

Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para la generación de energía geotérmica

Introducción

Las guías sobre medio ambiente, salud y seguridad (MASS) son documentos de referencia técnica que contienen ejemplos generales y específicos de la práctica internacional recomendada para la industria en cuestión¹. Cuando uno o más miembros del Grupo del Banco Mundial participan en un proyecto, estas guías sobre MASS se aplican con arreglo a los requisitos de sus respectivas políticas y normas. Las presentes guías sobre MASS para este sector de la industria deben usarse junto con el documento que contiene las **guías generales sobre MASS**, en el que se ofrece orientación a los usuarios respecto de cuestiones generales sobre la materia que pueden aplicarse potencialmente a todos los sectores industriales. Los proyectos más complejos podrían requerir el uso de múltiples guías para distintos sectores de la industria. Para una lista completa de guías sobre los distintos sectores de la industria, visitar: <http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/EnvironmentalGuidelines>

Las guías sobre MASS contienen los niveles y los indicadores de desempeño que generalmente pueden lograrse en instalaciones nuevas, con la tecnología existente y a costos razonables. En lo que respecta a la posibilidad de aplicar estas

guías a instalaciones ya existentes, podría ser necesario establecer metas específicas del lugar así como un calendario adecuado para alcanzarlas.

La aplicación de las guías debe adaptarse a los peligros y riesgos establecidos para cada proyecto sobre la base de los resultados de una evaluación ambiental en la que se tengan en cuenta las variables específicas del emplazamiento, tales como las circunstancias del país receptor, la capacidad de asimilación del medio ambiente y otros factores relativos al proyecto. La decisión de aplicar recomendaciones técnicas específicas debe basarse en la opinión profesional de personas idóneas y con experiencia.

En los casos en que el país receptor tenga reglamentaciones diferentes a los niveles e indicadores presentados en las guías, los proyectos deben alcanzar los que sean más rigurosos. Cuando, en vista de las circunstancias específicas de cada proyecto, se considere necesario aplicar medidas o niveles menos exigentes que aquellos proporcionados por estas Guías sobre MASS, será necesario aportar una justificación exhaustiva y detallada de las alternativas propuestas como parte de la evaluación ambiental en un sector concreto. Esta justificación debería demostrar que los niveles de desempeño escogidos garantizan la protección de la salud y el medio ambiente.

Aplicabilidad

La presente guía sobre MASS hace referencia a la generación de energía geotérmica. El **Anexo A** del presente documento proporciona una descripción general sobre las actividades de

¹ Definida como el ejercicio de la aptitud profesional, la diligencia, la prudencia y la previsión que podrían esperarse razonablemente de profesionales idóneos y con experiencia que realizan el mismo tipo de actividades en circunstancias iguales o semejantes en el ámbito mundial. Las circunstancias que los profesionales idóneos y con experiencia pueden encontrar al evaluar el amplio espectro de técnicas de prevención y control de la contaminación a disposición de un proyecto pueden incluir, sin que la mención sea limitativa, diversos grados de degradación ambiental y de capacidad de asimilación del medio ambiente, así como diversos niveles de factibilidad financiera y técnica.

generación de energía geotérmica. Para una discusión sobre aspectos relacionados con la transmisión y la distribución, ver las guías sobre MASS para la transmisión y distribución de electricidad.

Este documento está dividido en las siguientes secciones:

- Sección 1.0: Manejo e impactos específicos de la industria
- Sección 2.0: Indicadores y seguimiento del desempeño
- Sección 3.0: Referencias y fuentes adicionales
- Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

1.0 Manejo e impactos específicos de la industria

La siguiente sección contiene una síntesis de las cuestiones relativas al medio ambiente, la salud y la seguridad asociadas a la generación de energía geotérmica, así como recomendaciones para su manejo. Por otra parte, en las **guías generales sobre medio ambiente, salud y seguridad** se ofrecen recomendaciones sobre la gestión de las cuestiones de este tipo que son comunes a la mayoría de los grandes establecimientos industriales durante las etapas de construcción y de desmantelamiento.

1.1 Medio ambiente

Entre las cuestiones ambientales a que pueden dar lugar los proyectos de generación de energía geotérmica se encuentran las siguientes²:

- Efluentes
- Emisiones a la atmósfera
- Residuos sólidos
- Reventones en pozos y fallos en las tuberías
- Consumo y extracción del agua

Efluentes

Fluidos y detritos de perforación

Durante las actividades de exploración, desarrollo y operación pueden instalarse pozos de producción de vapor y reinyección. Los fluidos de perforación empleados durante las actividades de perforación pueden ser acuosos u oleosos, y pueden contener aditivos químicos para ayudar a controlar las variaciones de presión en el sondeo e impedir la pérdida de viscosidad. Los detritos procedentes de los lodos oleosos son especialmente

preocupantes debido a los contaminantes oleosos que contienen, y pueden precisar un tratamiento y eliminación especiales dentro o fuera del emplazamiento. Las recomendaciones para el manejo de los detritos y fluidos de perforación incluyen:

- La recuperación y almacenamiento de fluidos y detritos oleosos de perforación en tanques o pozos de almacenamiento dedicados, revestidos con una membrana impermeable, antes del tratamiento (p. ej. lavado), reciclaje y/o tratamiento final y eliminación;
- La reutilización de fluidos de perforación, cuando sea posible;
- La eliminación de tanques y pozos para evitar la descarga presente o futura de materiales oleosos en el suelo o en los recursos hídricos y el tratamiento / eliminación de los contenidos como residuos peligrosos o no peligrosos en función de sus propiedades (ver las guías generales sobre MASS);
- La eliminación de fluidos acuosos de perforación en el pozo de sondeo tras una valoración de la toxicidad. Los detritos acuosos suelen reutilizarse siempre que no sean tóxicos (p. ej. como relleno de construcción) o se eliminarán en un vertedero;
- Durante el tratamiento ácido de los pozos, el uso de encofrados de pozo a prueba de fugas a profundidades adecuadas a la formación geológica para evitar la filtración de fluidos ácidos en las aguas subterráneas.

Fluidos geotérmicos usados

Los fluidos geotérmicos usados consisten en agua de desecho procedente de los separadores de vapor (el agua desechada presente inicialmente en el vapor procedente de la reserva geotérmica) y el condensado derivado de la condensación del vapor usado después de la generación de electricidad. Las instalaciones que utilizan torres de refrigeración de agua

² Duffield y Sass (2003).

durante el proceso de evaporación suelen dirigir el condensado geotérmico al ciclo de refrigeración. El condensado geotérmico puede caracterizarse por altas temperaturas, un reducido pH y un contenido en metales pesados. Las aguas de desecho procedente de los separadores presentan a menudo un pH neutro y pueden contener metales pesados³. La calidad del vapor y el agua de formación depende de las características del recurso geotérmico.

El manejo recomendado para los fluidos geotérmicos incluye:

- La cuidadosa evaluación de los posibles impactos ambientales de las descargas de fluido geotérmico en función del sistema de refrigeración elegido;⁴
- Cuando las instalaciones no reinyecten todos los fluidos geotérmicos bajo tierra, la calidad de la descarga de efluentes deberá ajustarse al uso de la masa de agua receptora tal y como describen las **guías generales sobre MASS**. Esto podría implicar un ajuste de la temperatura del efluente según la normativa local o normas específicas del emplazamiento basadas en los posibles impactos sobre la masa de agua receptora. Cuando se registren elevadas concentraciones de metales pesados en los fluidos geotérmicos, se aplicarán buenos criterios a la hora de descargarlos en masas de agua naturales que puedan precisar la construcción y operación de instalaciones de tratamiento complejas y costosas;
- Cuando la reinyección sea la alternativa seleccionada, se minimizarán las probabilidades de contaminación de las aguas subterráneas mediante la instalación de encofrados de pozo a prueba de fugas en los pozos de inyección a una profundidad ajustada a la formación geológica que albergue la reserva geotérmica;

- Se estudiarán las oportunidades para reutilizar los fluidos geotérmicos desechados, incluyendo:
 - El uso de tecnologías binarias de generación de electricidad;
 - La utilización en procesos industriales aguas abajo, siempre que la calidad del agua desechada (incluidos los niveles de metales pesados totales y disueltos) respete los requisitos de calidad en función del uso final. Algunos ejemplos de usos aguas abajo incluyen las aplicaciones de calor, como son invernaderos, acuicultura, calefacción de locales, procesamiento de alimentos / frutas y uso recreativo para hoteles / balnearios, entre otros.

Emisiones a la atmósfera

Las emisiones de las plantas de energía geotérmica son mínimas en comparación con las plantas de electricidad basadas en la combustión de combustibles fósiles⁵. El ácido sulfhídrico y el mercurio son los principales contaminantes del aire asociados con la generación de energía geotérmica por medio de tecnologías de evaporación instantánea o vapor seco. El dióxido de carbono está presente en el vapor, aunque sus emisiones también se consideran mínimas en comparación con las fuentes de combustión de combustibles fósiles. La presencia y concentración de posibles contaminantes del aire puede variar dependiendo de las características de la fuente geotérmica.

Las emisiones pueden producirse durante las actividades de perforación de pozos y las pruebas de flujo, a través de los condensadores de contacto / torres de refrigeración abiertos, a menos que se bombeen fuera del condensador y se reinyecten en la reserva junto con los fluidos geotérmicos desechados. Los

³ Kestin (1980).

⁴ En ciertos casos, puede optarse por la reinyección para prolongar la vida de la reserva.

⁵ Por ejemplo, las plantas de energía geotérmica emiten aproximadamente un 1 por ciento de óxido de azufre (SO_x) y óxido de nitrógeno (NO_x) y un 5 por ciento de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) procedentes de las plantas de energía térmica con una capacidad de generación eléctrica similar suministrada con carbón (Duffield y Sass (2003)).

silenciadores de ventilación en los campos de pozos y las plantas pueden ser también fuentes potenciales de emisiones de ácido sulfhídrico, sobre todo en condiciones operativas alteradas que requiera ventilación. Las tecnologías binarias y las que combinan evaporación instantánea / tecnología binaria (con tecnología de condensación sin contacto) casi no emiten ácido sulfhídrico y mercurio a la atmósfera, gracias a la reinyección de todos los fluidos y gases geotérmicos.

Los métodos recomendados para el manejo de las emisiones a la atmósfera incluyen:

- Estudiar las opciones tecnológicas que impliquen la reinyección total o parcial de gases con fluidos geotérmicos en el contexto de los posibles impactos ambientales ocasionados por tecnologías alternativas de generación junto con otros factores primarios, como el ajuste de la tecnología al recurso geológico y las consideraciones económicas (p. ej. costes de capital y explotación / mantenimiento);
- Cuando la reinyección total no sea factible, se ventilará el ácido sulfhídrico y el mercurio volátil no condensable siempre que, basándose en una evaluación del impacto potencial en las concentraciones ambiente, los niveles de contaminantes no excedan las normas aplicables de higiene y seguridad;
- Cuando sea necesario, emplear sistemas reductores para eliminar las emisiones de ácido sulfhídrico y mercurio procedentes de gases no condensables. Entre los posibles controles de ácido sulfhídrico se incluyen lavadores húmedos o secos y sistemas de reducción de fase líquida / oxidación, mientras que los controles de emisiones de mercurio pueden consistir en la condensación de la corriente de gas con métodos adicionales de separación y adsorción;

Residuos sólidos

Las tecnologías geotérmicas no producen cantidades sustanciales de residuos sólidos. Los precipitados de azufre, silicio y carbonato proceden normalmente de las torres de refrigeración, sistemas de depuración de gases, turbinas y separadores de vapor. Estos lodos pueden calificarse de peligrosos en función de la concentración y las probabilidades de filtración de los compuestos de silicio, cloruros, arsénico, mercurio, vanadio, níquel y otros metales pesados. Las **guías generales sobre MASS** describen el manejo recomendado para los residuos peligrosos, lo que implica el almacenamiento y contención en el emplazamiento antes del tratamiento final y la eliminación en una instalación de residuos adecuada. Cuando los lodos sean de calidad aceptable y no contengan un nivel significativo de metales filtrables (es decir, cuando se trate de residuos no peligrosos), podrá estudiarse la posibilidad de reutilizarlos dentro o fuera del emplazamiento como opción para su eliminación. Los sólidos recuperables, como la torta de azufre, deben reciclarse en la medida de lo posible en plantas externas⁶. Los métodos de eliminación se determinarán inicialmente mediante análisis químicos adecuados de los precipitados, que se repetirán periódicamente (p. ej., anualmente) para tener en cuenta las posibles variaciones geoquímicas y los impactos resultantes en la calidad del agua.

Reventones en pozos y fallos en las tuberías

Aunque altamente improbables, durante la perforación de pozos y el funcionamiento de las instalaciones pueden producirse reventones de pozos y fallos en las tuberías. Estos fallos pueden provocar el vertido de aditivos y fluidos tóxicos de perforación, así como gases de ácido sulfhídrico procedentes de formaciones subterráneas. Las roturas en las tuberías también pueden ser el resultado de la liberación superficial de

⁶ Un ejemplo de uso beneficioso es la producción de fertilizantes agrícolas.

fluidos y vapores geotérmicos que contengan metales pesados, ácidos, depósitos minerales y otros contaminantes.

Los métodos recomendados para controlar y prevenir la contaminación en caso de reventones en pozos o las roturas en las tuberías incluyen:

- El mantenimiento periódico de bocas de pozos y conductos de fluidos geotérmicos, incluidos el control y la inspección de la corrosión; el seguimiento de la presión; y el uso de equipos de prevención de reventones, como por ejemplo las válvulas de corte; y
- El diseño de respuestas ante emergencias en caso de reventón en los pozos o roturas en las tuberías, incluidas las medidas destinadas a la contención de vertidos de fluidos geotérmicos⁷.

La planificación de las respuestas en caso de emergencia se describe detalladamente en las **guías generales sobre MASS**.

Consumo y extracción del agua

La extracción de aguas superficiales es necesaria para distintas actividades de generación de energía geotérmica, incluida la perforación de pozos, las pruebas de inyectividad de las formaciones subterráneas y su uso en los sistemas de refrigeración. El agua superficial empleada durante la refrigeración sin contacto en una pasada suele regresar a la fuente con un contenido calorífico aumentado en alguna medida, aunque sin cambios generales en términos de calidad.

Se recomiendan las siguientes medidas de manejo para conservar las fuentes de agua empleadas en las actividades de generación geotérmica:

- Evaluar los registros hidrológicos sobre la variabilidad a corto y largo plazo de las corrientes que sirven de agua

original, garantizando el mantenimiento de los fluidos críticos durante las épocas de flujos bajos para no obstaculizar la circulación de los peces o perjudicar a la biota acuática;

- Supervisar las variaciones de temperatura del efluente y de las masas de aguas receptoras para cumplir con la normativa local relativa a la descarga térmica o, en ausencia de tal normativa, de acuerdo con los principios señalados anteriormente en el presente documento.

1.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Los riesgos que la construcción y el desmantelamiento de los proyectos de generación de energía térmica entrañan para la higiene y la seguridad en el trabajo son similares a los que se producen en la mayoría de las instalaciones industriales; su prevención y control se analizan en las **guías generales sobre MASS**.

Las cuestiones sobre higiene y seguridad específicamente relacionadas con los proyectos de generación de energía geotérmica incluyen la posible exposición a:

- Gases geotérmicos
- Espacios reducidos
- Calor
- Ruido

Gases geotérmicos

La exposición en el trabajo a los gases geotérmicos, principalmente al gas de ácido sulfhídrico, puede darse durante el vertido extraordinario de fluidos geotérmicos (por ejemplo, como consecuencia de fallos en las tuberías) y labores de mantenimiento en espacios reducidos como son tuberías, turbinas y condensadores. La importancia del riesgo que

⁷ Para más información, ver Babok y Toth (2003).

supone el ácido sulfhídrico puede variar en función de la ubicación y formación geológica propia de las instalaciones.

Cuando exista la probabilidad de exposición a niveles peligrosos de ácido sulfhídrico, las instalaciones de generación de energía geotérmica tendrán en cuenta las siguientes medidas de manejo:

- Instalar sistemas de seguimiento y alerta de ácido sulfhídrico. El número y la ubicación de monitores se determinarán sobre la base de una evaluación de las ubicaciones de las plantas más propicias para la emisión de ácido sulfhídrico y para la exposición ocupacional⁸;
- Elaborar un plan de emergencia para los vertidos de ácido sulfhídrico, incluyendo todos los aspectos relativos a la evacuación y la vuelta a las operaciones normales;
- Proporcionar equipos de respuesta ante emergencias en las instalaciones, monitores personales de ácido sulfhídrico, aparatos respiratorios autónomos y suministro de oxígeno de emergencia, además de capacitar sobre el uso seguro y efectivo de los mismos a los trabajadores que se encuentren en áreas con alto riesgo de exposición;
- Proporcionar sistemas de ventilación adecuados para los edificios ocupados que eviten la acumulación de gas de ácido sulfhídrico;
- Elaborar e implementar un programa de acceso a espacios cerrados para las zonas designadas como tales (ver a continuación);
- Proporcionar a los trabajadores hojas informativas o información accesible sobre la composición química de las fases líquida y gaseosa, con una explicación sobre sus posibles implicaciones para la salud y la seguridad humana.

⁸ Los valores umbral de alarma en los monitores de ácido sulfhídrico para las instalaciones o el personal se establecerán por debajo de las normas de seguridad recomendadas y de acuerdo con las recomendaciones de un especialista en seguridad en el trabajo.

Espacios cerrados

Los riesgos asociados a los espacios cerrados en éste y otros sectores industriales pueden ser letales. La entrada de trabajadores en espacios cerrados y la posibilidad de que se produzcan accidentes pueden variar de unas instalaciones geotérmicas a otras en función del diseño y de los equipos e infraestructura del emplazamiento. Las áreas específicas y exclusivas de espacios cerrados pueden ser las turbinas, condensadores y torres de refrigeración de agua (durante las actividades de mantenimiento), los almacenes que alberguen los equipos de seguimiento (durante la toma de muestras) y la "bodega" del pozo (una depresión subterránea creada para realizar perforaciones). En estas instalaciones deben formularse y aplicarse los procedimientos para el ingreso a espacios reducidos que se describen en las **guías generales sobre MASS**.

Calor

La exposición ocupacional al calor se produce durante las actividades de construcción y durante la operación y mantenimiento de tuberías, pozos y equipos calientes asociados. La exposición no rutinaria abarca los posibles reventones accidentales producidos durante las labores de perforación, así como el mal funcionamiento de la contención de vapor y las instalaciones de transporte.

Entre las medidas de prevención y control recomendadas en relación con la exposición al calor se cuentan las siguientes:

- Reducir el tiempo requerido para trabajar en entornos a elevadas temperaturas y garantizar el acceso al agua potable;
- Proteger las superficies donde los trabajadores entren en contacto con equipos calientes, incluidos los equipos generadores, conductos, etc.;

- Usar los equipos de protección personal (EPP) adecuados, incluidos guantes y calzado aislante;
- Implementar los procedimientos de seguridad adecuados durante el proceso de perforación de exploración.

Ruido

Las fuentes de ruido en las instalaciones de generación de energía geotérmica están principalmente relacionadas con la perforación de pozos, la expansión instantánea del vapor y la ventilación. Otras fuentes pueden ser los equipos relacionados con las plantas de bombeo, turbinas y actividades de purga de las tuberías. Los niveles temporales de ruido pueden exceder los 100 dBA durante ciertas actividades de perforación y de ventilación de vapor. La tecnología de reducción del ruido incluye el uso de amortiguadores de piedra, aislamiento sonoro y barreras durante las labores de perforación, además de los silenciadores en los equipos instalados en las plantas de procesamiento del vapor. Las **guías generales sobre MASS** contienen recomendaciones adicionales para el manejo del ruido y las vibraciones en el trabajo, como por ejemplo el uso de EPP adecuados.

1.3 Higiene y seguridad en la comunidad

Los impactos en la higiene y seguridad de la comunidad durante la construcción y desmantelamiento de las plantas de generación de energía térmica son comunes a los de la mayoría de las demás instalaciones industriales y se analizan en las **guías generales sobre MASS**.

Los problemas de higiene y seguridad para la comunidad durante las operaciones de las plantas de generación de energía geotérmica incluyen:

- La exposición al gas de ácido sulfhídrico

- La seguridad de la infraestructura
- Los efectos de las actividades en los recursos hídricos

Ácido sulfhídrico

Además de la prevención y el control de las emisiones y la exposición al gas de ácido sulfhídrico descritos en las secciones anteriores sobre higiene y seguridad, se estudiará cuidadosamente la posible exposición de los miembros de la comunidad durante el proceso de planificación, implementándose las precauciones que sean necesarias. Cuando las probabilidades de exposición para la comunidad sean significativas, entre las medidas de mitigación se contarán:

- La ubicación de fuentes potenciales considerables de emisiones teniendo en cuenta la exposición al gas de ácido sulfhídrico de las comunidades cercanas (teniendo en cuenta factores ambientales fundamentales como la proximidad, la morfología y la dirección predominante del viento);
- La instalación de una red de seguimiento del gas de ácido sulfhídrico en que el número y emplazamiento de las estaciones de seguimiento obedezca a la modelización de la dispersión del aire y tenga en cuenta la ubicación de las fuentes de emisiones y las zonas de uso comunitario y residencial;
- El funcionamiento continuo de los sistemas de seguimiento de gas de ácido sulfhídrico para facilitar su temprana detección y alerta;
- La planificación de emergencia que tenga en cuenta las aportaciones de la comunidad para lograr una respuesta eficaz ante las alertas de los sistemas de seguimiento.

La seguridad de la infraestructura

Las comunidades pueden estar expuestas a los riesgos físicos asociados con los pozos y las redes de tuberías relacionadas. Estos riesgos pueden producirse como resultado del contacto

con componentes calientes, fallos en los equipos o la presencia de infraestructuras de pozos activos y abandonados que puedan plantear riesgos de espacios cerrados o de caídas. Las técnicas de manejo recomendadas para mitigar estos impactos incluyen:

- Colocar elementos disuasorios, como por ejemplo vallas y señales de advertencia, para impedir el acceso y alertar sobre los riesgos existentes;
- Minimizar la longitud de los sistemas de tuberías necesarios;
- Considerar la viabilidad de los conductos subterráneos y las pantallas térmicas para impedir el contacto del público en general con las tuberías geotérmicas calientes;
- Clausurar las infraestructuras, como por ejemplo tuberías y carreteras de acceso, incluyendo: la limpieza, desensamblado y retirada de equipos; el análisis de la calidad del suelo, efectuando la limpieza allá donde sea preciso; la repoblación vegetal del emplazamiento y bloqueo; y la recuperación de las carreteras de acceso donde sea necesario;
- Clausurar las bocas de pozo, lo que incluye el sellado de pozos con cemento, la eliminación de la boca de pozo y el relleno de la depresión en torno a la boca de pozo, cuando sea necesario⁹.

Los efectos de las actividades en los recursos hídricos

La extracción, reinyección y descarga de fluidos geotérmicos puede afectar a la calidad y cantidad de las aguas superficiales y subterráneas. Entre los impactos específicos se cuentan la introducción accidental de fluidos geotérmicos en los acuíferos productivos más superficiales durante las actividades de

extracción y reinyección, o la reducción del flujo de los manantiales térmicos calientes debido a las actividades de extracción. Las medidas recomendadas para prevenir y controlar estos impactos incluyen:

- Elaborar un modelo exhaustivo geológico e hidrogeológico que incluya la arquitectura global geológica, estructural y tectónica, el tamaño de la reserva, los límites y las propiedades geotécnicas e hidráulicas de la roca en el emplazamiento;
- Evaluar el balance hidrogeológico y del agua durante la fase de planificación del proyecto para identificar las interconexiones hidráulicas entre la extracción geotérmica y los puntos de reinyección y las fuentes de agua potable y propiedades de las aguas superficiales;
- Aislar las fuentes productoras de vapor procedentes de formaciones hidrológicas más superficiales que puedan emplearse como fuentes de agua potable mediante la cuidadosa selección del emplazamiento y sistemas de encofrado de los pozos debidamente diseñados e instalados;
- Evitar los impactos negativos en las aguas superficiales introduciendo criterios estrictos para la descarga y los medios adecuados para obtener una calidad del agua y una temperatura basadas en normas aceptables.

2.0 Indicadores y seguimiento del desempeño

2.1 Medio ambiente

Guías sobre emisiones y efluentes

Emisiones

Pueden originarse emisiones mínimas de ácido sulfhídrico, vapor de mercurio y dióxido de azufre como emisiones fugitivas

⁹ El desmantelamiento y cierre de la infraestructura de las plantas geotérmicas podría requerir una detallada planificación basada en cuestiones específicas del emplazamiento.

procedentes de la torre de refrigeración cuando el proceso de condensación implique el contacto directo del vapor con el agua de refrigeración. Las cantidades correspondientes a las emisiones y efluentes de los procesos industriales en este sector son indicativas de las prácticas internacionales recomendadas para la industria, reflejadas en las normas correspondientes de los países que cuentan con marcos normativos reconocidos. Aunque los proyectos de energía geotérmica no suelen generar emisiones considerables de fuentes puntuales durante las fases de construcción y operación, las emisiones de ácido sulfhídrico y otros tipos de emisiones no deberían resultar en concentraciones ambiente superiores a las normas sobre calidad del aire ambiente establecidas a escala nacional o, en ausencia de éstas, a las guías reconocidas internacionalmente¹⁰.

Efluentes

Los fluidos geotérmicos usados que suelen reinyectarse en la formación rocosa anfitriona generan un volumen mínimo de efluentes de aguas desechadas. Los contaminantes potenciales en los efluentes geotérmicos varían en función de la mineralogía de la formación geológica anfitriona, la temperatura del agua geotérmica y los procesos específicos de las instalaciones en el emplazamiento. En caso de no reinyectarse fluidos geotérmicos usados, los efluentes deberán situarse en los niveles de descarga específicos del emplazamiento para las aguas superficiales descritos en las **guías generales sobre MASS**.

Seguimiento ambiental

Se llevarán a cabo programas de seguimiento ambiental para este sector en todas aquellas actividades identificadas por su potencial impacto significativo en el medio ambiente, durante las operaciones normales y en condiciones alteradas. Las

¹⁰ Directrices sobre la calidad del aire, Organización Mundial de la Salud (OMS), Ginebra 2000.

actividades de seguimiento ambiental se basarán en indicadores directos e indirectos de emisiones, efluentes y uso de recursos aplicables al proyecto concreto.

La frecuencia del seguimiento debería permitir obtener datos representativos sobre los parámetros objeto del seguimiento. El seguimiento deberá recaer en individuos capacitados, quienes deberán aplicar los procedimientos de seguimiento y registro y utilizar un equipo adecuadamente calibrado y mantenido. Los datos de seguimiento se analizarán y revisarán con regularidad, y se compararán con las normas vigentes para así adoptar las medidas correctivas necesarias. Las **guías generales sobre MASS** contienen orientaciones adicionales sobre los métodos de muestreo y análisis de emisiones y efluentes.

2.2 Higiene y seguridad en el trabajo

Guía sobre higiene y seguridad en el trabajo

Para evaluar el desempeño en materia de higiene y seguridad en el trabajo deben utilizarse las guías sobre exposición que se publican en el ámbito internacional, entre ellas: guías sobre la concentración máxima admisible de exposición profesional (TLV®) y los índices biológicos de exposición (BEIs®) publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)¹¹, la Guía de bolsillo sobre riesgos químicos publicada por el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad en el Trabajo de los Estados Unidos (NIOSH)¹², los límites permisibles de exposición publicados por la Administración de Seguridad e Higiene en el Trabajo de los Estados Unidos (OSHA)¹³, los valores límite indicativos de

¹¹ Disponibles en: <http://www.acgih.org/TLV/> y <http://www.acgih.org/store/>

¹² Disponible en: <http://www.cdc.gov/niosh/npg/>

¹³ Disponibles en: http://www.osha.gov/pls/oshaweb/owadisp.show_document?p_table=STANDARDS&p_id=9992

exposición profesional publicados por los Estados miembros de la Unión Europea¹⁴ u otras fuentes similares.

Tasas de accidentes y letalidad

Deben adoptarse medidas para reducir a cero el número de accidentes entre los trabajadores del proyecto (ya sean empleados directos o personal subcontratado), especialmente los accidentes que pueden causar la pérdida de horas de trabajo, diversos niveles de discapacidad e incluso la muerte. Como punto de referencia para evaluar las tasas del proyecto puede utilizarse el desempeño de instalaciones en este sector en países desarrollados, que se obtiene consultando las fuentes publicadas (por ejemplo, a través de la Oficina de Estadísticas Laborales de los Estados Unidos y el Comité Ejecutivo de Salud y Seguridad del Reino Unido)¹⁵.

Seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo

Es preciso realizar un seguimiento de los riesgos que pueden correr los trabajadores en el entorno laboral del proyecto concreto. Las actividades de seguimiento deben ser diseñadas y realizadas por profesionales acreditados¹⁶ como parte de un programa de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo. En las instalaciones, además, debe llevarse un registro de los accidentes y enfermedades laborales, así como de los sucesos y accidentes peligrosos. Las **guías generales sobre MASS** contienen orientaciones adicionales sobre los programas de seguimiento de la higiene y la seguridad en el trabajo.

¹⁴ Disponibles en: http://europe.osha.eu.int/good_practice/risks/ds/oel/

¹⁵ Disponibles en: <http://www.bls.gov/iif/> y <http://www.hse.gov.uk/statistics/index.htm>.

¹⁶ Los profesionales acreditados pueden incluir a higienistas industriales certificados, higienistas ocupacionales diplomados o profesionales de la seguridad certificados o su equivalente.

3.0 Referencias y fuentes adicionales

- ANZECC (Consejo Australiano y Neozelandés para el Medio Ambiente y la Conservación). ANZECC. Disponible en: <http://www.deh.gov.au/about/councils/anzecc> (consultado en marzo de 2006).
- AS/NZ (Australian/New Zealand Standard on Risk Management). 1999. Australian/New Zealand Standard on Risk Management (AS/NZ 4360:1999). Auckland, NZ: AS/NZ. Disponible en: <http://www.uq.edu.au/hupp/index.html?page=30899&pid=30896> (consultado en marzo de 2006).
- Asociación Geotérmica Internacional (IGA). 2001. Informe de la IGA para la Comisión de Desarrollo Sostenible de la ONU, Sesión 9 (CSD-9), Nueva York, abril de 2001.
- Axelsson, G. y Gunnlaugsson, E. 2000. "Background: Geothermal utilization, management and monitoring." In *Long-Term Monitoring of High- and Low Enthalpy Fields under Exploitation*, World Geothermal Congress 2000 Short Courses, Japón, 3-10. Beppu, Japón.
- Babok, B., Toth, A., 2003. Geothermal energy production and its environmental impacts in Hungary. International Geothermal Conference, Reikjavik, 2003, pp. 19-25.
- Bay Area Air Quality Management District, Regulation 9: Inorganic Gaseous Pollutants, Rule 5 - Hydrogen Sulfide from Geothermal Power Plants. Disponible en: <http://www.baaqmd.gov/dsl/regulations/index.htm#reg9> (consultado el 11 de septiembre de 2006).
- Brophy, Paul. 1997. "Environmental Advantages to the Utilization of Geothermal Energy." *Renewable Energy* 10:2-3, cuadro 3.374.
- Bloomfield, K., Moore, J.N. y R.M. Neilson Jr. (2003). Geothermal Energy Reduces Greenhouse Gases. Davis, CA: Geothermal Research Council. GRC Bulletin, Abril de 2003.
- Brown, K. L. 2000. "Impacts on the physical environment." En Brown, K.L., ed., *Environmental Safety and Health Issues in Geothermal Development*, World Geothermal Congress 2000 Short Courses, Japón, 43-56. Beppu, Japón.
- California Vision of Oil Gas and Geothermal Resources. 2004. Geothermal Injection Wells.: California Vision of Oil Gas and Geothermal Resources. Disponible en: http://www.consrv.ca.gov/DOG/geothermal/general_info/injection_wells.htm (consultado en marzo de 2006).
- Comisión de Energía de California (California Energy Commission). 2002. Overview of Geothermal Energy in California. Sacramento, CA. California Energy Commission. Disponible en: <http://www.energy.ca.gov/geothermal/overview> (consultado en marzo de 2006).
- Consejo Mundial de la Energía (junio de 2006): http://www.worldenergy.org/wec-geis/publications/default/tech_papers/17th_congress/3_1_17.asp
- Crecelius, E.A.; Robertson, D.E.; Fruchter, J.S.; y Ludwick, J.D. 1976. Chemical forms of mercury and arsenic emitted by a geothermal power plant. 10th Annual Conference on Trace Substances in Environmental Health. University of Missouri, Columbia, Missouri, Estados Unidos.
- Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. DOE), 2000. Revised Geothermal Safety and health rules and regulations. Department Circular 2000-02-001. Washington DC.
- Departamento de Energía de Estados Unidos (US DOE). 2001. Energy and Geosciences Institute at University of Utah. Geothermal Energy: Clean Sustainable Energy for the Benefit of Humanity and the Environment (Brochure).. Washington, DC: US DOE. Disponible en: <http://www.geo-energy.org/RedBrochure.pdf> (con acceso en octubre de 2004).
- Departamento de Energía de Estados Unidos (US DOE), Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). 2004. Geothermal Technologies Program. Geothermal energy Plants.. Washington, DC: US DOE/EERE. Disponible en: <http://www.eere.gov/geothermal/powerplants.html> (con acceso el 6 de diciembre de 2004).
- Departamento de Energía de Estados Unidos (US DOE), Geothermal Technologies Program. 2004. Geopowering the West: Hawaii Facts Sheet. 21 de diciembre de 2004. Washington, DC: US DOE. Disponible en: http://www.eere.energy.gov/geothermal/gpw_hawaii.html (con acceso en marzo de 2006).
- Departamento de Energía de Estados Unidos (U.S. DOE), NERL(National Renewable Energy Laboratory). 2001. Geothermal Energy: Heat from the Earth (Publication No. DOE/GO - 102001-1432). Washington, DC: US DOE/NERL. Disponible en: <http://www.nrel.gov/dos/fy02osti/29214/pdf> (con acceso el 6 de diciembre de 2004).
- Dippio, R. 1999. Small Geothermal energy Plant, Design, Performance and Economics. Geothermal Research Council Bulletin (Junio).Davis, Ca.
- Duffield, W.A., Sass, J.H, 2003. Geothermal Energy - Clean Power from the Earth's Heat. U.S. Geological Survey. Circular 1249. p. 43
- Geothermal Hot Line. 1996. Subsidence and Uplift at Heber Geothermal Field. California.
- Geothermal Regulatory and Reclamation Program at DOGAMI. Department of Geology and Minerals Industries. Portland, OR. Disponible en: <http://www.oregongeology.com/sub/oil/oilhome.htm> (consultado en marzo de 2006).
- Geothermal Training Programme Reports. 2003. Orkustofnun, Grensásvegur 9, Number 5 IS-108. Reykjavik, Islandia.
- Grupo del Banco Mundial. 2002. Geothermal Energy. Washington, DC: World Bank Group. Disponible en: <http://www.worldbank.org/html/fpd/energy/geothermal/> (con acceso el 6 de diciembre de 2004).
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A. y Quijano-León, J.L. 2004. Analysis of Seismicity in the Los Humeros, México, Geothermal Field. *Geothermal Resources Council Transactions* 28: 467-72.
- Hiroyuki T., H. Takagi, Y. Kiyota, K., Matsuda, Hideki Hatanaka, Kanichi Shimada, Hirofumi Inuyama, Roger Young, Larry F. Bayrante, Oliver T. Jordan, Jesus Reymundo M. Salera y Francis Edward B. Bayon. 2000. Development and Verification of a Method to Forecast Hot Springs Interference due to Geothermal Power Exploitation. Proceedings World Geothermal Congress 2000. Kyushu - Tohoku, Japón, 28 de mayo-10 de junio de 2000.
- International Energy Agency. 2003. Appendices to Report on Benign Energy: The Environmental Implications of Renewables. Appendix G Geothermal Paris, France: International Energy Agency. Disponible en: <http://www.iea.org/pubs/studies/files/benign/pubs/append3g.pdf> (consultado en abril de 2003).
- Kagel, A. D. Bates, and K. Gawell. 2005. *Clear the Air: Air Emissions from Geothermal Electric Power Facilities Compared to Fossil-Fuel Power Plants in the United States*. Washington, DC: Geothermal Energy Association, GRC Bulletin, May/June.
- Kestin, J. (Editor). Source book on the production of electricity from Geothermal Energy. Departamento de Energía de Estados Unidos. División de Energía Geotérmica. Washington, D.C.
- Krzan, Zbigniew. 1995. "Environmental Protection of the Tatra, Pieniny and Gorge Mountains by the Use of Geothermal Energy". *WGC* 4: 2799-800.

Lienau, P.J. y Lunis, B.C. (editores), 1991. *Geothermal direct use engineering and design guidebook*. Geoheat Center, Oregon Institute of Technology.

Lunis, B. y Breckenridge, R. 1991. "Environmental considerations". En Lienau, P.J. y Lunis, B.C., eds., *Geothermal Direct Use, Engineering and Design Guidebook*, 437-45. Klamath Falls, Oregon: Geo-Heat Center.

Ministerio Federal Alemán de Medio Ambiente (FME). 2005. *Geothermal Energy – Energy for the Future*. Werner Burchmann, ed. Berlín, Alemania: Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear. Disponible en: www.bmu.de. (consultado en marzo de 2006).

Organización Mundial de la Salud (OMS), Directrices sobre la calidad del aire, segunda edición, Ginebra, 2000. Disponible en: http://www.euro.who.int/air/activities/20050223_3 (consultado el 11 de septiembre de 2006).

Philippines DOE (Department of Energy). 2002. *Guidelines for Geothermal Operations in the Philippines*. Bureau Circular No. 83-01-02. Manila. DOE. Disponible en: www.doe.gov.ph/peer2005 (con acceso en marzo de 2003).

Programa de Medio Ambiente de Estados Unidos (PNUMA). 2005. *Guidelines for Geothermal Energy Systems (Release 1.0) Environmental Due Diligences of Renewable Energy Projects*, United Nations Environmental Programme. UNEP. Disponible en: www.energy-base.org/fileadmin/media/sefi/docs/edd_geothermal.pdf (accessed on November 5, 2005).

Reed, Marshall J. y J. Renner. 1995. "Environmental Compatibility of Geothermal Energy." In F.S. Sterret, eds., *Alternative Fuels and the Environment*. Boca Raton: CRC Press.

Takashashi, K, M. Kuragaki, 2000. Yanaizu-Nishiyama geothermal power station H2S Abatement. *Proceedings of World Geothermal Congress*, Beppu, Japón, 2000. pp. 719-724

Timperly, M.H. y L.F. Hill, (1997). Discharge of mercury from the Wairakei geothermal power station to the Waikato River, New Zealand. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 1997, Vol. 31: 327-336

Utah Water Quality Act. 2004. *The Utah Water Quality Act and Title R317 - Environmental Quality and Water Quality*, 2004. Estado de Utah.

Weres, O. 1984. *Environmental Protection and the Chemistry of Geothermal Fluids*. Berkley, CA.: Lawrence Berkeley Laboratory, LBL 14403.

Wright, P.M. 1998. The Sustainability of Production from Geothermal Resources. *Bulletin. Geo-Heat Center* 19(2): 9-12.

Anexo A: Descripción general de las actividades de la industria

La generación de energía geotérmica supone aprovechar las reservas subterráneas a altas temperaturas de aguas o vapor geotérmicos y la conversión de energía térmica en electricidad. Las plantas de generación de energía geotérmica suelen ubicarse cerca de las fuentes de energía térmica para reducir las pérdidas de calor durante el transporte. La transmisión y distribución de electricidad a distancias más grandes puede lograrse por medio de líneas de electricidad de tamaño adecuado. Las plantas de energía geotérmica suelen requerir entre 0,5 y 3,5 hectáreas de terreno por megavatio (MW). Las plantas integradas geotérmicas proporcionan electricidad y pueden emplear el calor residual procedente del fluido geotérmico desechado en distintas posibles industrias aguas abajo, como es el caso de los invernaderos, la acuicultura, la calefacción de locales, el procesamiento de alimentos / frutas y el uso recreativo de hoteles / balnearios, entre otros¹⁷.

Los componentes básicos de las instalaciones de generación de energía geotérmica incluyen pozos para acceder al vapor y a las aguas subterráneas sobrecalentadas, turbinas de vapor, generadores, condensadores, torres de refrigeración, bombas de reinyección y equipos de interconexión de la malla eléctrica.

Los proyectos de energía geotérmica constan de tres fases principales, incluida la exploración y evaluación de las reservas, el desarrollo del campo de producción y la construcción de la planta eléctrica.

Las actividades de exploración y evaluación de las reservas incluyen sondeos geológicos, geofísicos y de perforación para la perforación exploratoria y las pruebas a las que se someten las reservas.

El desarrollo del campo de producción comprende el uso de pozos de perforación de producción de vapor o agua caliente y pozos de reinyección y el procesamiento del producto de la reserva para su uso en la planta eléctrica. La perforación prosigue durante el transcurso de la vida del proyecto, dado que los pozos de producción e inyección deben actualizarse periódicamente para cumplir los requisitos de generación de electricidad.

Las actividades de construcción de las plantas de electricidad incluyen la construcción de las instalaciones y la infraestructura asociada (por ejemplo, torres de refrigeración, tuberías e instalaciones dedicadas al tratamiento y reinyección de aguas residuales y gases). Otras actividades consisten en el establecimiento de estanques de asentamiento para dar soporte a las labores de perforación y pruebas de pozos, y la construcción de carreteras de acceso, zonas de almacenamiento e instalaciones de mantenimiento.

Las actividades operativas incluyen el funcionamiento y mantenimiento rutinarios de la planta de generación de energía geotérmica, el seguimiento y mantenimiento de los campos de pozos, la perforación periódica de pozos de producción e inyección, el procesamiento de fluidos geotérmicos y el mantenimiento de tuberías.

Los fluidos geotérmicos sobrecalentados suelen contener una serie de metales disueltos y gases. Los efluentes de aguas residuales y gases suelen reinyectarse en la reserva o en sus alrededores para minimizar la posible contaminación de las aguas subterráneas. En ocasiones, cuando no es posible reinyectar los fluidos y gases de aguas residuales, es necesario construir estanques de sedimentación / refrigeración con revestimiento para capturar y eliminar los gases.

¹⁷ Lienau y Lunis (1991).

Dependiendo del diseño de las instalaciones, las torres de refrigeración pueden emplear para la circulación fluidos geotérmicos o aprovechar el agua de fuentes de aguas superficiales. Los precipitados de azufre presentes en el condensado pueden generar residuos sólidos peligrosos y deben eliminarse y almacenarse adecuadamente en el emplazamiento antes de su eliminación.

Existen dos clases principales de recursos geotérmicos: el vapor seco y el agua caliente¹⁸. En los recursos de vapor seco, la producción de los pozos consiste en un vapor seco que puede emplearse directamente para operar las turbinas-generadores, mientras que en el caso de los recursos de agua caliente, la descarga del pozo consiste en agua a elevadas temperaturas (>180 °C). Para los recursos hídricos por debajo de los 180°C, la generación de electricidad es posible gracias a un sistema de ciclo binario que implica el uso de fluido secundario, como se describe a continuación.

Los proyectos de generación de energía geotérmica suelen consistir en uno de los siguientes procesos o en una combinación de los mismos:

- **Vapor geotérmico de expansión instantánea:** el vapor se separa del recurso de agua caliente y se emplea para generar electricidad cuando la temperatura del recurso supera los 180°C, lo que permite extraer algo de vapor a alta presión mediante su 'evaporación' en los separadores de vapor empleados para operar la turbina de generador. Las tecnologías de evaporación instantánea, en dos etapas y, en ocasiones, en tres etapas, son de uso frecuente. La proporción de vapor empleada en las turbinas y el agua caliente restante se desecha o reinyecta en la reserva.

- **Proceso binario geotérmico:** Cuando la temperatura del recurso se sitúa por debajo de los 180°C, se emplea un ciclo secundario con un fluido de reducido punto de ebullición, como el isobuteno, el isopentano o una mezcla de amoníaco y agua, empleado para interconectar la fuente de calor (los fluidos geotérmicos) y la turbina.
- **Procesos combinados de evaporación instantánea/binarios:** los procesos tanto binarios como de evaporación instantánea se utilizan para incrementar la eficiencia.
- **Procesos geotérmicos de vapor seco:** el vapor seco a altas presiones generado por los pozos de producción se emplea directamente en las turbinas para generar electricidad. Los recursos de vapor seco son muy valiosos aunque infrecuentes.

¹⁸ Duffield y Sass (2003).