
RESUMEN GENERAL

El presente documento de referencia sobre las mejores técnicas disponibles para los sistemas de refrigeración industrial refleja el intercambio de información que se ha llevado a cabo con arreglo al apartado 2 del artículo 16 de la Directiva 96/61/CE del Consejo, y ha de contemplarse a la luz del prefacio, en el que se describen sus objetivos y forma de uso.

Desde el punto de vista de la prevención y el control integrados de la contaminación (IPPC), la refrigeración industrial es un problema horizontal, lo cual significa que en el estudio de las “mejores técnicas disponibles” (MTD) que recoge el presente documento no se han evaluado con detalle los procesos industriales en los que han de aplicarse. A pesar de ello, se considera que la MTD para un determinado sistema de refrigeración es la que satisface las necesidades del proceso industrial al que se aplica. La MTD para refrigerar un proceso es una técnica compleja que busca el equilibrio entre las necesidades del proceso, las circunstancias locales concretas y los requisitos medioambientales, con el fin de que pueda aplicarse en condiciones de viabilidad técnica y económica.

El término “sistemas de refrigeración industrial” se aplica a los sistemas que eliminan el exceso de calor de cualquier medio a través de un intercambio térmico con agua o aire, a fin de reducir la temperatura de dicho medio a niveles próximos al ambiente.

En el presente documento se describen las MTD para los sistemas de refrigeración que se consideran auxiliares para el funcionamiento normal de un proceso industrial, y se reconoce que el correcto funcionamiento de estos sistemas es un factor positivo para la fiabilidad del proceso. Sin embargo, no se trata la relación entre el sistema de refrigeración y la seguridad del proceso.

Este documento presenta un enfoque integrado con el que se pretende determinar cuáles son las MTD para los sistemas de refrigeración industrial, reconociendo que la solución definitiva depende de las condiciones específicas de la instalación. Con respecto a la selección del sistema de refrigeración, con este criterio sólo se trata de discernir cuáles de sus elementos están relacionados con su comportamiento medioambiental, y no de aprobar o desaprobar uno u otro sistema. En el caso de las medidas de reducción, lo que se intenta es destacar sus posibles efectos cruzados, haciendo hincapié en la necesidad de buscar el equilibrio entre las distintas emisiones de los sistemas de refrigeración.

El cuerpo principal del documento consta de cinco capítulos en los que se describe el criterio aplicado para determinar las MTD, sus problemas y principios básicos, los sistemas de refrigeración y sus aspectos medioambientales, las principales conclusiones alcanzadas en relación con las MTD y las conclusiones y recomendaciones finales para futuros trabajos. En sus once anexos se incluye información de base relativa a determinados aspectos del diseño y funcionamiento de los sistemas de refrigeración, así como algunos ejemplos ilustrativos del enfoque mencionado.

1. Enfoque integrado

Con el enfoque integrado basado en MTD, se trata de situar el comportamiento medioambiental del sistema de refrigeración en el contexto global de un proceso industrial y de minimizar los efectos directos e indirectos de su funcionamiento, de acuerdo con la experiencia de que dicho comportamiento depende en gran medida de la elección del sistema y de su diseño. Por lo tanto, el criterio a seguir en las nuevas instalaciones es prevenir las emisiones con un sistema de refrigeración debidamente diseñado, montado y configurado, además de reducirlas mediante la optimización de su funcionamiento diario.

Los sistemas de refrigeración actuales tienen menos posibilidades de prevención a corto plazo con la adopción de medidas tecnológicas, por lo que se hace hincapié en la reducción de las emisiones mediante la optimización del funcionamiento y el control del sistema. Estos sistemas pueden tener muchos parámetros fijos (como el espacio, la disponibilidad de los recursos de

explotación o los requisitos legales vigentes), con escaso margen de libertad para introducir cambios. Sin embargo, el enfoque general basado en MTD que se plantea en este documento puede considerarse un objetivo a largo plazo, adaptable a los ciclos de sustitución de los equipos en las instalaciones ya existentes.

En el enfoque integrado, se reconoce que la refrigeración es una parte esencial de muchos procesos industriales y que debe considerarse un elemento fundamental del sistema global de gestión energética. En los procesos industriales, es muy importante utilizar la energía de forma eficiente, tanto desde el punto de vista medioambiental como de la rentabilidad. Lo primero que debe tenerse en cuenta para la MTD es la eficiencia energética total del proceso, antes de adoptar medida alguna para optimizar el sistema de refrigeración. Para aumentar su eficiencia energética total, la industria intenta reducir la cantidad de calor irrecuperable realizando una gestión adecuada de la energía y aplicando diversos programas de ahorro integrados, incluido el intercambio de energía entre distintas unidades del proceso refrigerado, así como enlaces con procesos adyacentes. Existe una tendencia hacia un concepto de recuperación de calor para regiones industriales cuando los establecimientos industriales están relacionados entre sí o con sistemas de calefacción colectiva o cultivos en invernaderos. Cuando ya no es posible recuperar o reutilizar más calor, puede ser necesario liberarlo al ambiente.

El calor irrecuperable puede ser de nivel bajo (10-25°C), medio (25-60°C) y alto (60°C). Por regla general, se utilizan sistemas de refrigeración por vía húmeda para el calor de bajo nivel y por vía seca para el de alto nivel. Para el nivel medio no hay un principio de refrigeración preferible y pueden hallarse distintas configuraciones.

Una vez optimizada la eficiencia energética total del proceso industrial o de fabricación, queda cierta cantidad de calor irrecuperable de un determinado nivel. Para decidir qué configuración se va a utilizar para disipar este calor, hay que buscar un equilibrio entre:

- las necesidades de refrigeración del proceso,
- las limitaciones locales (incluidas las de carácter legal), y
- los requisitos medioambientales.

Las necesidades de refrigeración deben quedar siempre satisfechas para asegurar la fiabilidad del proceso, incluidas las fases de arranque y parada. El proceso debe tener garantizada su temperatura mínima y capacidad de refrigeración necesaria en todo momento, con el fin de aumentar su eficiencia y reducir la pérdida de producto y las emisiones al medio ambiente. Cuanto más sensible a la temperatura sea el proceso, más importante será este aspecto.

Las condiciones locales limitan las opciones de diseño y funcionamiento del sistema de refrigeración. Es el caso de la meteorología, la disponibilidad de agua para la refrigeración y los vertidos, el espacio disponible para los montajes y la sensibilidad de la zona circundante a las emisiones. En función de la demanda y capacidad de refrigeración del proceso, la elección del solar de construcción para una nueva instalación puede ser muy importante (por ejemplo, un sitio donde haya una gran fuente de abastecimiento de agua fría). Si esta elección se rige por otros criterios o si ya existen sistemas de refrigeración, las necesidades de refrigeración y las características locales son parámetros fijos.

La meteorología local es importante para la refrigeración, ya que afecta a la temperatura del agua y el aire utilizados. El clima se caracteriza por el patrón de temperaturas de bulbo húmedo y seco. En general, los sistemas de refrigeración están diseñados para satisfacer las necesidades del proceso en las condiciones climáticas menos favorables, es decir, con temperaturas máximas de bulbo húmedo o seco.

El siguiente paso en la selección y el diseño del sistema de refrigeración va en la dirección de cumplir los requisitos de la MTD, en función de las necesidades del proceso a la que ha de aplicarse y de las limitaciones locales. Esto significa que hay que hacer hincapié en la selección de materiales y equipos adecuados para reducir el mantenimiento, facilitar el funcionamiento

del sistema y cumplir los requisitos medioambientales. Además de la liberación de calor al medio ambiente, pueden producirse otros efectos, como la emisión de los aditivos utilizados para acondicionar los sistemas de refrigeración. Hay que destacar que, si es posible reducir el nivel y cantidad del calor que se ha de disipar, el impacto ambiental del sistema de refrigeración industrial será menor.

Los principios del enfoque basado en las MTD también pueden aplicarse a los sistemas de refrigeración ya existentes. Es posible que existan opciones tecnológicas, como el cambio de técnica de refrigeración o la sustitución o modificación de los equipos o productos químicos utilizados, pero sólo podrán aplicarse en cierta medida.

2. Sistemas de refrigeración utilizados

Los sistemas de refrigeración se basan en principios termodinámicos y están diseñados para promover el intercambio de calor entre el proceso y el refrigerante y para facilitar la liberación del calor irrecuperable al medio ambiente. Los sistemas de refrigeración industrial pueden clasificarse en función de su diseño y de su principio básico de funcionamiento: agua o aire, o una combinación de ambos.

El intercambio calorífico entre el medio de proceso y el refrigerante se intensifica a través de intercambiadores, donde el refrigerante descarga su calor al ambiente. En los sistemas abiertos, el refrigerante está en contacto con el ambiente, cosa que no ocurre en los sistemas cerrados, donde el refrigerante o el medio de proceso circulan por tubos o serpentines.

Los sistemas sin recirculación suelen utilizarse en instalaciones de gran capacidad que disponen de un suministro suficiente de agua para la refrigeración y que están situadas junto a una masa de aguas superficiales que sirve como medio receptor de los vertidos. Cuando no se dispone de un suministro de agua fiable, se utilizan sistemas con recirculación (torres de refrigeración).

En las torres de recirculación abiertas, el agua refrigerante se enfría por contacto con una corriente de aire. Estas torres están equipadas con dispositivos que aumentan la superficie de contacto de aire y agua. La corriente de aire puede crearse por tiro natural o por tiro mecánico, utilizando ventiladores. Las instalaciones de pequeña o gran capacidad utilizan mucho las torres de tiro mecánico, mientras que las instalaciones de gran capacidad (como las industrias eléctricas) utilizan principalmente las torres de tiro natural.

En los sistemas de circuito cerrado, los tubos o serpentines por los que circula el refrigerante o el medio de proceso tienen su propio sistema de refrigeración con el que enfrían la sustancia que contienen. En los sistemas de proceso húmedo, la corriente de aire enfría por evaporación los tubos o serpentines rociados con agua. Los sistemas de proceso seco sólo utilizan la corriente de aire. En ambos casos, los serpentines pueden ir provistos de aletas, que amplían la superficie de refrigeración y, por lo tanto, el efecto refrigerante. Los sistemas húmedos de circuito cerrado se utilizan mucho en la industria para las instalaciones de menor capacidad. El principio de refrigeración con aire seco puede encontrarse en pequeñas instalaciones industriales o también en grandes centrales eléctricas, cuando no se dispone de agua suficiente o ésta es muy cara.

Los sistemas de refrigeración híbridos, abiertos o cerrados, son torres mecánicas de diseño especial que pueden utilizar la vía seca o la húmeda para reducir la formación de penachos visibles. Con la opción de que los sistemas funcionen por la vía seca (en particular, las pequeñas unidades de tipo celular) durante períodos de baja temperatura del aire ambiente, puede reducirse además el consumo anual de agua.

Tabla 1: Ejemplo de las características técnicas y termodinámicas de los diferentes sistemas de refrigeración que se utilizan en las instalaciones industriales (distintas de las centrales eléctricas).

Sistema de refrigeración	Medio refrigerante	Principio básico de refrigeración	Aproximación mínima (K) ⁴⁾	Temperatura final mínima alcanzable en el medio de proceso ⁵⁾ (°C)	Capacidad del proceso industrial (MW _{th})
Sistema abierto sin recirculación, directo.	Agua	Conducción / convección	3 – 5	18 – 20	< 0,01 – > 2.000
Sistema abierto sin recirculación, indirecto.	Agua	Conducción / convección	6 – 10	21 – 25	< 0,01 – > 1.000
Sistema abierto con recirculación, directo.	Agua ¹⁾ Aire ²⁾	Evaporación ³⁾	6 – 10	27 – 31	< 0,1 – > 2.000
Sistema abierto sin recirculación, indirecto.	Agua ¹⁾ Aire ²⁾	Evaporación ³⁾	9 – 15	30 – 36	< 0,1 – > 200
Sistema húmedo de circuito cerrado.	Agua ¹⁾ Aire ²⁾	Evaporación + convección	7 – 14 ⁷⁾	28 – 35	0,2 – 10
Sistema de aire seco de circuito cerrado.	Aire	Convección	10 – 15	40 – 45	< 0,1 – 100
Sistema abierto híbrido.	Agua ¹⁾ Aire ²⁾	Evaporación + convección	7 – 14	28 – 35	0,15 – 2,5 ⁶⁾
Sistema abierto cerrado.	Agua ¹⁾ Aire ²⁾	Evaporación + convección	7 – 14	28 – 35	0,15 – 2,5 ⁶⁾

Notas:

- 1) El agua es el medio refrigerante secundario y se recircula en su mayor parte. El agua evaporada transmite el calor al aire.
- 2) El aire es el medio refrigerante que descarga el calor al ambiente.
- 3) El principio básico de refrigeración es la evaporación. El calor también se transmite por conducción/convección, pero en menor proporción.
- 4) Aproximación relacionada con las temperaturas de bulbo húmedo o seco.
Hay que añadir las aproximaciones correspondientes al intercambiador de calor y a la torre de refrigeración.
- 5) Las temperaturas finales dependen de la meteorología local (datos válidos para las condiciones climáticas que son normales en Europa central: 21°/30°C de temperatura de bulbo húmedo/seco y 15°C de temperatura máxima del agua)
- 6) Capacidad de las unidades pequeñas: con varias unidades o con sistemas de construcción especial, pueden alcanzarse mayores capacidades.
- 7) Si se utiliza un sistema indirecto o se aplica también la convección, la aproximación aumenta en este ejemplo de 3 a 5 K, con lo que aumenta la temperatura de proceso.

En la tabla se especifican las características de los sistemas de refrigeración utilizados en una determinada situación climática. La temperatura final del medio de proceso que sale del intercambiador depende de la temperatura del refrigerante y del diseño del sistema de refrigeración. El agua tiene mayor capacidad térmica específica que el aire y, por lo tanto, es el mejor refrigerante. La temperatura del aire y del agua que se utilizan como medios refrigerantes depende de las temperaturas locales de bulbo húmedo y seco. Cuanto más elevadas sean éstas, más difícil será conseguir que el proceso alcance una temperatura final baja.

La temperatura final del proceso se obtiene sumando la temperatura ambiente mínima (del refrigerante) y la diferencia mínima necesaria entre la temperatura del refrigerante (que entra al sistema de refrigeración) y la temperatura del medio de proceso después del intercambiador (que sale del sistema), la cual recibe también el nombre de “aproximación (térmica)”. Desde el punto de vista técnico, la aproximación puede ser muy pequeña por diseño, pero el coste es inversamente proporcional a la capacidad. Cuanto menor es la aproximación, menor puede ser la temperatura final. Cada intercambiador tiene su propia aproximación y, cuando se instalan intercambiadores adicionales, se suman todas las aproximaciones a la temperatura del refrigerante (que entra al sistema) para obtener la temperatura final que puede alcanzarse en el proceso. En los sistemas de refrigeración indirectos se utilizan intercambiadores adicionales cuando se instala un circuito de refrigeración suplementario. Este circuito secundario se conecta al primario por un intercambiador. Los sistemas indirectos se utilizan cuando es rigurosamente obligado evitar fugas de sustancias de proceso al medio ambiente.

En los sistemas de refrigeración que se suelen utilizar en el sector eléctrico, las aproximaciones y capacidades de refrigeración mínimas son algo diferentes que en las industrias no eléctricas,

debido a las especiales características del proceso de condensación de vapor. A continuación se resumen las distintas aproximaciones y capacidades de generación de energía.

Tabla 2: Ejemplos de capacidad y características termodinámicas de los diferentes sistemas de refrigeración que se utilizan en el sector eléctrico.

Sistema de refrigeración	Aproximaciones aplicadas (K)	Capacidad del proceso de generación de energía (MW_{th})
Sistemas abiertos sin recirculación.	13-20 (diferencia terminal 3-5)	< 2.700
Torre de refrigeración abierta de proceso húmedo.	7-15	< 2.700
Torre de refrigeración abierta de proceso híbrido.	15-20	< 2.500
Condensador refrigerado por aire seco.	15-25	< 900

3. Aspectos medioambientales de los sistemas de refrigeración utilizados

Los aspectos medioambientales de los sistemas de refrigeración varían según su configuración, pero lo más importante es aumentar la eficiencia energética total y la reducción de las emisiones al medio acuático. Los niveles de emisión y consumo son muy específicos de la instalación y, cuando es posible cuantificarlos, presentan grandes variaciones. De acuerdo con la filosofía del enfoque integrado basado en las MTD, hay que tener en cuenta los efectos cruzados en la evaluación de cada aspecto medioambiental y de las medidas de reducción conexas.

- **Consumo de energía**

El consumo específico de energía, directo o indirecto, es un aspecto medioambiental importante para todos los sistemas de refrigeración. El consumo indirecto de energía es el que corresponde al proceso que se ha de refrigerar. Este consumo puede aumentar si el rendimiento del sistema de refrigeración no es óptimo debido a su configuración, lo cual puede dar lugar a un aumento de la temperatura del proceso (ΔK), que se expresa en $kW_e/MW_{th}/K$.

El consumo directo de energía se expresa en kW_e/MW_{th} y hace referencia a la cantidad de energía que consumen todos los equipos (bombas, ventiladores) del sistema de refrigeración por cada MW_{th} que se disipa.

Medidas para reducir el consumo indirecto de energía son:

- seleccionar la configuración que tenga menor consumo indirecto (en general, sistemas sin recirculación),
- aplicar un diseño con pequeñas aproximaciones, y
- reducir la resistencia al intercambio calorífico mediante un correcto mantenimiento del sistema de refrigeración.

Por ejemplo, si se trata de una industria eléctrica, al pasar a un sistema con recirculación se produce un aumento del consumo de energía de los equipos auxiliares, así como una merma de eficiencia en el ciclo térmico.

Para reducir el consumo directo, existen bombas y ventiladores más eficientes. Se puede reducir la resistencia y las caídas de presión en el proceso modificando el diseño del sistema de refrigeración o instalando eliminadores de deriva de baja resistencia y membranas termotécnicas especiales en las torres. La correcta limpieza química o mecánica de las superficies es esencial para mantener baja la resistencia del proceso en funcionamiento.

- **Agua**

El agua es importante en los sistemas de proceso húmedo como principal refrigerante, pero también como medio receptor de los vertidos que se generan. Cuando se realizan grandes tomas de agua, los peces y otros organismos acuáticos son arrastrados y golpeados. El vertido de grandes cantidades de agua caliente también puede afectar al medio acuático, pero este impacto puede controlarse colocando las tuberías de toma y desagüe en puntos adecuados y evaluando los flujos mareales y estuarinos para comprobar la adecuada mezcla y dispersión advectiva de las aguas vertidas.

El consumo de agua oscila entre $0,5 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ para una torre abierta de proceso híbrido y hasta $86 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}_{\text{th}}$ para un sistema abierto sin recirculación. Para reducir las grandes tomas de agua que necesitan los sistemas sin recirculación, es necesario cambiar a sistemas recirculantes. De este modo, se reducen también los vertidos de grandes cantidades de agua caliente y las emisiones de productos químicos y residuos. El consumo de agua de los sistemas recirculantes puede reducirse aumentando el número de ciclos, mejorando el proceso de reposición de agua u optimizando el aprovechamiento de las fuentes de aguas residuales disponibles tanto dentro como fuera de la instalación. Ambas opciones requieren un complejo programa de tratamiento de las aguas procedentes de la refrigeración. El proceso híbrido permite utilizar la vía seca durante algunos períodos del año (en los que la temperatura del aire es más baja o la demanda de refrigeración menor) para reducir el consumo de agua, en particular en las pequeñas unidades de tipo celular.

Para evitar el arrastre y los golpes que sufren los organismos acuáticos se toman medidas relacionadas con el diseño y la ubicación de la tubería de toma y se recurre a diversos dispositivos (pantallas, barreras, luz, sonido), cuyo efecto depende de las especies presentes. Los costes de estas medidas son elevados y se aplican preferiblemente en plantas de nueva construcción. Si es posible reutilizar más calor para necesitar menos capacidad de refrigeración, pueden reducirse los vertidos de aguas residuales calientes a la masa de agua receptora.

- **Emisiones de calor a las aguas superficiales**

Como ya se ha dicho, las emisiones de calor pueden causar un impacto ambiental en las aguas receptoras. Factores de influencia son, por ejemplo, la capacidad de refrigeración de dichas aguas y su temperatura y situación ecológica. Los vertidos de aguas que se han calentado tras ser utilizadas como medio refrigerante pueden hacer que se sobrepasen los niveles de calidad medioambiental correspondientes a las temperaturas que se registran durante el período estival. La Directiva 78/659/CEE refleja los requisitos térmicos aplicables a dos sistemas ecológicos (aguas de salmónidos y aguas de ciprínidos). Con respecto al impacto ambiental que producen las emisiones de calor, no sólo importa la temperatura propia de las aguas receptoras, sino también el aumento de temperatura que se registra en los límites de la zona de mezcla como consecuencia de los vertidos calientes. El alcance del impacto ambiental depende tanto de la cantidad como del nivel del calor emitido en relación con las dimensiones de la masa de agua receptora. Si los vertidos se realizan en masas de agua relativamente pequeñas y el penacho de agua caliente alcanza la margen opuesta del río o canal, pueden crear barreras a la migración de los salmónidos.

Además de estos efectos, las elevadas temperaturas que producen las emisiones de calor pueden provocar un aumento de la respiración y de la producción biológica (eutrofización), reduciendo la concentración de oxígeno en el agua.

A la hora de diseñar un sistema de refrigeración, deben tenerse en cuenta todos estos aspectos y las posibilidades de reducir el calor que se disipa en las aguas superficiales.

- **Emisiones de sustancias a las aguas superficiales**

Las sustancias que emiten los sistemas de refrigeración a las aguas superficiales pueden ser:

- aditivos que se añaden al agua refrigerante y sus componentes reactantes,
- sustancias que son transportadas por el aire a una torre de refrigeración,
- productos de la corrosión de los equipos que integran los sistemas de refrigeración, y
- fugas de productos químicos de proceso y los productos de su reacción.

Para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas de refrigeración puede ser necesario tratar el agua refrigerante para evitar la corrosión, la oxidación y las micro/macroincrustaciones en los equipos. El tratamiento será diferente según se trate de sistemas con o sin recirculación. En estos últimos, pueden ser tratamientos bastante complejos, que utilicen muy diversos productos químicos. En consecuencia, las emisiones que generan las purgas de estos sistemas también son muy variables y es difícil establecer niveles representativos. A veces se aplica un tratamiento a las aguas purgadas antes de realizar la descarga.

Las emisiones de biocidas oxidantes en los sistemas abiertos sin recirculación –medidas como oxidantes libres en la salida– oscilan entre 0,1 [mg FO/l] y 0,5 [mg FO/l], en función de las pautas y frecuencias de dosificación.

Tabla 3: Componentes químicos de los tratamientos aplicados al agua utilizada en sistemas de refrigeración abiertos y recirculantes.

Ejemplos de tratamiento químico *	Problemas de calidad del agua					
	Corrosión		Oxidación		Bioincrustaciones	
	Sistemas sin recirculación	Sistemas recirculantes	Sistemas sin recirculación	Sistemas recirculantes	Sistemas sin recirculación	Sistemas recirculantes
Zinc		X				
Molibdatos		X				
Silicatos		X				
Fosfonatos		X		X		
Polifosfonatos		X		X		
Esteres poliólicos				X		
Compuestos orgánicos naturales				X		
Polímeros	(X)		(X)	X		
Biocidas no oxidantes						X
Biocidas oxidantes					X	X

* el cromato ya no se usa tanto como antes, debido a su fuerte impacto ambiental.

Una forma de reducir las fugas y la corrosión puede ser seleccionar e instalar equipos de refrigeración hechos de materiales adecuados para el entorno en el que han de funcionar. Este entorno se define por:

- las condiciones del proceso, como la temperatura, la presión o el caudal,
- los medios refrigerados, y
- las características químicas del agua refrigerante.

Los materiales más utilizados para fabricar intercambiadores, conductos, bombas y carcasas son el acero al carbono, la niquelina y varias clases de acero inoxidable, pero cada vez se utiliza más el titanio (Ti). También se aplican revestimientos y pinturas para proteger la superficie.

- **Uso de biocidas**

Los sistemas abiertos sin recirculación se tratan principalmente con biocidas oxidantes para evitar las macroincrustaciones. La cantidad aplicada puede expresarse en equivalentes del cloro por MW_{th} en relación con el alcance de las incrustaciones en el intercambiador o en sus proximidades. Utilizar halógenos es perjudicial para el medio ambiente porque se forman subproductos halogenados.

En los sistemas abiertos con recirculación, el agua se somete a un pretratamiento contra la oxidación, la corrosión y la microincrustación. Debido a que los sistemas recirculantes trabajan con volúmenes de agua relativamente menores, es posible aplicar con éxito tratamientos alternativos como el ozono o la luz ultravioleta, aunque requieren condiciones de proceso específicas y pueden ser bastante caros.

Las medidas de servicio que reducen los efectos nocivos del vertido de aguas residuales son el cierre del grifo de purga durante el tratamiento de choque y el tratamiento de las aguas purgadas antes de realizar el vertido a las aguas superficiales receptoras. Si se tratan las aguas purgadas en una depuradora, debe controlarse la actividad biocida remanente, ya que puede afectar a la población microbiana.

Para reducir las sustancias presentes en los vertidos y su impacto sobre el medio acuático, se seleccionan biocidas que se ajusten a los requisitos de los sistemas de refrigeración, teniendo en cuenta la sensibilidad del medio receptor.

- **Emisiones atmosféricas**

El aire que emiten las torres de circuito seco no suele considerarse el aspecto más importante de la refrigeración. Puede ser contaminante si hay una fuga de producto, pero esto puede evitarse con un mantenimiento adecuado.

Las gotas que contienen las emisiones de las torres de proceso húmedo pueden contaminarse con los productos químicos utilizados en el tratamiento de las aguas, con microbios o con los productos de la corrosión. La instalación de eliminadores de deriva y la aplicación de un programa de tratamiento optimizado reducen los posibles riesgos.

La formación de penachos se tiene en cuenta cuando se produce el efecto distorsionador del horizonte o cuando existe riesgo de que el penacho alcance el nivel del suelo.

- **Ruido**

Las emisiones acústicas constituyen un problema local en las grandes torres de refrigeración de tiro natural y en todos los sistemas de refrigeración mecánica. Sin atenuación, los niveles de presión acústica oscilan entre 70 dB(A) en las torres de tiro natural y 120 dB(A) en las torres mecánicas. Estas variaciones se deben a la utilización de diferentes equipos y distintos puntos de medición (entrada o salida del aire). Las principales fuentes de emisión son los ventiladores, las bombas y la caída de agua.

- **Aspectos de riesgo**

Aspectos de riesgo de los sistemas de refrigeración son las fugas en los intercambiadores, el almacenamiento de productos químicos y la contaminación microbiológica (como la enfermedad del legionario) de los sistemas de refrigeración de proceso húmedo.

El mantenimiento preventivo y la vigilancia son medidas que se aplican para evitar las fugas y la contaminación microbiológica. Si las fugas pueden acarrear la emisión de grandes cantidades de sustancias nocivas para el medio acuático, se considera la posibilidad de utilizar sistemas de refrigeración directos o adoptar medidas preventivas especiales.

Para evitar brotes de *Legionellae pneumophila (Lp)*, se aconseja establecer un programa adecuado de tratamiento de las aguas. No ha sido posible determinar límites máximos de concentración de la *Lp* –medidos en unidades formadoras de colonias (UFC por litro)– que sirvan como indicadores fiables de riesgo. La forma más eficaz de evitar este problema es realizar un mantenimiento adecuado.

- **Residuos de los sistemas de refrigeración**

Son escasos los informes de que se dispone con respecto a los residuos. Han de considerarse como tales los lodos que se generan en el pretratamiento del agua refrigerante o en los depósitos de las torres de refrigeración, que se tratan y se eliminan de distintas maneras en función de sus propiedades mecánicas y de su composición química. Los niveles de concentración varían según el programa de tratamiento de las aguas residuales.

Las emisiones al medio ambiente se reducen además mediante la aplicación de técnicas menos nocivas en la conservación de los equipos de refrigeración y mediante la selección de materiales que puedan reciclarse después de desmantelar o sustituir dichos equipos.

4. Principales conclusiones sobre MTD

En el capítulo 4 se describen las MTD para sistemas nuevos y antiguos. Las conclusiones pueden resumirse de la manera siguiente.

Se reconoce que la solución definitiva dependerá de las condiciones específicas de la instalación, pero se han identificado algunas MTD que pueden aplicarse en algunos aspectos con carácter general. En todas las situaciones, deben estudiarse y utilizarse las opciones disponibles y viables para reutilizar el calor, con el fin de reducir el nivel y cantidad del calor irrecuperable, antes de considerar la disipación del calor de un proceso industrial en el medio ambiente.

En todas las instalaciones, la MTD es una tecnología, método o procedimiento y el resultado de un enfoque integrado para reducir el impacto ambiental de los sistemas de refrigeración industrial, manteniendo el equilibrio entre los efectos directos e indirectos. El sistema de refrigeración no deberá sufrir merma alguna de su eficiencia por la adopción de medidas de reducción o, en todo caso, una pérdida insignificante en comparación con sus efectos positivos.

En algunos aspectos medioambientales, se han identificado técnicas que pueden considerarse MTD con arreglo al enfoque integrado. No ha sido posible identificar una MTD clara para reducir los residuos ni para manipularlos evitando problemas como la contaminación del suelo y el agua o –en el caso de que incluya una fase de incineración– del aire.

- **Requisitos del proceso y de la instalación**

El sistema de refrigeración (húmedo, seco o híbrido) que se elija para cumplir los requisitos del proceso y de la instalación debe conseguir la máxima eficiencia energética total. Con vistas a alcanzar este máximo grado de eficiencia, cuando se trabaja con grandes dosis de calor de bajo nivel (10-25°C), la MTD es utilizar sistemas abiertos sin recirculación. En las instalaciones de nueva construcción, este hecho puede justificar la elección de una zona (costera) con grandes cantidades de agua disponible para la refrigeración y situada junto a una masa de aguas superficiales con capacidad suficiente para recibir grandes vertidos de aguas residuales.

Cuando se trata de refrigerar sustancias peligrosas que (emitidas por el sistema de refrigeración) comportan un alto riesgo para el medio ambiente, la MTD es utilizar sistemas indirectos con un circuito de refrigeración secundario.

En principio, debe reducirse al mínimo el uso de aguas freáticas para la refrigeración, por ejemplo cuando no puede descartarse la posibilidad de que se agoten los recursos hídricos subterráneos.

- **Reducción del consumo directo de energía**

Para reducir el consumo directo de energía, hay que reducir la resistencia al agua o el aire en el sistema de refrigeración utilizando equipos de bajo consumo. Si el proceso refrigerado exige un funcionamiento variable, la modulación de los caudales de aire y agua es una técnica que se ha aplicado con éxito y que puede considerarse MTD.

- **Reducción del consumo de agua y de las emisiones de calor a las aguas**

Estas reducciones están estrechamente relacionadas, por lo que se aplican las mismas opciones tecnológicas.

La cantidad de agua necesaria para la refrigeración está relacionada con la cantidad de calor que hay que disipar. Cuanto mayor sea el nivel de reutilización del agua refrigerante, menores serán las cantidades necesarias.

La recirculación del agua refrigerante, por medio de un sistema recirculante abierto o cerrado, se considera MTD cuando el suministro de agua no es suficiente o fiable.

En los sistemas recirculantes, aumentar el número de ciclos puede ser MTD, pero la necesidad de aplicar un tratamiento al agua refrigerante puede ser un factor limitativo.

Es MTD instalar eliminadores de deriva para reducir ésta a menos del 0,01% del caudal recirculado total.

- **Reducción del arrastre de especies**

Se han desarrollado muchas técnicas diferentes para evitar el arrastre de especies o reducir los daños causados si éste se produce. Los resultados han sido positivos, aunque variables y específicos de cada instalación. No se ha identificado un MTD clara, pero se hace hincapié en el análisis del biotopo, ya que el éxito y el fracaso dependen en gran medida de aspectos del comportamiento de las especies y del correcto diseño y ubicación de la tubería de toma.

- **Reducción de las emisiones de sustancias químicas a las aguas**

De acuerdo con el enfoque integrado basado en las MTD, las posibles técnicas aplicables para reducir las emisiones al medio acuático debe considerarse en el siguiente orden:

1. seleccionar la configuración del sistema de refrigeración con menos emisiones a las aguas superficiales,
2. fabricar los equipos de refrigeración con materiales más resistentes a la corrosión,
3. prevenir y reducir las fugas de sustancias de proceso al circuito de refrigeración,
4. aplicar un tratamiento alternativo (no químico) al agua refrigerante,
5. seleccionar los aditivos que han de añadirse al agua refrigerante con miras a reducir el impacto ambiental, y
6. optimizar la aplicación (control y dosificación) de dichos aditivos.

Una MTD es reducir la necesidad de acondicionar el agua refrigerante eliminando en lo posible las incrustaciones y la corrosión por medio de un diseño adecuado. En los sistemas sin recirculación, el mejor diseño es evitar las zonas de estancamiento y turbulencia y mantener la velocidad del agua en unos parámetros mínimos (0,8 m/s en los intercambiadores y 1,5 m/s en los condensadores).

Otra MTD es fabricar los sistemas sin recirculación instalados en ambientes muy corrosivos con materiales como el titanio, o como el acero inoxidable de alta calidad u otros materiales de características similares cuando las condiciones ambientales limiten el uso del titanio.

En los sistemas recirculantes, además de las medidas aplicables al diseño, la MTD es identificar los ciclos de concentración aplicados y la capacidad de corrosión de la sustancia de proceso para poder elegir un material de resistencia adecuada a la corrosión.

En las torres de refrigeración, la MTD consiste en aplicar una membrana termotécnica teniendo en cuenta la calidad del agua (contenido de sólidos), las posibles incrustaciones, las temperaturas y la resistencia a la erosión, y elegir material de construcción que no necesite conservación química.

Con la aplicación del concepto VCI, la industria química pretende minimizar los riesgos para el medio acuático si se producen fugas de sustancias de proceso. Este concepto relaciona el grado de impacto ambiental de una sustancia con la configuración del sistema de refrigeración y los requisitos de control. Con mayores riesgos potenciales para el medio ambiente en caso de fugas, este concepto comprende mejores prestaciones anticorrosión, un diseño de refrigeración indirecta y un mayor control del agua refrigerante.

- **Reducción de las emisiones optimizando el tratamiento del agua refrigerante**

En los sistemas sin recirculación, la aplicación de los biocidas oxidantes se optimiza en función de la temporización y frecuencia de la dosificación. Se considera MTD reducir el aporte de biocidas mediante una dosificación específica combinada con el control del comportamiento de las especies que provocan macroincrustaciones (por ejemplo, el movimiento de las valvas de los mejillones) y con el tiempo de residencia del agua refrigerante en el sistema. En sistemas que mezclan distintos flujos de refrigeración en la salida, la MTD es la cloración alternada por pulsos, que puede reducir aún más las concentraciones de oxidantes libres en los vertidos. En general, para evitar las incrustaciones, basta con aplicar un tratamiento discontinuo en los sistemas sin recirculación. En función de las especies y de la temperatura del agua (por encima de 10-12°C), puede ser necesario aplicar un tratamiento continuo a bajos niveles.

Con respecto a las aguas marinas, las concentraciones de oxidantes residuales libres en los vertidos que corresponden a las prácticas consideradas como MTD varían en función del régimen de dosificación (continuo o discontinuo) y de la concentración de las dosis, así como de la configuración del sistema de refrigeración. Oscilan entre $\leq 0,1$ mg/l y 0,5 mg/l, con un valor medio de 0,2 mg/l en 24 horas.

Un elemento importante para adoptar un enfoque basado en MTD en el tratamiento de las aguas –especialmente en sistemas recirculantes que utilizan biocidas no oxidantes– es que se tomen decisiones informadas con respecto a cuál debe ser el régimen de tratamiento aplicado y cómo debe controlarse y vigilarse. La elección del régimen adecuado es una cuestión compleja, que debe tener en cuenta varios factores locales y específicos de la instalación y ponerlos en relación con las características de los propios aditivos de tratamiento y sus cantidades y combinaciones.

Con el fin de contribuir a este proceso de decisión, este documento pretende servir de base a las autoridades competentes para valorar la concesión de permisos de IPPC.

La Directiva 98/8/CE regula la comercialización de biocidas en Europa y contempla una categoría específica para los biocidas utilizados en los sistemas de refrigeración. El intercambio de información demuestra que algunos Estados miembros disponen de sistemas de evaluación específicos para el uso de aditivos en el agua refrigerante.

Tras el intercambio de información sobre los sistemas de refrigeración industrial, se presentaron dos propuestas relativas a estos aditivos, que las autoridades competentes pueden utilizar como instrumento complementario:

-
1. Un instrumento de evaluación basado en los conceptos ya existentes, que permite realizar una sencilla comparación relativa de los aditivos en términos de su impacto acuático potencial (evaluación comparativa, punto 1 del anexo VIII).
 2. Un estudio específico de la instalación para valorar el posible impacto de los biocidas vertidos a la masa de agua receptora, de acuerdo con la Directiva sobre biocidas y aplicando la metodología de niveles de calidad medioambiental que está previsto incorporar en la futura Directiva marco sobre el agua (evaluación local de biocidas, punto 2 del anexo VIII).

La evaluación comparativa puede servir para comparar el impacto ambiental causado por varios aditivos alternativos, mientras que la evaluación local constituye un patrón de referencia para determinar un enfoque compatible con las MTD y aplicable a los biocidas en particular (PEC/PNEC < 1). El uso de metodologías de evaluación local como instrumento de control de las emisiones industriales es ya práctica habitual.

- **Reducción de las emisiones atmosféricas**

La reducción de las emisiones atmosféricas procedentes de las torres de refrigeración está relacionada con la optimización del acondicionamiento del agua refrigerante para reducir las concentraciones en las gotas. Si el principal mecanismo de transporte es la deriva, la MTD consiste en instalar eliminadores de deriva que consigan reducir la pérdida de flujo recirculante por este motivo a menos del 0,01%.

- **Reducción del ruido**

Las medidas primarias consisten en la instalación de equipos de baja emisión acústica. Los niveles de reducción son de hasta 5 dB(A).

Las medidas secundarias adoptadas en las entradas y salidas de las torres de refrigeración mecánica conllevan niveles de reducción mínimos de 15 dB(A) o más. Hay que señalar que la reducción del ruido, en especial con medidas secundarias, puede producir una caída de presión, que necesita compensarse con un consumo de energía adicional

- **Reducción de fugas y riesgos microbiológicos**

Son MTD: evitar las fugas con medidas de diseño, controlar que el funcionamiento de los sistemas se ajuste a los límites del diseño y realizar inspecciones periódicas.

En el sector químico en particular, se considera MTD aplicar el concepto de seguridad de VCI, que ya se ha mencionado anteriormente con respecto a la reducción de las emisiones a las aguas.

Es imposible prevenir de forma absoluta los brotes de *Legionella pneumophila* en los sistemas de refrigeración, pero las siguientes medidas se consideran MTD:

- evitar las zonas de estancamiento y mantener el agua a velocidad suficiente,
- optimizar el tratamiento del agua refrigerante para reducir las incrustaciones y el desarrollo y proliferación de algas y amebas,
- limpiar periódicamente los depósitos de las torres de refrigeración, y
- reducir la vulnerabilidad respiratoria de los operarios facilitándoles protecciones bucales y auditivas cuando entren en una instalación en funcionamiento o cuando realicen limpiezas de alta presión en las torres.

5. Distinción entre sistemas nuevos y ya existentes

Todas las conclusiones sobre las MTD pueden aplicarse a los sistemas de refrigeración nuevos. Si requieren cambios tecnológicos, su aplicación puede limitarse a los sistemas ya existentes. En las pequeñas torres de refrigeración producidas en serie, los cambios tecnológicos son técnica y

económicamente viable. En los grandes sistemas, suelen tener grandes costes y hacer necesaria una compleja valoración técnica y económica en la que cuentan muchos factores. En algunos casos puede ser viable realizar adaptaciones relativamente pequeñas, cambiando parte de los equipos. Si hay que aplicar cambios tecnológicos más amplios, puede ser necesario realizar un estudio pormenorizado de los costes y efectos medioambientales.

En general, las MTD son similares para los sistemas nuevos y antiguos, ya que se centran en reducir el impacto ambiental mejorando el funcionamiento del sistema. Esto supone:

- optimizar el tratamiento de las aguas de la refrigeración mediante la selección y dosificación controlada de los aditivos utilizados con miras a reducir su impacto ambiental,
- realizar un mantenimiento periódico de los equipos, y
- vigilar los parámetros de trabajo, como la corrosión superficial del intercambiador, la composición química del agua refrigerante y el alcance de las incrustaciones y fugas.

Ejemplos de técnicas consideradas MTD para sistemas de refrigeración ya existentes son:

- la aplicación de una membrana termotécnica adecuada para contrarrestar las incrustaciones,
- la sustitución de los equipos giratorios por dispositivos con baja emisión de ruido,
- la prevención de fugas mediante la observación de los tubos de los intercambiadores,
- la biofiltración de las corrientes intermedias,
- la mejora de la calidad del agua de reposición, y
- la dosificación específica en los sistemas sin recirculación.

6. Conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos

Este documento ha recibido un gran respaldo por parte del grupo de trabajo técnico. Evaluar y determinar las MTD para el proceso de refrigeración industrial se considera en general un trabajo muy complejo y muy específico de cada instalación y de cada proceso, en el que hay que tener en cuenta muchos aspectos técnicos y de costes. Con todo, se ha apoyado con claridad el concepto de MTD para los sistemas de refrigeración con carácter general, basado en el prefacio del documento de referencia y en la introducción del capítulo 4.

Durante el intercambio de información se pusieron de relieve varias cuestiones en las que será necesario seguir trabajando con vistas a la revisión del presente documento. Con respecto a la evaluación local de los tratamientos aplicados a las aguas de refrigeración, hacen falta nuevas investigaciones que aclaren cómo deben tenerse en cuenta todos los factores pertinentes y las características químicas del lugar, pero al mismo tiempo se necesita una orientación clara y un procedimiento practicable. Otros ámbitos de interés que requieren estudios adicionales son las técnicas alternativas para tratar el agua refrigerante, la reducción del riesgo microbiológico y la importancia de las emisiones atmosféricas.