

1ª edición
Octubre 2024

Los Agentes Extintores

El Agua Nebulizada



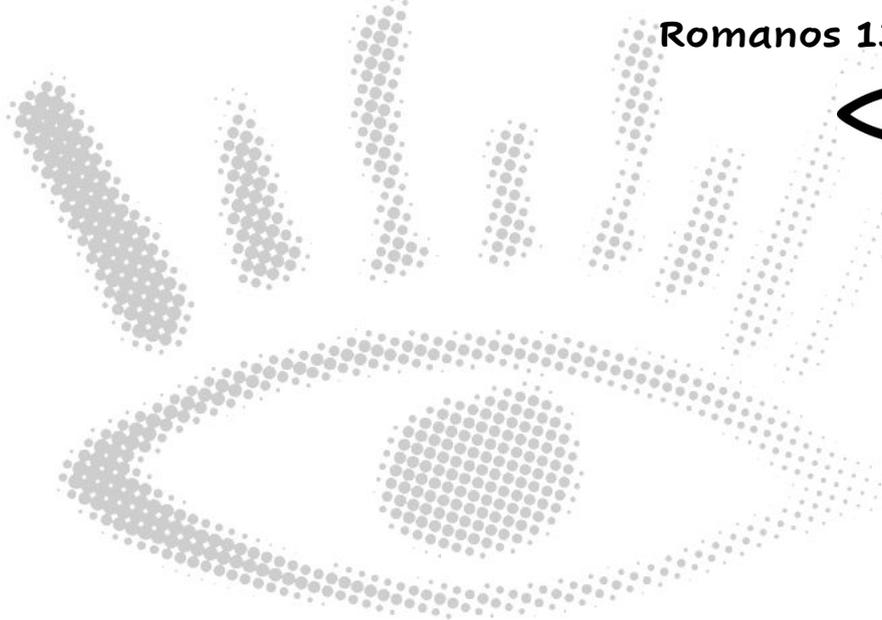
Ing. Néstor Adolfo BOTTA



www.redproteger.com.ar

*“No tengan deudas pendientes con nadie
a no ser la de amarse unos a otros.
De hecho, quien ama al prójimo ha cumplido la Ley.
Porque los mandamientos que dicen:
«No cometas adulterio»,
«no mates»,
«no robes»,
«no codicies»,
y todos los demás mandamientos,
se resumen en este precepto:
«Ama a tu prójimo como a ti mismo».
El amor no perjudica al prójimo.
Así que el amor es el cumplimiento de la Ley.”*

Romanos 13:8-10 NVI



EL AUTOR

Néstor Adolfo BOTTA es Ingeniero Mecánico recibido en el año 1992 en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata; Ingeniero Laboral recibido en el año 1995 en la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata; Diplomado en Ergonomía recibido en el año 2018 en la Facultad de Química e Ingeniería del Rosario de la Pontificia Universidad Católica Argentina; y Diplomado en Sistemas Integrados de Gestión recibido en el año 2021 en la Universidad Nacional de Lomas de Zamora.

Estudiante de la Diplomatura en Teología en el Instituto Bíblico Río de La Plata desde el 2022.

Es el Titular de la empresa Red Proteger, empresa dedicada a la Capacitación y Divulgación de conocimientos en materia de seguridad e higiene en el trabajo (www.redproteger.com.ar).

Desarrolló funciones como Responsable de Higiene y Seguridad en el Trabajo en empresas como SOIME SRL, TRADIGRAIN ARGENTINA SA, AMANCO ARGENTINA SA, MOLINOS RÍO DE LA PLATA SA y SEVEL ARGENTINA SA.

Asesoró a diversas empresas entre las que se destacan AKZO NOBEL SA, CERVECERÍA Y MALTERÍA QUILMES SAICAYG y APACHE ENERGÍA ARGENTINA SRL.

Su extensa actividad docente lo ubica como:

- Profesor en la UCA de Ing. de Rosario para la Carrera de Posgrado de Higiene y Seguridad en el Trabajo en la asignatura de Riesgo y Protección de Incendios y Explosiones.
- Profesor Titular en la Universidad Nacional del Litoral para la Carrera de Técnico en Seguridad Contra Incendios en la asignatura de Seguridad Contra Incendios III. Sistema de educación a distancia.
- Profesor en la Universidad Nacional del Litoral - Sede Rosario, para la Carrera de Lic. en Seguridad y Salud Ocupacional en la asignatura de Práctica Profesional.
- Profesor Titular en el Instituto Superior Federico Grote (Rosario - Santa Fe) para la Carrera de "Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo" para las asignaturas de Higiene y Seguridad en el Trabajo I, Seminario Profesional, Prevención y Control de Incendios II, y Prevención y Control de Incendios I.
- Profesor Interino Cátedra "Elementos de Mecánica". Carrera "Técnico Superior en Seguridad e Higiene en el Trabajo". ISFD Nro. 12 La Plata - 1.996
- Ayudante Alumno Cátedra "Termodinámica". Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ingeniería.
- Ayudante Alumno Cátedra "Análisis Matemático". Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencia Económicas.

©Todos los derechos reservados.

El derecho de propiedad de esta obra comprende para su autor la facultad exclusiva de disponer de ella, publicarla, traducirla, adaptarla o autorizar su traducción y reproducirla en cualquier forma, total o parcial, por medios electrónicos o mecánicos, incluyendo fotocopia, copia xerográfica, grabación magnetofónica y cualquier sistema de almacenamiento de información. Por consiguiente, ninguna persona física o jurídica está facultada para ejercitar los derechos precitados sin permiso escrito del Autor.

Editorial Red Proteger®
Rosario – Argentina
info@redproteger.com.ar
www.redproteger.com.ar

ÍNDICE

- 1) ¿Qué es el Agua Nebulizada?
- 2) Tamaño de las Gotas
- 3) El Efecto del Agua En Gotas
- 4) Surgimiento del Agua Pulverizada
- 5) Usos
- 6) Ventajas
- 7) Limitaciones
- 8) Mecanismos de Extinción
- 9) Extracción de Calor (Enfriamiento)
 - 9.1) El Enfriamiento y los Combustibles Líquidos
 - 9.2) Efecto sobre los Líquidos Inflamables Sobreambientales
 - 9.3) Efecto sobre los Líquidos Inflamables Subambientales
 - 9.4) El Enfriamiento y los Combustibles Sólidos
- 10) Desplazamiento del Oxígeno
 - 10.1) El Efecto de la Temperatura del Ambiente y el Vapor
 - 10.2) Tamaño del Incendio. Técnica de Pulverización de Ciclo Cortado
 - 10.3) Cantidad de Oxígeno según el Combustible
 - 10.4) Efectividad en Ambientes Cerrados y Ambientes Abiertos
 - 10.5) Incendios Grandes Versus Incendios Pequeños
- 11) Bloqueo del Calor Radiante
- 12) Dilución de la Mezcla Vapor/Aire
- 13) Efectos Cinéticos de la Nebulización Sobre las Llamas
- 14) Efectos del Cerramiento
 - 14.1) El Proceso de la Extinción en Compartimentos Pequeños
 - 14.2) El Tamaño del Incendio en Relación con el Tamaño del Cerramiento
 - 14.3) La Presión Dentro del Cerramiento

- 14.4) Incendios en Ambientes Abiertos o sin Confinar
- 15) Los Aditivos
 - 15.1) El Cloruro de Sodio
 - 15.2) Aditivos AFFF
 - 15.3) Otros Aditivos



1) ¿QUÉ ES EL AGUA NEBULIZADA?

El término "agua nebulizada" implica una pulverización de agua tan fina que permanece suspendida en el aire durante un periodo de tiempo extendido.

El término refleja una de las cualidades de la nebulización respecto a una pulverización de agua tradicional, los tamaños de las gotas son "pequeñitos" en relación con las pulverizaciones de los rociadores.

El proceso de la nebulización implica la ruptura del agua en gotas extremadamente pequeñas, generalmente mediante el uso de dispositivos como nebulizadores o pulverizadores. Estos dispositivos pueden generar una niebla o aerosol de agua con gotas muy finas, que pueden ser tan pequeñas como micrómetros.

2) TAMAÑO DE LAS GOTAS

Las primeras investigaciones con pulverizaciones finas de agua fueron motivadas por el hecho de que las gotas de tamaños "pequeños" aumentan la evaporación y la extracción de calor, utilizando pequeños volúmenes de agua.

Las investigaciones se enfocaron principalmente en los incendios de charco de combustibles líquidos, para los cuales, los beneficios deseados se pueden conseguir con pulverizaciones que tengan gotas con diámetros de 400 micrones o menos.

Sin embargo, el reciente interés por utilizar agua nebulizada para aplicaciones que involucran combustibles sólidos sugiere que se debe incluir pulverizaciones con tamaños de gotas superiores a los 400 micrones. Los tamaños de las gotas superiores a 400 micrones permiten el humedecimiento del combustible, un mecanismo importante para la extinción de incendios en combustibles sólidos y en sustancias que se carbonizan.

Por lo tanto, los sistemas de agua nebulizada son aplicables a un amplio rango de escenarios de incendio, incluyendo los combustibles líquidos al igual que los sólidos.

La definición de "agua nebulizada" en la NFPA 750: Sistemas de Protección Contra Incendios de Agua Nebulizada, incluye pulverizaciones para las cuales el noventa y nueve por ciento del volumen de la pulverización está contenido en gotas de menos de 1.000 micrones de diámetro.

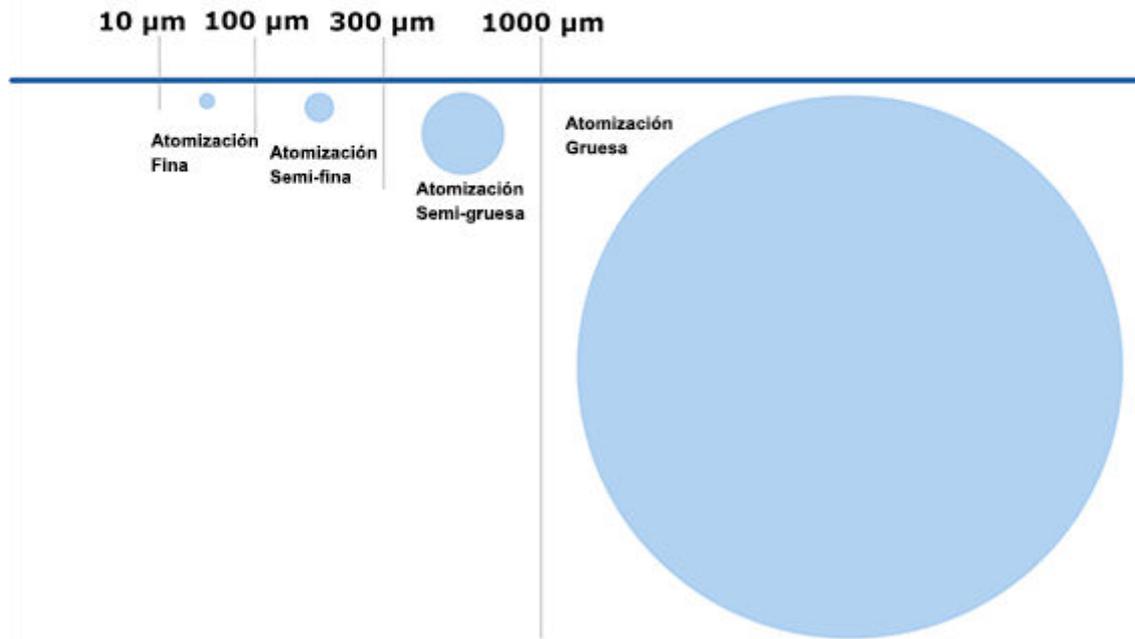
La distribución del tamaño de la gota¹ que sería la más efectiva en un escenario de incendio no necesariamente será la mejor para un segundo escenario. No existe "una que sirva para todos".

El tipo de combustible (sólido o líquido), las dimensiones del compartimiento, la velocidad a la cual se descarga la nebulización, entre otros, determinan conjuntamente la distribución más apropiada del tamaño de las gotas para una aplicación en particular.

Esta característica del tamaño de la gota no es la única característica de una pulverización que debe tenerse en cuenta con el fin de generar un medio efectivo de extinción del fuego. Existen otras características que tienen influencia sobre la efectividad como agente extintor:

1. La distribución del tamaño de las gotas.
2. La densidad del flujo: densidad de la pulverización, es decir, la masa de agua suspendida por unidad de volumen del espacio.
3. La impulsión del chorro: velocidad con que es descargada sobre el fuego.
4. La calidad del agua en sí, la cual puede contener aditivos disueltos para aumentar la efectividad de la supresión.

¹ El termino distribución del tamaño de las gotas se refiere al rango de los tamaños de las gotas contenidas en una muestra representativa de una pulverización o nebulización.



3) EL EFECTO DEL AGUA EN GOTAS²

La extinción de un incendio no sólo es cuestión de cuanto calor se puede absorber, sino la cantidad de calor por unidad de tiempo, dado que la combustión es un proceso dinámico.

La pelea de la extinción es un juego, en principio de calores, entre el calor generado y el calor absorbido, para ganar esta batalla hay que descargar agua de manera que ésta pueda absorber el máximo de calor en el menor tiempo posible.

El agua absorbe el máximo de calor no sólo cuando se transforma en vapor, sino también cuando se aplica pulverizada en pequeñas gotas en vez de hacerlo como un chorro compacto.

Para entender en profundidad el tema hay ciertos conceptos que es conveniente repasar y tener en claro:

² En el siguiente análisis se considerará solamente la capacidad de absorber calor del agua.

Primer Concepto

La cantidad de calor que absorbe un cuerpo, como el agua, está determinada por su masa siguiendo las siguientes fórmulas:

1° Etapa de Calentamiento del agua

$$Q = c \times m \times \Delta T$$

2° Etapa de Cambio de Estado del agua

$$Q = c_v \times m$$

Cómo c , c_v y ΔT son constantes, queda claro que la cantidad de calor absorbida por un cuerpo está en función de la masa de ese cuerpo:

$$Q = f(m)$$

Un kilogramo de agua absorbe 80 kcal para llevarla de 20 °C a 100 °C y 540 kcal para evaporarla en forma completa, indistintamente del estado de disgregación³ en que se encuentre.

En principio, mientras más cantidad de agua se arroje al incendio se está en condiciones de absorber más cantidad de calor.

³ Sinónimos: desintegración, dispersión, división, descomposición, desmenuzamiento, fragmentación, desarticulación, separación, desmoronamiento, desunión, atomización, desbandada.

Segundo Concepto

En un día frío colocamos nuestro cuerpo de frente a una fuente de calor, pero muy raramente nos ubiquemos de perfil, porque intuitivamente sabemos que recibiremos menor cantidad de calor, percibimos que la cantidad de calor es directamente proporcional a la superficie expuesta a la fuente de calor.

En calor ingresa a un cuerpo por la superficie de este. A mayor superficie expuesta mayor es la velocidad con que un cuerpo absorbe calor.

Tercer Concepto

Para un volumen dado de agua la superficie aumenta drásticamente si ésta se convierte en gotas. Para que no queden dudas respecto a este punto, vayamos a la siguiente demostración donde se exponen dos gotas de agua a la misma fuente de calor:

- **Gota A**

Gota de 1 kg de agua, en forma plana de 1 mm de espesor y de forma cuadrada de 5 mm de lado (imagen A).

- **Gota B**

La misma gota de 1 kg de agua dividida en 25 gotas más pequeñas de 1 mm de lado cada una (imagen B).

¿Qué sucede cuando estas gotas se exponen a un proceso de transferencia de calor, que para nuestro caso tan especial, se transfiere sólo por la superficie perimetral de las gotas cuadradas?

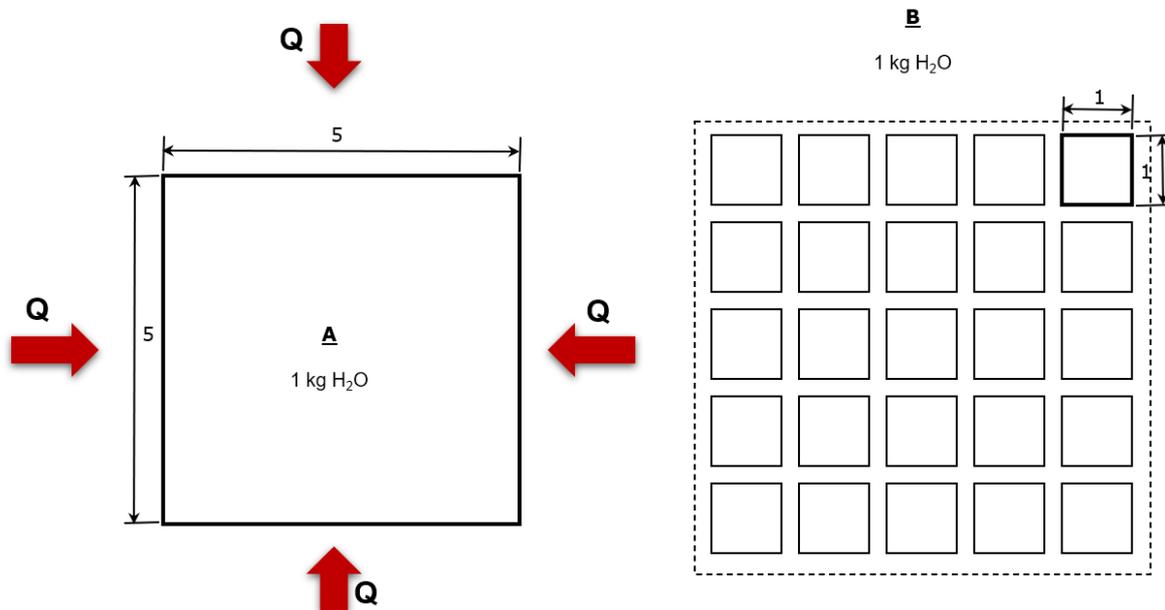
Superficie de Transferencia de Calor A = $(5 + 5 + 5 + 5) \text{ mm} \bullet 1 \text{ mm}$

Superficie de Transferencia de Calor A = **20 mm²**

Superficie de Transferencia de Calor B = $(1 + 1 + 1 + 1) \text{ mm} \bullet 1 \text{ mm} \bullet 25$

Superficie de Transferencia de Calor B = **100 mm²**

Es decir, que las gotas pulverizadas presentan mayor superficie expuesta a la transferencia del calor.



La aplicación de agua pulverizada se basa en el principio de que la velocidad de transmisión de calor es proporcional a la superficie expuesta de un líquido.

Con este método, no se observe más calor, sino, que se produce una absorción mucho más rápida, es decir, la masa de agua puesta en juego para apagar una combustión absorbe la misma cantidad de calor, se la tire en forma de chorro pleno o pulverizada, pero en este último caso el calor se absorberá a mayor velocidad.

El agua pulverizada ayuda a acelerar el ritmo con que el agua absorbe el calor, además, de tener otras ventajas como no producir daño, cosa que suele hacer un

chorro de agua compacto a alta presión, no salpica los combustibles líquidos, generar una barrera que disminuye el paso del calor por radiación, disminuye el paso de humo, entre otros usos.

Al disminuir el tamaño de las gotas de agua se aumenta la relación superficie expuesta de la gota con relación a la masa de agua que tiene esa gota. La siguiente tabla presenta esta idea, que tiene las siguientes consideraciones:

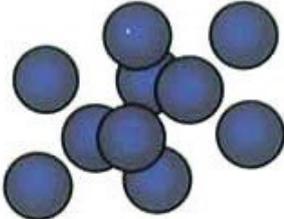
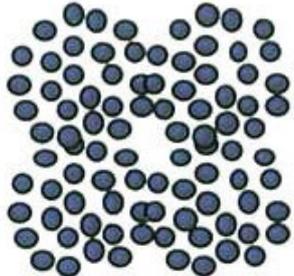
- El agua forma una esfera perfecta cuyo volumen está dado por $V = 4/3 \pi r^3$, donde V = volumen y r = radio.
- La esfera de agua presenta una superficie expuesta al calor determinado por la $S = 4 \pi r^2$, donde S = superficie.
- Se considera la densidad del agua en 1.000 kg/m^3

Volumen de la gota de agua (m ³)	Peso de la gota de agua (kg)	Radio de la gota de agua (cm)	Superficie la gota esférica (m ²)	Relación Superficie/masa (m ² /kg)
1,0	1.000	62,0	4,84	0,00484
0,5	500	49,2	3,05	0,0061
0,1	100	28,8	1,04	0,0104
0,01	10	13,4	0,22	0,022
0,001	1	6,20	0,05	0,05
0,0001	0,1	2,88	0,01	0,10
0,00001	0,01	1,33	0,0022	0,22
0,000001	0,001	0,62	0,00048	0,48
0,0000001	0,0001	0,288	0,000104	1,04
0,000000000001 (0,000001 cm ³) (0,000000001 litros)	1×10^{-9}	0,0062 (62 μm)	$4,836 \times 10^{-8}$	48,36

A medida que la gota de agua se hace cada vez más pequeña, aumenta la superficie que expone al calor, con relación a su cada vez menor masa, por consiguiente, más

superficie expuesta al calor para transferir ahora calor a mayor velocidad a una menor masa.

La siguiente imagen muestra con relación a una gota de un micrón, cómo a medida que disminuye el tamaño, aumenta la superficie y la cantidad de gotas.

	Tamaño de la gota (micras)	Superficie	Numero de gotas
	>1000	1	1
	300	10	40
	50	400	8000

4) SURGIMIENTO DEL AGUA PULVERIZADA

El desarrollo de sistemas de extinción en base a agua finamente pulverizada o nebulizada ha sido impulsado por dos grandes necesidades de la protección contra incendios.

Primero: A comienzos de los años 90, las organizaciones reguladoras marítimas internacionales hacían obligatoria la instalación de sistemas de rociadores en las embarcaciones de pasajeros.

Esto inspiró la búsqueda de un sistema que pudiera considerarse equivalente a los rociadores, pero que descargara una cantidad muy inferior de agua, utilizara tuberías de diámetro inferior y tuviera un peso total inferior al de un sistema de rociadores estándar, y que fuera más económico.

Segundo: La necesidad de encontrar algo que reemplazara las sustancias de agotamiento de ozono tales como los halones, las cuales habían sido utilizadas durante mucho tiempo para proteger los espacios para maquinaria, cuartos con líquidos inflamables, cuartos de computadoras y cuartos para materiales sensibles al “daño ocasionado por el agua”.

La búsqueda de un elemento alternativo al halón incluyó la posibilidad de utilizar agua en aplicaciones donde anteriormente el uso del agua no se consideraba práctico. Por lo tanto, una tecnología que pudiera reducir al mínimo el tamaño de las gotas y la tasa de aplicación, aumentar la evaporación y ayudar a reducir los niveles de oxígeno para extinguir los incendios ocultos, empezó a tener un valor comercial.

5) USOS

Los sistemas de agua nebulizada se han utilizado para aplicaciones específicas, como las marítimas, durante mucho tiempo, pero desde mediados de la década de 1990, el avance en el uso de estos sistemas fue impulsado por la eliminación gradual del halón y su uso como sistema de seguridad contra incendios para espacios, donde la cantidad de agua que se puede almacenar o descargar es limitada. Además, hay un

gran listado de las aplicaciones en las que pueden usarse los sistemas de agua nebulizada, incluidas las siguientes:

- Espacios de maquinaria
- Turbinas de combustión
- Cocinas industriales de aceite
- Salas de informática en pisos elevados
- Salas de equipos de procesamiento de datos
- Campanas para gases
- Prensas continuas para tableros de madera
- Camarotes y pasillos para pasajeros de embarcaciones
- Habitaciones y espacios públicos en embarcaciones
- Túneles de carretera
- Túneles de conducción de cables

6) VENTAJAS

Entre los principales beneficios de los sistemas de extinción de incendios en base a agua nebulizada para tener en cuenta se pueden mencionar:

- Gran poder de actuación contra fuegos de clase A, B y C.
- Capacidad de extinguir incendios tanto en espacios abiertos como cerrados.
- Cuidado del medio ambiente ya que los sistemas de agua nebulizada son los que menos agua utilizan.
- Al consumir notablemente menos agua que los sistemas de rociadores tradicionales minimizan los daños colaterales de ésta.
- Al usar gotas tan pequeñas, estos sistemas no mojan los productos que protegen y evitan la humedad de materiales valiosos.

- Los sistemas de agua nebulizada no contribuyen a la destrucción del ozono o al calentamiento global.
- Ausencia de problemas de toxicidad, dado que el agua utilizada es potable y no suele contar con tratamiento alguno, por lo que no es tóxico ni nocivo para las personas que trabajan alrededor.
- Los sistemas de agua nebulizada no producen subproductos tóxicos cuando se descargan en un fuego.
- No es necesario tener los ambientes cerrados totalmente confinados o herméticos como sucede en los sistemas en base a gases inertes.
- No se necesita la evacuación inmediata de las personas: pueden entrar en funcionamiento inmediatamente después de la declaración del incendio, no necesitando confirmar la evacuación antes de disparar el sistema tal como si ocurre con los sistemas basados en gas inerte.
- Los sistemas de agua nebulizada hacen el mismo trabajo con menos señales de seguridad, menos capacitación de los empleados y sin necesidad de sistemas de notificación audiovisual especializados.
- Los sistemas de agua nebulizada reducen los costos en comparación con los sistemas químicos secos. Los sistemas químicos secos pueden resultar difíciles de limpiar y pueden dañar los equipos electrónicos.

7) LIMITACIONES

Los sistemas de agua nebulizada no pueden combatir incendios que involucren materiales reactivos al agua. Al igual que otros sistemas a base de agua, la neblina de agua puede empeorar los incendios que contienen materiales que se vuelven peligrosos cuando se combinan con agua.

La NFPA 750 prohíbe específicamente el uso de sistemas de agua nebulizada en aplicaciones donde el agua puede hacer más daño que beneficio, produciendo reacciones violentas o cantidades significativas de productos peligrosos.

Los materiales incluidos son los siguientes.

- Metales reactivos, como litio, sodio, potasio, magnesio, titanio, circonio, uranio y plutonio.
- Alcóxidos metálicos, como el metóxido de sodio.
- Amidas metálicas, tales como amida de sodio.
- Carburos, tales como carburo de calcio.
- Haluros, tales como cloruro de benzoilo y cloruro de aluminio.
- Hidruros, como el hidruro de litio y aluminio.
- Oxihaluros, tales como oxibromuro de fósforo.
- Silanos, tales como triclorometilsilano.
- Sulfuros, tales como pentasulfuro de fósforo.
- Cianatos, como el metilisocianato.

Los sistemas de agua nebulizada no deben utilizarse para la aplicación directa a gases licuados como temperaturas criogénicas (como el gas natural licuado), que hierven violentamente cuando se calientan con agua.

Los costos son todavía uno de sus principales inconvenientes. Los mayores costos de las instalaciones y las restricciones en espacios abiertos favorecen los sistemas tradicionales de rociadores contra incendios.

Si bien estos sistemas pueden reducir los costos en comparación con los sistemas químicos secos o de agentes limpios, los sistemas tradicionales de rociadores contra incendios aún pueden tener una ventaja financiera.

El ahorro en daños potenciales a veces puede ser superador respecto a otros sistemas, pero los costos iniciales siguen siendo altos.

8) MECANISMOS DE EXTINCIÓN

En 1955 Braidech proporcionó una descripción básica de como el agua nebulizada extingue incendios:

“La acción extintora de las pulverizaciones de agua finamente dividida, aplicada a los incendios que se encuentran comúnmente, parece que se debe predominantemente a la dilución del suministro de aire (oxígeno) en el área de la combustión, con el vapor (vapor de agua) resultante de la evaporación de las gotas de agua, en el área calentada alrededor del incendio. En muchos casos, los efectos de enfriamiento del agua también pueden ser factores importantes en la extinción. Para obtener una extinción, las gotas de agua que conforman la pulverización deben ser relativamente pequeñas y la cantidad de agua aplicada debe ser suficiente según el incendio específico. “

Las investigaciones realizadas décadas después no han alterado la exactitud de esta descripción. Sin embargo, trabajos recientes han sugerido otros procesos que están involucrados y además han identificado los mecanismos más importantes que actúan en conjunto para extinguir el fuego, estos pueden ser descritos como tres mecanismos principales y dos secundarios.

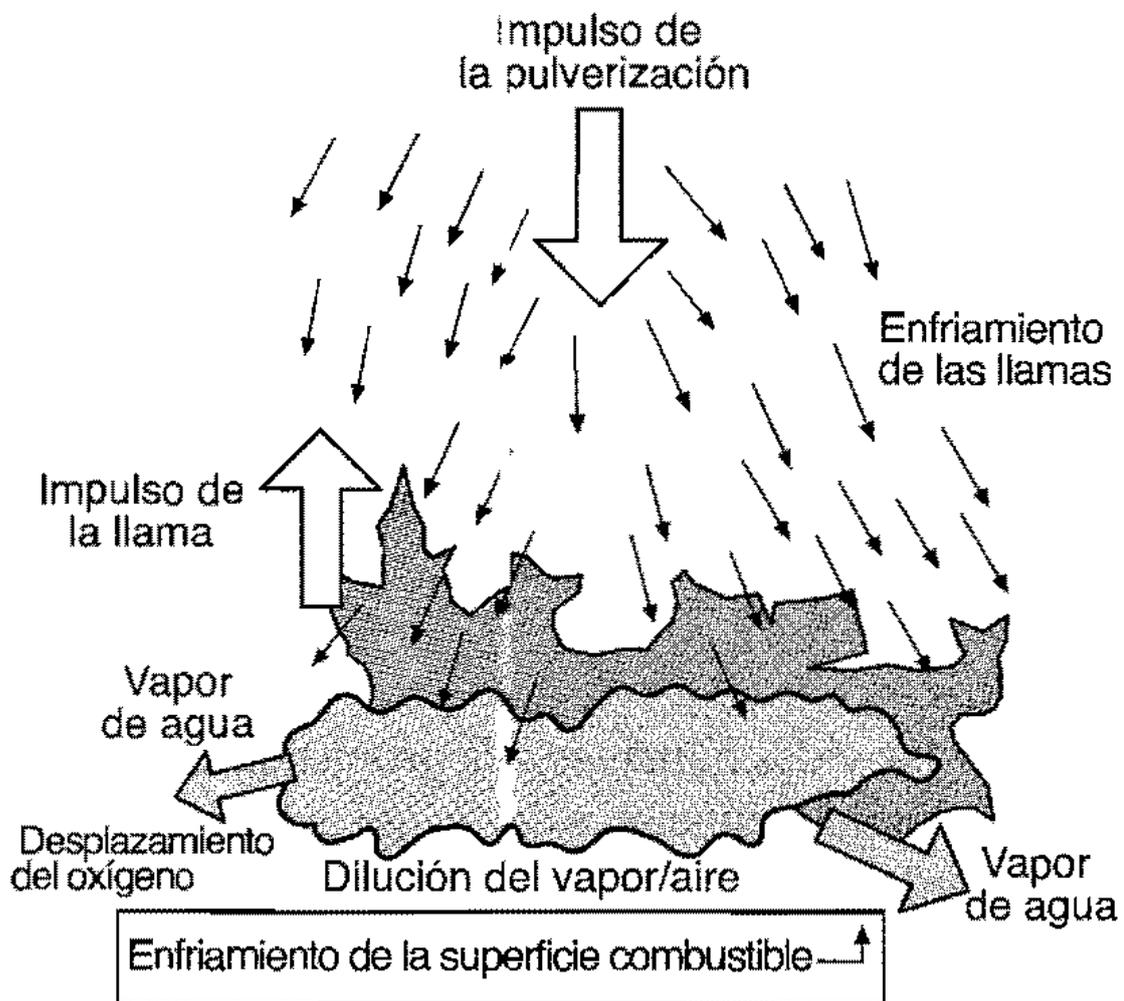
Los mecanismos principales son:

1. La extracción de calor.
2. El desplazamiento de oxígeno.

3. El bloqueo del calor radiante.

Los dos mecanismos secundarios que juegan un papel en la extinción, pero es difícil cuantificar su importancia, son:

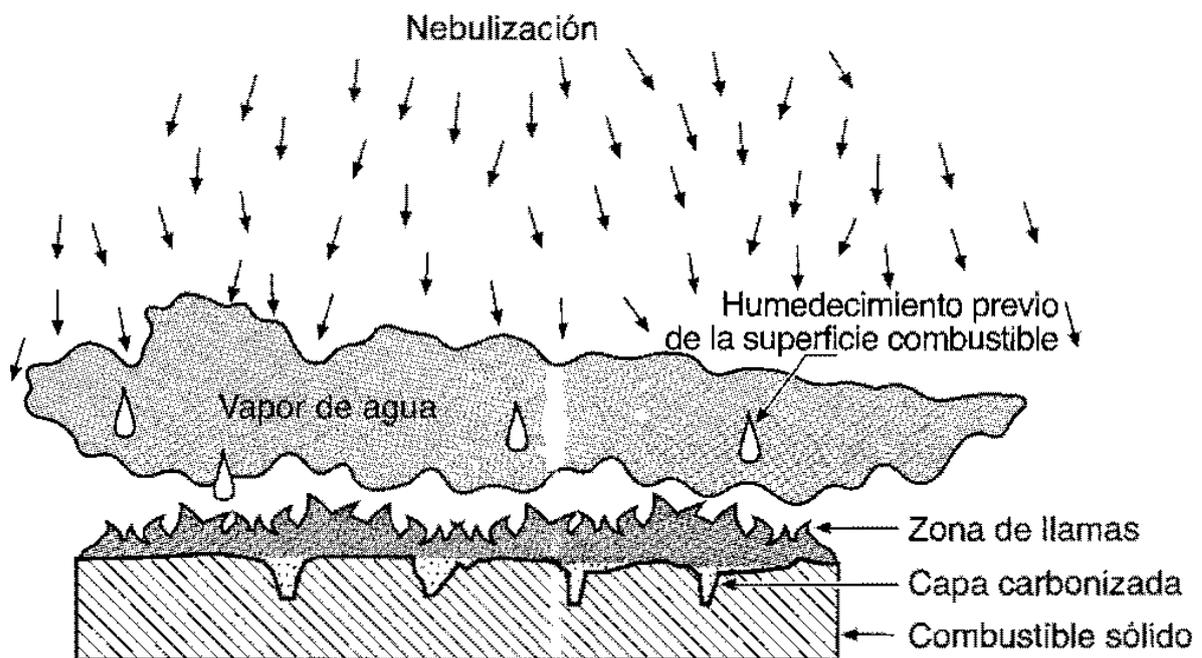
1. La dilución de vapor/aire.
2. Los efectos cinéticos.



Interacción de la nebulización con la llama de un incendio de charco, mostrando los mecanismos de extinción

Aunque hasta cierto punto los tres mecanismos principales están involucrados en todas las extinciones, en pruebas realizadas, algunos incendios fueron extinguidos en su mayoría a través de la extracción de calor (enfriamiento) y otros predominantemente mediante el desplazamiento de oxígeno. La diferencia dependía de si el fuego estaba bien o mal ventilado y de las propiedades del combustible.

El beneficio de la atenuación de la radiación en un ambiente cerrado se hace evidente con la reducción de la realimentación térmica para las superficies combustibles en llamas y sin quemar; sin embargo en experimentos realizados, la atenuación de la radiación no pudo ser identificada como el mecanismo dominante de la extinción.



Combustible sólido:

1. Pocas llamas, más difícil de enfriar
2. La carbonización arde con una concentración de O₂ más baja
3. Humedecimiento del combustible

Llamas sobre un combustible sólido con carbonización y nebulización

9) EXTRACCIÓN DE CALOR (ENFRIAMIENTO)

Cuando se aplica agua a un incendio, el calor es absorbido en tres áreas:

1. En los gases y llamas calientes.
2. En el combustible.
3. En los objetos y superficies cerca del fuego.

El enfriamiento del combustible y los objetos cercanos contribuye a reducir la propagación del fuego, pero no necesariamente requiere tamaños de gotas muy finos. De hecho, el humedecimiento y enfriamiento de los combustibles sólidos es más fácil de lograr utilizando gotas más grandes, gotas mayores a 400 micrones, y suministrando más agua de la que normalmente se puede suministrar como agua nebulizada.

La conversión de las gotas de agua en vapor absorbe calor, pero en comparación con las pulverizaciones más gruesas, las pulverizaciones de agua finamente divididas aumentan la velocidad a la cual la pulverización extrae calor de los gases calientes y las llamas.

El hecho de reducir el tamaño de las gotas aumenta el área de la superficie de la masa de agua y por lo tanto incrementa la tasa de transferencia de calor.

Si se retira una cantidad suficiente de calor, la temperatura de la fase gaseosa de las llamas puede caer por debajo de lo necesario para mantener la reacción de combustión y la llama será extinguida. Las consideraciones teóricas sugieren que la reacción de la combustión en una llama por difusión se detendrá si la temperatura de la llama cae por debajo de aproximadamente los 1.327 °C.

En cuanto a lo que constituye una absorción de calor "suficiente", no hay consenso definido, dado que el efecto concurrente de la reducción de oxígeno podría significar

que el incendio se puede extinguir con solo una fracción del mínimo teórico requerido para el enfriamiento de las llamas.

9.1) El Enfriamiento y los Combustibles Líquidos

Para los incendios de combustibles líquidos, la evaporación de la nebulización enfría las llamas, la cual, a su vez, reduce el flujo de calor radiante hacia la superficie del combustible, haciendo que se reduzca la evolución de los vapores inflamables.

La combinación de una temperatura reducida de la llama y de una reducción de los vapores de evolución genera una tasa de combustión reducida y, en algunos casos, una extinción completa.

9.2) Efecto sobre los Líquidos Inflamables Sobreambientales

Los incendios en los combustibles líquidos con puntos de ignición por encima de las temperaturas ambiente normales, por ejemplo, el combustible diésel (temperatura de ignición = 60 °C), pueden extinguirse con cierta facilidad mediante el enfriamiento de las llamas y la radiación reducida hacia la superficie.

9.3) Efecto sobre los Líquidos Inflamables Subambientales

Los incendios en combustibles líquidos con puntos de ignición por debajo de las temperaturas ambiente normales, por ejemplo, el heptano (temperatura de ignición = - 4 °C), son mucho más difíciles de extinguir solo con el enfriamiento porque las temperaturas no pueden reducirse lo suficiente como para reducir la mezcla de vapor/aire por encima de la superficie del combustible hasta por debajo del límite inferior de inflamabilidad, además, cualquier objeto o fragmento caliente de la llama puede provocar una nueva ignición.

9.4) El Enfriamiento y los Combustibles Sólidos

El enfriamiento de las llamas que están por encima de los combustibles sólidos reduce el flujo de calor radiante hacia la superficie combustible y la tasa de pirolisis del combustible.

Como la reacción de combustión ocurre dentro de la zona porosa rica en carbón que se forma sobre la superficie combustible, es posible que el enfriamiento de las llamas por difusión por encima de una zona de carbonización establecida no suprima la realimentación radiante dentro de las hendiduras del carbón.

Se debe aplicar agua en las primeras etapas del incendio, antes de que se desarrolle una zona carbonizada muy profunda y las gotas de agua deban penetrar la zona carbonizada para llegar a la zona de contacto real entre el combustible quemado y el que está sin quemar.

En este tipo de combustibles la altura de las llamas y las velocidades del penacho de fuego son relativamente bajas, de manera que es posible que las gotas de tamaños más grandes de un chorro de agua no se evaporen y mojen la superficie combustible. La extinción de combustibles sólidos como los combustibles Clase A, depende de la geometría de la disposición del combustible y de la profundidad de la capa carbonizada, por ejemplo, las superficies expuestas que dan hacia la fuente de la pulverización pueden ser extinguidas, mientras que las superficies protegidas (como en el interior de una pila de madera) serán casi imposibles de extinguir solo con el enfriamiento.

10) DESPLAZAMIENTO DEL OXIGENO

En 1955 Braidech concluyó correctamente que el efecto de supresión del agua nebulizada *"parece ser que ocurre debido predominantemente a la dilución del suministro de aire (oxígeno) en el área de la combustión con vapor de agua"*. Es decir,

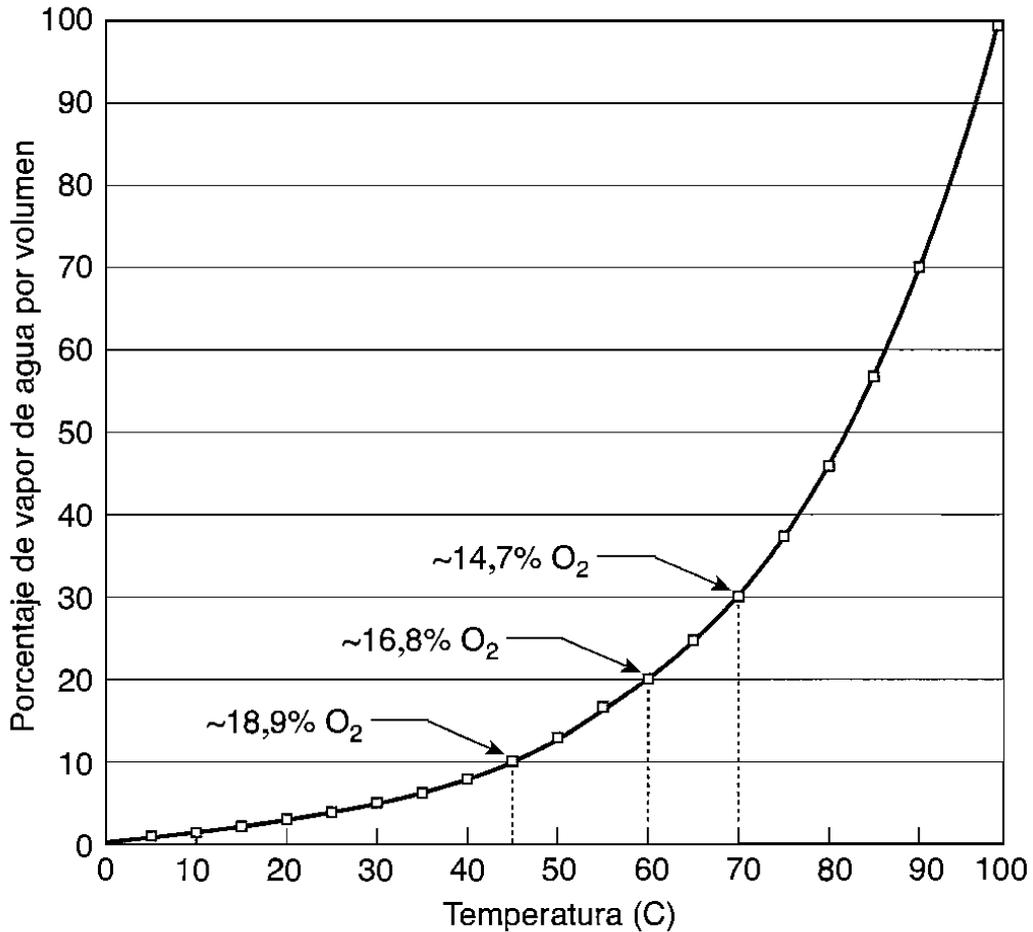
parece que el desplazamiento de oxígeno juega un papel más importante que el enfriamiento de las llamas.

Las gotas de agua se expanden aproximadamente 1.900 veces cuando se evaporan (a 95 °C y 1 atm de presión). Si la evaporación ocurre rápidamente, el vapor de agua desplaza el aire cerca de la gota.

La inyección de una pulverización de agua finamente dividida en el interior de un ambiente cerrado que se encuentra caliente da como resultado una evaporación y expansión rápida y un desplazamiento del aire por el vapor. Si la cantidad de oxígeno disponible para la combustión se reduce, el fuego arde ineficientemente y será más fácil extinguirlo mediante el enfriamiento.

10.1) El Efecto de la Temperatura del Ambiente y el Vapor

La concentración de vapor de agua que puede mantenerse en el aire a 60 °C es el 20% por volumen, lo cual puede reducir la concentración de oxígeno en un ambiente cerrado hasta aproximadamente el 16,8%, lo cual comienza a tener un efecto sobre la combustión, pero a 45 °C la cantidad de vapor de agua en el aire cae por debajo del 10%, y solo reduce la concentración de oxígeno al 19%, lo cual no es suficiente para extinguir el fuego.



Relación entre la temperatura del ambiente y la concentración de volumen del vapor de agua en el aire saturado, con indicación de la concentración aproximada de oxígeno resultante

10.2) Tamaño del Incendio. Técnica de Pulverización de Ciclo Cortado

Lo explicado en el punto anterior ayuda a entender por qué el agua nebulizada es más efectiva para extinguir incendios de gran tamaño que incendios pequeños.

Entre mayor sea la temperatura del ambiente, más vapor de agua se genera y más se diluye el oxígeno.

La técnica de ciclos de pulverización cortados o de encendido y apagado, en ambientes cerrados, reduce los tiempos de extinción, dado que se evapora una mayor cantidad de agua debido a la temperatura más alta del ambiente durante la etapa "sin agua" o de "apagado" del ciclo.

El agua nebulizada tiende a actuar como un agente de extinción gaseoso si la temperatura promedio del ambiente cerrado se encuentra entre 60 y 70°C. En un compartimiento más frío, la efectividad del agotamiento del oxígeno se ve reducida. Si se mantuviera un ciclo de agua pulverizada sin cortar, se podría llegar a enfriar primero el ambiente por debajo de los 60 °C y con esto se reduciría el efecto de la dilución del oxígeno en el ambiente, antes de lograr enfriar lo suficiente el combustible.

10.3) Cantidad de Oxígeno según el Combustible

La cantidad mínima de oxígeno libre necesaria para mantener la combustión depende del tipo de combustible. Por lo general, los gases y vapores de los hidrocarburos dejan de arder a concentraciones de oxígeno inferiores al 13%, mientras que los combustibles sólidos que se carbonizan pueden arder con concentraciones de oxígeno del 7%. Esto explica porque es más fácil extinguir los incendios de charco con hidrocarburos que los incendios en pilas de madera; la reducción del oxígeno necesario para extinguir la llama de un hidrocarburo es fácil de lograr, en comparación con la reducción que se requiere para detener la combustión en la madera que arde.

10.4) Efectividad en Ambientes Cerrados y Ambientes Abiertos

Pruebas realizadas sobre incendios de charco en diésel y heptano usando agua pulverizada confirmaron que el desplazamiento de oxígeno era el mecanismo dominante mediante el cual, el agua nebulizada extinguía las llamas, tanto en los ambientes cerrados como en los incendios de charco en áreas abiertas.

En pruebas realizadas con agua pulverizada muy fina e impulsada y una tasa de flujo bajo, se pudo extinguir un incendio de charco con heptano luego de 35 segundos de

aplicar la nebulización, en un ambiente de 28 m³. Los incendios en dichos ambientes pueden extinguirse con aproximadamente una décima parte del flujo de agua necesaria para los incendios de charco en áreas abiertas.

En pruebas contra incendios en áreas abiertas no se pudo lograr la extinción de los incendios de charco a menos que la pulverización estuviera orientada y se aplicara con la fuerza suficiente para empujar el vapor de agua que se genera en las regiones exteriores de una llama, sobre la superficie combustible. Los incendios en áreas abiertas requirieron pulverizaciones de alta impulsión, orientadas apropiadamente con respecto a la dirección del penacho.

Esto sugiere que la concentración de vapor de agua en la superficie combustible puede aumentarse confinando el fuego en un cerramiento o utilizando una impulsión del chorro para empujar el vapor de agua contra la superficie.

10.5) Incendios Grandes Versus Incendios Pequeños

¿Por qué es más fácil extinguir en un ambiente cerrado los incendios "grandes" que los incendios "pequeños"?

Un incendio "grande" libera más calor hacia el interior del ambiente en las primeras etapas que un incendio "pequeño", de modo que hay más calor disponible para evaporar el agua en finas gotas. Un incendio "pequeño" tendrá una fuente continua de aire fresco para la combustión a concentraciones normales de oxígeno.

Un incendio "grande" reducirá la concentración de oxígeno en el ambiente hasta el punto de que la eficiencia de la combustión ya se habrá reducido, antes de introducir el agua nebulizada. Con los efectos combinados del aire de combustión viciado, más una mayor dilución provocada por el vapor de agua, los incendios "grandes" pueden extinguirse con densidades de flujo más bajas que los incendios "pequeños."

11) BLOQUEO DEL CALOR RADIANTE

Este mecanismo de extinción juega un papel al impedir que el fuego se propague a las superficies combustibles que no se han encendido y al reducir la vaporización o la tasa de pirolisis en la superficie combustible.

La atenuación de la radiación provista por el agua nebulizada protege a los objetos y al personal que están en un ambiente, el daño producido por el calor radiante ya sea que ocurra o no la extinción.

La atenuación de la radiación mediante pulverizaciones de agua depende del diámetro de la gota y de la densidad de la masa de las gotas. A medida que aumenta la concentración de las gotas con diámetros inferiores a 50 micrones, también aumenta el grado de atenuación del calor radiante. Esta es una razón por la cual, el agua nebulizada, con altas concentraciones de gotas muy finas, ha demostrado ser muy efectiva en la reducción de la transferencia de calor radiante.

Una pregunta que surge es: ¿qué cantidad de la reducción de la radiación ocurre por el tamaño reducido de las llamas y que proporción se debe a la atenuación real del calor radiante debido a la presencia del agua nebulizada?

Las consideraciones teóricas sugieren que el agua nebulizada o el vapor que ingresa al espacio entre una llama y la superficie combustible reducen el flujo de calor radiante hacia esa superficie.

Existe la hipótesis de que el calor radiante proveniente de la llama puede ser absorbido por las gotas que no se han evaporado y por el vapor.

En el caso de algunos líquidos como el diésel, esta reducción del flujo de calor hasta la superficie combustible puede reducir la tasa de vaporización del combustible líquido y contribuir a la extinción. La reducción de la transferencia de energía a la superficie combustible reduce la tasa de generación de vapores volátiles.

12) DILUCIÓN DE LA MEZCLA VAPOR/AIRE

El vapor de agua generado en una pulverización de agua puede diluir la mezcla de vapor combustible y aire por debajo del límite inferior de inflamabilidad.

En el caso de los combustibles diésel el enfriamiento de las llamas reduce la energía térmica que llega a la superficie combustible, la cual, a su vez, reduce la tasa de evaporación de los vapores de combustible, y la concentración de vapor/aire cae por debajo del límite inferior de inflamabilidad.

Es mucho más difícil reducir una mezcla de heptano y aire debajo de su límite inferior de inflamabilidad, debido a la baja temperatura del punto de ignición de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la alta presión de vapor del heptano.

La dilución de los vapores de la pirolisis emitidos por los combustibles sólidos también contribuya a la extinción.

Esto se conoce como un mecanismo secundario, ya que es difícil ver como la dilución por sí misma pueda producir una extinción.

Se requiere el mezclado uniforme de la nebulización en la totalidad del espacio entre la llama y la superficie combustible para diluir toda la mezcla de vapor y aire. Con frecuencia, la mezcla en las superficies combustibles es turbulenta y no uniforme, así que es probable que siempre exista alguna región que este dentro del rango de inflamabilidad.

13) EFECTOS CINÉTICOS DE LA NEBULIZACIÓN SOBRE LAS LLAMAS

A veces, un incendio de charco líquido se ve intensificado por la aplicación de pulverización de agua. Frecuentemente ocurre un "recrudescimiento" durante los primeros momentos de contacto con el agua nebulizada y en algunas pruebas contra incendios es evidente que, la tasa de combustión aumenta por períodos más largos. El recrudescimiento general del fuego en el instante en que se aplica la pulverización

de agua sobre los incendios de combustibles líquidos es algo muy familiar para los bomberos.

En muchos casos, se eliminan y se extinguen las llamas rápidamente después de que ocurre este recrudecimiento del fuego. Si la pulverización es insuficiente para lograr la extinción, el incendio seguirá ardiendo violentamente a pesar de la nebulización. Algunos autores atribuyen la intensificación momentánea del incendio al efecto de las gotas que chocan con la superficie combustible y provocan salpicaduras y un aumento en la tasa de vaporización.

Otra explicación posible para la intensificación observada es que la turbulencia actuaba para introducir más aire dentro de la zona de combustión incrementando así la tasa de combustión del combustible.

14) EFECTOS DEL CERRAMIENTO

Los efectos del cerramiento aumentan el desempeño de los sistemas de agua nebulizada. El aumento del desempeño puede atribuirse a una ventilación restringida y al atrapamiento del calor.

Un incendio en un compartimiento "pequeño" reduce la concentración del oxígeno dentro de los primeros minutos. También le ocurre a un incendio que es lo suficientemente grande para reducir rápidamente la concentración promedio del oxígeno en un compartimiento que tiene "poca ventilación." La adición de una pequeña cantidad de agua nebulizada y el aumento resultante del vapor de agua reduce aún más el oxígeno disponible para sostener la combustión. Por lo tanto, un incendio con muy poca ventilación dentro de un cerramiento es "más fácil" de extinguir que un incendio no encerrado y bien ventilado.

14.1) El Proceso de la Extinción en Compartimentos Pequeños

El calor proveniente del fuego atrapado en el compartimiento evapora la parte más fina de la nebulización, de modo que el vapor de agua que se expande empuja al aire para sacarlo del compartimiento, el oxígeno se agota, los gases calientes del fuego en el cielo raso del compartimiento son enfriados por el agua nebulizada y empujados hasta el nivel del piso, mezclando el vapor de agua, el aire sin oxígeno y las gotas de agua con el fuego.

Los efectos combinados de la eficiencia reducida de la combustión y del enfriamiento de las llamas conducen a la extinción.

Con los efectos del cerramiento, es posible extinguir incluso los incendios protegidos con pulverizaciones de baja impulsión en los compartimientos con muchas obstrucciones.

En los lugares donde se puede depender de los efectos del cerramiento, la densidad de flujo requerida para la extinción puede ser hasta diez veces más baja que la densidad requerida para los incendios sin confinar y con buena ventilación.

14.2) El Tamaño del Incendio en Relación con el Tamaño del Cerramiento

Los términos incendio "pequeño" y "grande" se refieren al tamaño del incendio en relación con el tamaño del cerramiento.

En los experimentos de supresión con agua nebulizada se vio dificultada la extinción de los incendios en los cerramientos con incendios "pequeños" y la facilidad relativa para extinguir los incendios "grandes".

La observación se explica mediante el hecho de que un incendio "pequeño" tiene poco efecto sobre la concentración promedio de oxígeno en el cerramiento (al menos inicialmente), mientras que el efecto de un incendio "grande" sobre la concentración de oxígeno se hace evidente rápidamente. En comparación con un

incendio pequeño, un incendio grande genera más calor, produce una temperatura más alta en el compartimiento la cual, a su vez, mantiene una concentración más alta de vapor de agua y reduce la concentración promedio de oxígeno con mayor rapidez.

14.3) La Presión Dentro del Cerramiento

Un fenómeno asociado con los efectos del cerramiento puede conducir a un cambio de presión muy rápido entre el compartimiento del fuego y los espacios circundantes.

El agua nebulizada inyectada uniformemente por un sistema de diluvio a través de la capa de gas caliente provoca un rápido enfriamiento de la capa gaseosa.

La reducción del volumen que acompaña a los gases enfriados crea una presión negativa dentro del compartimiento en relación con los espacios que lo rodean. Dependiendo de la temperatura y la profundidad de la capa caliente, el enfriamiento rápido crea una reducción instantánea del volumen y un cambio de la presión negativa que puede succionar las ventanas o los muros de un cerramiento hermético.

14.4) Incendios en Ambientes Abiertos o sin Confinar

En el caso de un incendio sin confinar y por lo tanto, bien ventilado no hay efectos del cerramiento para crear condiciones favorables para la extinción. El agua nebulizada puede lograr la extinción solo si la pulverización tiene una impulsión lo suficientemente fuerte como para empujar las gotas de agua y el vapor dentro de las llamas y hacia la superficie combustible. Por lo tanto, la ausencia de los efectos del cerramiento crea la necesidad de un sistema de aplicación local.

15) LOS ADITIVOS

La naturaleza química del agua que se suministra a las boquillas tiene influencia sobre el desempeño del agua nebulizada como un supresor del fuego.

15.1) El Cloruro de Sodio

Los experimentos realizados demostraron que la efectividad de la extinción del agua nebulizada se incrementó por la adición de cloruro de sodio al agua. El agua nebulizada hecha con "agua marina" (solución al 2,5% por peso de cloruro de sodio) extinguió incendios de cubeta de combustible diésel con densidades de flujo inferiores, y un 40% a 50% más rápido que el agua nebulizada hecha con agua potable. Además, el agua marina nebulizada fue menos influenciada por las obstrucciones que el agua nebulizada de agua potable. Una explicación posible para el mejor desempeño es que las sales de álcali se cristalizan en la zona de las llamas a medida que las se evaporan. Los cristales de sal son lo suficientemente pequeños para estar en el rango óptimo de efectividad de los agentes de extinción de producto químico seco, muchos de los cuales, son sales de álcali. Esta hipótesis sugiere que las sales de álcali, las cuales son mejores supresores de incendios de producto químico seco que el cloruro de sodio, podrían mejorar significativamente la efectividad de extinción del agua nebulizada.

Investigaciones concluyeron los sistemas de agua nebulizada en base a agua potable, es decir, no contiene aditivos diferentes a los utilizados para el agua potable, o en base a "agua marina natural", no presentan riesgos alguno para las personas expuestas a esta, por consiguiente se reconoce que los sistemas de agua nebulizada abastecidos con agua potable o agua marina natural son "aceptables sin restricciones," como sustitutos para el halón 1301 en espacios ocupados y como un agente de pulverización para reemplazar el halón 1211.

15.2) Aditivos AFFF

La adición de un bajo porcentaje de un agente formador de película (por ejemplo, 0,3% de AFFF mejora muchísimo la efectividad del agua nebulizada en los incendios de charco de hidrocarburos.

15.3) Otros Aditivos

Los productos químicos que podrían agregarse al abastecimiento de agua para un sistema de agua nebulizada incluyen los agentes anticongelantes, los agentes formadores de película, los agentes espumantes Clase A o B, los surfactantes o emulsionantes para incrementar la penetración del agua en los combustibles sólidos, las sales retardadoras del fuego, los biocidas para evitar el crecimiento de algas en el agua almacenada, etc.

El beneficio provisto por el aditivo puede verse reducido por la introducción de problemas secundarios, como por ejemplo, un aumento de la corrosividad o toxicidad.

Los sistemas de agua nebulizada con aditivos son de interés para aplicaciones tales como los compartimientos del motor de los vehículos y en los espacios para maquinaria. Se ha aceptado el uso de agua nebulizada combinada con un pequeño porcentaje de un surfactante para tales aplicaciones en áreas que no están ocupadas. De forma similar, otros aditivos, como los anticongelantes, los agentes y las sales retardadoras del fuego, están limitados a espacios no ocupados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Manual de Protección Contra Incendios. Volumen I Sección VIII Capítulo 15. Quinta Edición en Español Mazo 2009. NFPA/OPCI/IFST
- NFPA 750:2023 Standard on Water Mist Fire Protection Systems
- <https://www.nfpa.org/es/news-blogs-and-articles/blogs/2022/06/24/descripci%C3%B3n-general-de-sistemas-de-agua-nebulizada>
- <https://www.cottesgroup.com/blog/proteccion-de-incendios-con-agua-nebulizada-funcionamiento-y-aplicaciones>
- <https://tectonica.archi/materials/proteccion-contra-incendios-por-agua-nebulizada-a-alta-presion/>
- <https://www.proinstalaciones.com/articulos/informativo/9225-agua-nebulizada-en-cpds>
- <https://www.infotecnico.com/rociadores-de-agua-nebulizada/>