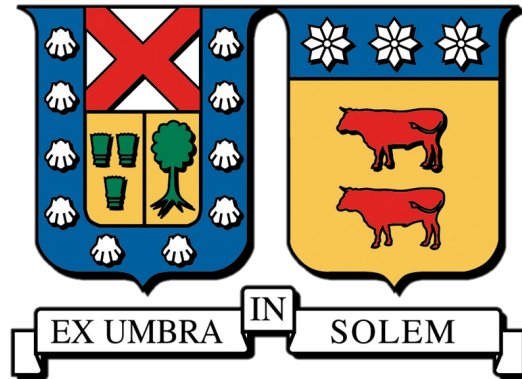


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECANICA



PROPUESTA DE MEJORA DE SISTEMA DE EXTINCION
DE INCENDIO ESPECIALIZADO PARA SALAS BLANCAS DE
DATA CENTERS

Cristian Ignacio Cortés Díaz

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Dr. Mauricio Osses Alvarado

Co-referente: Ing. Shiny Mezquita

FECHA 07/10/2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☐ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: PROPUESTA DE MEJORA DE SISTEMA DE EXTINCIÓN DE INCENDIO ESPECIALIZADO PARA SALAS BLANCAS DE DATA CENTERS

Nombre del candidato(a): Cristian Ignacio Cortés Díaz

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Mecánica

Campus: San Joaquín Departamento: Mecánica

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Mauricio Osses Alvarado, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente DEJO CONSTANCIA que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (marcar una opción):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 27/10/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha:

27/10/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Tabla de Contenidos

Problemática y Objetivos	7
1 Estado del Arte	9
1.1 Data Center	9
1.2 Sistemas de extinción de incendio usados en Data Centers	13
2 Marco Metodológico	19
2.1 Tipo y enfoque de la investigación	19
2.2 Criterios de análisis y ponderación	22
3 Análisis de sistemas de extinción de incendio	26
3.1 Criterios de evaluación aplicados	27
3.2 Definición de criterios para la matriz de puntuación	28
3.3 Escala de puntuación	35
3.4 Escenario de ponderación orientado a la continuidad operacional	36
3.5 Matriz de puntajes preliminares	39
3.6 Escenario de ponderación orientado a la viabilidad económica	43
3.7 Ranking de alternativas	47
3.8 Discusión de resultados	49
4 Diseño hidráulico	52
4.1 Diseño preliminar y supuestos	53
4.2 Determinación de la cantidad de cabezales y del caudal mínimo	58
4.3 Criterio preliminar para la bomba y las tuberías	60
5 Conclusiones y recomendaciones	71
5.1 Conclusiones generales	71
5.2 Conclusiones específicas	72

5.3 Recomendaciones	74
Bibliografía	75
A Resultados de la modelación hidráulica	81
A.1 Resultados preliminares de accesorios	81
A.2 Resultados preliminares de tuberías	84
A.3 Resultados finales de accesorios	87
A.4 Resultados finales de tuberías	90
Índice de figuras	94
Índice de tablas	95

Agradecimientos

Agradecer el tiempo de mi profesor guía Mauricio Osses especialmente por los consejos durante nuestras cesiones presenciales, y a mi co-referente Shiny Mezquita, muchas gracias por la voluntad de ayudarme con este proyecto y por la disposición de siempre querer enseñar tus conocimiento para con los demás.

Dedico parte de este estudio a mis hermanos Milton y Gabriel, por educarme y siempre confiar en mi, se que sin importar lo que piense alguien ajeno a nosotros siempre han visto mi potencial como yo lo veo ya en ellos, agradecer también a mis amistades tanto de Copiapo como Santiago que me ayudaron a entender quien era como amigo y persona.

Deseo dedicar el estudio de mi memoria a mi madre Eliana y a mi Padre Milton, quienes han sido la inspiración y generaron en mi el deseo de continuar con mis estudios y de desarrollarme más aya de como buen profesional, como una buena persona, no puedo expresar lo feliz que soy de ser su hijo, gracias mamá y papá por todo lo que siempre han echo y seguirán haciendo por mí.

Resumen ejecutivo

La presente memoria desarrolla una propuesta de mejoramiento para sistemas de extinción de incendios aplicables a salas blancas de Data Centers, considerando desempeño técnico, continuidad operativa y viabilidad económica. El caso de estudio corresponde a una sala de referencia de 300 m², con 200 racks y una potencia mínima estimada de 2 MW, calculada a partir de una densidad de 10 kW por rack.

La investigación es de carácter aplicado, con enfoque cuantitativo, diseño no experimental y alcance descriptivo-comparativo. Se evalúan rociadores automáticos, agentes limpios, gases inertes y agua nebulizada mediante diez criterios, una escala de 1 a 5 y dos escenarios de ponderación. Posteriormente, se desarrolla una modelación hidráulica estacionaria en AFT Fathom 12 para una red de agua nebulizada con 30 cabezales OH-PX2, distribuidos en tres ramales de diez unidades.

En el escenario de viabilidad económica, el agua nebulizada alcanza 38,1 puntos sobre 50, equivalentes a 76,2 %, frente a 73,8 % de los agentes limpios, 70,6 % de los gases inertes y 57,0 % de los rociadores. Para el cálculo hidráulico se adopta una presión mínima de 7 bar y un factor K de 19,0 L min⁻¹ bar^{-1/2}, obteniéndose una demanda mínima teórica de 1.508,08 L/min. La configuración final entrega aproximadamente 1.651,00 L/min y caudales de 53,75 a 56,26 L/min por cabezal. El caudal mínimo simulado supera en 6,92 % el requerimiento de 50,27 L/min, mientras que las velocidades de la red se sitúan entre 1,12 y 4,24 m/s.

Se concluye que la red modelada satisface preliminarmente los requerimientos de caudal definidos para el escenario hidráulico considerado. La preferencia por agua nebulizada depende de los criterios, calificaciones y ponderaciones adoptados. Su implementación requiere verificar la aplicación del cabezal al riesgo protegido, las condiciones reales de suministro, el NPSH y la autonomía del sistema, junto con completar la ingeniería de detalle. La simulación no acredita por sí sola la eficacia de extinción ni la continuidad operativa posterior a un incendio.

Abstract

This thesis develops an improvement proposal for fire suppression systems in data center white spaces, considering technical performance, operational continuity, and economic feasibility. The reference case comprises a 300 m² room with 200 racks and an estimated minimum IT power demand of 2 MW, based on a density of 10 kW per rack.

An applied, quantitative, non-experimental, descriptive-comparative approach is adopted. Automatic sprinklers, clean agents, inert gases, and water mist are evaluated using ten criteria, a five-point rating scale, and two weighting scenarios. A steady-state hydraulic model is then developed in AFT Fathom 12 for a water mist network consisting of 30 OH-PX2 nozzles arranged in three branches of ten nozzles each.

Under the economic feasibility scenario, water mist achieves 38.1 out of 50 points, equivalent to 76.2%, compared with 73.8% for clean agents, 70.6% for inert gases, and 57.0% for automatic sprinklers. A minimum pressure of 7 bar and a K-factor of 19.0 L min⁻¹ bar^{-1/2} are adopted for the hydraulic calculations, resulting in a theoretical minimum total demand of 1,508.08 L/min. The final configuration supplies approximately 1,651 L/min, with individual nozzle flow rates ranging from 53.75 to 56.26 L/min. The minimum simulated nozzle flow exceeds the 50.27 L/min requirement by 6.92%, while pipe velocities throughout the network range from 1.12 to 4.24 m/s.

The modeled network therefore meets the preliminary flow requirements defined for the hydraulic scenario. The preference for water mist depends on the selected criteria, ratings, and weights. Implementation requires verification of nozzle suitability for the protected hazard, actual supply conditions, NPSH, and water supply duration, together with detailed engineering. The simulation alone does not establish fire suppression effectiveness or operational continuity following a fire.

Problemática y Objetivos

Problemática

Los Data Centers constituyen infraestructuras críticas cuya operación continua es esencial para el funcionamiento de servicios estratégicos como telecomunicaciones, banca, salud y computación en la nube. En estos recintos, la sala blanca concentra equipos electrónicos de alta densidad energética y alto valor económico, lo que incrementa el riesgo asociado a incendios de origen eléctrico o térmico.

La selección del sistema de extinción de incendios en este tipo de instalaciones representa un desafío técnico relevante, ya que debe equilibrar seguridad, continuidad operativa, cumplimiento normativo y minimizar daños a los equipos. Mientras los sistemas tradicionales basados en agua pueden generar daños a la infraestructura tecnológica, los sistemas gaseosos implican mayores costos de inversión y reposición. En el contexto chileno, además, factores como la alta actividad sísmica y el crecimiento acelerado del mercado de Data Centers refuerzan la necesidad de un análisis técnico comparativo que permita fundamentar adecuadamente la elección del sistema de protección contra incendios.

En consecuencia, resulta pertinente desarrollar un estudio que evalúe técnica y económicamente las alternativas de sistemas de extinción aplicables a salas blancas de Data Centers de alta densidad, considerando su impacto sobre la infraestructura crítica, la continuidad operativa y la viabilidad de implementación. En este contexto, la problemática se sintetiza en la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué sistema de extinción maximiza el desempeño y la continuidad operativa, bajo restricciones normativas y económicas, en un Data Center de alta densidad en Chile, y cómo se diseña preliminarmente la red asociada?

Objetivo general

Desarrollar una propuesta de mejoramiento para sistemas de extinción de incendio especializado para salas blancas de Data Centers. Para cumplir el objetivo general presentado, se consideran los siguientes objetivos específicos.

Objetivos específicos

- Definir criterios técnicos y económicos de los principales sistemas de extinción aplicables a salas blancas de Data Centers.
- Comparar los sistemas de extinción mediante una matriz de análisis multicriterio.
- Seleccionar la alternativa más adecuada bajo el escenario definido.
- Diseñar la red de extinción del sistema seleccionado mediante cálculo hidráulico y modelación.
- Verificar el diseño propuesto en función de los requisitos normativos y operativos aplicables.

Capítulo 1

Estado del Arte

1.1 Data Center

Los centros de datos, también conocidos como Data Centers, son infraestructuras críticas destinadas al almacenamiento, procesamiento y gestión de grandes volúmenes de información, constituyendo la base operativa de servicios esenciales como telecomunicaciones, banca, comercio electrónico, computación en la nube e inteligencia artificial. A nivel mundial, el crecimiento acelerado del tráfico de datos, la digitalización y el crecimiento de la inteligencia artificial han convertido los data centers en activos estratégicos, donde la disponibilidad y continuidad operativa son requisitos fundamentales, ya que las interrupciones no planificadas pueden generar pérdidas económicas significativas y afectar servicios críticos (Uptime Institute, 2023).

Organismos internacionales reconocen que los data centers son un pilar estructural de la economía digital moderna y del desarrollo tecnológico global (International Energy Agency, 2022). En Chile, esta relevancia se ha intensificado durante la última década debido al rápido crecimiento del mercado de data centers, impulsado por la estabilidad institucional, la conectividad internacional y la inversión sostenida de operadores nacionales e internacionales, posicionando al país como un polo emergente de infraestructura digital en Latinoamérica.

Sala Blanca

Dentro de un Data Center, la sala blanca corresponde al espacio físico donde se instalan los racks que alojan servidores, equipos de almacenamiento y dispositivos de red, constituyendo el punto más crítico de la instalación. Estas salas cuentan con sistemas de climatización de precisión, controlando la temperatura, la humedad y el flujo de aire durante las 24 horas del día, todos los días del año; por lo que su diseño debe considerar aspectos como la contención de pasillos frío-cálido, pisos técnicos elevados, plenum de aire caliente, resistencia estructural y accesibilidad para mantenimiento (ASHRAE, 2021). Asimismo, la configuración de la sala blanca es determinante para la eficiencia energética, la continuidad operativa y la mitigación de riesgos, incluyendo aquellos asociados a incendios y fallas térmicas (Uptime Institute, 2022). En el caso de Chile, uno de los aspectos más críticos con respecto a la construcción de un Data Center es la alta actividad sísmica en la región, por lo cual estos cuentan con aisladores sísmicos en su fundación u otro tipo de sistema capaz de disipar el efecto de las vibraciones dentro del Data Center.

Rack

El rack es un gabinete metálico estandarizado que permite alojar y proteger los equipos tecnológicos dentro de la sala blanca de un Data Center, tales como servidores, sistemas de almacenamiento, switches y unidades de distribución eléctrica. Generalmente diseñado bajo el estándar de 19 pulgadas, el rack facilita la correcta disposición del hardware, la gestión del cableado y el flujo de aire necesario para la refrigeración de los equipos. La correcta selección y disposición de los racks es fundamental para asegurar la eficiencia térmica, la accesibilidad para mantenimiento y la escalabilidad de la infraestructura, especialmente en instalaciones de alta densidad de potencia (ASHRAE, 2021). Asimismo, organismos especializados señalan que los racks concentran activos de alto valor económico y estratégico, convirtiéndose en el elemento físico central de la operación del Data Center (Uptime Institute, 2023).

Incendios en salas blancas de Data Centers

Los incendios en salas blancas de Data Centers presentan una condición particular frente a otros recintos industriales, debido a la combinación de alta densidad eléctrica, circulación forzada de aire, equipos TI energizados, cableado, sistemas UPS, equipos HVAC y exigencias de continuidad operativa. Desde una perspectiva de riesgo, el impacto principal de un incendio en este tipo de infraestructura no se limita al daño físico directo, sino que puede extenderse a la interrupción de servicios digitales, pérdida de capacidad de procesamiento y afectación de clientes ubicados incluso fuera del recinto siniestrado. La Fire Protection Research Foundation señala que, en instalaciones IT, el impacto indirecto asociado a interrupción operacional y pérdida de operaciones críticas puede superar ampliamente la pérdida material directa del incendio (Gottuk et al., 2012).

En términos históricos, la literatura reciente muestra que los incendios en Data Centers han adquirido mayor relevancia debido al aumento de densidad de potencia, crecimiento de cargas asociadas a inteligencia artificial y mayor dependencia de servicios digitales. Un estudio reciente sobre riesgo de incendio en Data Centers modernos identifica como causas contribuyentes frecuentes las fallas eléctricas, fallas de baterías, mal funcionamiento de sistemas de enfriamiento y errores humanos (Kareck et al., 2025). Esto es coherente con la experiencia descrita por NFPA 75, donde los escenarios de incendio más comunes dentro de áreas con equipos TI se asocian a fuentes de poder, UPS, equipos HVAC, ventiladores, filtros combustibles y cables de potencia, mientras que los incendios originados directamente en los equipos TI listados son menos frecuentes (National Fire Protection Association [NFPA], 2020).

Desde el punto de vista térmico, las salas blancas operan normalmente dentro de rangos controlados; sin embargo, los pasillos calientes pueden alcanzar condiciones significativamente superiores a la temperatura ambiente de diseño. NFPA 75 indica que en pasillos calientes pueden presentarse temperaturas de 38 °C, que incrementos temporales sobre este valor pueden ocurrir durante la operación normal, y que en condiciones anormales, como fallas del sistema HVAC, se han observado temperaturas de hasta 66 °C en pasillos calientes (NFPA, 2020). Estos valores son relevantes para la selección de detectores, rociadores o boquillas, ya que los dispositivos instalados en zonas de alta temperatura deben estar listados para las condiciones reales del entorno donde operan.

El daño térmico sobre equipos TI y medios de almacenamiento también debe considerarse como parte del riesgo de incendio. NFPA 75 indica que el daño a equipos TI en funcionamiento puede comenzar a una temperatura ambiente sostenida de 79,4 °C, mientras que medios magnéticos como cintas y discos flexibles pueden comenzar a dañarse sobre 37,8 °C, y medios de disco pueden comenzar a dañarse sobre 65,6 °C (NFPA, 2020). Estos valores muestran que el daño crítico en un Data Center puede ocurrir antes de que exista una propagación estructural significativa del incendio, por lo que la detección temprana, la respuesta automática y la continuidad del enfriamiento resultan factores esenciales para evitar pérdidas operacionales mayores.

La detección de incendios en salas blancas se ve dificultada por las altas tasas de ventilación y por la configuración de pasillos fríos y calientes. En un estudio experimental a escala real realizado por FM Global y la Fire Protection Research Foundation, se ensayó un recinto representativo de Data Center con dimensiones interiores de 7,3 m × 4,9 m × 4,9 m, con piso técnico, sala de servidores, pasillo frío confinado y plenum de retorno. En dicho estudio se caracterizaron flujos de aire con tasas de renovación de 78 ACH y 265 ACH, se realizaron más de 200 pruebas de caracterización de flujo, mediciones en más de 100 ubicaciones y se instalaron 27 detectores distribuidos en subpiso, sala de servidores y plenum de cielo (Thumuluru et al., 2014). Estos datos evidencian que el diseño de detección en Data Centers no debe tratarse como una instalación convencional, ya que la alta ventilación puede diluir y transportar el humo antes de que llegue a los detectores.

Respecto a la duración e impacto económico de incidentes, los estudios de interrupciones en Data Centers muestran que los tiempos de recuperación pueden ser relevantes incluso cuando el evento físico es acotado. Como referencia histórica, el estudio de Ponemon Institute y Emerson Network Power reportó para 2013 una duración promedio de incidente de 86 minutos, con un costo promedio aproximado de US\$7.900 por minuto, y para interrupciones totales un tiempo promedio de recuperación de 119 minutos (Ponemon Institute, 2013).

En Chile existen antecedentes públicos que muestran la exposición del país a riesgos asociados a infraestructura digital crítica. Un registro público vinculado a PIT Chile reportó un incendio en un Data Center donde mantenía infraestructura, con una interrupción aproximada de 90 minutos para clientes alojados únicamente en el recinto afectado, mientras que clientes con redundancia en otros Data Centers no presentaron afectación equivalente (Žilić Schmidt, 2024).

Los incendios en salas blancas de Data Centers deben analizarse como eventos de baja frecuencia relativa, pero de alto impacto operacional, económico y reputacional. La evidencia técnica muestra que las fuentes de incendio más relevantes se relacionan con infraestructura eléctrica, UPS, HVAC, cableado de potencia y fallas térmicas, mientras que los efectos del incendio pueden afectar equipos TI incluso a temperaturas inferiores a las requeridas para un incendio estructural desarrollado. Por ello, este apartado refuerza la necesidad de evaluar los sistemas de extinción no solo por su capacidad de apagar el fuego, sino también por su efecto sobre continuidad operativa, detección temprana, recuperación post-incidente, daño térmico, interacción con climatización y compatibilidad con las condiciones reales de una sala blanca de alta densidad.

1.2 Sistemas de extinción de incendio usados en Data Centers

Los Data Centers emplean sistemas de extinción de incendios especializados, diseñados para suprimir el fuego de manera rápida y eficaz sin causar daños a los equipos ni interrumpir innecesariamente la operación. Entre los sistemas más utilizados se encuentran los agentes limpios gaseosos, los gases inertes, los sistemas de agua nebulizada (water mist) y, como respaldo, los sistemas de rociadores automáticos. Los agentes limpios, regulados por la norma NFPA 2001, incluyen compuestos como FK-5-1-12 (Novec 1230) y HFC-227ea (FM-200), los cuales extinguen el incendio principalmente por absorción de calor y no dejan residuos conductivos, siendo adecuados para salas blancas con equipos energizados (NFPA, 2022). Por su parte, los sistemas de gases inertes como IG-541 o IG-55 actúan reduciendo la concentración de oxígeno hasta niveles que impiden la combustión, sin afectar de manera crítica la seguridad de las personas ni los equipos (Loo et al., 2021). Los sistemas de agua nebulizada utilizan microgotas que enfrían la zona de combustión y desplazan el oxígeno, logrando la extinción del incendio con un consumo de agua menor que los rociadores convencionales, lo que reduce el daño colateral, a los servidores que no se encuentran cercanos al incendio (ASHRAE, 2021). Los rociadores automáticos suelen emplearse como sistema de respaldo estructural, principalmente para cumplir requisitos normativos y controlar incendios de mayor magnitud.

La implementación de sistemas de extinción especializados en Data Centers es necesaria debido a la naturaleza crítica de los equipos alojados, la alta densidad energética y los requisitos de continuidad operativa de las instalaciones. A diferencia de edificaciones convencionales, un Data Center concentra grandes cargas eléctricas, sistemas de respaldo energético y cableado de alta densidad, lo que incrementa el riesgo de incendios de origen eléctrico y térmico. La literatura técnica indica que el uso de métodos tradicionales, como la extinción manual o el empleo exclusivo de rociadores de agua, resulta insuficiente y potencialmente dañino, ya que el agua puede provocar fallas irreversibles en servidores y sistemas de almacenamiento, generando pérdidas superiores a las ocasionadas por el propio incendio (Uptime Institute, 2023). En este contexto, la NFPA establece que los Data Centers deben contar con detección temprana y supresión automática, capaces de actuar en las primeras etapas del incendio, minimizando el daño físico y el tiempo de inactividad (NFPA 75, 2023).

La Tabla 1.1 a continuación presenta rangos referenciales de costo de instalación por metro cuadrado para distintos sistemas de extinción de incendios aplicables a Data Centers e infraestructura crítica. Estos valores permiten establecer una base preliminar para comparar la viabilidad económica de cada alternativa, considerando que el costo final de implementación puede variar según la superficie protegida, el volumen del recinto, la complejidad de la red, la cantidad de zonas, los requerimientos de detección y las condiciones particulares del proyecto.

Tabla 1.1: Rangos referenciales de costo de instalación para sistemas de extinción aplicables a Data Centers / infraestructura crítica

Sistema	Precio de instalación (USD/m ²)
Rociadores automáticos (comercial / especializado)	16.2 – 86.1
Agente limpio (FM-200 / Novec) en salas TI	43.1 – 86.1
Agua nebulizada	48.4 – 72.7
Gas inerte	215.3 – 430.6

Fuente: Elaboración propia con base en Firetron (<https://firetron.com/fire-suppression-systems/best-fire-suppression-systems/>); 24ChemicalResearch (<https://www.24chemicalresearch.com/reports/280306/united-states-water-mist-fire-extinguishing-system-market>); Firetron (<https://firetron.com/fire-suppression-systems/fire-suppression-system-cost/>); y Firetron (<https://firetron.com/fire-sprinkler-systems/cost-commercial-fire-sprinkler-installation/>).

Desde un enfoque comparativo, los sistemas de extinción utilizados en Data Centers presentan diferencias significativas no solo en su principio de funcionamiento y efecto sobre los equipos, sino también en sus costos de inversión, operación y recuperación post-incendio, los cuales son determinantes en la selección del sistema. Los sistemas de **agentes limpios**, como FK-5-1-12 (Novec 1230) o HFC-227ea (FM-200), presenta un rango medio alto en comparación a los demás sistemas según tabla 2.1, posee un rango de precio por metro cuadrado similar al agua nebulizada, estos altos costos se ven asociados al agente extintor, cilindros presurizados, redes de tuberías y sistemas de detección y control. No obstante, estos sistemas minimizan los costos indirectos, ya que no dejan residuos, permiten una rápida puesta en servicio y reducen significativamente el daño a los equipos tecnológicos, lo que disminuye los costos de reposición y las pérdidas por tiempo fuera de operación (NFPA, 2022; Uptime Institute, 2023).

En el caso de los **gases inertes**, el costo de instalación por metro cuadrado es el más alto de los cuatro sistemas tabla 2.1, debido al mayor volumen de gas requerido, la necesidad de cilindros de alta presión y exigencias estructurales adicionales en el recinto protegido. El agente extintor no se degrada, no tiene restricciones ambientales significativas y puede reutilizarse tras una descarga, lo que reduce los costos de reposición a largo plazo (Loo et al., 2021). Su impacto nulo sobre los equipos contribuye a disminuir los costos asociados a la recuperación operativa.

Los sistemas de **agua nebulizada** (water mist) se caracterizan por un costo de instalación similar a los rociadores tradicionales y a los agentes limpios, siendo aproximadamente en un 1.3 a 1.5 veces más costosa la inversión inicial esto según (United States Water Mist Fire Extinguishing System Market, 24 Chemical Research) , inferior en muchos casos al de los sistemas gaseosos, especialmente en instalaciones de gran volumen. Su menor consumo de agua reduce los costos asociados a infraestructura hidráulica y daños colaterales en comparación con los rociadores convencionales. Sin embargo, la literatura advierte que, pese a su eficiencia en la supresión, los costos indirectos derivados de la presencia de humedad y la posible afectación de equipos electrónicos deben ser considerados, especialmente en Data Centers de alta criticidad (ASHRAE, 2021).

Los sistemas de **rociadores automáticos tradicionales** presentan el menor costo inicial de instalación y un rango mucho mas amplio de costo por metro cuadrado, y son ampliamente utilizados por razones normativas y de protección estructural. No obstante, diversos estudios coinciden en que estos sistemas generan los mayores costos indirectos en Data Centers, debido a los daños extensivos provocados por el agua sobre servidores, sistemas de almacenamiento y cableado, incluso en eventos de incendio de pequeña magnitud.

Desde una perspectiva teórica de costo total de propiedad, la selección del sistema de extinción en Data Centers no debe basarse únicamente en el costo inicial de instalación, sino en un análisis integral que considere el impacto económico de la interrupción operativa, el daño a los equipos y el tiempo de recuperación del servicio. Bajo este enfoque, los sistemas gaseosos —agentes limpios y gases inertes— suelen justificar su mayor inversión inicial debido a la reducción sustancial de pérdidas económicas y riesgos operacionales en infraestructuras tecnológicas críticas (Uptime Institute, 2023).

La selección y el diseño de sistemas de extinción de incendios en Data Centers se basan en normativas técnicas internacionales, las cuales establecen criterios mínimos de seguridad, confiabilidad y protección de equipos de tecnología de la información. Entre las normas más relevantes se encuentra la NFPA 75, que regula la protección contra incendios de equipos de tecnología de la información y reconoce explícitamente a los Data Centers como instalaciones críticas, exigiendo la implementación de sistemas de detección temprana y supresión automática adecuados al riesgo eléctrico y térmico presente. Esta norma establece que los sistemas de extinción deben minimizar el daño a los equipos y permitir una rápida recuperación operativa.

Complementariamente, la NFPA 2001 regula los sistemas de extinción mediante agentes limpios, definiendo los requisitos de diseño, concentración, seguridad para ocupantes y desempeño de agentes como FK-5-1-12 (Novec 1230) y HFC-227ea (FM-200). Esta norma es ampliamente utilizada como referencia técnica en Data Centers debido a que prioriza la supresión rápida del incendio sin dejar residuos y sin afectar la integridad de los equipos electrónicos. Desde el punto de vista normativo, la NFPA 2001 proporciona el marco técnico que justifica el uso de agentes gaseosos como solución principal en salas blancas de alta criticidad (NFPA, 2022).

Las condiciones ambientales dentro de la sala blanca de un Data Center están reguladas principalmente por las guías técnicas de ASHRAE, las cuales establecen rangos recomendados y permisibles de temperatura, humedad relativa y punto de rocío, con el objetivo de garantizar la confiabilidad de los equipos electrónicos y la continuidad operativa. De acuerdo con la ASHRAE Thermal Guidelines for Data Processing Environments (5^a edición), la temperatura de entrada de aire a los equipos TI debe mantenerse, en condiciones recomendadas, entre 18 °C y 27 °C, mientras que el rango permisible se extiende desde 15 °C hasta 32 °C, dependiendo de la clase del Data Center (ASHRAE, 2021). Operar dentro del rango recomendado reduce el riesgo de fallas electrónicas, envejecimiento prematuro de componentes y eventos de sobrecalentamiento.

En relación con la humedad, ASHRAE establece que la humedad relativa recomendada en salas blancas debe mantenerse entre 20% y 60%, con un punto de rocío máximo de 15 °C. Como límite permisible, la normativa acepta humedades relativas entre 8% y 80%, siempre que el punto de rocío no supere los 17 °C (ASHRAE, 2021). Estos rangos buscan minimizar riesgos asociados tanto a la descarga electrostática (ESD) en ambientes excesivamente secos como a la condensación y corrosión en ambientes con alta humedad, ambos considerados factores críticos de riesgo para equipos de tecnología de la información.

Desde el punto de vista de la protección contra incendios, la NFPA 75 no define valores específicos de temperatura o humedad, pero exige que las condiciones ambientales de la sala blanca no comprometan el desempeño de los sistemas de detección y extinción. La norma establece que los sistemas de supresión deben ser diseñados considerando las condiciones normales de operación del recinto, incluyendo la circulación de aire, la densidad térmica y la disposición de los equipos, de modo que el agente extintor alcance concentraciones efectivas en todo el volumen protegido (NFPA, 2023). Esto implica que los rangos térmicos y de humedad definidos por ASHRAE deben ser compatibles con los sistemas de extinción seleccionados, especialmente en el caso de agentes gaseosos.

En el caso de los sistemas de extinción por agentes limpios, la NFPA 2001 establece que las concentraciones de diseño deben mantenerse durante un tiempo mínimo, típicamente 10 minutos, para asegurar la extinción completa del incendio. Para cumplir este requisito, la norma exige que las condiciones ambientales y la hermeticidad del recinto permitan la retención del agente, lo que puede verse afectado por diferencias térmicas significativas o corrientes de aire excesivas dentro de la sala blanca (NFPA, 2022). Por tanto, el control preciso de temperatura y humedad no solo responde a criterios de operación de los equipos, sino también a exigencias normativas de desempeño de los sistemas de extinción.

El desarrollo del marco teórico ha permitido establecer una base conceptual y normativa sólida para el análisis de los sistemas de extinción de incendios en Data Centers, abordando tanto la naturaleza crítica de estas infraestructuras como las condiciones técnicas que determinan su operación segura y continua. A partir de la revisión de literatura especializada y normativa internacional, se ha evidenciado que los Data Centers concentran equipos de alto valor económico y estratégico, cuya protección no puede abordarse mediante soluciones convencionales, sino que requiere sistemas de extinción específicamente diseñados para entornos de alta densidad energética y exigencias de disponibilidad permanente (Uptime Institute, 2023).

Asimismo, el análisis de las salas blancas como núcleo operativo del Data Center ha puesto de manifiesto la relevancia del control ambiental, la disposición de racks y la gestión térmica, aspectos regulados principalmente por las guías de ASHRAE, cuyos rangos normativos de temperatura y humedad condicionan directamente tanto la confiabilidad de los equipos como la efectividad de los sistemas de supresión de incendios (ASHRAE, 2021). En este contexto, la interacción entre diseño térmico y protección contra incendios emerge como un factor crítico que debe ser considerado de manera integrada.

La revisión comparativa de los principales sistemas de extinción utilizados en Data Centers: agentes limpios, gases inertes, agua nebulizada y rociadores automáticos, ha permitido identificar diferencias teóricas relevantes en términos de principio de extinción, impacto sobre los equipos, continuidad operativa y costos asociados.

Finalmente, el marco normativo analizado, basado principalmente en NFPA 75, NFPA 2001 y las guías ASHRAE, establece criterios de desempeño más que soluciones, lo que habilita la evaluación comparativa de distintas alternativas tecnológicas en función de su adecuación al riesgo, compatibilidad con las condiciones ambientales y capacidad de preservar la continuidad operativa. Este enfoque normativo refuerza la necesidad de un análisis técnico-económico que permita seleccionar el sistema de extinción más adecuado para Data Centers en el contexto chileno, sirviendo como fundamento para el desarrollo del marco metodológico y el análisis aplicado que se presentan en los capítulos siguientes.

Capítulo 2

Marco Metodológico

2.1 Tipo y enfoque de la investigación

La presente investigación corresponde a un estudio de tipo aplicado, dado que se orienta a la solución de un problema técnico concreto asociado al diseño y selección de sistemas de extinción de incendios para Data Centers, utilizando conocimientos propios de la ingeniería civil mecánica. El propósito del estudio es aplicar principios técnicos, normativos, ingenieriles y económicos existentes para mejorar el diseño de un sistema de protección contra incendios en un contexto específico.

El enfoque de la investigación es cuantitativo, ya que se basa en el análisis objetivo de parámetros técnicos, normativos y económicos, tales como condiciones ambientales de operación, principios de extinción, compatibilidad con equipos tecnológicos y costos asociados a cada sistema. Asimismo, el estudio presenta un alcance descriptivo-comparativo, puesto que describe las características de los distintos sistemas de extinción utilizados en Data Centers y los compara en función de criterios que se describirán posteriormente.

El diseño de la investigación es no experimental, debido a que no se manipulan deliberadamente las variables de estudio ni se realizan pruebas en terreno o ensayos de laboratorio. El análisis se desarrolla a partir de información técnica y normativa existente, lo que permite evaluar los sistemas de extinción bajo condiciones teóricas y de diseño ampliamente aceptadas en la industria, el desarrollo de la propuesta técnica incluye dimensionamiento y verificación de la red mediante cálculos de diseño hidráulico basados en normativa y documentación técnica disponible.

Asimismo, la investigación presenta un diseño transversal, ya que el análisis se efectúa en un único momento del tiempo, considerando el estado actual de las normativas, tecnologías y criterios de diseño aplicables a Data Centers. El estudio adopta un enfoque analítico-comparativo, mediante el cual se examinan diferentes alternativas de sistemas de extinción de incendios, identificando similitudes, diferencias, ventajas y limitaciones técnicas y económicas, con el objetivo de fundamentar la selección de la solución más adecuada para este tipo de infraestructura crítica.

La unidad de análisis de la presente investigación corresponde a los sistemas de extinción de incendios aplicables a Data Centers, con énfasis en su implementación en salas blancas de alta densidad, los cuales se consideran como infraestructura crítica.

La unidad de análisis incluye, además, las condiciones de operación de la sala blanca, tales como la densidad de equipos, la disposición de racks y los requerimientos ambientales y normativos, en la medida en que estos factores influyen directamente en el diseño y desempeño de los sistemas de extinción. De este modo, el análisis no se limita al sistema de supresión en sí mismo, sino que considera su interacción con el entorno físico y operativo del Data Center.

Escenario de aplicación: Data Center de alta densidad

Para el desarrollo de la presente investigación se define como escenario de aplicación un Data Center de alta densidad, considerando las tendencias actuales de diseño y operación de infraestructuras tecnológicas. En este contexto, se asume que cada rack presenta una densidad de consumo eléctrico mínima de 10 kW, valor representativo de Data Centers modernos que alojan servidores de alto rendimiento y equipamiento de procesamiento intensivo.

Bajo esta condición, el análisis se enfoca en una sala blanca con una capacidad mínima de 200 racks, lo que representa una infraestructura de gran escala, con elevadas cargas térmicas y eléctricas concentradas en un espacio reducido. En función de esta capacidad, se considera una superficie mínima de sala blanca del orden de 300 m² o superior, permitiendo una disposición adecuada de racks, pasillos técnicos, sistemas de climatización y redes de protección contra incendios.

En la tabla 2.1 se muestran distintos ejemplos en Chile con dimensiones cercanas o superiores a las mencionadas en el parrafos anteriores, junto con una alta densidad de carga en los equipos TI.

Tabla 2.1: Referencias de salas blancas y densidad de potencia en Data Centers

Fuente	Referencia textual	Densidad / capacidad reportada
Creattiva Datacenter, Chile	“600 m ² de sala blanca, dividida en dos salas de 300 m ² aproximadamente cada una.”	600 m ² de sala blanca; dos salas de 300 m ² aprox.
GTD Lídice I, Chile	“668 m ² of white space within a total area of 2184 m ² .”	668 m ² de sala blanca.
GTD Lídice II, Chile	“600 m ² of white space within a total area of 2,390 m ² .”	600 m ² de sala blanca.
Claro Data Center Liray, Chile	“tres salas blancas de 1.000 m ² cada una en el Data Center Liray.”	Tres salas blancas de 1.000 m ² cada una.
Cirion SAN2, Santiago	“más de 2.800 m ² de espacio de colocación con piso elevado” y “hasta 9,8 kW por rack”.	2.844 m ² de colocación; 1.200 racks; hasta 9,8 kW/rack.
Díaz et al. (2017)	“room with capacity for 42 racks, which can dissipate 2, 5, 10 and 15 kW per rack”.	42 racks; escenarios de 2, 5, 10 y 15 kW/rack.
Telescent (2022)	“around 5,000 square feet of space” y “10 kW / rack”.	5.000 ft ² aprox. (465 m ²); 100 a 200 racks; 10 kW/rack.
APC / Schneider Electric	“well in excess of 10 kW per rack”.	Referencia técnica para cargas de alta densidad superiores a 10 kW/rack.

Fuente: Elaboración propia con base en Creattiva Datacenter (s. f.), DataCenterMap (s. f.-a, s. f.-b), Claro Chile Empresas (2024), Cirion Technologies (2025), Díaz et al. (2017), Telescent (2022) y APC/Schneider Electric (2006).

La definición de este escenario de alta densidad condiciona directamente los criterios de análisis utilizados en la investigación, particularmente en lo relativo a la eficacia de los sistemas de extinción, su capacidad de respuesta ante incendios en etapas tempranas, su compatibilidad con altas cargas térmicas y su impacto sobre la continuidad operativa. Asimismo, este enfoque permite evaluar el desempeño de los sistemas de extinción considerados en condiciones exigentes, representativas de Data Centers de misión crítica.

La recolección de información de la presente investigación se realizó mediante técnicas de carácter documental y técnico, considerando que el estudio posee un diseño no experimental y se basa en el análisis de información existente y validada en el ámbito de los Data Centers. Estas técnicas permiten obtener antecedentes confiables y verificables para el análisis comparativo y el desarrollo de la propuesta de diseño del sistema de extinción.

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión documental normativa, orientada a identificar los requisitos técnicos y de desempeño aplicables a los sistemas de extinción de incendios en Data Centers. Esta revisión incluyó normas internacionales, guías técnicas y documentos de referencia utilizados habitualmente en el diseño de infraestructuras críticas, los cuales establecen criterios de seguridad, condiciones de operación y compatibilidad con equipos de tecnología de la información.

En segundo lugar, se realizó una revisión de literatura técnica especializada, compuesta por libros, artículos científicos, informes técnicos, con el objetivo de identificar principios de funcionamiento, ventajas, limitaciones y aplicaciones de los distintos sistemas de extinción utilizados en Data Centers.

Adicionalmente, se utilizaron fichas técnicas y documentación de fabricantes, para obtener datos relevantes sobre requerimientos de instalación, rangos de operación, componentes del sistema y consideraciones de diseño. Esta información fue empleada exclusivamente con fines comparativos y de apoyo al desarrollo de la propuesta técnica, sin realizar ensayos experimentales ni pruebas en terreno.

Finalmente, la información recopilada fue organizada y sistematizada en función de los criterios definidos en el marco metodológico, asegurando coherencia entre los objetivos de la investigación, el análisis comparativo y los resultados obtenidos.

2.2 Criterios de análisis y ponderación

Para la evaluación comparativa de los sistemas de extinción de incendios aplicables a Data Centers de alta densidad, se definieron criterios en función del escenario de aplicación establecido y de los objetivos de la investigación. Estos criterios permiten evaluar de manera estructurada el desempeño de cada alternativa, priorizando aquellos aspectos que resultan críticos en salas blancas con alta concentración de equipos y elevadas cargas térmicas.

Los criterios técnicos consideran, en primer lugar, la eficacia de extinción, entendida como la capacidad del sistema para suprimir incendios en etapas tempranas bajo condiciones de alta densidad de potencia por rack. En segundo lugar, se evalúa la compatibilidad con equipos de tecnología de la información (TI), considerando el potencial de daño directo o colateral que puede generar el agente extintor sobre servidores, sistemas de almacenamiento y cableado. Asimismo, se incorpora el criterio de continuidad operativa, asociado al tiempo requerido para la recuperación del servicio una vez activado el sistema, aspecto crítico en infraestructuras de misión crítica.

Adicionalmente, se consideran criterios relacionados con la adaptabilidad al entorno de alta densidad, tales como la capacidad del sistema para operar eficientemente en salas blancas con elevada carga térmica, circulación forzada de aire y disposición intensiva de racks. Este criterio resulta determinante para evaluar la idoneidad de los sistemas de extinción en Data Centers con potencias por rack iguales o superiores a 10 kW y con superficies superiores a 300 m².

En cuanto a los criterios económicos, se consideran el costo de instalación (CAPEX), asociado a la implementación del sistema de extinción, incluyendo equipos, redes y obras asociadas, y el costo de operación y mantenimiento (OPEX), vinculado a inspecciones, recargas y manutenções periódicas. Asimismo, se incorpora el costo de recuperación post-incidente, que contempla la reposición de equipos dañados, la limpieza del recinto y las pérdidas derivadas del tiempo fuera de operación. Este último criterio adquiere especial relevancia en Data Centers de alta densidad, donde el impacto económico de una interrupción puede ser significativo.

El procedimiento metodológico de la presente investigación se desarrolló de manera secuencial y sistemática, siguiendo una lógica coherente con los objetivos planteados y con el diseño no experimental del estudio. En una primera etapa, se realizó la delimitación del problema de investigación, estableciendo el contexto de aplicación en Data Centers de alta densidad, definidos por una potencia mínima de 10 kW por rack, una capacidad mínima de 200 racks y una superficie de sala blanca igual o superior a 300 m².

Posteriormente, se llevó a cabo la revisión del marco teórico y normativo, orientada a identificar los conceptos técnicos, criterios de diseño y exigencias normativas relevantes para la protección contra incendios en salas blancas que albergan equipos TI. Esta etapa permitió establecer las bases conceptuales necesarias para comprender el funcionamiento, ventajas y limitaciones de los distintos sistemas de extinción utilizados en Data Centers.

En una tercera etapa, se procedió a la definición del escenario de análisis, considerando las condiciones operativas propias de un Data Center de alta densidad, tales como elevada carga térmica, alta concentración de equipos TI y requerimientos estrictos de continuidad operativa. Este escenario sirvió como referencia común para el análisis comparativo de los sistemas de extinción y para el desarrollo de la propuesta técnica.

A continuación, se establecieron los criterios de análisis y ponderación, integrando aspectos técnicos y económicos relevantes para la evaluación de los sistemas de extinción. Estos criterios fueron definidos de manera coherente con los objetivos de la investigación y priorizados en función de su impacto en la protección de los equipos TI y en la continuidad del servicio.

En la siguiente etapa, se realizó el análisis comparativo de los sistemas de extinción, utilizando los criterios previamente definidos y considerando a los sistemas alternativos como referencias técnicas.

Finalmente, con base en los resultados del análisis comparativo, se desarrolló la propuesta técnica del sistema de extinción, ajustada al escenario de alta densidad definido y a los requerimientos normativos y operativos del Data Center. Este procedimiento permitió estructurar la investigación de forma ordenada y replicable, asegurando coherencia entre los objetivos planteados, la metodología empleada y los resultados obtenidos.

La presente investigación presenta una serie de limitaciones metodológicas, derivadas principalmente de su enfoque aplicado y de su diseño no experimental. En primer lugar, el estudio se basa en el análisis de información documental, normativa y técnica disponible, por lo que no contempla la realización de ensayos experimentales, pruebas en terreno ni validaciones a escala real de los sistemas de extinción evaluados. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden a un análisis teórico-comparativo y no a mediciones directas de desempeño en condiciones reales de operación.

Asimismo, el análisis se desarrolla bajo un escenario de aplicación definido, correspondiente a un Data Center de alta densidad, caracterizado por una potencia mínima de 10 kW por rack, una capacidad mínima de 200 racks y una superficie de sala blanca igual o superior a 300 m². Si bien este escenario es representativo de infraestructuras tecnológicas modernas y de misión crítica, los resultados del estudio no son directamente extrapolables a Data Centers de menor escala o con condiciones operativas significativamente distintas.

Otra limitación relevante del estudio es que la evaluación económica de los sistemas de extinción se realiza a partir de criterios generales de costos de instalación, operación y recuperación post-incidente, sin considerar cotizaciones específicas ni análisis financieros detallados asociados a un proyecto real. Por tanto, los resultados económicos obtenidos deben interpretarse como una referencia comparativa, más que como un presupuesto definitivo.

Escenarios de ponderación considerados

Debido a que el diseño de un Data Center puede responder a distintas prioridades de proyecto, la evaluación multicriterio se desarrolla considerando dos escenarios de ponderación. El primer escenario corresponde a un enfoque orientado principalmente a la continuidad operacional, en el cual adquieren mayor importancia los criterios relacionados con disponibilidad del servicio, compatibilidad con equipos TI, recuperación posterior a una activación y eficacia del sistema. Este enfoque representa proyectos en los que la reducción del tiempo fuera de servicio constituye la principal condición de decisión.

El segundo escenario corresponde a un enfoque de viabilidad económica y de implementación, en el cual se incrementa la relevancia relativa de criterios asociados al costo de instalación, operación, escalabilidad y adaptación del sistema a salas blancas de gran superficie, manteniendo simultáneamente criterios técnicos y de continuidad operacional. Este escenario representa proyectos en los cuales la selección del sistema debe equilibrar la protección de infraestructura crítica con las restricciones económicas y constructivas propias del desarrollo del Data Center.

La utilización de ambos escenarios no tiene por objetivo modificar los resultados obtenidos por una determinada alternativa, sino evaluar la sensibilidad de la selección frente a distintas prioridades de proyecto. Por consiguiente, las mismas tecnologías y la misma escala de puntuación son evaluadas en ambos casos, modificándose únicamente la importancia relativa asignada a los criterios.

Finalmente, la investigación no aborda aspectos relacionados con la implementación constructiva, la operación a largo plazo ni la gestión de mantenimiento de los sistemas de extinción evaluados, centrándose exclusivamente en su análisis comparativo desde una perspectiva técnica y metodológica. Estas limitaciones no afectan la validez del estudio, pero delimitan su alcance y establecen el marco dentro del cual deben interpretarse los resultados y conclusiones.

Capítulo 3

Análisis de sistemas de extinción de incendio

El presente capítulo tiene por objetivo desarrollar el análisis comparativo de los sistemas de extinción de incendios aplicables a Data Centers de alta densidad, conforme a los criterios y ponderaciones definidos en el Marco Metodológico. A diferencia de los capítulos anteriores, en los cuales se establecieron las bases teóricas y metodológicas del estudio, en este apartado se aplican dichos criterios para evaluar de manera estructurada las distintas alternativas tecnológicas disponibles.

El análisis se realiza considerando un escenario de Data Center de alta densidad, caracterizado por una potencia mínima de 10 kW por rack, una capacidad mínima de 200 racks y una superficie de sala blanca igual o superior a 300 m². Bajo estas condiciones, se evalúa el desempeño relativo de los sistemas de extinción seleccionados para el estudio, atendiendo a criterios técnicos y económicos relevantes para la protección de equipos TI y la continuidad operativa.

Cabe destacar que el análisis desarrollado en este capítulo no presupone la selección previa de ningún sistema de extinción, sino que tiene como finalidad identificar, a partir de una evaluación objetiva y ponderada, la alternativa que presenta el mejor desempeño global bajo el escenario definido. Los resultados obtenidos constituyen la base para la posterior selección del sistema más adecuado y para el desarrollo de la propuesta técnica correspondiente.

De acuerdo con lo establecido en la unidad de análisis, el estudio considera como alternativas de evaluación los principales sistemas de extinción utilizados en Data Centers, los cuales representan soluciones ampliamente reconocidas en la industria. Estos sistemas son analizados bajo los mismos criterios y condiciones de operación, con el fin de asegurar la consistencia y comparabilidad de los resultados.

Los sistemas de extinción evaluados en el presente capítulo corresponden a los mencionados en la Sección 1.2.

3.1 Criterios de evaluación aplicados

Para el desarrollo del análisis comparativo, se aplican los criterios técnicos y económicos definidos en el apartado 3.5, los cuales se mantienen constantes para todas las alternativas evaluadas. Estos criterios permiten cuantificar y comparar el desempeño relativo de cada sistema bajo el escenario de Data Center de alta densidad. Los criterios considerados en el análisis incluyen:

- Eficacia de extinción en entornos de alta densidad de potencia.
- Compatibilidad con equipos TI.
- Impacto en la continuidad operativa.
- Adaptabilidad al entorno de sala blanca de gran escala.
- Costo de instalación (CAPEX).
- Costos asociados a operación, mantenimiento y recuperación post-incidente.

La ponderación de estos criterios se aplica de manera uniforme a todas las alternativas, garantizando que los resultados obtenidos reflejen el desempeño global de cada sistema y no la influencia de un criterio aislado.

El análisis comparativo se desarrolla mediante la construcción de matrices de evaluación, en las cuales cada sistema de extinción es calificado en función de los criterios establecidos. A cada criterio se le asigna una ponderación relativa, previamente definida, y a cada sistema se le asigna un puntaje en función de su desempeño frente a dicho criterio.

El puntaje final de cada sistema se obtiene a partir de la suma ponderada de los resultados parciales, permitiendo establecer una comparación objetiva entre las alternativas evaluadas. Este procedimiento asegura la trazabilidad del análisis, ya que cada resultado puede vincularse directamente con un criterio específico y con la información técnica utilizada para su evaluación.

3.2 Definición de criterios para la matriz de puntuación

Con el fin de realizar un análisis comparativo objetivo entre los sistemas de extinción de incendios evaluados, se establece una matriz de puntuación multicriterio, la cual permite cuantificar el desempeño relativo de cada alternativa bajo el escenario de un Data Center de alta densidad. Los criterios seleccionados se derivan directamente del Marco Metodológico y de las condiciones operativas propias de salas blancas que albergan equipos TI de misión crítica.

C1. Costo de instalación (CAPEX)

Evalúa el costo asociado a la implementación inicial del sistema de extinción, considerando equipos principales, redes de distribución, obras asociadas y sistemas de detección y control. Este criterio resulta relevante debido a la escala del Data Center analizado y a las restricciones presupuestarias habituales en proyectos de infraestructura tecnológica.

C2. Costos de operación y mantenimiento (OPEX)

Considera los costos debido a mantención preventiva, pruebas y posibles recargas

C3. Costos de recuperación post-incident

Costos posteriores a activación (habilitación y reposición)

C4. Continuidad operativa

Evalúa la capacidad del sistema de extinción para permitir una rápida recuperación del servicio tras un evento de incendio, minimizando el tiempo de indisponibilidad del Data Center. Este criterio es crítico en infraestructuras de alta densidad, donde las interrupciones generan impactos operativos y económicos significativos.

C5. Compatibilidad con equipos TI

Mide el grado en que el sistema de extinción afecta directa o indirectamente a los equipos TI, considerando riesgos de daño eléctrico, corrosión, residuos o humedad. Un mayor puntaje indica menor impacto sobre servidores, sistemas de almacenamiento y redes.

C6. Impacto sobre los sistemas de climatización

Evalúa el daño potencial o la afectación funcional que el sistema de extinción puede generar sobre los equipos de climatización (CRAC, CRAH, ductos, unidades de expansión directa), considerando corrosión, contaminación o necesidad de reemplazo de componentes.

C7. Recuperación y limpieza post-activación

Esfuerzo/tiempo de limpieza, secado y re-validación.

C8. Eficacia de extinción en Data Centers de alta densidad

Evalúa la capacidad del sistema para controlar y extinguir incendios en salas blancas con altas cargas térmicas, elevada densidad de racks y circulación forzada de aire.

C9. Escalabilidad y adaptabilidad a grandes salas blancas

Mide la facilidad con la que el sistema puede ampliarse o adaptarse a salas blancas de gran superficie (300 m²) y alta cantidad de racks (200), sin comprometer su desempeño.

C10. Compatibilidad normativa

Evalúa el grado de alineación del sistema con los requisitos normativos aplicables a la protección de equipos TI y Data Centers, facilitando su aprobación en etapas de diseño y operación.

Tabla 3.1: Criterios de evaluación multicriterio para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad

Cod.	Criterio	Descripción (resumen)
C1	Costo de instalación (CAPEX)	Inversión inicial por implementación del sistema.
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	Costos periódicos de mantención, pruebas y recargas.
C3	Costos de recuperación post-incidente	Costos posteriores a activación (habilitación y reposición).
C4	Continuidad operativa	Rapidez de retorno a operación tras un evento.
C5	Compatibilidad con equipos TI	Riesgo de daño/afectación a equipos TI por el agente.
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	Riesgo de daño/afectación a equipos HVAC asociados.
C7	Recuperación y limpieza post-activación	Esfuerzo/tiempo de limpieza, secado y revalidación.
C8	Eficacia en alta densidad	Desempeño en salas ≥ 10 kW/rack y alta carga térmica.
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	Facilidad de ampliación en ≥ 200 racks y ≥ 300 m ² .
C10	Compatibilidad normativa	Facilidad de cumplimiento y aprobación normativa.

Sistemas de rociadores automáticos

Los sistemas de rociadores automáticos presentan una ventaja inicial asociada a su amplia aceptación normativa, disponibilidad comercial y menor complejidad relativa frente a sistemas gaseosos especializados. En recintos con equipos TI, la NFPA 75 establece que las salas y áreas de equipos TI ubicadas en edificios protegidos con rociadores deben contar con sistema automático de rociadores, y que estos deben instalarse conforme a NFPA 13 (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, secs. 9.1.1–9.1.2). Sin embargo, en una sala blanca de alta densidad, su principal desventaja se relaciona con el daño colateral generado por la descarga de agua sobre servidores, cableado, pisos técnicos y sistemas de climatización. En este sentido, el material explicativo de NFPA 75 indica que, para minimizar el daño sobre equipos electrónicos ubicados en áreas protegidas por rociadores, resulta importante que la energía se encuentre desconectada antes de la aplicación de agua sobre el fuego (NFPA, 2017, anexo A.9.1.2). Por ello, aunque los rociadores pueden ser eficaces para controlar incendios desarrollados y proteger la estructura del recinto, su desempeño disminuye al evaluarlos bajo criterios de continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI, facilidad de recuperación post-activación e impacto sobre sistemas HVAC.

El sistema de rociadores automáticos constituye una alternativa normativamente reconocida y económicamente competitiva; no obstante, en Data Centers de alta densidad presenta limitaciones relevantes debido al posible daño por agua y al mayor tiempo de recuperación posterior a una activación. Por esta razón, su evaluación dentro de la matriz multicriterio debe diferenciar entre su eficacia para controlar incendios y su impacto operativo sobre la sala blanca.

Sistema de agentes limpios

Los sistemas de agentes limpios corresponden a una alternativa de extinción gaseosa orientada a recintos donde existe una necesidad crítica de proteger datos en proceso, reducir daño a equipos y facilitar el retorno al servicio. En este sentido, NFPA 75 indica que, cuando existe una necesidad crítica de proteger datos, reducir el daño a equipos y facilitar la recuperación operacional, debe considerarse el uso de sistemas gaseosos dentro de unidades o como sistemas de inundación total en áreas con equipos TI (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, sec. 9.4.1). Asimismo, la norma establece que, cuando se emplean sistemas de agentes gaseosos o gases inertes de inundación total, estos deben diseñarse, instalarse y mantenerse conforme a NFPA 12, NFPA 12A o NFPA 2001, y que el agente seleccionado no debe causar daño a los equipos TI ni a los medios almacenados (NFPA, 2017, sec. 9.4.2). Desde la matriz de evaluación, estos sistemas presentan un desempeño favorable en continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI y recuperación post-activación, debido a que no descargan grandes volúmenes de agua sobre el recinto protegido. Sin embargo, su evaluación económica debe considerar el costo de instalación, la recarga posterior a una descarga, la necesidad de hermeticidad del recinto y la interacción con los sistemas HVAC, ya que NFPA 75 advierte que los sistemas gaseosos requieren mantener condiciones ambientales de diseño, como cierre de compuertas, detención de ventiladores y sellado de aberturas, para alcanzar la concentración requerida de extinción (NFPA, 2017, anexo D.2). Además, estudios sobre reemplazos de halón señalan que los productos de descomposición térmica generados durante la supresión pueden ser tóxicos y corrosivos, por lo que la detección temprana y la descarga oportuna son factores relevantes para reducir riesgos sobre personas y equipos (Liu Kim, 1999).

Los agentes limpios presentan ventajas importantes en protección de equipos TI, continuidad operativa y recuperación posterior al evento, por lo que constituyen una alternativa técnicamente sólida para salas blancas de alta criticidad. No obstante, su evaluación dentro de la matriz multicriterio debe penalizar los costos de instalación, recarga, hermeticidad del recinto y dependencia de condiciones ambientales controladas para asegurar el desempeño esperado.

Sistema de gases inertes

Los sistemas de gases inertes corresponden a soluciones de extinción por inundación total que actúan reduciendo la concentración de oxígeno dentro del recinto protegido, sin incorporar agua ni dejar residuos sobre los equipos TI. En salas blancas de Data Centers, esta característica permite evaluarlos favorablemente en criterios como compatibilidad con equipos TI, continuidad operativa y recuperación post-activación, ya que reducen la necesidad de limpieza, secado o retiro de residuos luego de una descarga. La NFPA 75 establece que, cuando se utilicen sistemas gaseosos o de gases inertes de inundación total, estos deben ser diseñados, instalados y mantenidos conforme a NFPA 12, NFPA 12A o NFPA 2001, y que el agente seleccionado no debe causar daño a los equipos TI ni a los medios almacenados (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, sec. 9.4.2). No obstante, su principal desventaja se relaciona con el costo y la infraestructura requerida, debido a que los gases inertes deben almacenarse como gases a alta presión, lo que exige cilindros, tuberías y espacios de almacenamiento mayores que otros agentes gaseosos; esta condición incrementa la superficie ocupada, la complejidad de instalación y el costo total del sistema, especialmente en recintos de gran volumen como salas blancas de alta densidad (Loo et al., 2025).

Los sistemas de gases inertes presentan ventajas relevantes en continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI y facilidad de recuperación posterior al evento, debido a que no generan residuos ni humedad en el recinto protegido. Sin embargo, su evaluación dentro de la matriz multicriterio debe considerar negativamente el mayor costo de instalación, el espacio requerido para almacenamiento de cilindros y la complejidad asociada a su implementación en salas blancas de gran superficie.

Sistema de agua nebulizada

El sistema de agua nebulizada corresponde a una alternativa de extinción basada en la descarga de microgotas de agua, cuyo desempeño se asocia principalmente al enfriamiento del foco de incendio, la atenuación de la radiación térmica y el desplazamiento parcial de oxígeno por evaporación (Liu Kim, 2000; Farrell, 2023). En el contexto de salas blancas de Data Centers de alta densidad, este sistema presenta una posición intermedia dentro de la matriz multicriterio: frente a los rociadores tradicionales, puede reducir el volumen de agua descargado y, por tanto, disminuir el daño colateral y el tiempo de recuperación post-activación; sin embargo, a diferencia de los sistemas gaseosos, mantiene presencia de humedad en el recinto, por lo que debe evaluarse cuidadosamente su compatibilidad con equipos TI, sistemas de climatización y procedimientos de limpieza posterior. Desde el punto de vista normativo, NFPA 75 establece que, cuando se utilicen sistemas de agua nebulizada, estos deben instalarse de acuerdo con NFPA 750, además de diseñarse para los riesgos específicos y objetivos de protección indicados en su certificación o listado (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, secs. 9.8.1–9.8.3).

El sistema de agua nebulizada presenta ventajas relevantes frente a los rociadores automáticos en términos de menor descarga de agua, menor daño colateral esperado y recuperación potencialmente más rápida. No obstante, su evaluación dentro de la matriz multicriterio debe considerar la presencia de humedad, la interacción con sistemas HVAC, la necesidad de diseño específico según el riesgo protegido y el cumplimiento normativo asociado a NFPA 750.

A partir del análisis cualitativo desarrollado, se observa que ningún sistema de extinción presenta superioridad absoluta frente a todos los criterios de evaluación, ya que cada alternativa responde de manera distinta a las exigencias de una sala blanca de Data Center de alta densidad. Los rociadores automáticos destacan por su disponibilidad, aceptación normativa y menor costo relativo, pero presentan desventajas relevantes en daño colateral y recuperación post-activación. Los agentes limpios y gases inertes muestran mejor compatibilidad con equipos TI y continuidad operativa, aunque su implementación implica mayores costos, exigencias de hermeticidad y complejidad técnica. Por su parte, el agua nebulizada se ubica como una alternativa intermedia, al reducir el volumen de agua descargado respecto de rociadores tradicionales, pero manteniendo la necesidad de evaluar humedad residual, interacción con sistemas HVAC y requisitos específicos de diseño. Este enfoque comparativo es coherente con NFPA 75, que establece que la estrategia de protección contra incendios para áreas con equipos TI debe considerar factores como continuidad de servicio, valor de los equipos, pérdidas económicas, características de supresión y detección, tiempo de respuesta e impacto regulatorio (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, secs. 4.1.1, 4.2.3).

La síntesis comparativa permite establecer que la selección del sistema más adecuado debe realizarse mediante una matriz multicriterio, ya que la decisión no depende únicamente de la eficacia de extinción, sino también del equilibrio entre costo, continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI, impacto sobre climatización, facilidad de recuperación y cumplimiento normativo.

3.3 Escala de puntuación

Para aplicar la matriz multicriterio, se define una escala de puntuación de 1 a 5, donde cada valor representa el nivel de desempeño de un sistema de extinción frente a un criterio específico. Esta escala permite transformar la evaluación cualitativa de cada alternativa en un valor numérico comparable, manteniendo coherencia entre los criterios técnicos, económicos y operacionales definidos previamente.

La escala se aplica de manera uniforme a todos los sistemas evaluados: rociadores automáticos, agentes limpios, gases inertes y agua nebulizada. De esta forma, cada alternativa será calificada bajo los mismos parámetros, evitando que la evaluación favorezca previamente a un sistema determinado.

Tabla 3.2: Escala de puntuación para la evaluación multicriterio

Puntaje	Nivel de desempeño	Interpretación
1	Muy desfavorable	Presenta bajo desempeño frente al criterio evaluado.
2	Desfavorable	Presenta limitaciones relevantes, aunque puede ser aplicable.
3	Intermedio	Presenta un desempeño aceptable, con ventajas y desventajas equilibradas.
4	Favorable	Presenta buen desempeño y limitaciones menores.
5	Muy favorable	Presenta desempeño óptimo o altamente conveniente frente al criterio evaluado.

Para los criterios económicos, como costo de instalación, OPEX y costos de recuperación post-incidente, un mayor puntaje representa una condición económica más favorable. Por ejemplo, un sistema con menor costo relativo obtendrá mayor puntuación, mientras que una alternativa con costos elevados o complejidad económica importante obtendrá una puntuación menor.

Para los criterios técnicos y operacionales, como continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI, eficacia en alta densidad y compatibilidad normativa, un mayor puntaje representa mejor desempeño técnico. Esto significa que los sistemas con menor daño colateral, mayor rapidez de recuperación, mejor adaptación al entorno de sala blanca y mayor facilidad de cumplimiento normativo serán evaluados con puntuaciones superiores.

Esta escala no tiene por objetivo entregar una medición absoluta del desempeño de cada sistema, sino establecer una herramienta comparativa que permita ordenar las alternativas bajo un mismo marco de análisis. Por lo tanto, los puntajes deberán asignarse de forma argumentada, considerando el análisis técnico desarrollado en las secciones anteriores y la información disponible en normas, literatura técnica, papers científicos y referencias de costos.

La escala de puntuación definida permite transformar los criterios de evaluación en valores comparables, facilitando la construcción de una matriz multicriterio ordenada y trazable. Con esta escala, la selección del sistema de extinción no se establece de manera previa, sino que surge del puntaje obtenido por cada alternativa al aplicar los criterios técnicos, económicos y operacionales definidos en la investigación.

3.4 Escenario de ponderación orientado a la continuidad operacional

La asignación de ponderaciones se plantea como una evaluación multicriterio, ya que la selección del sistema de extinción no depende de una única variable, sino de criterios técnicos, económicos, operacionales y normativos. Este enfoque es coherente con el método de decisión multicriterio propuesto por Saaty, en el cual los factores relevantes para una decisión se organizan jerárquicamente y se ponderan según su importancia relativa frente al objetivo general del análisis (Saaty, 1990)

.

Para esta memoria, los criterios con mayor ponderación corresponden a continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI y eficacia de extinción en alta densidad, debido a que el escenario de referencia considera una sala blanca de al menos 300 m², con 200 racks y una densidad mínima de 10 kW/rack. La NFPA 75 indica que la estrategia de protección contra incendios para áreas con equipos TI debe considerar factores como continuidad del servicio, acceso a datos, valor del equipamiento, pérdidas económicas, sistemas de supresión/detección y tiempo de respuesta (National Fire Protection Association [NFPA], 2017, secs. 4.1.1–4.2.3).

Además, la continuidad operativa recibe la ponderación más alta porque las fallas en infraestructura digital tienen consecuencias económicas y operacionales relevantes. El informe Annual Outage Analysis 2024 de Uptime Institute señala que evitar fallas en infraestructura digital sigue siendo una prioridad para propietarios y operadores de Data Centers, y analiza las causas, costos y consecuencias de las interrupciones (Uptime Institute, 2024).

Los criterios asociados a daño sobre equipos TI, sistemas HVAC y recuperación post-incidente también reciben ponderaciones relevantes, ya que la NFPA 75 establece como propósito proteger los equipos TI y sus áreas contra daño por fuego y efectos asociados, incluyendo humo, corrosión, calor y agua (NFPA, 2017, sec. 1.2). En el caso de sistemas gaseosos, estudios recientes sobre agentes limpios e IG-541 destacan su aplicación en Data Centers y activos críticos debido a que no dejan residuos tras la descarga, aunque requieren análisis de seguridad, costos y diseño (Loo, Lee, Bee, 2025).

En el caso del agua nebulizada, la ponderación considera que su desempeño depende de parámetros técnicos como tamaño de gota, densidad de flujo, dinámica del spray, condiciones de ventilación y efecto del recinto. Liu y Kim indican que la eficacia del agua nebulizada no se comporta como un agente gaseoso puro y depende de las características del spray y del escenario de incendio, además de propiedades físicas como calor específico del agua de 4,2 J/g·K y calor latente de vaporización de 2442 J/g (Liu Kim, 2000).

Las ponderaciones propuestas priorizan los criterios directamente asociados a la misión crítica del Data Center: continuidad operativa, protección de equipos TI y eficacia de extinción en condiciones de alta densidad. Los criterios económicos mantienen una participación relevante, pero no dominante, debido a que la selección del sistema no debe basarse únicamente en el costo inicial, sino en el equilibrio entre inversión, riesgo operacional, recuperación post-incidente y cumplimiento normativo.

Tabla 3.3: Ponderaciones propuestas para la matriz multicriterio

Cod.	Criterio	Ponderación	Justificación resumida
C1	Costo de instalación (CAPEX)	12%	Criterio relevante para viabilidad económica inicial del proyecto.
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	6%	Considera mantenencias, pruebas, recargas y disponibilidad de servicio técnico.
C3	Costos de recuperación post-incidente	9%	Evalúa costos posteriores a descarga, reposición, limpieza y retorno a servicio.
C4	Continuidad operativa	18%	Criterio crítico en Data Centers por impacto económico y disponibilidad del servicio.
C5	Compatibilidad con equipos TI	15%	Evalúa daño potencial por agua, humedad, residuos, corrosión o interacción con equipos energizados.
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	7%	Considera afectación sobre CRAC, CRAH, ductos, filtros, sensores y flujo de aire.
C7	Recuperación y limpieza post-activación	5%	Evalúa esfuerzo de limpieza, secado, retiro de residuos y revalidación ambiental.
C8	Eficacia de extinción en alta densidad	15%	Considera desempeño en salas con alta carga térmica, alta ventilación y ≥ 10 kW/rack.
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	5%	Evalúa facilidad de ampliación en salas ≥ 200 racks y ≥ 300 m ² .
C10	Compatibilidad normativa	8%	Considera facilidad de cumplimiento, aprobación y trazabilidad normativa del sistema.
	Total	100%	Suma total de ponderaciones aplicadas en la matriz.

La escala se aplica de manera uniforme a todos los sistemas evaluados: rociadores automáticos, agentes limpios, gases inertes y agua nebulizada. De esta forma, cada alternativa será calificada bajo los mismos parámetros, evitando que la evaluación favorezca previamente a un sistema determinado.

3.5 Matriz de puntajes preliminares

El segundo escenario de evaluación considera una mayor relevancia de la viabilidad económica y de implementación del sistema. A diferencia del escenario anterior, orientado principalmente a la continuidad operacional, esta configuración incrementa la importancia relativa del costo de instalación y de la escalabilidad, manteniendo simultáneamente criterios relacionados con continuidad operacional, eficacia de extinción y compatibilidad con equipos TI. De esta manera, ambos escenarios representan enfoques distintos que pueden presentarse durante la planificación y construcción de un Data Center, sin modificar los puntajes base asignados a las tecnologías evaluadas.

La asignación se fundamenta en que la NFPA 75 establece que la estrategia de protección contra incendios en áreas con equipos TI debe considerar continuidad del servicio, valor del equipamiento, pérdidas económicas, características de detección y supresión, y tiempo de respuesta (National Fire Protection Association [NFPA], 2017). Además, Uptime Institute señala que evitar fallas de infraestructura digital sigue siendo primordial para propietarios y operadores de Data Centers, debido a las causas, costos y consecuencias de las interrupciones (Uptime Institute, 2024).

En sistemas gaseosos, el respaldo técnico considera que los agentes sin descarga de agua fueron históricamente utilizados en aplicaciones donde la conservación de propiedad era de alto valor, incluyendo salas de servidores, con el objetivo de evitar daño por agua (Fire Protection Research Foundation, 2012). Para gases inertes, la evaluación considera que estos actúan reduciendo el oxígeno del recinto, con diseños que pueden disminuirlo bajo el 15%, nivel en que normalmente el fuego no puede sostener la combustión (Fire Protection Research Foundation, 2012). En agua nebulizada, la puntuación considera que su desempeño depende de características del spray, tamaño de gota, densidad de flujo, ventilación y condiciones del incendio, por lo que no se comporta como un agente gaseoso puro (Liu Kim, 1999).

Tabla 3.4: Matriz preliminar de puntajes para sistemas de extinción en salas blancas

Cod.	Criterio	Rociadores	Agentes limpios	Gases inertes	Agua nebulizada
C1	Costo de instalación (CAPEX)	5	2	1	4
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	4	2	3	3
C3	Costos de recuperación post-incidente	1	4	4	4
C4	Continuidad operativa	2	4	4	4
C5	Compatibilidad con equipos TI	1	5	5	3
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	1	4	4	3
C7	Recuperación y limpieza post-activación	1	5	5	3
C8	Eficacia en alta densidad	3	4	4	4
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	5	3	2	4
C10	Compatibilidad normativa	5	5	5	4
	Suma total	28	38	37	36

La matriz preliminar de puntajes permite transformar el análisis cualitativo de los sistemas de extinción en una base numérica comparable. Los rociadores automáticos obtienen buen desempeño en costo, escalabilidad y compatibilidad normativa, pero presentan penalización en compatibilidad con equipos TI y recuperación post-activación. Los agentes limpios y gases inertes muestran mejor desempeño en continuidad operativa y protección de equipos TI, aunque con mayor penalización económica. El agua nebulizada se posiciona como alternativa intermedia, con mejor desempeño que los rociadores en recuperación y daño colateral, pero con limitaciones asociadas a humedad residual y diseño específico.

La matriz ponderada se construye a partir de la escala de puntuación definida en la Tabla 3.2, los criterios de evaluación establecidos en la Tabla 3.1, las ponderaciones de la Tabla 3.3 y los puntajes preliminares presentados en la Tabla 3.4. Para cada criterio, el aporte ponderado se obtiene multiplicando la ponderación porcentual del criterio por el puntaje asignado al sistema y dividiendo el resultado por el puntaje máximo de la escala, correspondiente a 5 puntos.

De esta forma, el puntaje total ponderado se expresa en una escala de 0 a 100%, donde un valor mayor representa un mejor desempeño global del sistema frente al conjunto de criterios técnicos, económicos, operacionales y normativos definidos para la sala blanca de referencia. Este procedimiento permite comparar las alternativas sin depender únicamente de la suma simple de puntajes, ya que incorpora la importancia relativa de cada criterio dentro del análisis.

Tabla 3.5: Matriz de puntaje ponderado para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad

Cod.	Criterio	Peso	Rociadores	Agentes limpios	Gases inertes	Agua nebulizada
C1	Costo de instalación (CAPEX)	12%	6.0	2.4	1.2	4.8
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	6%	2.4	1.2	1.8	1.8
C3	Costos de recuperación post-incidente	9%	0.9	3.6	3.6	3.6
C4	Continuidad operativa	18%	3.6	7.2	7.2	7.2
C5	Compatibilidad con equipos TI	15%	1.5	7.5	7.5	4.5
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	7%	0.7	2.8	2.8	2.1
C7	Recuperación y limpieza post-activación	5%	0.5	2.5	2.5	1.5
C8	Eficacia en alta densidad	15%	4.5	6.0	6.0	6.0
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	5%	2.5	1.5	1.0	2.0
C10	Compatibilidad normativa	8%	4.0	4.0	4.0	3.2
	Puntaje total obtenido	100%	26.6	38.7	37.6	36.7
	Resultado ponderado final		53.2%	77.4%	75.2%	73.4%

La matriz ponderada permite observar que, bajo los puntajes y ponderaciones definidos, las alternativas gaseosas obtienen un desempeño global superior debido a su mayor compatibilidad con equipos TI, menor daño colateral y mejor recuperación post-activación. Sin embargo, el sistema de agua nebulizada mantiene un desempeño competitivo al presentar una mejor relación entre costo de instalación, recuperación operacional y escalabilidad frente a los sistemas gaseosos. Los rociadores automáticos obtienen el menor puntaje ponderado, principalmente por su impacto potencial sobre equipos TI, sistemas de climatización y continuidad operativa.

3.6 Escenario de ponderación orientado a la viabilidad económica

Para la matriz final, las ponderaciones se ajustan en función del escenario definido para la memoria: una sala blanca de Data Center de alta densidad, con una superficie mínima de 300 m², al menos 200 racks y una densidad mínima de 10 kW/rack. Bajo estas condiciones, la evaluación no debe centrarse únicamente en la eficacia de extinción, sino también en la viabilidad económica, la continuidad operativa, la compatibilidad con equipos TI y la capacidad de escalamiento del sistema seleccionado.

La NFPA 75 establece que la estrategia de protección contra incendios en áreas con equipos TI debe considerar factores como continuidad del servicio, valor del equipamiento, pérdidas económicas, características de detección y supresión, tiempo de respuesta e impacto regulatorio (National Fire Protection Association [NFPA], 2017). Además, Uptime Institute indica que evitar fallas en infraestructura digital continúa siendo una prioridad para operadores de Data Centers, debido a las causas, costos y consecuencias de las interrupciones (Uptime Institute, 2024).

En consecuencia, se otorga mayor peso a los criterios que afectan directamente la continuidad del servicio y la factibilidad de implementación en una sala blanca de gran escala. Asimismo, se incrementa la importancia relativa del costo de instalación, debido a que las soluciones gaseosas pueden presentar mayores exigencias de cilindros, hermeticidad, recarga y espacio técnico. Para el caso del agua nebulizada, la literatura indica que su desempeño depende de variables técnicas como tamaño de gota, densidad de flujo, ventilación y condiciones del incendio, por lo que su evaluación debe considerar tanto su potencial de reducción de agua respecto de rociadores tradicionales como sus limitaciones por humedad residual (Liu Kim, 1999).

Tabla 3.6: Ponderaciones definitivas para la matriz multicriterio

Cod.	Criterio	Ponderación	Justificación resumida
C1	Costo de instalación (CAPEX)	16%	Relevante para viabilidad económica en salas de gran superficie.
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	8%	Considera mantenciones, pruebas, recargas y soporte técnico.
C3	Costos de recuperación post-incidente	8%	Evalúa reposición, limpieza, habilitación y retorno operativo.
C4	Continuidad operativa	15%	Criterio crítico por impacto del tiempo fuera de servicio.
C5	Compatibilidad con equipos TI	12%	Evalúa afectación por agua, humedad, residuos o corrosión.
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	7%	Considera afectación sobre CRAC, CRAH, ductos, filtros y sensores.
C7	Recuperación y limpieza post-activación	7%	Evalúa esfuerzo de limpieza, secado y revalidación ambiental.
C8	Eficacia de extinción en alta densidad	13%	Considera desempeño en salas con alta carga térmica y ≥ 10 kW/rack.
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	8%	Evalúa facilidad de aplicación en ≥ 200 racks y ≥ 300 m ² .
C10	Compatibilidad normativa	6%	Considera cumplimiento normativo y trazabilidad técnica del diseño.
	Total	100%	Suma total de ponderaciones aplicadas.

Las ponderaciones definitivas priorizan los factores más relevantes para una sala blanca de alta densidad: continuidad operativa, costo de instalación, eficacia de extinción, compatibilidad con equipos TI y escalabilidad. Esta distribución permite que la matriz multicriterio evalúe no solo el desempeño técnico de cada sistema, sino también su factibilidad económica y operacional en una infraestructura crítica de gran escala.

La matriz definitiva integra en una sola tabla el puntaje base asignado a cada sistema y su respectivo aporte ponderado, utilizando los criterios establecidos en la Tabla 3.1, la escala de puntuación de la Tabla 3.2 y las ponderaciones definitivas de la Tabla 3.6. En cada celda se presenta el formato puntaje base / puntaje ponderado, donde el puntaje ponderado se obtiene multiplicando la ponderación del criterio por el puntaje asignado y por un factor de escala igual a 10.

El puntaje máximo posible corresponde a 50 puntos, dado que la puntuación máxima por criterio es 5 y la suma total de ponderaciones es 100%. De esta manera, el resultado final se expresa tanto como puntaje total obtenido como porcentaje respecto del máximo desempeño posible.

Tabla 3.7: Matriz definitiva de puntaje y ponderación para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad

Cod.	Criterio	Peso	Rociadores	Agentes limpios	Gases inertes	Agua nebulizada
C1	Costo de instalación (CAPEX)	16%	5 / 8,0	2 / 3,2	1 / 1,6	4 / 6,4
C2	Costos de operación y mantenimiento (OPEX)	8%	4 / 3,2	2 / 1,6	3 / 2,4	4 / 3,2
C3	Costos de recuperación post-incidente	8%	1 / 0,8	4 / 3,2	4 / 3,2	4 / 3,2
C4	Continuidad operativa	15%	2 / 3,0	4 / 6,0	4 / 6,0	4 / 6,0
C5	Compatibilidad con equipos TI	12%	1 / 1,2	5 / 6,0	5 / 6,0	3 / 3,6
C6	Impacto sobre sistemas de climatización	7%	1 / 0,7	4 / 2,8	4 / 2,8	3 / 2,1
C7	Recuperación y limpieza post-activación	7%	1 / 0,7	5 / 3,5	5 / 3,5	4 / 2,8
C8	Eficacia de extinción en alta densidad	13%	3 / 3,9	4 / 5,2	4 / 5,2	4 / 5,2
C9	Escalabilidad y adaptabilidad	8%	5 / 4,0	3 / 2,4	2 / 1,6	4 / 3,2
C10	Compatibilidad normativa	6%	5 / 3,0	5 / 3,0	5 / 3,0	4 / 2,4
	Puntaje total obtenido	100%	28,5	36,9	35,3	38,1
	Puntaje máximo posible		50,0	50,0	50,0	50,0
	Resultado ponderado final		57,0%	73,8%	70,6%	76,2%

La matriz definitiva permite integrar en un solo instrumento la puntuación cualitativa y el efecto de las ponderaciones asignadas a cada criterio. Bajo esta estructura, el análisis deja de depender de una suma simple de puntajes y considera la importancia relativa de factores críticos como continuidad operativa, costo de instalación, compatibilidad con equipos TI, eficacia en alta densidad y escalabilidad.

3.7 Ranking de alternativas

A partir de la matriz definitiva presentada en la Tabla 3.7, se obtiene el ranking final de los sistemas de extinción evaluados. Este ranking permite ordenar las alternativas según su desempeño global frente a los criterios técnicos, económicos, operacionales y normativos definidos para la sala blanca de referencia.

El resultado muestra que el sistema de agua nebulizada alcanza el mayor puntaje ponderado, con 38,1 puntos sobre un máximo de 50,0, equivalente a un 76,2% de cumplimiento global. En segundo lugar se ubican los agentes limpios, con 36,9 puntos y un 73,8%, seguidos por los gases inertes, con 35,3 puntos y un 70,6%. Finalmente, los rociadores automáticos tradicionales obtienen 28,5 puntos, equivalentes a un 57,0%.

Tabla 3.8: Ranking final de sistemas de extinción evaluados

Lugar	Sistema de extinción	Puntaje obtenido	Resultado final
1	Agua nebulizada	38,1 / 50,0	76,2%
2	Agentes limpios	36,9 / 50,0	73,8%
3	Gases inertes	35,3 / 50,0	70,6%
4	Rociadores automáticos tradicionales	28,5 / 50,0	57,0%

El resultado obtenido indica que la diferencia entre las tres primeras alternativas no es absoluta, sino comparativa. Los sistemas gaseosos presentan ventajas importantes en compatibilidad con equipos TI, recuperación post-activación y continuidad operativa; sin embargo, su desempeño global se ve afectado por mayores costos de instalación, mayor complejidad de implementación, exigencias de hermeticidad y dependencia de agentes especializados.

Por su parte, el sistema de agua nebulizada presenta un equilibrio más favorable entre costo de instalación, escalabilidad, eficacia de extinción en alta densidad y recuperación operacional. Aunque mantiene limitaciones asociadas a la presencia de humedad y a la necesidad de un diseño específico para el riesgo protegido, su resultado ponderado permite posicionarlo como la alternativa con mejor desempeño global bajo las condiciones de evaluación definidas.

El ranking final permite identificar que el sistema de agua nebulizada obtiene el mayor desempeño global dentro de la matriz multicriterio, alcanzando un 76,2% del puntaje máximo posible. Este resultado no se explica por una superioridad absoluta en todos los criterios, sino por un equilibrio técnico-económico más favorable frente al escenario de una sala blanca de Data Center de alta densidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la Tabla 3.8, el sistema de agua nebulizada se selecciona como la alternativa más adecuada para la sala blanca de referencia, al alcanzar un puntaje de 38,1 sobre 50,0 puntos, equivalente a un 76,2% de cumplimiento global. Este resultado deriva de la aplicación conjunta de los criterios técnicos, económicos, operacionales y normativos definidos previamente, por lo que la selección no responde a una preferencia inicial, sino al desempeño comparativo obtenido mediante la matriz multicriterio.

Para el desarrollo de la propuesta hidráulica se adopta como escenario de decisión el enfoque orientado a la viabilidad económica y de implementación, debido a que la presente memoria busca establecer una propuesta de mejoramiento técnicamente aplicable a una sala blanca de gran escala, considerando conjuntamente desempeño técnico, continuidad operacional y factibilidad de implementación. El escenario orientado a continuidad operacional se mantiene como análisis de sensibilidad y permite identificar cómo cambia la alternativa preferente cuando la disponibilidad del servicio constituye la prioridad dominante.

El resultado del análisis muestra que el agua nebulizada no representa la alternativa con mayor desempeño absoluto en todos los criterios, especialmente frente a sistemas gaseosos en compatibilidad con equipos TI y ausencia de residuos. Sin embargo, presenta el mejor equilibrio general para una sala blanca de alta densidad de 300 m², 200 racks y una carga mínima estimada de 2 MW considerando 10 kW/rack, debido a su desempeño favorable en costo de instalación, escalabilidad, recuperación post-activación y eficacia de extinción en ambientes con alta carga térmica.

Desde el punto de vista normativo, la selección exige que el diseño posterior del sistema considere los requisitos aplicables a sistemas de agua nebulizada. En este sentido, NFPA 75 establece que, cuando se utilicen sistemas de agua nebulizada, estos deben instalarse conforme a NFPA 750 y diseñarse según los riesgos específicos y objetivos de protección definidos para el sistema (National Fire Protection Association [NFPA], 2017).

La selección del sistema de agua nebulizada se fundamenta en el resultado de la matriz multicriterio y en su equilibrio técnico-económico frente al escenario de análisis definido. A partir de esta selección, el desarrollo posterior de la memoria debe orientarse al diseño técnico de la red de extinción correspondiente, considerando criterios hidráulicos, distribución de boquillas, sectorización, presión de operación, compatibilidad con la sala blanca y cumplimiento normativo aplicable.

3.8 Discusión de resultados

Comparación técnica entre alternativas

Los resultados obtenidos permiten observar que las alternativas gaseosas, como agentes limpios y gases inertes, presentan ventajas relevantes en compatibilidad con equipos TI, limpieza posterior a la descarga y continuidad operativa. Esto se debe a que no incorporan agua al recinto protegido ni dejan residuos sólidos sobre servidores, cableado o sistemas de almacenamiento. Sin embargo, su desempeño global se ve reducido por factores asociados a costo de instalación, recarga, espacio para almacenamiento de cilindros, necesidad de hermeticidad del recinto y mayor dependencia de proveedores especializados.

Por otro lado, los rociadores automáticos tradicionales obtienen el menor resultado dentro de la matriz, a pesar de su bajo costo relativo y alta aceptación normativa. Esta diferencia se explica porque, en una sala blanca de Data Center, la descarga de agua en grandes volúmenes puede afectar directamente equipos TI, sistemas HVAC, cableado, pisos técnicos y continuidad operativa. Por esta razón, aunque los rociadores pueden ser adecuados como protección estructural o respaldo, su desempeño disminuye cuando se evalúan criterios propios de infraestructura crítica.

El agua nebulizada se posiciona entre ambas familias tecnológicas. Frente a los rociadores, reduce el volumen de agua descargado y, por tanto, el potencial de daño colateral. Frente a los sistemas gaseosos, presenta una solución económicamente más competitiva y más escalable para salas de gran superficie. Esta condición explica que, aunque su compatibilidad con equipos TI no sea equivalente a la de los agentes gaseosos, su resultado ponderado final sea superior al considerar simultáneamente costo, continuidad, recuperación, eficacia y escalabilidad.

Relevancia económica y operacional

La diferencia entre los sistemas mejor evaluados no es amplia, lo que confirma que la selección depende fuertemente de las prioridades del proyecto. Los agentes limpios alcanzan un 73,8%, los gases inertes un 70,6% y el agua nebulizada un 76,2%, según la Tabla 3.8. Esta cercanía demuestra que las soluciones gaseosas siguen siendo técnicamente robustas, pero su mayor costo y complejidad reducen su conveniencia cuando el análisis incorpora viabilidad económica y escalabilidad para una sala blanca de gran tamaño.

En el caso de la sala blanca de referencia, la superficie mínima de 300 m² y la cantidad mínima de 200 racks implican que el sistema seleccionado debe poder ampliarse, sectorizarse y mantenerse sin generar una dependencia excesiva de recargas especiales o espacios técnicos adicionales. Bajo este enfoque, el agua nebulizada presenta una ventaja comparativa al utilizar una red hidráulica sectorizable, con menor impacto económico que sistemas gaseosos y menor daño esperado que rociadores convencionales.

Alcance de la selección

La selección del sistema de agua nebulizada no implica que esta alternativa sea universalmente superior para cualquier Data Center. Su conveniencia se establece únicamente para el escenario definido en esta memoria: sala blanca de alta densidad, carga mínima de 10 kW/rack, al menos 200 racks, superficie igual o superior a 300 m² y evaluación bajo los criterios definidos en la Tabla 3.1. En instalaciones de menor escala, con distinta criticidad operacional o con presupuestos diferentes, el resultado podría variar.

Asimismo, la selección requiere considerar cuidadosamente las limitaciones propias del agua nebulizada. Entre ellas se encuentran la presencia de humedad residual, la interacción con sistemas HVAC, la ubicación de boquillas, la presión de trabajo, el tamaño de gota, la sectorización del sistema y los procedimientos de recuperación post-descarga. Por tanto, el capítulo siguiente debe abordar el diseño técnico preliminar considerando estas restricciones.

La discusión de resultados muestra que el agua nebulizada alcanza el mejor desempeño global no por dominar todos los criterios, sino por lograr el equilibrio más favorable entre desempeño técnico, costo, escalabilidad y recuperación operacional. Este resultado permite justificar su selección como base para el diseño técnico de la red de extinción en la sala blanca de referencia.

El presente capítulo permitió aplicar el procedimiento de evaluación multicriterio definido en el marco metodológico, considerando criterios económicos, técnicos, operacionales y normativos. A través de la matriz de puntaje y ponderación, se compararon cuatro alternativas de extinción aplicables a salas blancas de Data Centers: rociadores automáticos, agentes limpios, gases inertes y agua nebulizada.

Los resultados obtenidos permitieron determinar que el sistema de agua nebulizada alcanza el mayor puntaje ponderado, con 38,1/50,0 puntos, equivalente a 76,2% del máximo posible. Este resultado supera a los agentes limpios, gases inertes y rociadores automáticos tradicionales, principalmente por su equilibrio entre costo de instalación, continuidad operativa, recuperación post-activación, eficacia de extinción y adaptabilidad a salas blancas de alta densidad.

En consecuencia, el sistema de agua nebulizada se establece como la alternativa seleccionada para el desarrollo del diseño técnico de la red de extinción correspondiente. El siguiente capítulo deberá concentrarse en transformar esta selección en una propuesta técnica preliminar, incorporando criterios de distribución de boquillas, presión de operación, sectorización, condiciones hidráulicas, integración con detección y restricciones propias de una sala blanca con equipos TI.

Capítulo 4

Diseño hidráulico

Caso de estudio

El presente capítulo desarrolla el diseño hidráulico del sistema de extinción seleccionado para el caso de estudio definido previamente, correspondiente a una sala blanca de Data Center de alta densidad. Sobre la base de las características geométricas, operacionales y térmicas establecidas en los capítulos anteriores, se construye un modelo de la red en AFT Fathom 12 con el propósito de determinar la distribución de caudales, presiones, velocidades y pérdidas de carga, así como verificar el comportamiento hidráulico del sistema en su condición de operación más exigente, el cual consiste en la apertura en simultaneo de todos los rociadores presentes en la sala blanca. De esta manera, el capítulo transforma los antecedentes teóricos y metodológicos del estudio en una propuesta técnica cuantificable, orientada a fundamentar la selección de tuberías, boquillas, accesorios y equipo de bombeo.

Para el desarrollo y verificación hidráulica de la red propuesta se utiliza el software AFT Fathom 12. Su incorporación permite representar mediante un modelo hidráulico los distintos componentes que conforman la red y determinar las condiciones de funcionamiento resultantes a partir de los parámetros definidos para el sistema.

La formulación fundamental de AFT Fathom considera flujo incompresible y unidimensional, ausencia de reacciones químicas y condiciones de estado estacionario (Applied Flow Technology, s. f.). Estas condiciones son consistentes con el análisis desarrollado en la presente memoria, en el cual se estudia el comportamiento hidráulico de la red para condiciones de operación definidas, sin considerar variaciones transitorias durante la descarga.

La construcción del modelo se realiza mediante tuberías y elementos de unión o *junctions*, a partir de los cuales se establecen las condiciones de borde y las conexiones entre los diferentes componentes de la red. AFT Fathom permite definir dentro de la configuración del análisis las propiedades del fluido, las características de las tuberías y uniones, las condiciones ambientales y los parámetros necesarios para obtener una solución estacionaria del sistema (Applied Flow Technology, s. f.). Asimismo, las pérdidas localizadas pueden representarse mediante elementos específicos de la red o mediante factores de pérdida asociados a las tuberías (Applied Flow Technology, s. f.).

En el presente estudio, AFT Fathom 12 se utiliza para representar el reservorio, las tuberías, los cambios de sección, las ramificaciones, los cabezales de descarga y posteriormente el equipo de bombeo. A partir de esta configuración se obtienen los caudales, presiones y velocidades correspondientes a los distintos puntos de la red, permitiendo identificar las condiciones hidráulicas necesarias para satisfacer el caudal mínimo establecido para los cabezales seleccionados.

La modelación se desarrolla inicialmente mediante una configuración preliminar, utilizada para determinar la presión mínima de suministro requerida por la red. Posteriormente, los resultados obtenidos se emplean para seleccionar el equipo de bombeo e incorporarlo a una segunda configuración con una mayor cantidad de elementos y pérdidas localizadas. De esta forma, el software se utiliza como una herramienta de cálculo y verificación del comportamiento hidráulico de la propuesta, mientras que los criterios de selección de los componentes y las condiciones de diseño se establecen a partir de los antecedentes técnicos y normativos desarrollados en la presente memoria.

4.1 Diseño preliminar y supuestos

La modelación preliminar del diseño se desarrolla sin considerar accesorios adicionales, tales como válvulas de corte u otros elementos que generen pérdidas localizadas, salvo los cambios de sección incorporados en la red. Asimismo, las longitudes utilizadas corresponden a valores estimativos, por lo que deberán ajustarse posteriormente según las condiciones y necesidades reales del sitio de instalación.

Selección preliminar del cabezal de agua nebulizada

La correcta selección del cabezal constituye una etapa fundamental en el diseño del sistema de agua nebulizada, debido a que sus características hidráulicas y de descarga influyen directamente en la distribución del agua, el área protegida y la capacidad del sistema para controlar o extinguir un incendio. Estudios experimentales han demostrado que variables como el caudal, la presión de suministro, el ángulo de pulverización y el tamaño de las gotas afectan la cobertura del cabezal, el tiempo de extinción y la disminución de la temperatura en el recinto (Liu et al., 2014; Kraus-Namrozy y Brzezińska, 2022). En consecuencia, la comparación de alternativas debe considerar no solo su aplicación declarada, sino también la presión de operación, el factor K , la cobertura, la separación máxima, la orientación de instalación y las aprobaciones asociadas al riesgo protegido.

Uno de los principales parámetros hidráulicos utilizados para caracterizar un cabezal es el factor K , correspondiente al coeficiente que relaciona el caudal descargado con la diferencia de presión disponible a través del elemento (Applied Flow Technology, 2026). Esta relación se expresa mediante la Ecuación 4.1:

$$Q = K\sqrt{\Delta P} \quad (4.1)$$

Donde Q corresponde al caudal descargado por el cabezal, K representa el factor hidráulico y ΔP corresponde a la diferencia de presión entre la entrada del cabezal y el ambiente de descarga. Cuando la descarga se produce hacia un recinto a presión atmosférica, esta diferencia puede representarse mediante la presión manométrica disponible en el cabezal (Applied Flow Technology, 2026). El factor K no es adimensional, puesto que sus unidades dependen de las unidades seleccionadas para el caudal y la presión; en el sistema métrico suele expresarse en L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$ (Applied Flow Technology, 2026).

Para una misma presión disponible, un cabezal con un factor K mayor entrega un caudal superior. Por esta razón, este parámetro permite establecer la demanda hidráulica de cada punto de descarga y verificar, mediante la modelación, que todos los cabezales reciban la presión necesaria para alcanzar el caudal previsto. No obstante, el factor K no constituye por sí solo un criterio suficiente para seleccionar el cabezal, debido a que el desempeño del agua nebulizada también depende de las características del patrón de descarga, del tamaño de las gotas, de la ubicación del cabezal y de las condiciones particulares del riesgo protegido (Liu et al., 2014; Kraus-Namrozy y Brzezińska, 2022). A partir de estos antecedentes, la Tabla 4.1 presenta una comparación preliminar de los cabezales considerados para el caso de estudio.

Tabla 4.1: Cabezales de agua nebulizada disponibles para aplicaciones tecnológicas

Cabezal	Características principales
VID FIREKILL OH-PX2	Cabezal automático cerrado de agua nebulizada de baja presión, destinado a áreas tecnológicas clasificadas como OH-3. Opera entre 7 y 16 bar, posee un factor K de 19,0 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$, una cobertura máxima de 12,25 m ² , una separación máxima de 3,5 × 3,5 m y una altura máxima de instalación de 4 m.
VID FIREKILL OH-DC1	Cabezal automático colgante de baja presión, diseñado para la protección de salas con equipos de procesamiento de datos ubicados sobre piso técnico. Opera entre 8 y 16 bar y posee un factor K de 13,4 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$.
VID FIREKILL OH-DC2	Cabezal automático vertical de baja presión, destinado a la protección de espacios ubicados bajo el piso técnico de salas con equipos de procesamiento de datos. Opera entre 8 y 16 bar y posee un factor K de 13,85 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$.
VID FIREKILL OH-VSO	Cabezal automático colgante de baja presión, aplicable a áreas de procesamiento de datos y ocupaciones clasificadas como HC1 u OH1. Opera entre 8 y 16 bar, posee un factor K de 16,7 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$ y una cobertura máxima de 20,25 m ² .
Viking EconAqua MX3-P EA	Cabezal colgante de agua nebulizada de baja presión y respuesta rápida. Posee una conexión DN15–1/2" y un factor K de 14 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$.
Viking EconAqua MX3-U EA	Cabezal vertical de agua nebulizada de baja presión y respuesta rápida. Posee una conexión DN15–1/2" y un factor K de 14 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$.
Marioff HI-FOG	Familia de cabezales automáticos de agua nebulizada de alta presión, equipados con ampolla térmica y filtro integrado. Se utiliza en sistemas de tubería húmeda y de preacción, incluyendo aplicaciones en salas de servidores y Data Centers.
Johnson Controls AquaMist ULF	Sistema de agua nebulizada de alta presión y preacción destinado a la protección de instalaciones críticas y Data Centers. La documentación pública consultada no identifica un modelo específico de cabezal ni su factor K .

Fuente: Elaboración propia con base en Fike Corporation (2020), VID Fire Kill ApS, Viking EMEA, Marioff Corporation Oy y Johnson Controls.

Recomendación preliminar

Para efectuar una comparación técnicamente fundamentada, se identifican tres cabezales principales como alternativas preliminares para el caso de estudio:

- **OH-DC1:** destinado a la protección general de salas con equipos de procesamiento de datos ubicados sobre piso técnico.
- **OH-DC2:** destinado a complementar la protección de los espacios ubicados bajo el piso técnico.
- **OH-PX2:** aplicable principalmente a áreas tecnológicas clasificadas como OH-3 o a recintos que contengan equipos con baterías de ion-litio.

Entre las alternativas analizadas, el cabezal OH-DC1 presenta una correspondencia más directa con las características del caso de estudio que el modelo OH-PX2, debido a que su aplicación se encuentra expresamente vinculada con la protección de salas de procesamiento de datos ubicadas sobre piso técnico. No obstante, el cabezal OH-PX2 continúa constituyendo una alternativa técnicamente válida, aunque su ficha técnica lo caracteriza principalmente para la protección de áreas tecnológicas clasificadas como OH-3, mientras que documentación posterior del fabricante también lo relaciona con salas que contienen baterías de ion-litio.

La selección de estos cabezales no debe realizarse únicamente a partir de la comparación de sus factores K , presiones de operación o tamaños de gota. Cada modelo forma parte de un sistema ensayado para un riesgo y una configuración determinados. Por esta razón, la selección definitiva deberá mantener concordancia con las aprobaciones correspondientes, el manual de diseño, instalación, operación y mantenimiento del fabricante, la altura de instalación, la separación entre cabezales, las condiciones de ventilación y el área de diseño considerada.

Este criterio resulta consistente con el enfoque presentado por COPIME (2025), cuya conferencia técnica sobre sistemas de agua nebulizada incorpora dentro de su temario a NFPA 750, UNE 14972, FM, VdS y los ensayos de fuego como elementos asociados a la evaluación de esta tecnología. En consecuencia, para el presente diseño la selección del cabezal debe mantener correspondencia con la aplicación para la cual el sistema ha sido ensayado y aprobado, además de cumplir las condiciones hidráulicas establecidas para el modelo.

La selección preliminar del cabezal *VID FIREKILL OH-PX2* se fundamenta en su compatibilidad con áreas tecnológicas y, especialmente, en la flexibilidad que proporciona su cobertura máxima de 12,25 m², asociada a una separación máxima de 3,5 × 3,5 m y a una altura de instalación de hasta 4 m (Fike Corporation, 2020). En comparación con cabezales que abarcan superficies mayores, esta área de cobertura permite disponer una distribución más localizada de los puntos de descarga y adaptar con mayor precisión la protección a sectores reducidos de la sala blanca, como un grupo acotado de racks, evitando extender innecesariamente la aplicación de agua hacia equipos TI que no se encuentren directamente expuestos al incendio. Esta característica resulta relevante en un Data Center, donde la continuidad operativa y la reducción de daños secundarios sobre equipos cercanos constituyen criterios prioritarios, junto con esto cabe destacar que si bien OH-DC1 es aun más específico para salas blancas que el rociador seleccionado, se opta por el OH-PX2 por contar con parámetros hidráulicos completos, junto con permitir una modelación con una cobertura mucho más focalizada. Por consiguiente, el OH-PX2 se adopta como cabezal preliminar debido a que combina una aplicación declarada para áreas tecnológicas, una cobertura acotada y parámetros hidráulicos definidos, permitiendo desarrollar una protección más granular y ajustada a la distribución de los racks.

Una vez seleccionado preliminarmente el cabezal *VID FIREKILL OH-PX2*, se establecen los principales parámetros técnicos requeridos para la construcción del modelo hidráulico. De acuerdo con la ficha técnica proporcionada por el fabricante, las condiciones de operación y disposición del cabezal corresponden a las siguientes (Fike Corporation, 2020):

- Presión mínima de operación: 7 bar.
- Presión máxima de operación: 16 bar.
- Factor K : 19,0 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$.
- Cobertura máxima por cabezal: 12,25 m², correspondiente a una disposición de 3,5 × 3,5 m.
- Altura máxima de instalación: 4 m.
- Separación máxima entre cabezales: 3,5 m.

4.2 Determinación de la cantidad de cabezales y del caudal mínimo

Una vez establecidos los parámetros técnicos del cabezal *VID FIREKILL OH-PX2*, se procede a determinar la cantidad mínima requerida para cubrir la superficie de 300 m² considerada para la sala blanca. De acuerdo con la ficha técnica del fabricante, cada cabezal proporciona una cobertura máxima de 12,25 m², correspondiente a una disposición máxima de 3,5 × 3,5 m (Fike Corporation, 2020). Por consiguiente, la cantidad mínima de cabezales se determina mediante la Ecuación 4.2.

$$N_{min} = \frac{A_{sala}}{A_{cobertura}} \quad (4.2)$$

Al reemplazar los valores correspondientes al caso de estudio, se obtiene:

$$N_{min} = \frac{300 \text{ m}^2}{12,25 \text{ m}^2} = 24,49 \quad (4.3)$$

Debido a que la cantidad de cabezales debe corresponder a un número entero y garantizar la cobertura total del recinto, el resultado se aproxima al entero inmediatamente superior:

$$N_{min} = \lceil 24,49 \rceil = 25 \text{ cabezales} \quad (4.4)$$

El resultado anterior corresponde al mínimo geométrico teórico y no considera posibles restricciones derivadas de la distribución de los racks, pasillos, muros, obstáculos o interferencias con otras instalaciones. Por esta razón, para la modelación preliminar se adopta una configuración de 30 cabezales, distribuida en tres ramales de diez unidades cada uno. Esta disposición proporciona una mayor flexibilidad para posicionar los puntos de descarga y permite adaptar posteriormente la red a las condiciones reales del sitio, sin establecer que la totalidad de los cabezales constituya necesariamente el área de operación exigida para una instalación definitiva.

Determinación del caudal mínimo

El caudal mínimo descargado por cada cabezal se determina mediante el factor K , utilizando la presión mínima de operación de 7 bar indicada en la ficha técnica del modelo OH-PX2. La relación entre el caudal, el factor K y la presión disponible se presenta en la Ecuación 4.5 (Fike Corporation, 2020; Applied Flow Technology, 2026).

$$Q_{\text{cabezal}} = K\sqrt{P} \quad (4.5)$$

Al reemplazar el factor K de 19,0 L/min/ $\sqrt{\text{bar}}$ y la presión mínima de 7 bar, se obtiene:

$$\begin{aligned} Q_{\text{cabezal}} &= 19,0 \frac{\text{L/min}}{\sqrt{\text{bar}}} \sqrt{7 \text{ bar}} \\ &= 50,27 \text{ L/min} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Para el caso preliminar se adopta una condición conservadora en la cual los 30 cabezales operan simultáneamente, considerar esto como un supuesto y tiene que ser validado de manera experimental. El caudal mínimo total se determina mediante la Ecuación 4.7.

$$Q = N_{\text{cabezales}} Q_{\text{cabezal}} \quad (4.7)$$

Al reemplazar los valores definidos para el modelo, se obtiene:

$$\begin{aligned} Q &= 30 \times 50,27 \text{ L/min} \\ &= 1508,08 \text{ L/min} \end{aligned} \quad (4.8)$$

Por lo tanto, la fuente de suministro deberá proporcionar preliminarmente un caudal mínimo de 1508,08 L/min, manteniendo una presión no inferior a 7 bar en el cabezal hidráulicamente más desfavorable.

4.3 Criterio preliminar para la bomba y las tuberías

A partir del caudal calculado, se consulta la Tabla 4.28(b), denominada *Summary of Centrifugal Fire Pump Data (Metric)*, de NFPA 20. El caudal nominal normalizado inmediatamente superior corresponde a 1514 L/min, equivalente a 400 gpm. Para esta capacidad, la tabla establece diámetros nominales mínimos de 100 mm, equivalentes a 4", tanto para la tubería de succión como para la tubería de descarga de la bomba (National Fire Protection Association, 2022b). En consecuencia, estos diámetros se adoptan como valores preliminares para la conexión del equipo de bombeo, quedando su selección definitiva condicionada al punto de operación obtenido mediante la modelación hidráulica.

Table 4.28(b) Summary of Centrifugal Fire Pump Data (Metric)

Pump Rating (L/min)	Minimum Pipe Sizes (Nominal) (mm)							
	Suction ^{a,b,c}	Discharge ^a	Relief Valve	Relief Valve Discharge	Meter Device	Number and Size of		Hose Header Supply
						Hose Valves	Nonthreaded Connections	
95	25	25	19	25	32	1 — 38	1 — 65	25
189	38	32	32	38	50	1 — 38	1 — 65	38
379	50	50	38	50	65	1 — 65	1 — 65	65
568	65	65	50	65	75	1 — 65	1 — 65	65
757	75	75	50	65	75	1 — 65	1 — 65	65
946	85	75	50	65	85	1 — 65	1 — 65	75
1,136	100	100	65	85	85	1 — 65	1 — 65	75
1,514	100	100	75	125	100	2 — 65	1 — 125	100
1,703	125	125	75	125	100	2 — 65	1 — 125	100
1,892	125	125	75	125	125	2 — 65	1 — 125	100
2,839	150	150	100	150	125	3 — 65	1 — 125	150
3,785	200	150	100	200	150	4 — 65	1 — 125	150
4,731	200	200	150	200	150	6 — 65	1 — 125	200
5,677	200	200	150	200	200	6 — 65	1 — 125	200
7,570	250	250	150	250	200	6 — 65	2 — 125 ^d	200
9,462	250	250	150	250	200	8 — 65	2 — 125 ^d	250
11,355	300	300	200	300	200	12 — 65	2 — 125 ^d	250
13,247	300	300	200	300	250	12 — 65	3 — 125 ^d	300
15,140	350	300	200	350	250	16 — 65	3 — 125 ^d	300
17,032	400	350	200	350	250	16 — 65	3 — 125 ^d	300
18,925	400	350	200	350	250	20 — 65	3 — 125 ^d	300

Figura 4.1: NFPA 20, Tabla 4.28(b), Summary of Centrifugal Fire Pump Data (Metric).

Para establecer los diámetros iniciales de la red de distribución se revisan, como referencia comparativa, las tablas 19.2.2.1 y 28.5.2.2.1 de NFPA 13, correspondientes a sistemas de rociadores dimensionados mediante el método de tablas de tuberías (National Fire Protection Association, 2022a). A partir de esta referencia, se adopta preliminarmente una tubería principal de acero inoxidable de 100 mm y tres ramales que comienzan con un diámetro de 50 mm, reduciéndose progresivamente hasta 25 mm en las proximidades de los últimos cabezales.

Steel		Copper	
1 in. (25 mm)	2 sprinklers	1 in. (25 mm)	2 sprinklers
1¼ in. (32 mm)	3 sprinklers	1¼ in. (32 mm)	3 sprinklers
1½ in. (40 mm)	5 sprinklers	1½ in. (40 mm)	5 sprinklers
2 in. (50 mm)	10 sprinklers	2 in. (50 mm)	12 sprinklers
2½ in. (65 mm)	30 sprinklers	2½ in. (65 mm)	40 sprinklers
3 in. (80 mm)	60 sprinklers	3 in. (80 mm)	65 sprinklers
3½ in. (90 mm)	100 sprinklers	3½ in. (90 mm)	115 sprinklers
4 in. (100 mm)	See Section 4.4.	4 in. (100 mm)	See Section 4.4.

Figura 4.2: NFPA, Tabla 28.5.2.2.1 light Hazard Pipe Schedules.

Occupancy Classification	Minimum Residual Pressure Required		Acceptable Flow at Base of Riser (Including Hose Stream Allowance)		Duration (minutes)
	psi	bar	gpm	L/min	
Light hazard	15	1	500–750	1900–2850	30 or 60
Ordinary hazard	20	1.4	850–1500	3200–5700	60 or 90

Figura 4.3: NFPA, Tabla 19.2.2.1 Water Supply Requirements for Pipe Schedule Light Sprinkler Systems.

Sin embargo, debido a que las tablas de NFPA 13 corresponden a sistemas convencionales de rociadores, estos diámetros no se consideran un dimensionamiento normativo definitivo para la red de agua nebulizada. La selección final deberá comprobarse mediante cálculo hidráulico, considerando las características del cabezal, las pérdidas de presión, las velocidades, el número de cabezales operativos y las restricciones establecidas por la aprobación y el manual de diseño del sistema. NFPA 750 establece que los sistemas de agua nebulizada deben mantener concordancia con sus ensayos, listados, componentes, método de cálculo hidráulico y documentación del fabricante (National Fire Protection Association, 2023).

Para la selección del material de las tuberías se diferencian dos zonas de la red: las tuberías asociadas a la succión y descarga del equipo de bombeo y la red de distribución que alimenta los cabezales de agua nebulizada. Para el primer sector se adopta tubería de acero, en concordancia con NFPA 20. La norma establece que para instalaciones sobre el nivel de piso debe emplearse tubería de acero y, para la descarga de la bomba, especifica el empleo de tuberías de acero con uniones mediante bridas, juntas roscadas o juntas ranuradas mecánicas (National Fire Protection Association [NFPA], 2019, secs. 4.15.1.1 y 4.17.4).

En particular, la edición en español indica textualmente que “debe utilizarse tubería de acero sobre el nivel de piso” (NFPA, 2019, sec. 4.15.1.1).

Para la red de distribución en la que se instalan los cabezales de agua nebulizada se utiliza acero inoxidable AISI 316L. Esta diferenciación responde principalmente al requerimiento de reducir la posibilidad de corrosión y generación de partículas dentro de las tuberías. NFPA 750 establece que las superficies mojadas de tuberías, válvulas y accesorios comprendidas hasta las boquillas deben presentar resistencia a la corrosión adecuada para este tipo de sistema (National Fire Protection Association [NFPA], 2023). De forma consistente con este criterio, Morales Araya (2017, p. 27), al desarrollar un sistema de agua nebulizada basado en NFPA 750, señala que los componentes expuestos al agua deben utilizar un “material resistente a la corrosión, de modo que se minimice el riesgo de atasco”, seleccionando para su diseño acero inoxidable AISI 316L.

Esta condición adquiere relevancia adicional para el cabezal OH-PX2. La documentación del fabricante establece que este debe instalarse únicamente en sistemas de tuberías limpios y no corrosivos, cuyas superficies internas se encuentren libres de impurezas (VID Fire-Kill ApS, 2021). En consecuencia, la utilización de acero inoxidable en la red que alimenta los cabezales permite mantener concordancia con las condiciones de instalación establecidas para el componente seleccionado y disminuir la generación de productos de corrosión que puedan alcanzar los elementos de descarga.

Dentro de las alternativas de acero inoxidable se adopta preliminarmente AISI 316L debido a su resistencia a la corrosión. La documentación técnica de Aperam señala que “el 316L presenta una excelente resistencia en soluciones ácidas y una buena resistencia en entorno con contenido en cloruros” (Aperam, s. f.). Por lo tanto, para el diseño desarrollado se propone utilizar tubería de acero en los tramos de succión y descarga asociados a la bomba, mientras que la red de distribución destinada a alimentar los cabezales de agua nebulizada se considera en acero inoxidable AISI 316L. Esta selección corresponde a un criterio preliminar de diseño y deberá mantenerse en concordancia con el listado, las aprobaciones y la documentación definitiva del sistema de agua nebulizada utilizado.

A continuación, en la Tabla 4.2, se presentan los diámetros de las tuberías sobre las cuales se disponen los aspersores considerados en la simulación. La tabla permite visualizar la reducción progresiva de sección a lo largo de cada ramal, establecida con el propósito de mantener condiciones adecuadas de presión en la red frente a las pérdidas generadas durante el transporte y la descarga del agua.

Tabla 4.2: Diámetros y materiales de tubería considerados en la red hidráulica

Tramo / Aspersor	Diámetro de tubería	Material
Succión de la bomba	100 mm	Acero
Descarga de la bomba	100 mm	Acero
Aspersores 1–5	50 mm	Acero inoxidable AISI 316L
Aspersores 6–7	40 mm	Acero inoxidable AISI 316L
Aspersor 8	32 mm	Acero inoxidable AISI 316L
Aspersores 9–10	25 mm	Acero inoxidable AISI 316L

Fuente: NFPA 13, Elaboración propia.

Para la primera simulación en AFT Fathom 12, se considera una distancia de 30 m desde la bomba hasta el edificio, se considera una cantidad de 5 codos de 100 mm, junto con 4 válvulas check y 4 válvulas de corte, obteniendo un factor de pérdida k igual a 16.13, se adopta una fuente de presión idealizada, cuyo valor se ajusta iterativamente hasta alcanzar el valor mínimo de presión para alcanzar un valor mínimo de 50,27 lmp en cada uno de los rociadores, tomando en consideración la apertura en simultaneo de todos estos. De esta manera, la presión y la altura manométrica requeridas se obtienen como resultados del comportamiento hidráulico de la red y se utilizan posteriormente para definir el punto de operación y seleccionar la bomba. Asimismo, se considera inicialmente un reservorio infinito, entendido como una fuente cuyo nivel no cambia de manera apreciable durante el intervalo analizado, lo que permite estudiar el comportamiento estacionario de la red sin incorporar todavía el vaciado de un estanque de volumen limitado (Applied Flow Technology, 2026).

Resultados preliminares

A continuación en la figura 4.4 se muestra el diseño preliminar modelado en el programa AFT Fathom, como se menciona anteriormente se este cuenta con un reservorio infinitivo y una presión entregada sin pérdidas y de manera constante.

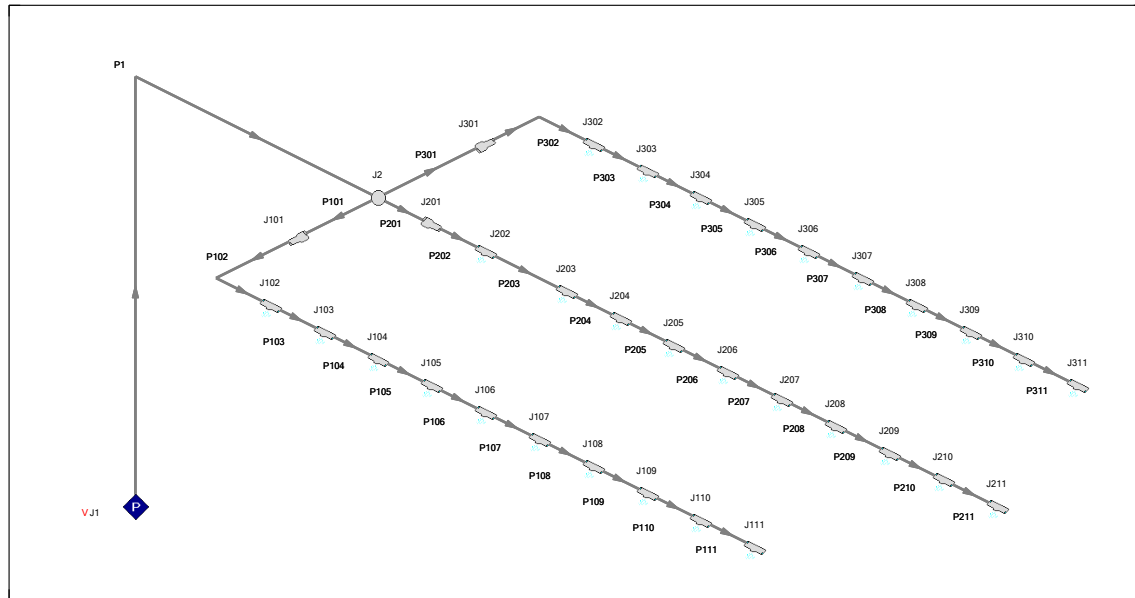


Figura 4.4: Configuración de la red hidráulica modelada en AFT Fathom.

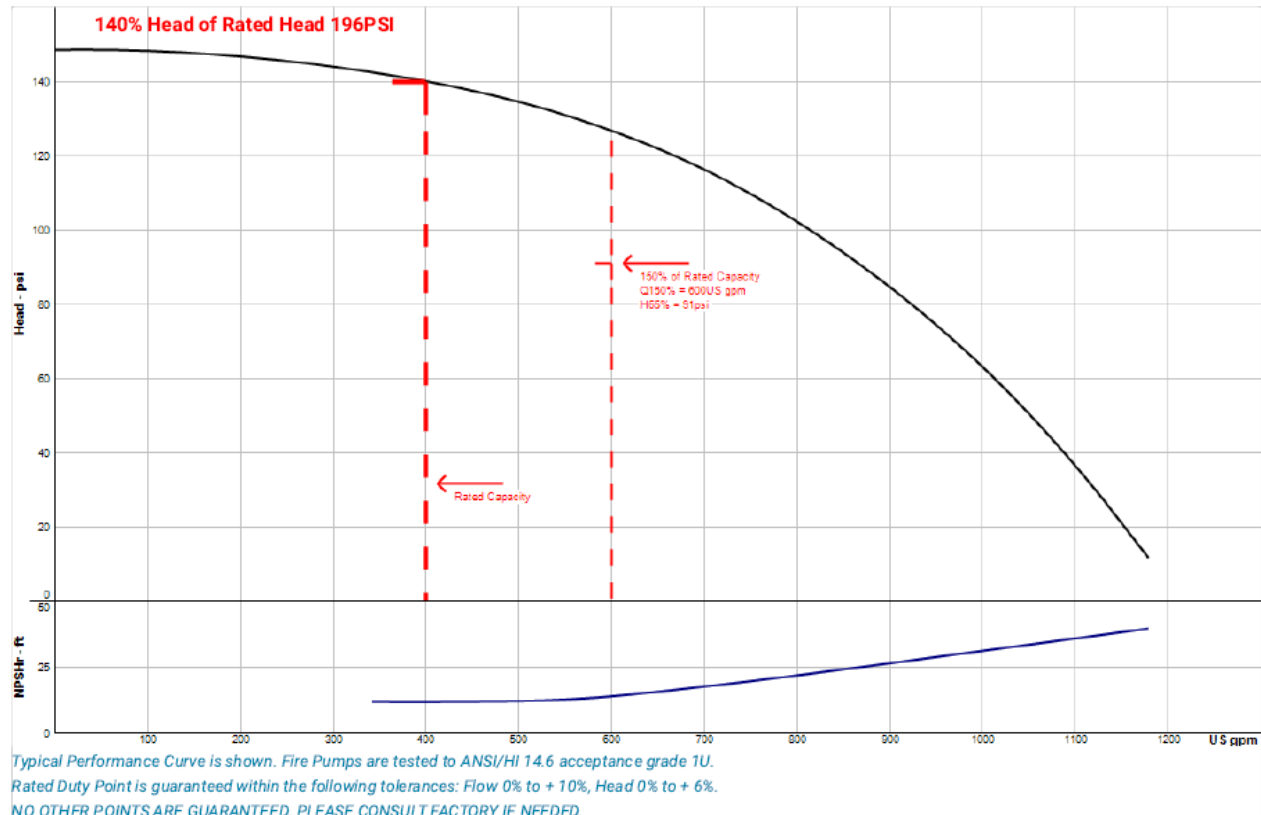
Los principales resultados obtenidos en esta primera modelación indican que la presión mínima requerida para que todos los rociadores operen simultáneamente con un caudal mínimo de 50,27 L/min por unidad corresponde a 9,326 bar. A partir de este resultado, es posible establecer las condiciones mínimas requeridas para la posterior selección de la bomba del sistema, la cual deberá ser capaz de suministrar un caudal de 1508,10 L/min a la presión previamente determinada.

Selección de bomba

Para la selección preliminar de la bomba se utilizó la herramienta de selección disponible en el sitio web de AC Fire Pump. En esta se ingresaron como parámetros de búsqueda el caudal de (1508,10 L/min) y la presión de (9,326 bar). A partir de estas condiciones de operación se identificó la alternativa de bombeo utilizada posteriormente en el desarrollo del modelo (AC Fire Pump, s. f.).

La bomba seleccionada es una bomba en línea modelo 4x4x9.5F de la marca AC Fire Pump, con una velocidad nominal de 3550 rpm, con un caudal nominal de 1514,16 lpm y una altura nominal de 9.65 bar.

A continuación, se presenta la Figura 4.6, en la cual se observa la curva característica de la bomba, junto con sus distintos puntos de eficiencia y potencia requerida. Para el presente caso, el NPSH no se evalúa en detalle en esta etapa preliminar y deberá verificarse en la ingeniería de detalle, debido a que la bomba se encontrará alineada con el reservorio o conectada directamente a la red hidráulica disponible de la empresa de agua potable de la zona. El punto de operación considerado corresponde al indicado como *RATED CAPACITY*, seleccionado debido a que el caudal suministrado cumple con los requerimientos establecidos previamente y la presión asociada presenta un valor similar al obtenido en los resultados anteriores.



Flow (US gpm)	Head (psi)	Efficiency (%)	Power Required (hp)	NPSHr (ft)
0	149	0	0	12
100	147	32.1	43.5	12
200	145	40.7	47.7	12
300	143	49.4	51.9	12
400	140	58	56	12
600	126	68.9	63.4	14.5
1179	11.7	13.3	60.7	39.7

Figura 4.5: Curva de la bomba.

Para este sistema y siguiendo la imagen curva de la bomba, es posible apreciar que el punto de operacion posee una eficiencia del 58 % siendo el maximo teorico de eficiencia de la bomba del 68,9%, con este caudal la potencia requerida por la bomba es de 56 hp.

Una vez seleccionada la bomba, se incorpora el equipo al modelo hidráulico junto con el reservorio utilizado como condición de borde del sistema. Para esta etapa se mantiene un reservorio infinito con una presión definida de 1 bar, lo que permite estudiar el comportamiento estacionario de la red sin considerar la disminución del nivel de agua durante la descarga. Por consiguiente, esta condición de modelación no representa por sí misma la autonomía hídrica del sistema, ya que la determinación de dicha autonomía requeriría establecer un volumen de almacenamiento y un tiempo de operación definidos para una instalación real (Applied Flow Technology, s. f.).

Asimismo, la condición de succión y el NPSH no se verifican de manera definitiva en esta etapa, debido a que aún no se dispone de la configuración real del reservorio, las condiciones de suministro ni la geometría final de la tubería de succión. En consecuencia, la verificación del NPSH deberá efectuarse durante una etapa posterior de ingeniería de detalle utilizando las condiciones reales de instalación y los requerimientos correspondientes a la bomba seleccionada.

A continuación en la figura 4.6 se presenta el nuevo diseño incluyendo la bomba.

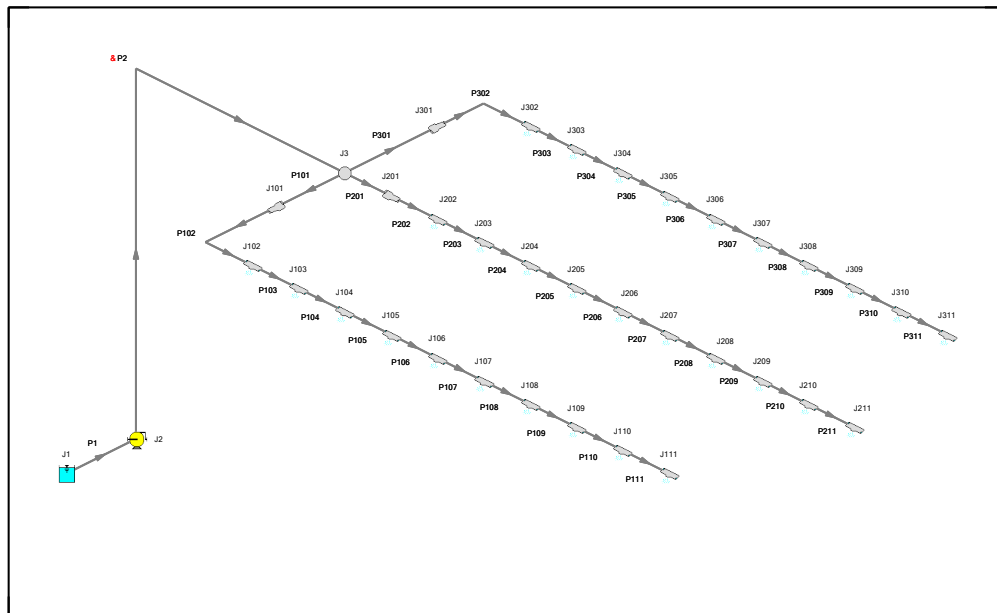


Figura 4.6: Diseño de red PCI.

Cambios realizados al diseño, principalmente se agregó una mayor cantidad de restricciones y sean codos, válvulas de corte y una mayor longitud a la tubería de 100 mm hasta la llegada a la ramificación para simular un caso más realista, considerar que estos aspectos varían dependiendo de las necesidades del sitio y no son necesariamente idénticas a las realizadas en la simulación.

Los nuevos resultados de la simulación son los siguientes:

Se obtiene un caudal mínimo de 53,75 lpm en el rociador más alejado del inicio del ramal y un caudal máximo de 56,26 lpm, con lo cual se encuentra dentro de los rangos aceptables por el proveedor del cabezal de agua nebulizada.

Resultados obtenidos de la bomba, obtenemos un caudal generado de 1651 lpm, un flujo másico de 27,48 kg/s y una diferencia de presión de 9,45 bar lo cual concuerda con el punto de operación seleccionado para la bomba.

aceroltados más relevantes asociados a las tuberías corresponden a una velocidad máxima de 4,238 m/s, registrada en el cambio de sección de 100 mm a 50 mm, el cual ocurre al inicio de cada uno de los tres ramales, y una velocidad mínima de 1,607 m/s. Como referencia comparativa, UNE-EN 12845 establece límites de velocidad para sistemas de rociadores; sin embargo, debido a que la red desarrollada corresponde a un sistema de agua nebulizada, estos valores no se utilizan para establecer un cumplimiento normativo definitivo. La verificación permite comprobar preliminarmente que las velocidades obtenidas no presentan valores elevados respecto del criterio hidráulico de referencia utilizado. El cumplimiento definitivo deberá verificarse de acuerdo con NFPA 750, las aprobaciones del sistema y la documentación del fabricante correspondiente.

El desarrollo del presente capítulo permitió transformar la selección del sistema de agua nebulizada realizada previamente en una propuesta hidráulica preliminar para la sala blanca de referencia. A partir de las características del cabezal seleccionado y de las condiciones establecidas para el caso de estudio, se definió una configuración compuesta por 30 cabezales distribuidos en tres ramales de diez unidades, considerando una condición conservadora de operación simultánea. Para cada cabezal se estableció un caudal mínimo de 50,27 L/min, obteniéndose una demanda total preliminar de 1508,08 L/min

La modelación desarrollada mediante AFT Fathom 12 permitió determinar inicialmente que la red requiere una presión de suministro de 9,326 bar para mantener el caudal mínimo establecido en todos los cabezales bajo la condición de operación considerada. A partir de estos resultados se realizó la selección preliminar del equipo de bombeo y posteriormente se incorporó al modelo una configuración con mayores longitudes y restricciones hidráulicas, incluyendo codos y válvulas, con el propósito de representar de manera más aproximada las pérdidas que podrían presentarse en una instalación.

En la configuración final modelada se obtuvo un caudal total de 1651,00 L/min, un flujo másico de 27,48 kg/s y una diferencia de presión de 9,45 bar proporcionada por la bomba. Los caudales obtenidos en los cabezales se encontraron entre 53,75 y 56,26 L/min, manteniéndose por sobre el caudal mínimo de 50,27 L/min definido previamente para el cabezal considerado. Asimismo, las velocidades calculadas en las tuberías se encontraron entre 1,607 y 4,238 m/s, siendo la velocidad máxima registrada en el cambio de sección de 100 mm a 50 mm.

Estos resultados permiten dar cumplimiento al cuarto objetivo específico de la memoria, correspondiente al diseño de la red de extinción mediante cálculo hidráulico y modelación. La propuesta desarrollada permitió definir preliminarmente la cantidad y distribución de cabezales, los diámetros y materiales de las tuberías, las condiciones mínimas de caudal y presión y las características requeridas para el sistema de bombeo.

Respecto del quinto objetivo específico, los resultados de la simulación permiten realizar una verificación preliminar del comportamiento hidráulico de la propuesta. Los cabezales reciben caudales superiores al mínimo definido para su operación y las velocidades obtenidas se mantienen dentro de los criterios de referencia considerados durante el desarrollo del capítulo. Sin embargo, esta comprobación corresponde a una verificación hidráulica preliminar y no a una certificación definitiva del sistema. El diseño final deberá mantener concordancia con NFPA 750, las aprobaciones y ensayos correspondientes al sistema seleccionado, así como con el manual de diseño, instalación, operación y mantenimiento del fabricante.

En consecuencia, el Capítulo 4 permite concluir que, bajo las condiciones y supuestos considerados en la modelación, la red propuesta presenta capacidad hidráulica suficiente para suministrar los caudales requeridos por los cabezales seleccionados. De esta manera, se obtiene una propuesta técnicamente cuantificada que permite establecer la factibilidad hidráulica preliminar del sistema de agua nebulizada para el escenario de Data Center de alta densidad considerado en la presente memoria, quedando su implementación definitiva condicionada al desarrollo de una ingeniería de detalle y a la validación específica de la instalación.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones generales

El desarrollo de la presente memoria permitió integrar la evaluación comparativa de sistemas de extinción de incendios con el dimensionamiento hidráulico para red de una sala blanca para Data Center de alta densidad. Para el caso de referencia de 300 m², 200 racks y una potencia TI mínima estimada de 2 MW, la comparación consideró cuatro alternativas y diez criterios técnicos, económicos, operacionales y normativos. Bajo el escenario de viabilidad económica, el agua nebulizada alcanzó 38,1 puntos sobre 50, equivalentes a 76,2 %, superando en 1,2 puntos, o 2,4 puntos porcentuales, a los agentes limpios. Esta diferencia expresa una preferencia dentro del modelo de decisión adoptado (modelo de costos) y no una superioridad universal de la tecnología.

La propuesta hidráulica se configuró con 30 cabezales distribuidos en tres ramales de diez unidades, considerando su operación simultánea como supuesto de cálculo. La demanda mínima teórica fue de 1.508,08 L/min y la configuración final entregó aproximadamente 1.651,00 L/min, con descargas entre 53,75 y 56,26 L/min por cabezal. En relación con el mínimo de 50,27 L/min correspondiente a la ficha de 7 bar adoptada, el cabezal más desfavorable presentó un margen de caudal de 6,92 %. Estos resultados establecen una factibilidad hidráulica preliminar para la configuración estudiada.

El alcance del estudio no permite acreditar el desempeño del sistema frente a un incendio real, cuantificar una reducción del daño a equipos TI ni demostrar la continuidad operativa posterior al evento. Asimismo, la aplicación de la propuesta requiere completar la verificación del suministro, el NPSH, la autonomía, la disposición física de los cabezales y las aprobaciones específicas del sistema. Por consiguiente, el aporte de la memoria corresponde a una evaluación comparativa y a una base de dimensionamiento para una etapa posterior de ingeniería de detalle.

5.2 Conclusiones específicas

Primer objetivo: definición de criterios técnicos y económicos

Se definieron diez criterios de evaluación: costo de instalación, costos de operación y mantenimiento, costos de recuperación post-incidente, continuidad operativa, compatibilidad con equipos TI, impacto sobre climatización, recuperación y limpieza post-activación, eficacia en alta densidad, escalabilidad y compatibilidad normativa. Su aplicación mediante una escala de 1 a 5 y ponderaciones que suman 100 % permitió estructurar la comparación de las cuatro alternativas. En el escenario de continuidad, el mayor peso correspondió a continuidad operativa, con 18 %, mientras que en el escenario económico el costo de instalación alcanzó 16 %. Estas ponderaciones representan prioridades de evaluación del estudio y no valores prescritos por las normas.

Segundo objetivo: comparación mediante una matriz multicriterio

La comparación permitió identificar la dependencia del ranking respecto de las prioridades del proyecto. Bajo el escenario de continuidad operacional, y utilizando la misma matriz base en ambos escenarios, los agentes limpios obtuvieron 77,4 %, el agua nebulizada 75,6 %, los gases inertes 75,2 % y los rociadores 53,2 %. En el escenario económico, los resultados fueron 76,2 % para agua nebulizada, 73,8 % para agentes limpios, 70,6 % para gases inertes y 57,0 % para rociadores. El cambio de la alternativa preferente muestra la sensibilidad de la decisión a las ponderaciones y limita la extrapolación de la selección a otros proyectos.

Tercer objetivo: selección de la alternativa para el escenario definido

Para el escenario orientado a viabilidad económica e implementación, el agua nebulizada se identificó como la alternativa de mayor puntuación, con 38,1/50 puntos. Los agentes limpios alcanzaron 36,9/50, los gases inertes 35,3/50 y los rociadores 28,5/50. La diferencia de 1,2 puntos frente a los agentes limpios permite fundamentar una preferencia condicionada a las calificaciones y ponderaciones adoptadas, sin demostrar una superioridad independiente del modelo. La selección conserva las restricciones asociadas a humedad, aplicación al riesgo y condiciones de instalación del sistema.

Cuarto objetivo: diseño mediante cálculo hidráulico y modelación

Se desarrolló una configuración preliminar de agua nebulizada mediante cálculo hidráulico y modelación estacionaria en AFT Fathom 12. El cociente entre la superficie de 300 m² y la cobertura de referencia de 12,25 m² entregó un mínimo geométrico de 25 cabezales, mientras que el modelo adoptó 30 unidades en tres ramales. Con $K = 19,0 \text{ L min}^{-1} \text{ bar}^{-1/2}$ y una presión mínima de 7 bar, se determinó un caudal de 50,27 L/min por cabezal y una demanda total mínima de 1.508,08 L/min. La primera configuración reportó 1.546,04 L/min, mientras que la configuración con bomba alcanzó los 1.651,00 L/min. Estos valores diferencian la demanda teórica del caudal resultante de la interacción entre suministro y red.

Para la red se propusieron diámetros nominales de 100 mm en las conexiones principales y de 50, 40, 32 y 25 mm en los ramales, según la tabla de diseño presentada. La definición corresponde a un dimensionamiento preliminar: la distribución definitiva, las longitudes, los diámetros interiores y las pérdidas localizadas deberán quedar documentados y ajustados a la geometría real de la instalación.

Quinto objetivo: verificación normativa y operativa

La verificación hidráulica mostró caudales de 53,75 a 56,26 L/min en los cabezales, superiores al mínimo de 50,27 L/min adoptado, con un margen mínimo de 6,92 %. La comprobación mediante la relación de descarga entrega diferencias de presión equivalentes de aproximadamente 8,00 a 8,77 bar. Las velocidades de toda la red se encontraron entre 1,12 y 4,24 m/s, según el anexo de resultados. Estas magnitudes permiten comprobar el comportamiento hidráulico estacionario bajo los supuestos definidos, sin constituir una validación del desempeño de extinción.

El objetivo de verificación se alcanzó de forma parcial, debido a que permanecen pendientes la aplicación de las aprobaciones al riesgo protegido, el NPSH, la autonomía hídrica, la cobertura real y las condiciones de suministro e instalación. Por tanto, no corresponde declarar cumplimiento normativo integral ni certificación del sistema a partir de la simulación realizada. El diseño definitivo deberá verificarse con la documentación del sistema, los requisitos aplicables y las condiciones reales del sitio.

5.3 Recomendaciones

Se recomienda cerrar la trazabilidad de la matriz multicriterio mediante una ficha de evidencia por calificación, con fuente, condición de aplicación y regla de puntuación. Los escenarios deberán emplear una matriz base común. El análisis de sensibilidad debe considerar también la incertidumbre de las calificaciones, debido a la proximidad de los resultados de las alternativas mejor evaluadas.

Asimismo, se recomienda complementar el diseño preliminar con la evaluación del tratamiento del agua destinada al sistema de agua nebulizada y el dimensionamiento de su almacenamiento, aspectos que no fueron desarrollados en la presente memoria. Esta evaluación deberá considerar los requisitos de calidad y filtración del agua establecidos por el fabricante, junto con las condiciones de almacenamiento y el volumen necesario para satisfacer la autonomía requerida. Además, se recomienda estudiar la incorporación de un sistema de preacción y su integración con la detección de incendios, cuyo diseño y secuencia de activación tampoco fueron abordados en esta etapa.

Como investigación futura, se recomienda evaluar la integración de diferentes sistemas de protección contra incendios (PCI) en un Data Center completo considerando salas de oficinas, baterías, eléctricas y todo lo que conlleve el proyecto, esto mediante configuraciones complementarias adaptadas al riesgo y las características de cada sector. Este estudio podría considerar la combinación de rociadores automáticos, agua nebulizada y sistemas gaseosos, junto con su coordinación con los sistemas de detección y control. La evaluación deberá analizar la compatibilidad técnica y normativa, las secuencias de actuación y el efecto de estas configuraciones sobre los costos, la protección de los equipos TI y la continuidad operativa.

Asimismo, se recomienda estudiar la viabilidad técnica, económica y operativa de sustituir un sistema de rociadores automáticos convencionales por uno de agua nebulizada en una instalación existente. El estudio deberá establecer la posibilidad de reutilizar tuberías, bombas, válvulas y elementos de control, así como identificar los componentes que requieran sustitución o adaptación, de acuerdo con las exigencias hidráulicas, los requisitos normativos y las condiciones de aprobación del sistema seleccionado. Además, deberá considerar los costos de intervención y una secuencia de implementación que permita mantener la protección contra incendios y minimizar las interrupciones de servicio durante la transición.

Bibliografía

- [1] 24ChemicalResearch. (s. f.). *United States water mist fire extinguishing system market*. <https://www.24chemicalresearch.com/reports/280306/united-states-water-mist-fire-extinguishing-system-market>
- [2] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2021). *Thermal guidelines for data processing environments* (5th ed.). ASHRAE.
- [3] Applied Flow Technology. (s. f.-a). *Finite and infinite reservoirs*. <https://docs.aft.com/fathom/FiniteandInfiniteReservoirs.html>
- [4] Applied Flow Technology. (s. f.-b). *Pump configuration*. <https://docs.aft.com/fathom/PumpConfiguration.html>
- [5] Applied Flow Technology. (s. f.-c). *Spray discharge fire sprinklers*. <https://docs.aft.com/fathom/SprayDischargeFireSprinklers.html>
- [6] Asociación Española de Normalización. (2021a). *UNE-EN 12845:2016+A1:2021. Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de rociadores automáticos. Diseño, instalación y mantenimiento*. UNE.
- [7] Asociación Española de Normalización. (2021b). *UNE-EN 14972-1:2021. Sistemas fijos de lucha contra incendios. Sistemas de agua nebulizada. Parte 1: Diseño, instalación, inspección y mantenimiento*. UNE.
- [8] Boyd, H. D., & Locurto, C. A. (1986). Reliability and maintainability for fire protection systems. *Fire Safety Science*, 1, 963–970. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.1-963>
- [9] Brissaud, F., Barros, A., & Bérenguer, C. (2012). Probability of failure on demand of safety systems: Impact of partial test distribution. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 226(4), 426–436. <https://doi.org/10.1177/1748006X12448142>

- [10] Ceylan, O. B., Sezer, Ş. İ., & Akyuz, E. (2025). An integrated System Theoretic Accident Model and Process (STAMP)-Bayesian Network (BN) for safety analysis of water mist system on tanker ships. *Applied Ocean Research*, 154, 104344.
- [11] Cirion Technologies. (2025). *SAN2: Santiago de Chile – Cirion Data Center* [Ficha técnica].
- [12] Claro Chile Empresas. (2024, 28 de junio). *Claro alcanza ocupación del 70% de su nueva sala blanca del Data Center*. <https://blog.clarochile.cl/blog/claro-alcanza-ocupacion-del-70-de-su-nueva-sala-blanca-del-data-center/>
- [13] Creattiva Datacenter. (s. f.). *Acerca de Creattiva Datacenter*. <https://www.creattiva.cl/acerca-de/>
- [14] Data Center Map. (s. f.-a). *GTD Lídice I – Santiago*. <https://www.datacentermap.com/chile/santiago/gtd-lidice-i/>
- [15] Data Center Map. (s. f.-b). *GTD Lídice II – Santiago*. <https://www.datacentermap.com/chile/santiago/gtd-lidice-ii/>
- [16] Díaz, A. J., Cáceres, R., Cardemil, J. M., & Silva-Llanca, L. (2017). Energy and exergy assessment in a perimeter cooled data center: The value of second law efficiency. *Applied Thermal Engineering*, 124, 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.066>
- [17] Factory Mutual Insurance Company. (s. f.-a). *FM Property Loss Prevention Data Sheet 4-2: Water mist systems*. FM.
- [18] Factory Mutual Insurance Company. (s. f.-b). *FM Property Loss Prevention Data Sheet 4-9: Halocarbon and inert gas (clean agent) fire extinguishing systems*. FM.
- [19] Factory Mutual Insurance Company. (2026). *FM Property Loss Prevention Data Sheet 5-32: Data centers and related facilities*. FM.
- [20] Farrell, K., Hassan, M. K., Hossain, M. D., Ahmed, B., Rahnamayiezekavat, P., Douglas, G., & Saha, S. (2023). Water mist fire suppression systems for building and industrial applications: Issues and challenges. *Fire*, 6(2), 40. <https://doi.org/10.3390/fire6020040>
- [21] Fike Corporation. (2020). *VID FIRE-KILL OH-PX2 nozzle* [Ficha técnica, Form No. W.1.33.01].

- [22] Firetron. (s. f.-a). *Best fire suppression systems*. <https://firetron.com/fire-suppression-systems/best-fire-suppression-systems/>
- [23] Firetron. (s. f.-b). *Cost of commercial fire sprinkler installation*. <https://firetron.com/fire-sprinkler-systems/cost-commercial-fire-sprinkler-installation/>
- [24] Firetron. (s. f.-c). *Fire suppression system cost*. <https://firetron.com/fire-suppression-systems/fire-suppression-system-cost/>
- [25] Frank, K., Gravestock, N., Spearpoint, M., & Fleischmann, C. (2013). A review of sprinkler system effectiveness studies. *Fire Science Reviews*, 2, 6. <https://doi.org/10.1186/2193-0414-2-6>
- [26] Gottuk, D., Floyd, J., Dinaburg, J., & Williamson, J. (2012). *Validation of modeling tools for detection design in high air flow environments*. Fire Protection Research Foundation.
- [27] Hanauska, C. (1997). *Aspects of clean agent fire extinguishing system reliability*. Hughes Associates, Inc.
- [28] Hannaford, P. (2006). *Ten cooling solutions to support high-density server deployment* (White Paper No. 42, Rev. 2). American Power Conversion.
- [29] International Energy Agency. (s. f.). *Data centres and data transmission networks*. <https://www.iea.org/energy-system/buildings/data-centres-and-data-transmission-networks>
- [30] Johnson Controls. (s. f.). *Fire protection of data centers: Balancing economics, environment and uptime*. <https://www.johnsoncontrols.com/building-insights/feature-story/fire-protection-of-data-centers>
- [31] Kareck, T. L., Li, C.-Y., Wang, J., Gollner, M. J., & Wang, Q. (2026). From incident to insight: Fire risk in modern data centers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 100, 105890. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2025.105890>
- [32] Kraus-Namroży, N., & Brzezińska, D. (2022). Effectiveness of swirl water mist nozzles for fire suppression. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23), 16328. <https://doi.org/10.3390/ijerph192316328>

- [33] Liu, Y., Zhuo, J., Wang, D., & Li, X. (2014). Experimental research on the water mist fire suppression performance in an enclosed space by changing the characteristics of nozzles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 52, 174–181. <https://doi.org/10.1016/j.exptthermflusci.2013.09.008>
- [34] Liu, Z., & Kim, A. K. (2000). A review of water mist fire suppression systems—Fundamental studies. *Journal of Fire Protection Engineering*, 10(3), 32–50.
- [35] Loo, K. H., Lee, T. S., & Bee, S. T. (2025). A comparative review of IG-541 system use in total flooding application for energized electrical fire. *Processes*, 13(2), 485. <https://doi.org/10.3390/pr13020485>
- [36] Marioff Corporation Oy. (s. f.-a). *Fire protection for data centers*. <https://www.marioff.com/en/fire-protection-on-land/data-centers/>
- [37] Marioff Corporation Oy. (s. f.-b). *HI-FOG sprinklers*. <https://www.marioff.com/en/water-mist/system-components/sprinklers/>
- [38] Moinuddin, K., Thomas, I. R., & Chea, S. (2008). Estimating the reliability of sprinkler systems in Australian high-rise office buildings. *Fire Safety Science*, 9, 515–526. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.9-515>
- [39] National Fire Protection Association. (2017). *NFPA 75: Standard for the fire protection of information technology equipment*. NFPA.
- [40] National Fire Protection Association. (2022a). *NFPA 13: Standard for the installation of sprinkler systems*. NFPA.
- [41] National Fire Protection Association. (2022b). *NFPA 20: Standard for the installation of stationary pumps for fire protection*. NFPA.
- [42] National Fire Protection Association. (2022c). *NFPA 2001: Standard on clean agent fire extinguishing systems*. NFPA.
- [43] National Fire Protection Association. (2023). *NFPA 750: Standard on water mist fire protection systems*. NFPA.
- [44] Ñaupas Paitán, H., Valdivia Dueñas, M. R., Palacios Vilela, J. J., & Romero Delgado, H. E. (2019). *Metodología de la investigación cuantitativa-cualitativa y redacción de la tesis* (5.^a ed.). Ediciones de la U.

- [45] Ponemon Institute. (2013). *2013 cost of data center outages*. Ponemon Institute & Emerson Network Power.
- [46] Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)
- [47] Telescent. (2022). *How to operationalize edge data centers using automation*. <https://www.telescent.com/blog/2022/1/14/how-to-operationalize-edge-data-centers-using-automation>
- [48] Thummuluru, S., Ditch, B., Chatterjee, P., & Chaos, M. (2014). *Experimental data for model validation of smoke transport in data centers*. FM Research.
- [49] Uptime Institute. (2023). *Annual outage analysis 2023*. <https://intelligence.uptimeinstitute.com/resource/annual-outage-analysis-2023>
- [50] Uptime Institute. (2024). *Annual outage analysis 2024*. <https://intelligence.uptimeinstitute.com/resource/annual-outage-analysis-2024>
- [51] VID Fire Kill ApS. (s. f.-a). *Automatic low-pressure nozzle: Model OH-DC1* [Ficha técnica]. https://vidfirekill.com/wp-content/uploads/2022/01/DS_OHDC1_UK_FM-1.pdf
- [52] VID Fire Kill ApS. (s. f.-b). *Automatic low-pressure nozzle: Model OH-DC2* [Ficha técnica]. https://vidfirekill.com/wp-content/uploads/2022/12/DS_OHDC2_DE_FM.pdf
- [53] VID Fire Kill ApS. (s. f.-c). *Automatic low-pressure nozzle: Model OH-VSO* [Ficha técnica]. https://vidfirekill.com/wp-content/uploads/2022/01/DS_OHVS0_UK_FM.pdf
- [54] Viking EMEA. (s. f.-a). *MX3-P EA: EconAqua spray sprinkler*. <https://www.viking-emea.com/product/mx3-p-ea/>
- [55] Viking EMEA. (s. f.-b). *MX3-U EA: EconAqua spray sprinkler*. <https://www.viking-emea.com/product/mx3-u-ea/>
- [56] Wheatland Tube. (s. f.). *Schedule 40 fire sprinkler pipe* [Ficha técnica].
- [57] Xylem Inc. (s. f.). *A-C Fire Pump Series 1580 In-Line Configu-Pac* [Catálogo técnico].
- [58] Xu, S., & Susemihl, E. A. (2007). Reliability analysis of water mist systems. En *ASME 2007 International Mechanical Engineering Congress and Exposition* (pp. 37–40). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/IMECE2007-41046>

- [59] Žilić Schmidt, I. (2024). *Publicación sobre incendio en Data Center con infraestructura de PIT Chile* [Publicación de LinkedIn].
- [60] Morales-Araya, F. E. (2017). *Diseño de sistema de supresión de incendios de agua nebulizada en un edificio de varios niveles en un ingenio azucarero y comparación con sistema prediseñado de gabinetes* [Proyecto de graduación de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica]. Repositorio TEC. <https://hdl.handle.net/2238/7359>
- [61] Aperam. (s. f.). *Acero inoxidable austenítico: Aperam 316L bajo contenido de carbono con molibdeno* [Ficha técnica]. https://www.aperam.com/sites/default/files/documents/FT_316L_es_web.pdf
- [62] VID Fire-Kill ApS. (2021). *Product data sheet: Automatic low-pressure nozzle, Model OH-PX2 Non-Storage* (No. DS-211217-01-01 OHPX2 CEN, Rev. 01). https://vidfirekill.com/wp-content/uploads/2023/01/DS_OHPX2_HC2_3_UK_IBS7.6.pdf
- [63] National Fire Protection Association. (2019). *NFPA 20-ES: Norma para la instalación de bombas estacionarias de protección contra incendios*. NFPA.
- [64] AC Fire Pump. (s. f.). *Fire pump selection*. <https://www.selectacfirepump.com/pumps>

Apéndice A

Resultados de la modelación hidráulica

En el presente anexo se incorporan los resultados detallados obtenidos mediante la modelación hidráulica desarrollada en AFT Fathom 12. Se presentan los resultados correspondientes a la modelación preliminar y a la configuración final de la red.

A.1 Resultados preliminares de accesorios

Los siguientes resultados corresponden a los accesorios, nodos y cabezales considerados en la modelación hidráulica preliminar.

	P Static In bar	P Static Out bar	P Stag. In bar	P Stag. Out bar	Vol. Flow Rate Thru Jct m3/hr
J1 (Assigned Pressure)	9,33	9,33	9,38	9,38	92,76
J2 (Branch)	9,17	9,17	9,19	9,19	N/A
J101 (Area Change)	9,18	9,09	9,18	9,17	30,92
J102 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,68	1,00	N/A
J103 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,59	1,00	N/A
J104 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,53	1,00	N/A
J105 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,47	1,00	N/A
J106 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,43	1,00	N/A
J107 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,33	1,00	N/A
J108 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,27	1,00	N/A
J109 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,19	1,00	N/A
J110 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,04	1,00	N/A
J111 (Spray Discharge)	7,99	1,00	8,01	1,00	3,02
J201 (Area Change)	9,18	9,09	9,18	9,17	30,92
J202 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,68	1,00	N/A
J203 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,59	1,00	N/A
J204 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,53	1,00	N/A
J205 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,47	1,00	N/A
J206 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,43	1,00	N/A
J207 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,33	1,00	N/A
J208 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,27	1,00	N/A
J209 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,19	1,00	N/A
J210 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,04	1,00	N/A
J211 (Spray Discharge)	7,99	1,00	8,01	1,00	3,02
J301 (Area Change)	9,18	9,09	9,18	9,17	30,92
J302 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,68	1,00	N/A
J303 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,59	1,00	N/A
J304 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,53	1,00	N/A
J305 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,47	1,00	N/A
J306 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,43	1,00	N/A
J307 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,33	1,00	N/A
J308 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,27	1,00	N/A
J309 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,19	1,00	N/A
J310 (Spray Discharge)	N/A	1,00	8,04	1,00	N/A
J311 (Spray Discharge)	7,99	1,00	8,01	1,00	3,02

Mass Flow Rate Thru Jct kg/sec	Loss Factor (K)	Vol. Flow Rate Jct Net liter/min
25,73	0,00	-1546,04
N/A	0,00	0,00
8,58	3,24	0,00
N/A	9355,55	52,67
N/A	9355,55	52,37
N/A	9355,55	52,13
N/A	9355,55	51,95
N/A	9355,55	51,81
N/A	3443,59	51,47
N/A	3443,59	51,24
N/A	1858,76	50,96
N/A	620,60	50,44
0,84	620,60	50,30
8,58	3,24	0,00
N/A	9355,55	52,67
N/A	9355,55	52,37
N/A	9355,55	52,13
N/A	9355,55	51,95
N/A	9355,55	51,81
N/A	3443,59	51,47
N/A	3443,59	51,24
N/A	1858,76	50,96
N/A	620,60	50,44
0,84	620,60	50,30
8,58	3,24	0,00
N/A	9355,55	52,67
N/A	9355,55	52,37
N/A	9355,55	52,13
N/A	9355,55	51,95
N/A	9355,55	51,81
N/A	3443,59	51,47
N/A	3443,59	51,24
N/A	1858,76	50,96
N/A	620,60	50,44
0,84	620,60	50,30

A.2 Resultados preliminares de tuberías

Los siguientes resultados presentan los parámetros hidráulicos obtenidos para las tuberías correspondientes a la configuración preliminar de la red.

	Vol. Flow Rate	Velocity	P Static Max	P Static Min	Elevation Inlet	Elevation Outlet
	m3/hr	meters/sec	bar	bar	meters	meters
P1 (Pipe)	92,76	3,14	9,33	9,14	1,00	0,30
P101 (Pipe)	30,92	1,05	9,18	9,18	0,30	0,30
P102 (Pipe)	30,92	3,97	9,09	8,60	0,30	4,00
P103 (Pipe)	27,76	3,56	8,62	8,53	4,00	4,00
P104 (Pipe)	24,62	3,16	8,54	8,48	4,00	4,00
P105 (Pipe)	21,49	2,76	8,49	8,43	4,00	4,00
P106 (Pipe)	18,37	2,36	8,44	8,41	4,00	4,00
P107 (Pipe)	15,27	3,23	8,38	8,28	4,00	4,00
P108 (Pipe)	12,18	2,58	8,30	8,24	4,00	4,00
P109 (Pipe)	9,10	2,62	8,24	8,16	4,00	4,00
P110 (Pipe)	6,04	3,01	8,15	8,00	4,00	4,00
P111 (Pipe)	3,02	1,50	8,03	7,99	4,00	4,00
P201 (Pipe)	30,92	1,05	9,18	9,18	0,30	0,30
P202 (Pipe)	30,92	3,97	9,09	8,60	0,30	4,00
P203 (Pipe)	27,76	3,56	8,62	8,53	4,00	4,00
P204 (Pipe)	24,62	3,16	8,54	8,48	4,00	4,00
P205 (Pipe)	21,49	2,76	8,49	8,43	4,00	4,00
P206 (Pipe)	18,37	2,36	8,44	8,41	4,00	4,00
P207 (Pipe)	15,27	3,23	8,38	8,28	4,00	4,00
P208 (Pipe)	12,18	2,58	8,30	8,24	4,00	4,00
P209 (Pipe)	9,10	2,62	8,24	8,16	4,00	4,00
P210 (Pipe)	6,04	3,01	8,15	8,00	4,00	4,00
P211 (Pipe)	3,02	1,50	8,03	7,99	4,00	4,00
P301 (Pipe)	30,92	1,05	9,18	9,18	0,30	0,30
P302 (Pipe)	30,92	3,97	9,09	8,60	0,30	4,00
P303 (Pipe)	27,76	3,56	8,62	8,53	4,00	4,00
P304 (Pipe)	24,62	3,16	8,54	8,48	4,00	4,00
P305 (Pipe)	21,49	2,76	8,49	8,43	4,00	4,00
P306 (Pipe)	18,37	2,36	8,44	8,41	4,00	4,00
P307 (Pipe)	15,27	3,23	8,38	8,28	4,00	4,00
P308 (Pipe)	12,18	2,58	8,30	8,24	4,00	4,00
P309 (Pipe)	9,10	2,62	8,24	8,16	4,00	4,00
P310 (Pipe)	6,04	3,01	8,15	8,00	4,00	4,00
P311 (Pipe)	3,02	1,50	8,03	7,99	4,00	4,00

dP Stag. Total bar	dP Static Total bar	dH meters	P Static In bar	P Static Out bar	P Stag. In bar	P Stag. Out bar
0,19	0,19	2,62	9,33	9,14	9,38	9,19
0,00	0,00	0,04	9,18	9,18	9,19	9,18
0,48	0,48	1,25	9,09	8,60	9,17	8,68
0,09	0,09	0,89	8,62	8,53	8,68	8,59
0,07	0,07	0,70	8,54	8,48	8,59	8,53
0,05	0,05	0,54	8,49	8,43	8,53	8,47
0,04	0,04	0,40	8,44	8,41	8,47	8,43
0,10	0,10	1,00	8,38	8,28	8,43	8,33
0,06	0,06	0,65	8,30	8,24	8,33	8,27
0,08	0,08	0,81	8,24	8,16	8,27	8,19
0,15	0,15	1,50	8,15	8,00	8,19	8,04
0,04	0,04	0,40	8,03	7,99	8,04	8,01
0,00	0,00	0,04	9,18	9,18	9,19	9,18
0,48	0,48	1,25	9,09	8,60	9,17	8,68
0,09	0,09	0,89	8,62	8,53	8,68	8,59
0,07	0,07	0,70	8,54	8,48	8,59	8,53
0,05	0,05	0,54	8,49	8,43	8,53	8,47
0,04	0,04	0,40	8,44	8,41	8,47	8,43
0,10	0,10	1,00	8,38	8,28	8,43	8,33
0,06	0,06	0,65	8,30	8,24	8,33	8,27
0,08	0,08	0,81	8,24	8,16	8,27	8,19
0,15	0,15	1,50	8,15	8,00	8,19	8,04
0,04	0,04	0,40	8,03	7,99	8,04	8,01
0,00	0,00	0,04	9,18	9,18	9,19	9,18
0,48	0,48	1,25	9,09	8,60	9,17	8,68
0,09	0,09	0,89	8,62	8,53	8,68	8,59
0,07	0,07	0,70	8,54	8,48	8,59	8,53
0,05	0,05	0,54	8,49	8,43	8,53	8,47
0,04	0,04	0,40	8,44	8,41	8,47	8,43
0,10	0,10	1,00	8,38	8,28	8,43	8,33
0,06	0,06	0,65	8,30	8,24	8,33	8,27
0,08	0,08	0,81	8,24	8,16	8,27	8,19
0,15	0,15	1,50	8,15	8,00	8,19	8,04
0,04	0,04	0,40	8,03	7,99	8,04	8,01

A.3 Resultados finales de accesorios

Los siguientes resultados corresponden a los accesorios, nodos, cabezales, reservorio y equipo de bombeo incorporados en la configuración final de la red.

	P Static In bar	P Static Out bar	P Stag. In bar	P Stag. Out bar	Vol. Flow Rate Thru Jct m3/hr
J1 (Reservoir)	1,01	1,41	1,01	1,41	99,06
J2 (Pump)	1,37	10,86	1,43	10,91	99,06
J3 (Branch)	10,27	10,27	10,29	10,29	N/A
J101 (Area Change)	10,28	10,17	10,28	10,26	33,03
J102 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,76	1,00	N/A
J103 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,66	1,00	N/A
J104 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,59	1,00	N/A
J105 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,53	1,00	N/A
J106 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,48	1,00	N/A
J107 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,37	1,00	N/A
J108 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,30	1,00	N/A
J109 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,21	1,00	N/A
J110 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,04	1,00	N/A
J111 (Spray Discharge)	8,99	1,00	9,00	1,00	3,22
J201 (Area Change)	10,28	10,17	10,28	10,26	33,03
J202 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,76	1,00	N/A
J203 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,66	1,00	N/A
J204 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,59	1,00	N/A
J205 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,53	1,00	N/A
J206 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,48	1,00	N/A
J207 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,37	1,00	N/A
J208 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,30	1,00	N/A
J209 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,21	1,00	N/A
J210 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,04	1,00	N/A
J211 (Spray Discharge)	8,99	1,00	9,00	1,00	3,22
J301 (Area Change)	10,28	10,17	10,28	10,26	33,03
J302 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,76	1,00	N/A
J303 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,66	1,00	N/A
J304 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,59	1,00	N/A
J305 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,53	1,00	N/A
J306 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,48	1,00	N/A
J307 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,37	1,00	N/A
J308 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,30	1,00	N/A
J309 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,21	1,00	N/A
J310 (Spray Discharge)	N/A	1,00	9,04	1,00	N/A
J311 (Spray Discharge)	8,99	1,00	9,00	1,00	3,22

Mass Flow Rate Thru Jct kg/sec	Loss Factor (K)	Vol. Flow Rate Jct Net liter/min
27,48	0,00	-1650,94
27,48	0,00	0,00
N/A	0,00	0,00
9,16	3,24	0,00
N/A	9355,55	56,26
N/A	9355,55	55,94
N/A	9355,55	55,68
N/A	9355,55	55,49
N/A	9355,55	55,34
N/A	3443,59	54,98
N/A	3443,59	54,74
N/A	1858,76	54,44
N/A	620,60	53,89
0,89	620,60	53,75
9,16	3,24	0,00
N/A	9355,55	56,26
N/A	9355,55	55,94
N/A	9355,55	55,68
N/A	9355,55	55,49
N/A	9355,55	55,34
N/A	3443,59	54,98
N/A	3443,59	54,74
N/A	1858,76	54,44
N/A	620,60	53,89
0,89	620,60	53,75
9,16	3,24	0,00
N/A	9355,55	56,26
N/A	9355,55	55,94
N/A	9355,55	55,68
N/A	9355,55	55,49
N/A	9355,55	55,34
N/A	3443,59	54,98
N/A	3443,59	54,74
N/A	1858,76	54,44
N/A	620,60	53,89
0,89	620,60	53,75

A.4 Resultados finales de tuberías

Los siguientes resultados presentan los parámetros hidráulicos obtenidos para las tuberías correspondientes a la configuración final de la red, incluyendo caudales, velocidades, presiones y pérdidas de carga.

	Vol. Flow Rate	Velocity	P Static Max	P Static Min	Elevation Inlet	Elevation Outl
	m3/hr	meters/sec	bar	bar	meters	meters
P1 (Pipe)	99,06	3,35	1,37	1,35	1,00	0,30
P2 (Pipe)	99,06	3,35	10,86	10,23	0,30	0,30
P101 (Pipe)	33,03	1,12	10,28	10,28	0,30	0,30
P102 (Pipe)	33,03	4,24	10,17	9,67	0,30	4,00
P103 (Pipe)	29,64	3,80	9,69	9,59	4,00	4,00
P104 (Pipe)	26,29	3,37	9,61	9,53	4,00	4,00
P105 (Pipe)	22,95	2,94	9,54	9,48	4,00	4,00
P106 (Pipe)	19,63	2,52	9,49	9,45	4,00	4,00
P107 (Pipe)	16,30	3,45	9,42	9,31	4,00	4,00
P108 (Pipe)	13,01	2,75	9,33	9,26	4,00	4,00
P109 (Pipe)	9,72	2,80	9,26	9,17	4,00	4,00
P110 (Pipe)	6,46	3,22	9,16	8,99	4,00	4,00
P111 (Pipe)	3,22	1,61	9,03	8,99	4,00	4,00
P201 (Pipe)	33,03	1,12	10,28	10,28	0,30	0,30
P202 (Pipe)	33,03	4,24	10,17	9,67	0,30	4,00
P203 (Pipe)	29,64	3,80	9,69	9,59	4,00	4,00
P204 (Pipe)	26,29	3,37	9,61	9,53	4,00	4,00
P205 (Pipe)	22,95	2,94	9,54	9,48	4,00	4,00
P206 (Pipe)	19,63	2,52	9,49	9,45	4,00	4,00
P207 (Pipe)	16,30	3,45	9,42	9,31	4,00	4,00
P208 (Pipe)	13,01	2,75	9,33	9,26	4,00	4,00
P209 (Pipe)	9,72	2,80	9,26	9,17	4,00	4,00
P210 (Pipe)	6,46	3,22	9,16	8,99	4,00	4,00
P211 (Pipe)	3,22	1,61	9,03	8,99	4,00	4,00
P301 (Pipe)	33,03	1,12	10,28	10,28	0,30	0,30
P302 (Pipe)	33,03	4,24	10,17	9,67	0,30	4,00
P303 (Pipe)	29,64	3,80	9,69	9,59	4,00	4,00
P304 (Pipe)	26,29	3,37	9,61	9,53	4,00	4,00
P305 (Pipe)	22,95	2,94	9,54	9,48	4,00	4,00
P306 (Pipe)	19,63	2,52	9,49	9,45	4,00	4,00
P307 (Pipe)	16,30	3,45	9,42	9,31	4,00	4,00
P308 (Pipe)	13,01	2,75	9,33	9,26	4,00	4,00
P309 (Pipe)	9,72	2,80	9,26	9,17	4,00	4,00
P310 (Pipe)	6,46	3,22	9,16	8,99	4,00	4,00
P311 (Pipe)	3,22	1,61	9,03	8,99	4,00	4,00

dP Stag. Total bar	dP Static Total bar	dP Gravity bar	dH meters	P Static In bar	P Static Out bar	P Stag. In bar
-0,02	-0,02	-0,07	0,50	1,35	1,37	1,41
0,62	0,62	0,00	6,37	10,86	10,23	10,91
0,00	0,00	0,00	0,04	10,28	10,28	10,29
0,50	0,50	0,36	1,42	10,17	9,67	10,26
0,10	0,10	0,00	1,01	9,69	9,59	9,76
0,08	0,08	0,00	0,80	9,61	9,53	9,66
0,06	0,06	0,00	0,62	9,54	9,48	9,59
0,04	0,04	0,00	0,46	9,49	9,45	9,53
0,11	0,11	0,00	1,14	9,42	9,31	9,48
0,07	0,07	0,00	0,74	9,33	9,26	9,37
0,09	0,09	0,00	0,92	9,26	9,17	9,30
0,17	0,17	0,00	1,70	9,16	8,99	9,21
0,04	0,04	0,00	0,42	9,03	8,99	9,04
0,00	0,00	0,00	0,04	10,28	10,28	10,29
0,50	0,50	0,36	1,42	10,17	9,67	10,26
0,10	0,10	0,00	1,01	9,69	9,59	9,76
0,08	0,08	0,00	0,80	9,61	9,53	9,66
0,06	0,06	0,00	0,62	9,54	9,48	9,59
0,04	0,04	0,00	0,46	9,49	9,45	9,53
0,11	0,11	0,00	1,14	9,42	9,31	9,48
0,07	0,07	0,00	0,74	9,33	9,26	9,37
0,09	0,09	0,00	0,92	9,26	9,17	9,30
0,17	0,17	0,00	1,70	9,16	8,99	9,21
0,04	0,04	0,00	0,42	9,03	8,99	9,04
0,00	0,00	0,00	0,04	10,28	10,28	10,29
0,50	0,50	0,36	1,42	10,17	9,67	10,26
0,10	0,10	0,00	1,01	9,69	9,59	9,76
0,08	0,08	0,00	0,80	9,61	9,53	9,66
0,06	0,06	0,00	0,62	9,54	9,48	9,59
0,04	0,04	0,00	0,46	9,49	9,45	9,53
0,11	0,11	0,00	1,14	9,42	9,31	9,48
0,07	0,07	0,00	0,74	9,33	9,26	9,37
0,09	0,09	0,00	0,92	9,26	9,17	9,30
0,17	0,17	0,00	1,70	9,16	8,99	9,21
0,04	0,04	0,00	0,42	9,03	8,99	9,04

P Stag. Out
bar

1,43
10,29
10,28
9,76
9,66
9,59
9,53
9,48
9,37
9,30
9,21
9,04
9,00
10,28
9,76
9,66
9,59
9,53
9,48
9,37
9,30
9,21
9,04
9,00
10,28
9,76
9,66
9,59
9,53
9,48
9,37
9,30
9,21
9,04
9,00

Índice de figuras

4.1	NFPA 20, Tabla 4.28(b), Summary of Centrifugal Fire Pump Data (Metric).	60
4.2	NFPA, Tabla 28.5.2.2.1 light Hazard Pipe Schedules.	61
4.3	NFPA, Tabla 19.2.2.1 Water Supply Requirements for Pipe Schedule Light Sprinkler Systems.	61
4.4	Configuración de la red hidráulica modelada en AFT Fathom.	65
4.5	Curva de la bomba.	67
4.6	Diseño de red PCI.	68

Índice de tablas

1.1 Rangos referenciales de costo de instalación para sistemas de extinción aplicables a Data Centers / infraestructura crítica	14
2.1 Referencias de salas blancas y densidad de potencia en Data Centers	21
3.1 Criterios de evaluación multicriterio para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad	30
3.2 Escala de puntuación para la evaluación multicriterio	35
3.3 Ponderaciones propuestas para la matriz multicriterio	38
3.4 Matriz preliminar de puntajes para sistemas de extinción en salas blancas	40
3.5 Matriz de puntaje ponderado para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad	42
3.6 Ponderaciones definitivas para la matriz multicriterio	44
3.7 Matriz definitiva de puntaje y ponderación para sistemas de extinción en salas blancas de Data Centers de alta densidad	46
3.8 Ranking final de sistemas de extinción evaluados	47
4.1 Cabezales de agua nebulizada disponibles para aplicaciones tecnológicas	55
4.2 Diámetros y materiales de tubería considerados en la red hidráulica	64