigación llevada a cabo sobre SRCI en EGA.

II. CÓDIGOS Y ESTÁNDARES APLICABLES

En el contexto normativo peruano, el Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), por medio de la norma A.130 - Requisito de Seguridad, establece en su artículo 99 los criterios de PCI para edificaciones dedicadas a oficinas, el cumplimiento obligatorio de instalaciones de sistemas de rociadores automáticos. Asimismo, el artículo 102 dispone la aplicación de la normativa internacional NFPA 13 como estándar para el diseño e instalación de los SRCI [26].

A. NFPA

La Asociación Nacional de Protección contra Incendios (NFPA) desarrolla códigos y normas destinados a la prevención de incendios y la seguridad humana [27]. Para los SRCI basados en agua aplicados a los EGA, se consideran normativas específicas como:

NFPA 13: Instalación de sistemas automáticos de aspersores.

NFPA 14: Sistemas de tuberías verticales y mangueras.

NFPA 20: Instalación de bombas contra incendios estacionarias.

NFPA 25: Inspección, prueba y mantenimiento de sistemas contra incendios.

Adicionalmente, el uso del código de prevención de incendios NFPA 1 y el código de seguridad humana NFPA 101.

B. Criterios de protección para Edificios de gran altura

Los EGA son considerados como aquellas edificaciones cuyo piso más alto ocupado se encuentra a más de 23 m (75 pies) de altura sobre el nivel de acceso para vehículo del cuerpo de bomberos [28] [29].

La norma NFPA 101, en sus secciones 11.8.3.1 y 11.8.3.2, establece los requisitos específicos para estos edificios, como:

1) *Sistemas de rociadores automáticos*: obligatoriedad de sistemas aprobados y supervisados con dispositivos de control y monitoreo en cada nivel.

2) *Instalación de montantes verticales Clase I*: conforme con la NFPA 14.

Adicionalmente, la sección 9.7.1 de la NFPA 101 indica que los SRCI deben diseñarse conforme a las normativas NFPA 13, NFPA 13D o NFPA 13R [29].

III. MÉTODO Y HERRAMIENTA DE CALCULO

A. Principio de cálculos hidráulicos - NFPA 13

1) *Área de cobertura del rociador*: se refiere a la superficie efectiva real de protección del aspersor [30]. Se calcula mediante la ecuación (1):

$$As = S \times L. \quad (1)$$

Donde:

As: área de cobertura del rociador (m² o ft²)

S: es la distancia entre rociadores a lo largo de una línea de tuberías (m o ft).

L: es la distancia entre líneas paralelas de rociadores (m o ft).

2) *Número de rociadores calculados*: es el número de aspersores calculados dentro del área de diseño del sistema [30]. Se determina mediante la ecuación (2):

$$Ts = \frac{DA}{As}. \quad (2)$$

Donde:

Ts: total de números de rociadores calculados.

DA: área de diseño (m² o ft²).

As: área de cobertura del rociador (m² o ft²).

3) *Número de rociadores por ramal*: es la cantidad de aspersores permitida en un lineal de ramal [30]. Se calcula mediante la ecuación (3):

$$Ns = \frac{1.2(\sqrt{AD})}{S}. \quad (3)$$

Donde:

Ns: números de rociadores por ramal.

DA: área de diseño (m² o ft²).

S: es la distancia entre rociadores a lo largo de una línea de tuberías (m o ft).

4) *Requisito de demanda de agua*: La NFPA define que la demanda de agua para sistemas de rociadores automáticos debe determinarse mediante uno de tres métodos principales: (1) las curvas de densidad/área, (2) el cálculo basado en el espacio donde se generó la mayor demanda y (3) el diseño de áreas especiales.

En la Fig. 1, se presenta la gráfica de densidad/área donde se detallan los valores de densidad mínima de descarga de agua (medida en gpm/ft² o mm/min) en función de la zona de protección de los rociadores (indicada en ft² o m²). Este gráfico clasifica las ocupaciones en diferentes niveles de riesgo: ligero, ordinario (grupos 1 y 2) y extra (grupos 1 y 2), y define los parámetros necesarios para garantizar una

cobertura adecuada según la naturaleza del riesgo y el área protegida [30].

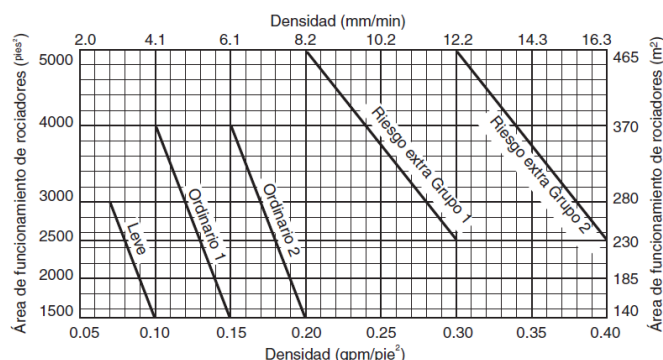


Fig. 1 Curva densidad / área [30].

5) *Asignación de manguera*: la NFPA establece el suministro mínimo de agua para sistemas calculados hidráulicamente debe estar disponible durante el tiempo mínimo indicado. Los criterios de asignación particulares para los caudales de manguera se describen en la Tabla I. Estos requisitos tienen en cuenta tanto las mangueras interiores como una combinación de mangueras interiores y exteriores, y se aplican según el tipo de ocupación [30].

TABLA I

REQUISITOS DE ASIGNACIÓN PARA CHORROS DE MANGUERAS Y DURACIÓN DEL SUMINISTRO DE AGUA PARA SISTEMAS CALCULADOS HIDRÁULICAMENTE [30].

Ocupación	Manguera interior		Manguera interior y exterior total combinada		Duración (min)
	(gpm)	(l/min)	(gpm)	(l/min)	
Riesgo leve	0, 50, 100	0, 190, 380	100	380	30
Riesgo ordinario	0, 50, 100	0, 190, 380	250	950	60-90
Riesgo extra	0, 50, 100	0, 190, 380	500	1900	90-120

B. Fórmulas

1) *Pérdida por fricción*: las pérdidas ocasionadas por fricción en las tuberías deben determinarse mediante el uso de la fórmula matemática de Hazen-Williams [30], como se muestra en la ecuación (4):

$$P_m = 6.5 \times \left(\frac{Q_m^{1.85}}{C^{1.85} \times d_m^{4.87}} \right) \times 10^5. \quad (4)$$

Donde:

P_m : resistencia por fricción (bar/m).

Q_m : caudal (L/min).

C : factor de pérdida de fricción.

d_m : diámetro interno (mm).

2) *Ajuste del factor K del rociador*: es el coeficiente de descarga del rociador [30]. El flujo a través de un rociador se define por la siguiente ecuación (5):

$$Q = K \times \sqrt{P}. \quad (5)$$

Donde:

Q : caudal [gpm (L/min)].

K : coeficiente K del rociador [gpm/psi^{0.5} (lpm/bar^{0.5})].

C : coeficiente de pérdida de fricción.

P : presión [psi (bar)].

C. Software de cálculo hidráulico - SprinkCALC

Es un instrumento versátil y sofisticado diseñado para realizar cálculos hidráulicos complejos en sistemas de rociadores contra incendios, incluida la evaluación de la duración del suministro de fluido. Este software permite la construcción o modificación de cualquier sistema de rociadores utilizando numerosas unidades de medida, lo que facilita su despliegue en diversas situaciones y el cumplimiento de las normativas NFPA y EN (Norma Europea) [31].

D. Software de diseño - Revit

Revit ofrece funcionalidades para diversas disciplinas profesionales, desde ingeniería arquitectónica y estructural hasta diseño de interiores y planificación de la construcción. Proporciona una plataforma unificada que permite a los interesados crear, visualizar y gestionar proyectos de manera eficiente. En arquitectura, se utiliza para diseño conceptual, modelado detallado y creación de documentos de construcción. Los ingenieros estructurales lo emplean para diseñar sistemas estructurales, y las disciplinas MEP lo utilizan en el diseño de sistemas mecánicos, eléctricos y de fontanería. También facilita la gestión de la construcción, mejorando la visualización y coordinación del proyecto [32].

IV. MATERIAL Y MÉTODO

A. Edificio de Gran Altura

El estudio está basado en un modelo representativo de un edificio dedicado al uso de oficinas, con una altura de 140 m, compuesto por 44 pisos superiores por encima del nivel del terreno y dos plantas de sótanos para el uso de estacionamientos. La superficie total construida es de 600 m². La altura de cada piso es de 3.20 m. Este edificio está compuesto por un *hall* de dos ascensores y una escalera presurizada de evacuación. Los estacionamientos tienen una superficie de 854 m² construidos. Los niveles del primero al décimo tienen una superficie de 741 m². A partir del décimo primero hasta el último nivel tiene 605 m². Para fines del estudio, en la Fig. 2, se muestra la planta correspondiente al cuadragésimo cuarto piso, que está implementada por dos áreas exclusivamente para oficinas y un *hall* de ascensores como área común entre ambas oficinas. Estas oficinas tienen un área de 216 m² y 250 m². Este nivel es considerado como el escenario hidráulicamente más desfavorable, donde se implementarán las dos alternativas de diseño de tuberías (del tipo parrilla y tipo árbol) para el sistema de rociadores contra incendios.

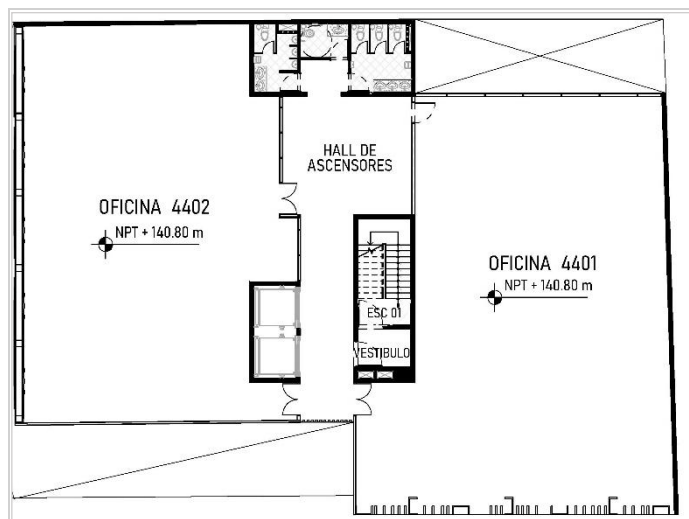


Fig. 2 Planta arquitectónica del piso 44.

B. Enfoque de diseño

En esta investigación se implementa un diseño conceptual de un sistema húmedo, basado en la NFPA 13. Compuesta por una montante mixta para rociadores y gabinetes contra incendios, y una montante para válvulas angulares. Ambos montantes son alimentados por una tubería que viene desde la descarga de la bomba contra incendios.

1) *Nivel de riesgo*: se determina por el nivel de combustibilidad que presenta la ocupación. Los estacionamientos se clasifican como un riesgo ordinario tipo 2 y las oficinas como un riesgo ligero, de acuerdo con la NFPA 13 (cap. 4.3.2 y 4.3.3).

2) *Distribución de rociadores*: cumple con los parámetros de diseño de ubicación de rociadores, de acuerdo con la NFPA 13, tales como distancias máximas (4.60 m) y distancias mínimas (1.80 m) entre rociadores, así como el área de cobertura de protección (20 m²).

C. Estudio del Caso

Con el fin de analizar las pérdidas de presión y caudal de los SRCI en las configuraciones de tuberías, se han diseñado dos sistemas en el piso 44 del prototipo de edificio en estudio, que son habitualmente utilizados en la ingeniería PCI. Estas configuraciones son el sistema tipo parrilla, que consta de dos tuberías principales (*cross mains*) que alimentan los ramales (*branch line*), y el sistema tipo árbol, que se basa en una tubería principal central de la cual se derivan ramales.

1) *Modelado – diseño de tubería tipo parrilla*: se muestra en la Fig. 3, la red del sistema que consta de 3 ramales con un diámetro nominal de 25 mm (1"). Tiene una distancia de 16.89 m de largo alimentado por dos tuberías alimentadoras. La troncal principal de un diámetro nominal de 40 mm (1.50") y secundaria con un diámetro de 40 mm (1.50"). La troncal principal está conectada a una montante (*riser*) de un diámetro nominal de 100 mm (4"), la cual tiene una distancia de recorrido de 166 m (desde el piso 44 hasta el nivel del sótano 2 del edificio). Esta tubería es alimentada por la línea de descarga de la bomba contra incendios (BCI) de 150 mm (6"), que tiene una distancia de recorrido de 31 m. Los rociadores automáticos son tipo colgante (*pendent*) que tienen un coeficiente de descarga de K: 80.6 lpm/bar^{0.5} (5.6

gpm/psi^{0.5}). Estos aspersores están conectados a los ramales por medio del cuello de ganso (*drop*) de diámetro nominal de 25 mm (1"). El material específico de la tubería es ASTM A-53, cédula 40.

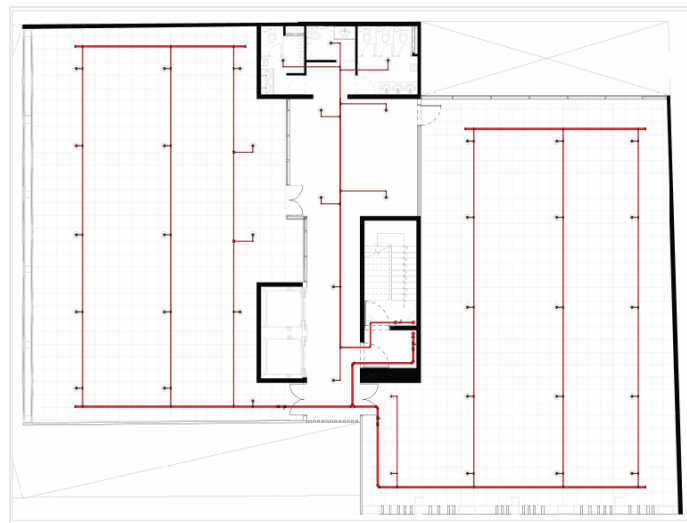


Fig. 3 Configuración del sistema de rociadores tipo parrilla.

2) *Modelado – diseño de tuberías en tipo árbol*: se presenta en la Fig. 4, la red del sistema que consta de varios ramales con diámetros que van variando conforme a la cantidad de rociadores, de forma escalonada (de menor a mayor diámetro), siguiendo las directrices del cap. 28.5.2.2 de la NFPA 13. Recolectada por una troncal central de diámetro nominal de 50 mm (2") con una distancia de 21.20 m y posteriormente por un diámetro de 65 mm (2.50"), tiene una distancia de 4.30 m de recorrido, hasta la conexión con la montante (*riser*). La montante tiene un diámetro nominal de 100 mm (4"), la cual tiene una distancia de recorrido de 166 m (desde el piso 44 hasta el nivel del sótano 2 del edificio). Esta tubería es alimentada por la línea de descarga de la bomba contra incendios (BCI) de 150 mm (6"), que tiene una distancia de recorrido de 31 m. Los rociadores automáticos son tipo colgante (*pendent*) que tienen un coeficiente de descarga de K: 80.6 lpm/bar^{0.5} (5.6 gpm/psi^{0.5}). Estos aspersores están conectados a los ramales por medio del cuello de ganso (*drop*) de diámetro nominal de 25 mm (1"). El material específico de la tubería es ASTM A-53, cédula 40.

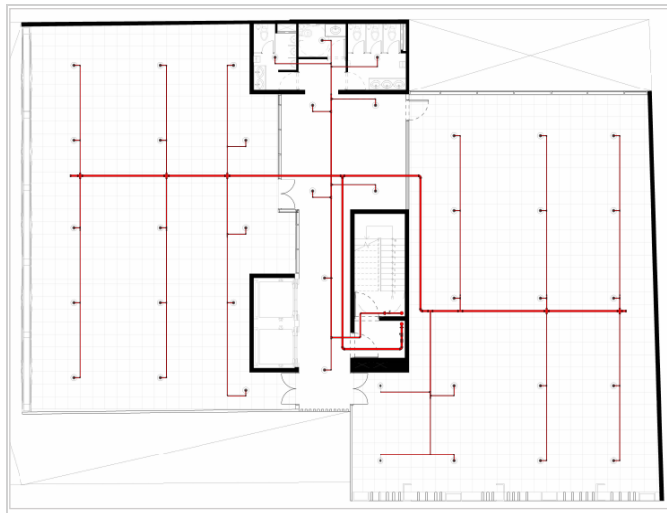


Fig. 4 Configuración del sistema de rociadores tipo árbol.

V. SIMULACIÓN

A. Datos y Parámetros de Entrada

En la Tabla II, se detallan los valores iniciales, requeridos para simulación de los CH de los SRCI a través del *software* SprinkCALC. Estos datos son establecidos por la norma internacional NFPA 13 (capítulos 19 y 27).

TABLA II
PARÁMETROS INICIALES DE CÁLCULO

Ocupación	Clasificación de Riesgo	Área de diseño	Presión mínima	Densidad	Tolerancia por mangueras
		(pies ²)	(psi)	(gpm/pies ²)	(gpm)
		(m ²)	(bar)	(mm/min)	(L/min)
Oficinas	Ligero	1500	7	0.1	100
		140	0.5	4.1	380

B. Escenarios de Cálculo Hidráulico

Para determinar el área de cobertura de cada aspersor se emplea la ecuación (1), que tiene en cuenta la distancia máxima entre aspersores a lo largo de la tubería (S) y la distancia máxima entre los ramales paralelos de los aspersores (L). En este caso, se determinaron las distancias máximas permitidas, con S: 4.20 m y L: 4.20 m, dando como resultado un área de cobertura de 17.64 m² por aspersor.

A continuación, se calcula el número total de aspersores necesarios para el escenario de cálculo. El número de rociadores se determina por la fracción entre el área de diseño (AD) y el área de cobertura de cada rociador (As), como se indica en la ecuación (2). El área de diseño del sistema es de 140 m² y el área de cobertura del rociador es de 17.64 m². El resultado del cálculo indica que se requieren 8 rociadores, de mayor demanda hidráulica, identificados como h34, h35, h36, h37, h38, h39, h40 y h40. Finalmente, se determina el número de rociadores por ramal (Ns). Conociendo los valores de AD y As, se calcula Ns por medio de la ecuación (3), lo que da como resultado 4 rociadores por cada lineal de ramal del sistema.

Los escenarios de cálculo hidráulico del sistema de rociadores están delineados por dos configuraciones principales, cada una de las cuales utiliza materiales de tubería distintos. La Fig. 5 ilustra un sistema tipo parrilla que utiliza tuberías cédula 40, que posteriormente, en esta configuración,

se reemplaza dichas tuberías por tuberías de CPVC (Cloruro de Polivinilo Clorado). Por otro lado, la Fig. 6 muestra un sistema tipo árbol diseñado inicialmente con tubería cédula 40, el cual, de manera similar, se rediseña utilizando tuberías de CPVC.

Esta intervención en el cambio de material proporciona una visión de la influencia de la rugosidad en las presiones y caudal para cada SRCI. Para determinar la rugosidad y el coeficiente de pérdida por fricción (factor C) de los materiales de las tuberías, se empleó el *software* SprinkCALC, una herramienta especializada en cálculos hidráulicos. Los valores de rugosidad y factor C para una tubería cédula 40 son 0,1016 y 120, respectivamente, mientras que para las tuberías CPVC, la rugosidad es 0,002134 y un factor C de 150. Estos valores son indispensables para la evaluación del rendimiento hidráulico del sistema y para determinar las caídas de presión en cada configuración, empleando el método de Hazen-Williams, como se muestra en la ecuación (4).

C. Nodos y Paths de los Sistemas Calculados

En la Fig. 7 se presentan los nodos y *paths* de referencia de los dos escenarios de cálculo hidráulico (CH): el sistema tipo árbol (en la parte superior) y el sistema tipo parrilla (en la parte inferior). Los *paths* fueron generados automáticamente por el *software* SprinkCALC como resultado del proceso de cálculo hidráulico, destacando el análisis de las rutas hidráulicas. Los resultados se abordan en el Capítulo VI.

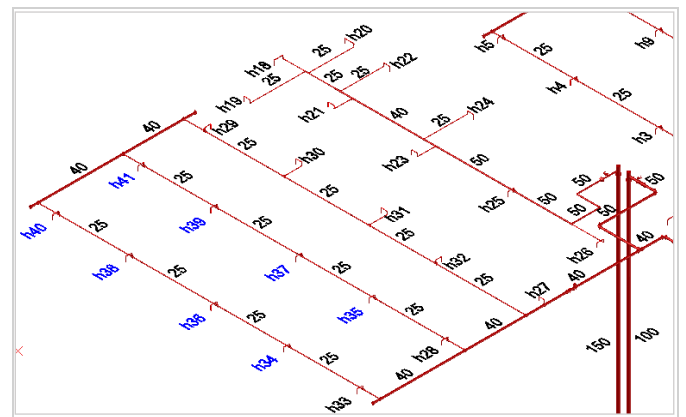


Fig. 5 Escenario de C.H del sistema tipo parrilla - tubería cédula 40.

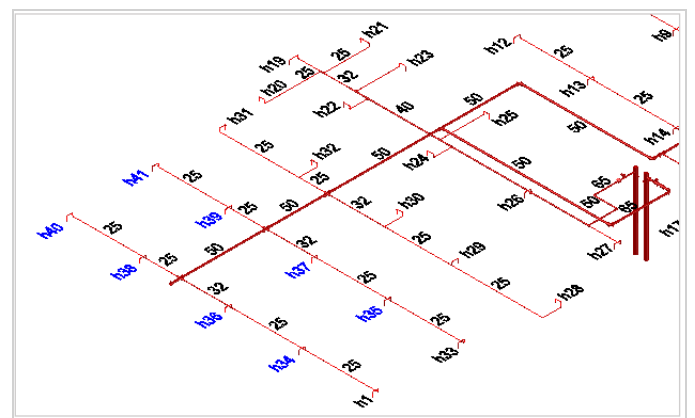


Fig. 6 Escenario de C.H del sistema tipo árbol - tubería cédula 40.

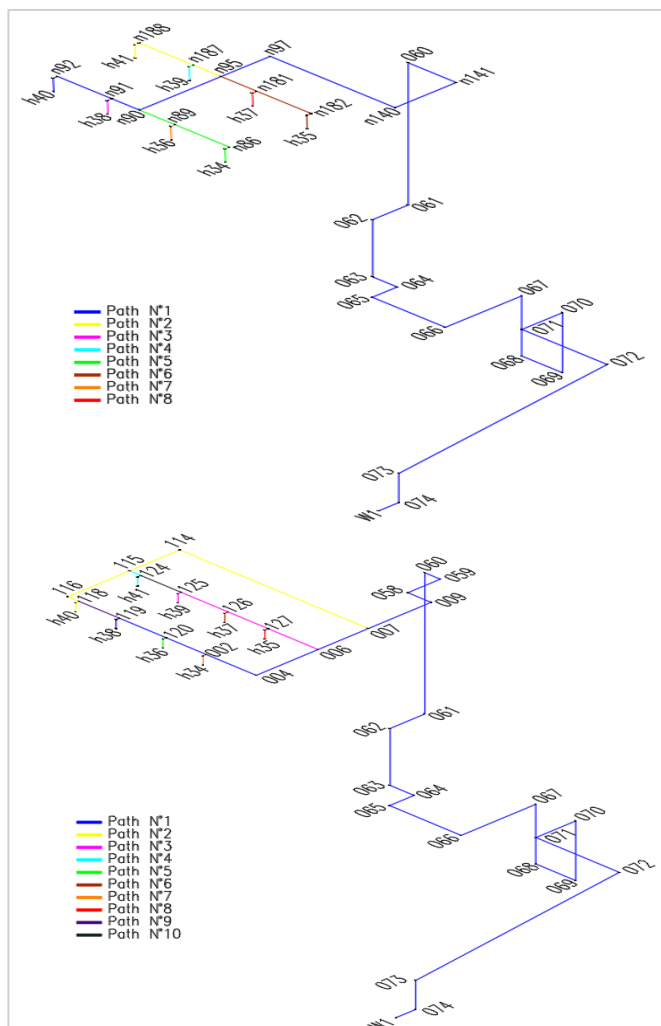


Fig. 7 Nodos y paths de los sistemas de tipo árbol y parrilla.

VI. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Considerando la Tabla II y en el capítulo V, los cuales son la base para realizar los cálculos hidráulicos utilizando el software SprinkCALC, se analizan los resultados correspondientes a los casos de estudio presentados en las Fig. 5 y Fig. 6. Para asegurar que los resultados simulados estén dentro del alcance de la bomba contra incendios (BCI), se procede en dos etapas. Primero, se determina la demanda de mangueras, según NFPA 14 (capítulo 7.10). En la Fig. 8, se muestra la demanda para mangueras a 21.91 bar y un caudal de 1913.36 l/min, resultado de la simulación de dos conexiones de mangueras de 65 mm de diámetro (más remotas), con una presión mínima de 6.90 bar y un caudal de 946 l/min.

En segundo lugar, se selecciona una bomba con una presión y caudal nominal de 23.10 bar @ 1893 l/min, la misma que satisfice la demanda de manguera. La curva característica de la BCI se ajusta a lo estipulado en la NFPA 20 (Capítulo 6.2), con los puntos de la curva definidos al 150% del caudal nominal y no menos del 65% de la presión nominal. Además, la presión de cierre no debe superar el 140% de la presión nominal. En la Fig. 8, se presenta la curva característica aproximada para asegurar el correcto funcionamiento del sistema.

A. Demanda de Rociadores – NFPA 13

La Fig. 9, se analiza la demanda hidráulica requerida de los SRCI de los casos de estudio. En primer término, se analiza el sistema tipo parrilla. Se demuestra que el de material CPVC presenta un mejor desempeño en comparación con cédula 40, ya que funciona a una presión de 18.68 bar y un caudal de 980.76 l/min, en contraste con los 20.11 bar y 998.04 l/min, respectivamente. En segundo término, la configuración tipo árbol en CPVC presenta una presión de 17.05 bar y un caudal de 985.08 l/min, que son inferiores a los 17.54 bar y 1001.33 l/min observados en el sistema tipo árbol de cédula 40.

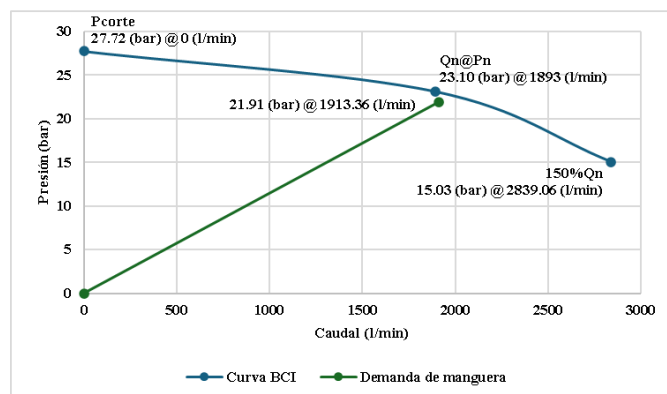


Fig. 8 Demanda del sistema de manguera – Curva característica de BCI

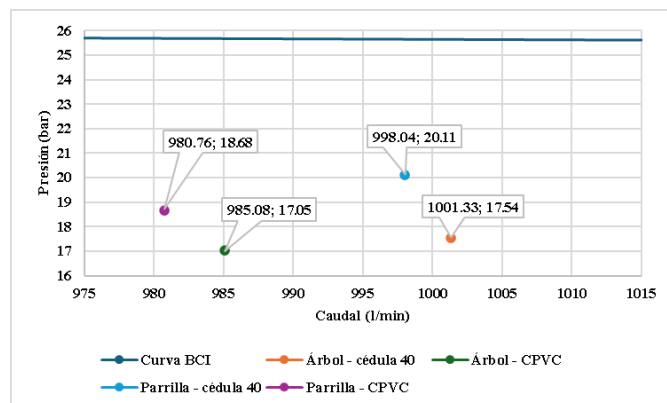


Fig. 9 Demanda del sistema de rociadores tipo árbol y tipo parrilla.

B. Sistema tipo Parrilla – Pérdida de Presión y Caudal

Los resultados extraídos de la Fig. 10 y Tabla III, en el path 1, el caudal total en cédula 40 (619.47 l/min) supera al CPVC (602.22 l/min) en un 3%, aunque la pérdida de presión en cédula 40 (19.32 bar) es 8% mayor al CPVC (17.89 bar), lo que subraya un mejor comportamiento hidráulico del CPVC. En el path 2, la discrepancia en el caudal es insignificante (1%), pero se observa una diferencia significativa en la pérdida de presión entre los materiales utilizados; la cédula 40 experimenta un 80% más de pérdida de presión en relación con el CPVC. En path 3, el caudal en cédula 40 (235.08 l/min) es 3% mayor, aunque su pérdida de presión (1.94 bar) es 88% mayor al CPVC (1.03 bar). En los paths 4, 5 y 6, las discrepancias en el caudal son mínimas, oscilando entre el 2%, mientras que las pérdidas de presión en cédula 40 son entre un 50% y 100% mayores que en el material CPVC. Los paths 7 y 8 muestran patrones iguales, con cédula 40 mostrando caudales que son un 8% superiores, pero incurriendo en pérdidas de presión del 80% y 100% mayores que en el CPVC. En los paths 9 y 10 no se presenta pérdidas de presión; sin embargo, se observa una disminución del caudal del 6% en

cédula 40, mientras que en CPVC se registra un aumento del 40%, respectivamente.

C. Sistema tipo Árbol - Pérdida de Presión y Caudal

Los resultados de la Fig. 11 y Tabla IV, se observa que la red tipo árbol en el *path* 1, el caudal total en cédula 40 (622.85 l/min) supera al del CPVC (606.53 l/min) en un 3%, con una diferencia insignificante en la pérdida de presión, ya que en cédula 40 mide 16.75 bar y en CPVC 16.26 bar. En el *path* 2, el caudal en cédula 40 (150.27 l/min) es un 1% mayor; sin embargo, su pérdida de presión (0.48 bar) es un 78% superior a la del CPVC (0.27 bar), lo que demuestra la superioridad del CPVC en cuanto al comportamiento hidráulico. En el *path* 3, la variación del caudal es mínima (1%), con pérdidas de presión de 0.05 bar en cédula 40 y 0.04 bar en CPVC, lo que indica un 25% mayor en comparación con CPVC. El *path* 4 muestra que el caudal en cédula 40 es un 50% menor en comparación con CPVC, acompañado de pérdidas de presión que son un 65% menores, lo que refleja un comportamiento distinto en este tramo. Por el contrario, en el *path* 5, mientras que el caudal en cédula 40 es de 160.99 l/min, en CPVC disminuye a 75.84 l/min, lo que indica una reducción del 53% en el caudal respecto a cédula 40. Sin embargo, las pérdidas de presión en cédula 40 (0.31 bar) son 675% mayores que las del CPVC (0.04 bar). En el *path* 6, el caudal en cédula 40 (164.89 l/min) es un 5% mayor, aunque su pérdida de presión (0.32 bar) es un 78% superior a la del CPVC (0.18 bar). En el *path* 7, la discrepancia de caudal es del 6%, mientras que en cédula 40 presenta pérdidas de presión un 133% superiores (0.07 bar frente a 0.03 bar en CPVC). En el *path* 8, el caudal en cédula 40 (84.6 l/min) supera al del CPVC en un 6% (79.87 l/min).

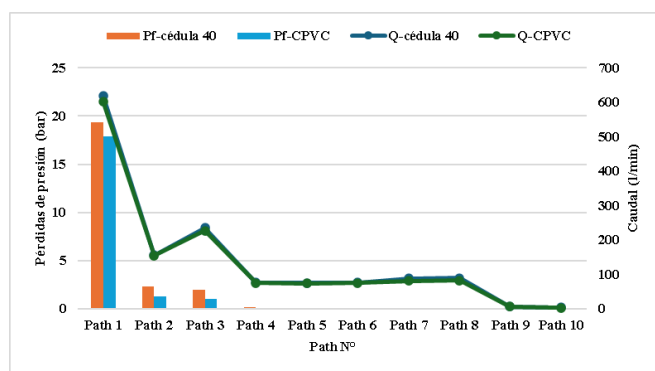


Fig. 10 Gráfica de pérdida de presión y caudal – sistema tipo parrilla

D. Sistema tipo parrilla - Descarga de Rociadores Abiertos

Según la Tabla V y Fig. 12, los resultados del sistema tipo parrilla indican que la densidad de referencia inicial de 4.10 mm/min aumenta en los aspersores iniciales (h34 y h35), alcanzando niveles de 5.0 y 5.1 mm/min, respectivamente. El aumento es atribuible a la elevada presión y caudal presentes en los primeros segmentos del sistema, donde en cédula 40 registra caudales de 87.99 l/min y 89.67 l/min, mientras que en CPVC muestra una pequeña reducción a 81.36 l/min y 82.84 l/min, lo que refleja cambios del 8% en el caudal y de hasta el 17% en la presión. A partir del aspersor h36, la densidad disminuye rápidamente debido al descenso de la presión y del caudal, acercándose al valor de referencia. En los aspersores últimos (h38 a h41), la densidad se estabiliza en 4.10 mm/min,

con caudales casi idénticos entre cédula 40 y CPVC (alrededor de 72.72 l/min), y variaciones nulas de la presión.

TABLA III
CAUDAL Y PÉRDIDA DE PRESIÓN – SISTEMA TIPO PARRILLA

Path	Parrilla - cédula40		Parrilla - CPVC		% Variación	
	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)
Path 1	619.47	19.32	602.22	17.89	3%	8%
Path 2	155.51	2.28	154.58	1.27	1%	80%
Path 3	235.08	1.94	227.46	1.03	3%	88%
Path 4	76.9	0.13	75.55	0.07	2%	86%
Path 5	75.69	0.06	74.06	0.03	2%	100%
Path 6	76.85	0.06	75.03	0.04	2%	50%
Path 7	87.99	0.08	81.36	0.04	8%	100%
Path 8	89.67	0.09	82.84	0.05	8%	80%
Path 9	6.68	0	7.12	0	-6%	0%
Path 10	4.16	0	2.98	0	40%	0%

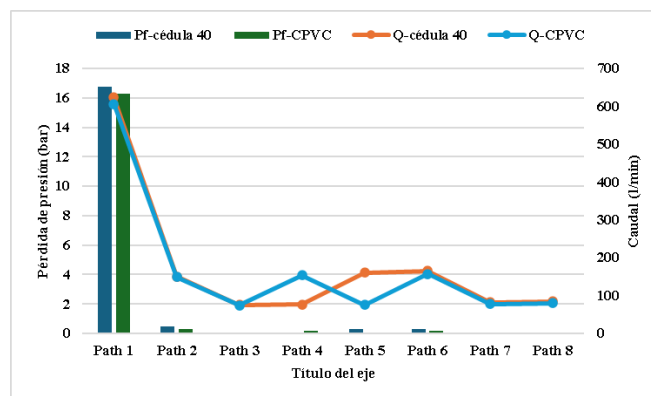


Fig. 11 Gráfica de pérdida de presión y caudal – sistema tipo árbol

TABLA IV
CAUDAL Y PÉRDIDA DE PRESIÓN – SISTEMA TIPO ÁRBOL

Path	Árbol - cédula40		Árbol - CPVC		% Variación	
	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)	Caudal total (l/min)	Pérdida de presión (bar)
Path 1	622.85	16.75	606.53	16.26	3%	3%
Path 2	150.27	0.48	149.35	0.27	1%	78%
Path 3	74.82	0.05	74.17	0.04	1%	25%
Path 4	76.63	0.06	153.83	0.17	-50%	-65%
Path 5	160.99	0.31	75.84	0.04	112%	675%
Path 6	164.89	0.32	157.3	0.18	5%	78%
Path 7	82.6	0.07	78.12	0.03	6%	133%
Path 8	84.6	0.07	79.87	0.04	6%	75%

E. Sistema tipo árbol - Descarga de Rociadores Abiertos

Con respecto a la Fig. 13 y la Tabla VI, en el sistema tipo árbol, los primeros rociadores (h34 a h37) presentan valores de densidad y caudal más elevados, con densidades que oscilan entre 4.4 y 4.8 mm/min y caudales que alcanzan hasta 82.6 l/min en cédula 40. Estas características se atribuyen al aumento de presión en los rociadores más críticos, donde las diferencias entre cédula 40 y CPVC son más pronunciadas, con variaciones de hasta el 6% en el caudal (h36) y el 12% en la presión (h36). En los rociadores (h38 a h41), el sistema muestra una disminución gradual en el caudal y la presión con variaciones mínimas entre los dos materiales del 1% y 2%, respectivamente. En los rociadores finales (h40 y h41), la densidad se estabiliza en torno a 4.2 mm/min, la fluctuación del caudal y la presión se mantienen en un 0%, evidenciando una mayor estabilidad del sistema en estos puntos.

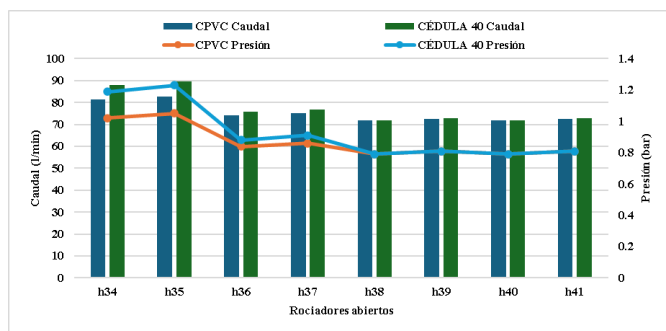


Fig. 12 Gráfica de presión y caudal de rociadores abiertos - sistema parrilla

TABLA V

CAUDAL Y PRESIÓN DE DESCARGA DE ROCIADORES ABIERTOS SISTEMA PARRILLA

Rociador abierto	CÉDULA 40			CPVC			% variación	
	Densidad (mm/min)	Caudal (l/min)	Presión (bar)	Densidad (mm/min)	Caudal (l/min)	Presión (bar)	Caudal (l/min)	Presión (bar)
h34	5	87.99	1.19	4.6	81.36	1.02	8%	17%
h35	5.1	89.67	1.23	4.7	82.84	1.05	8%	17%
h36	4.3	75.69	0.88	4.2	74.06	0.84	2%	5%
h37	4.4	76.88	0.91	4.3	75.03	0.86	2%	6%
h38	4.1	71.88	0.79	4.1	71.88	0.79	0%	0%
h39	4.1	72.72	0.81	4.1	72.57	0.81	0%	0%
h40	4.1	71.93	0.79	4.1	71.91	0.79	0%	0%
h41	4.1	72.74	0.81	4.1	72.57	0.81	0%	0%

TABLA VI

CAUDAL Y PRESIÓN DE DESCARGA DE ROCIADORES ABIERTOS SISTEMA ÁRBOL

Rociador abierto	CÉDULA 40			CPVC			% variación	
	Densidad (mm/min)	Caudal (l/min)	Presión (bar)	Densidad (mm/min)	Caudal (l/min)	Presión (bar)	Caudal (l/min)	Presión (bar)
h34	4.4	78.38	0.94	4.3	75.72	0.88	4%	7%
h35	4.6	80.27	0.99	4.4	77.73	0.92	3%	8%
h36	4.7	82.6	1.05	4.4	78.12	0.94	6%	12%
h37	4.8	84.58	1.1	4.5	79.87	0.98	6%	12%
h38	4.2	74.82	0.86	4.2	74.17	0.84	1%	2%
h39	4.3	76.63	0.9	4.3	75.84	0.88	1%	2%
h40	4.1	71.88	0.79	4.1	71.88	0.79	0%	0%
h41	4.2	73.63	0.83	4.2	73.51	0.83	0%	0%

VII. DISCUSIONES

Los resultados muestran que el CPVC, debido a su menor rugosidad en comparación con el acero, presenta menores pérdidas de presión. En el sistema tipo parrilla, el CPVC redujo significativamente la pérdida de presión en varios *paths*. En el *path 2*, la pérdida de presión en cédula 40 fue de 19.32 bar, un 80% mayor que en CPVC (17.89 bar), mientras que en el *path 3* esta diferencia alcanzó el 88%, con valores de 1.94 bar en cédula 40 y 1.03 bar en CPVC. Estos resultados fueron obtenidos mediante el software SprinkCALC para el análisis del sistema. Estudios previos indican que el CPVC reduce las pérdidas de presión en un 34% respecto al acero, debido a su coeficiente de Hazen-Williams más alto ($C=150$ en CPVC frente a $C=120$ en acero). En dicho estudio, la pérdida de presión en tuberías de acero alcanzó 76.64 MPa, mientras que en tuberías de CPVC fue de 50.72 MPa, reflejando una reducción del 34% [22]. Dichos estudios utilizaron el software PIPENET para sus análisis.

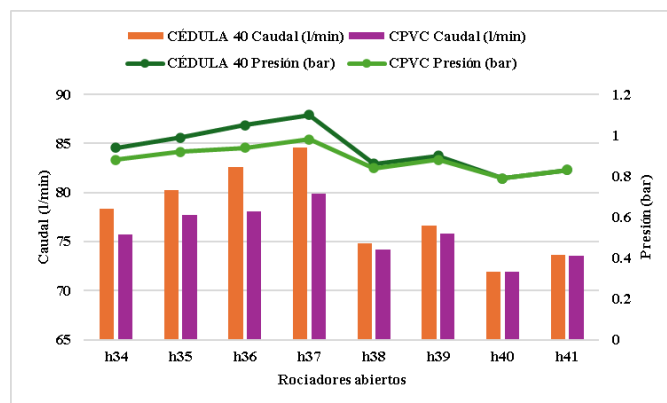


Fig. 13 Gráfica de presión y caudal de rociadores abiertos - sistema árbol

VIII. CONCLUSIONES

Se diseñó conceptualmente las redes de tuberías del SRCI tipo árbol y tipo parrilla, cumpliendo con los alineamientos de la norma NFPA 13, tales como distancias máximas (4.60 m) y mínimas (1.80 m) entre rociadores, así como la cobertura de protección de 20 m². Además, se determinaron los valores mínimos de la curva característica de la BCI, conforme a la NFPA 20. El diseño permitió simular el desempeño de las configuraciones gracias al modelado detallado de accesorios y válvulas en el *software* SprinkCALC.

Se realizaron las simulaciones en el *software* SprinkCALC siguiendo las condiciones iniciales establecidas por la NFPA 13, que incluyen una densidad de 4.10 mm/min, un escenario de incendio de 140 m² y una tolerancia de manguera de 380 l/min.

Se comparó el desempeño hidráulico de los sistemas tipo árbol y tipo parrilla con cédula 40 y CPVC. En la red tipo parrilla, en CPVC tuvo una menor demanda hidráulica, a una presión de 18.68 bar y un caudal de 980.76 l/min, mientras que en cédula 40 requirió 20.11 bar para un caudal similar. En la red tipo árbol, en cédula 40 demandó menos caudal, con 1001.33 l/min, en comparación con los 985.08 l/min en CPVC.

Se determina que entre ambas redes las pérdidas de presión en tipo árbol son menores al tipo parrilla, tanto en CPVC como en cédula 40. Alcanzando una variación del 3% y 8%, respectivamente, para cada tipo de red. Por tanto, la red tipo árbol es más favorable en términos de reducción de caída de presiones, considerando para un riesgo ligero.

AGRADECIMIENTO

Quiero dedicar este trabajo a mi madre, por su amor eterno y sacrificio. Te agradezco que hayas sido mi apoyo y mi inspiración en cada momento de mi vida. Tu apoyo, aunque ya no formes parte de mi vida físicamente, sigue siendo la inspiración que me motiva a seguir adelante. Te agradezco todo lo que me diste y por creer siempre en mí.

REFERENCES

- [1] Ziavras, "Determining sprinkler requirements for high rise buildings", NFPA, 21 de agosto de 2020. <https://www.nfpa.org/news-blogs-and-articles/blogs/2020/08/21/determining-sprinkler-requirements-for-high-rise-buildings> (accedido 2 de noviembre de 2024).
- [2] J. Kim, S. Lee, y J. Yang, "Comparative Study on Pressure Reduction of Sprinkler Piping Systems with an Orifice", Korean Society Of Hazard Mitigation, vol. 21, n.o 6, pp. 111-117, dic. 2021, doi: 10.9798/kosham.2021.21.6.111.
- [3] N. Mamatha. y A. Chandran. C. K, "Evaluation of Fire Protection systems in Residential High-rise Buildings for Evacuation Optimisation- A Case of Bengaluru", International Journal Of Membrane Science And

- Technology, vol. 10, n.o 1, pp. 595-604, oct. 2023, doi: 10.15379/ijmst.v10i1.2622.
- [4] L. Song, J. Zhu, S. Liu, y Z. Qu, "Recent Fire Safety Design of High-Rise Buildings", Journal Of Urban Development And Management, vol. 1, n.o 1, pp. 50-57, nov. 2022, doi: 10.56578/judm010106.
 - [5] Y. Wang, L. Hou, M. Li, y R. Zheng, "A Novel Fire Risk Assessment Approach for Large-Scale Commercial and High-Rise Buildings Based on Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) and Coupling Revision", International Journal Of Environmental Research And Public Health, vol. 18, n.o 13, p. 7187, jul. 2021, doi: 10.3390/ijerph18137187.
 - [6] M. K. Alao, B. M. Y. Yahya, W. Y. B. W. Mohmood, y I. U. Aliu, "Fire Safety Protection and Prevention Measures in Nigeria Office Buildings", International Journal Of Management And Humanities, vol. 4, n.o 5, pp. 109-115, ene. 2020, doi: 10.35940/ijmh.e0547.014520.
 - [7] N. P. Tathod y N. K. Mishra, "Evaluation of Fire Protection Systems in Multiple Use High-rise Buildings for Fire Safety Optimization", International Journal Of Advanced Research In Science Communication And Technology, pp. 193-202, may 2024, doi: 10.48175/ijarsct-18631.
 - [8] F. Wu, Y. Cui, F. Qu, y L. Mai, "Experimental Study on Fire Extinguishing Characteristics of Automatic Sprinkler System", IEEE Conference Publication | IEEE Xplore, ago. 2015, doi: 10.1109/isdea.2015.103.
 - [9] J. Hua, K. Kumar, B. C. Khoo, y H. Xue, "A numerical study of the interaction of water spray with a fire plume", Fire Safety Journal, vol. 37, n.o 7, pp. 631-657, oct. 2002, doi: 10.1016/s0379-7112(02)00026-7.
 - [10] D. Ristić, M. Blagojević, N. Haznadarević, y M. Simić, "RELIABILITY ANALYSIS OF FIRE SUPPRESSION SYSTEMS", Facta Universitatis Series Working And Living Environmental Protection, p. 127, dic. 2019, doi: 10.22190/fuwlep1902127r.
 - [11] A. Cablé, K. Chetehouna, N. Gascoin, A. Settar, K. Van Herpe, y M. Kadoche, "Experimental and numerical study of sprinkler fire protection systems: Effect of initial pressure on system performance", Journal Of Loss Prevention In The Process Industries, vol. 60, pp. 76-86, abr. 2019, doi: 10.1016/j.jlp.2019.04.009.
 - [12] H. Liu et al., "Critical assessment on operating water droplet sizes for fire sprinkler and water mist systems", Journal Of Building Engineering, vol. 28, p. 100999, oct. 2019, doi: 10.1016/j.jobe.2019.100999.
 - [13] S. A. Dabous, A. Shikhli, S. Shareef, E. Mushtaha, K. Obaideen, y I. Alsayouf, "Fire prevention and mitigation technologies in high-rise buildings: A bibliometric analysis from 2010 to 2023", Ain Shams Engineering Journal, p. 103010, ago. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.103010.
 - [14] B. O'Connor, "Descripción general de sistemas de agua nebulizada | NFPA", NFPA, 24 de junio de 2022. <https://www.nfpa.org/es/news-blogs-and-articles/blogs/2022/06/24/descripci%C3%B3n-general-de-sistemas-de-agua-nebulizada> (accedido 16 de noviembre de 2024).
 - [15] Y. J. Ko y N. Elsagan, "Investigation of the performance of fire suppression systems in protection of mass timber residential buildings", Indoor And Built Environment, vol. 32, n.o 1, pp. 230-241, nov. 2022, doi: 10.1177/1420326x221138415.
 - [16] N. F. M. Kit, N. M. H. Ishak, N. M. F. Fauzi, N. T. I. A. T. M. Muhibuddin, y N. I. Taib, "Simulation Analysis for the Distribution of Fire Water Sprinkler", CFD Letters, vol. 15, n.o 11, pp. 110-117, sep. 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.11.110117.
 - [17] R. Ramachandran y J. Lundberg, "Evaluation of Complex Spray Behaviors of Sprinkler Spray Using FDS", Linköping Electronic Conference Proceedings, vol. 192, pp. 177-183, oct. 2022, doi: 10.3384/ecp192025.
 - [18] L. Wun-Ting, C. Kee-Chiang, y L. Ming-Yuen, "Study on the Influence of Nozzle Setting Density of Water Mist System on the Fire Extinguishing Performance of Residential Fires", Interciencia, ene. 2023, doi: 10.59671/n9ok0.
 - [19] Y. Fan, A. Hao, y B. Yang, "Optimization Analysis of Water Supply Mode for Fire Protection System of Super High Rise Building", Journal Of Physics Conference Series, vol. 2860, n.o 1, p. 012029, oct. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2860/1/012029.
 - [20] S. A. Abdulrahman, K. Chetehouna, A. Cablé, Ø. Skreiberg, y M. Kadoche, "A review on fire suppression by fire sprinklers", Journal Of Fire Sciences, vol. 39, n.o 6, pp. 512-551, jul. 2021, doi: 10.1177/07349041211013698.
 - [21] K. Vishnoi, "Piping layout for fire sprinkler system: An overview," International Journal of Engineering and Applied Sciences (IJEAS), vol. 4, no. 3, Mar. 2017, doi: 10.31873/ijeas.4.3.15.
 - [22] U. I. Kang, "A study on the effects of Friction loss of CPVC pipe according to Roughness coefficient in a sprinkler system," Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 17, no. 11, pp. 355-362, Nov. 2016, doi: 10.5762/kais.2016.17.11.355.
 - [23] B. Maharmi, S. Samsudin, T. Ramdha, and H. Hanifulkhair, "Integrated IOT-Based fire Prevention and Evacuation System for High-Rise buildings," Journal of Ocean Mechanical and Aerospace -science and Engineering- (JOMase), vol. 68, no. 3, pp. 161-168, Nov. 2024, doi: 10.36842/jomase.v68i3.383.
 - [24] B. Alianto, N. Nasruddin, and Y. S. Nugroho, "High-rise building fire safety using mechanical ventilation and stairwell pressurization: A review," Journal of Building Engineering, vol. 50, p. 104224, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104224.
 - [25] Z. Yan, Y. Wang, and L. Chao, "Simulation study on fire and evacuation of super high-rise commercial building," Case Studies in Thermal Engineering, vol. 52, p. 103519, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103519.
 - [26] Requisitos de Seguridad, NORMA A.130, Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE), 2006. Accedido el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://cdn-web.construccion.org/normas/me2012/me2006/files/titulo3/01_A/RNE2006_A_130.pdf
 - [27] "Conoce más sobre NFPA | La National Fire Protection Association". NFPA | The National Fire Protection Association. Accedido el 23 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.nfpa.org/es/about-nfpa>
 - [28] Fire Code, NFPA 1, National Fire Protection Association (NFPA), 2021. Accedido el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-1-standard-development/1>
 - [29] Life Safety Code, NFPA 101, National Fire Protection Association (NFPA), 2021. Accedido el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-101-standard-development/101>
 - [30] Standard for the Installation of Sprinkler Systems, NFPA 13, National Fire Protection Association (NFPA), 2022. Accedido el 1 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.nfpa.org/es/codes-and-standards/nfpa-13-standard-development/13>
 - [31] "SprinkCALC | SprinkCAD". Home | SprinkCAD. Accedido el 23 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: <https://www.sprinkcad.com/solutions/SprinkCALC/>
 - [32] I. Ghorawat, "What is Revit Software: An In-Depth Overview," Techtute, Nov. 18, 2024. <https://www.techtute.global/blog/what-is-revit-software-an-in-depth-overview>