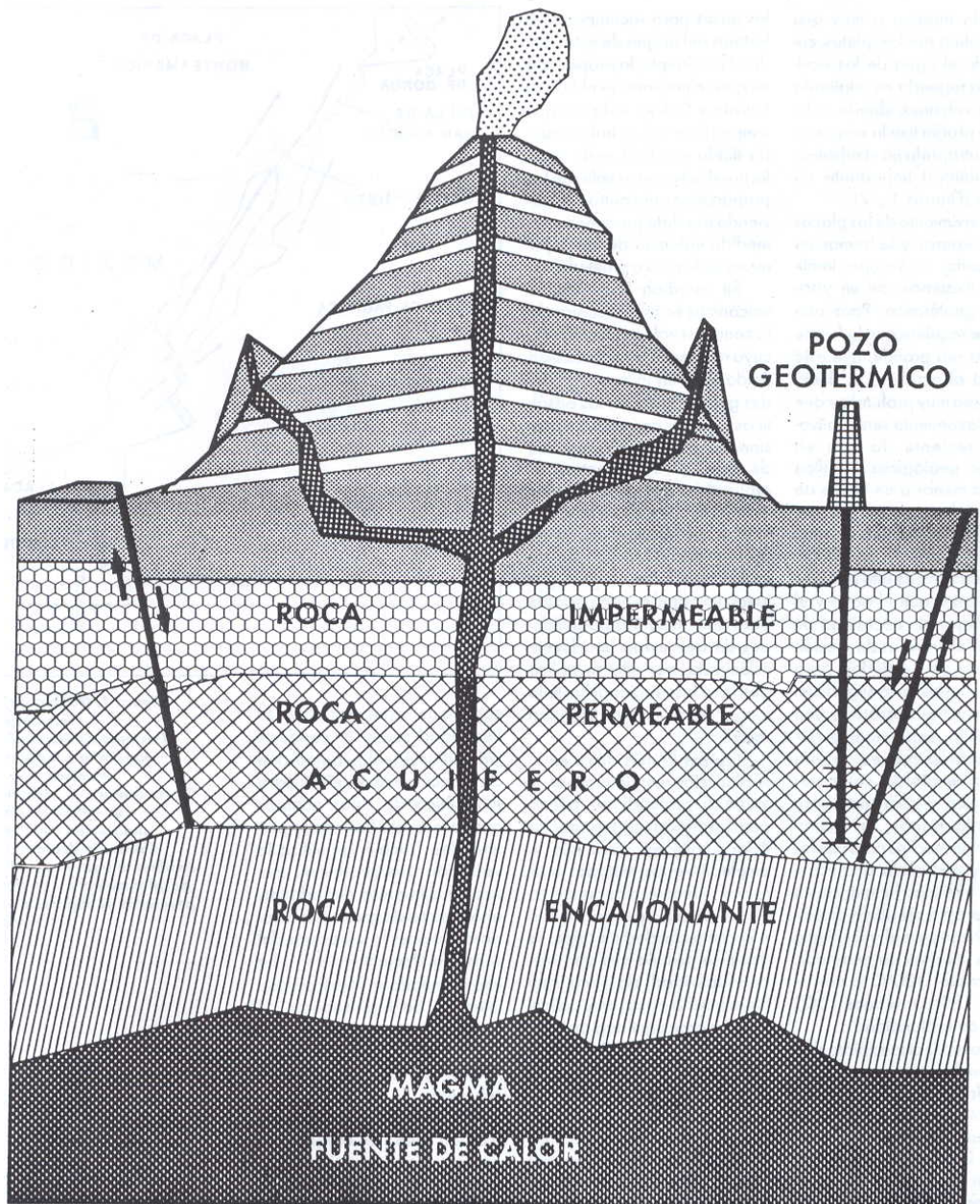


GEOTERMIA Y ENERGÍA GEOTERMICA

- Qué es la Geotermia:
 - Técnicas utilizadas para la exploración, evaluación y explotación de la energía interna de la Tierra
- Energía Geotérmica:
 - Calor proveniente desde el centro del Planeta
- Algunos antecedentes de referencia:
 - 1ª Central Geotérmica: Larderello en Italia, 1913
 - México tiene más de 25 años de experiencia en centrales geotérmicas
 - (Ver tabla 1 transparencias)
- Orígenes de la energía geotérmica:
 - Emplazamiento magma “cercano” a la superficie
 - Este magma origina volcanes, geysers y fuentes termales donde hay agua.
 - El magma aparece de dos formas básicas:
 - Separación de placas de la corteza terrestre, permite ascensión de magma
 - En los volcanes queda una cantidad importante de magma atrapada en el subsuelo
- Características como ERNC:
 - Alta disponibilidad anual
 - Parcialmente renovable, dependiendo de la tasa de uso y renovación del recurso natural
- Usos de la energía geotérmica:
 - Usos medicinales y turísticos, los + antiguos (termas)
 - Calor para calefacción de viviendas
 - Calor para usos agropecuarios e industriales
 - Generación de electricidad
 - Cogeneración
 - ...

EL RECURSO GEOTERMICO



YACIMIENTOS GEOTERMICOS

1. Sistemas hidrotérmicos

- Mezcla agua-vapor a alta presión y temperatura (300°C, 150 bar) almacenada en una roca permeable a unos 1.500 mt de profundidad.
- Son los más aprovechados para fines energéticos, los únicos en operación comercial.
- Contiene gases corrosivos (H_2S , requiere cuidados ambientales), material erosivo y sólidos disueltos (3.000 – 25.000 ppm).

➤ Hay 2 tipos de yacimientos hidrotérmicos:

▪ Vapor dominantes:

- En el yacimiento mismo el vapor está a ≈ 35 bar, $\approx 200^\circ C$
- Llega a la superficie, en cabeza de pozo, a ≈ 10 bar, $\approx 200^\circ C$.
- Son escasos, se conocen 5 en el mundo: Larderello (Italia), Geysers (EEUU), ...
- Son los de mayor factibilidad al generar potencia con una menor inversión

▪ Líquido dominantes:

- Agua caliente en el yacimiento a $\approx 150 - 315^\circ C$, esto requiere ≈ 70 bar.
- Tienen mayor T y p que los vapor dominantes.
- En boca de pozo la presión se regula ≈ 10 bar.
- El agua fluye naturalmente por su propia presión; con la $\downarrow p$ se flashea parcialmente en la cañería
- Título (x) en boca de pozo $\approx 10-50\%$.
- La calidad del vapor (x) depende de las condiciones del reservorio, dimensiones del pozo, presión en la cabeza de pozo.

YACIMIENTOS GEOTERMICOS

2. Sistemas de roca caliente:

- Formados por capas de roca impermeable que recubren un foco calorífico $\approx 150\text{-}290^{\circ}\text{C}$.
- Para su aprovechamiento se debería inyectar agua fría y ésta se utiliza una vez calentada.

3. Sistemas geopresurizados:

- Acuíferos similares a los hidrotérmicos, de agua o “salmuera”, pero más profundos, 2.400-9.100mt,
- Presiones de 1.000 bar

➤ Requisitos para la existencia de un reservorio hidrotérmico:

- Que la fuentes de calor sea grande y esté cercana al reservorio, no muy profunda, de emplazamiento reciente ($< 1.000.000$ años)
- Que el reservorio se encuentre en una zona de alta permeabilidad
- Presencia de estructuras geológicas sobre el yacimiento que actúen como una capa sello, impermeable, favoreciendo la conservación del calor y la presión del reservorio
- Existencia de un área de recarga hídrica del reservorio, que condicione la característica renovable del recurso geotérmico

➤ Distribución de la energía térmica almacenada: 10 a 20% en al agua; 80 a 90% en la roca

➤ Para evaluar la longevidad del yacimiento geotérmico ante un régimen de extracción es indispensable conocer su tasa de recarga de agua

ETAPAS de la GEOTERMIA

1. Exploración geotérmica:

- Estudio de las “capacidades” geotérmicas de un área:
 - Se buscan zonas de evidente termalismo, se estudian los volcanes en las cercanías
 - Análisis de composición química del agua y los gases (información de la historia y origen de los fluidos)
 - Se perforan pozos de 10 a 20 mt de profundidad para medir el flujo de calor hacia la superficie, y poder conocer la localización de la fuente de calor
 - Determinación de la permeabilidad a una buena profundidad (se asocia con la conductividad eléctrica, con sondeos eléctricos y magnetotelúricos)
- Perforación:
 - Mediciones de temperatura a distintas profundidades
 - Pruebas de presión en pozo (permite determinar la permeabilidad de un yacimiento)
 - Se analizan los recortes de roca que van apareciendo (señales de la historia)

ETAPAS de la GEOTERMIA

2. Proyecto de la Central: Ingeniería (conceptual, básica, detalles), ubicación, capacidad, EIA,
3. Adquisiciones, construcción, puesta en marcha, etc.
4. Explotación y aprovechamiento:
 - Periodo de conocimiento del recurso explotado.
 - Aprovechamiento del recurso ya bien conocido
 - Pozos de 10" de diámetro, 2 a 3 km de profundidad
 - Las proporciones vapor-agua dependen de cada yacimiento; se separa el agua por fuerza centrífuga.
 - El vapor se envía a una TV (≈ 8 ton/h / MW).
 - Agua separada contiene sales disueltas y debe ser reinyectada al yacimiento para:
 - Prolongar la vida útil del yacimiento
 - Evitar contaminación
 - El vapor contiene partículas de sílice en suspensión que se incrustan en las turbinas. En México se ha evitado la incrustación con un sistema de lavado de la turbina (inyección de agua al vapor durante algunas horas en un punto cercano a la entrada a la turbina)
 - El vapor también contiene algo de gases no condensables:
 - El contenido de gas es aprox. 2% pp
 - Su composición química típica es 98% CO₂ y 2% H₂S.
 - Los condensadores requieren equipos auxiliares para la extracción de los gases no condensables

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

- Turbina a boca de pozo con descarga atmosférica:
 - Una forma económica y práctica cuando no se tiene conocimiento cabal del yacimiento
 - No requiere condensador, torres de enfriamiento, no compresores de gases no condensables
 - El consumo específico de vapor \uparrow 50%
- Plantas a condensación: $> \eta$ que TV boca de pozo
 - Tecnología para yacimientos vapor dominantes (vapor seco): TV, condensador.
 - Tecnología para yacimientos líquido dominantes (vapor húmedo, mezcal agua-vapor), además de TV y condensador requieren:
 - Requiere separador centrífugo del fluido geotérmico, el agua separada se reinyecta al yacimiento
 - $\eta \uparrow$ con más separaciones del agua caliente a menores presiones y expansiones del vapor flash obtenido
- Sistema binario: se transfiere el calor desde el fluido geotérmico a un fluido de trabajo secundario y operar en un ciclo Rankine cerrado
- Sistemas híbridos: son combinaciones de las tecnologías mencionadas, y con combustibles fósiles
- Turbinas de agua: ...
- Turbinas de flujo total: ...

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

1. Explotación de Sistemas Vapor Dominantes:

- Instalación de TV a contrapresión (descarga atmosférica para conocer el recurso), cuidando el medio ambiente.
- El condensador se instala una vez conocido el recurso.
- Se usan menores T y p a la entrada de la turbina y mayores p en el condensador (0,135 bar o mayor) que en centrales termoeléctricas convencionales; lo último para reducir la cantidad de agua de enfriamiento requerida.
- Estas centrales tienen menor η que las convencionales con HR 2 a 3 veces mayores.
- El vapor contiene gases no condensables (gnc), 0,2 a 10%pp, de los cuales 98% CO_2 y 2% H_2S . Mientras +s “joven” sea el recurso, +s gnc. También están entre los gnc CH_4 , H_2 , N_2 , NH_3 y H_2S .
- El sistema de extracción de los gnc es un componente crítico de la planta:
 - Usual% se usan eyectores de 2 etapas (inter y after condenser)
 - Bombas de vacío
 - Turbocompresores
- Se prefiere usa condensadores de superficie cuando los gnc deben ser tratados antes de liberarse a la atmósfera para no exceder los límites de H_2S .
- Pero a menudo se usan condensadores de contacto directo pq' son “+s efectivos” y económicos.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

1. Explotación de Sistemas Vapor Dominantes:

- Puede usarse agua como medio de enfriamiento, el vapor-condensado se usa como reposición del agua evaporada en la torre de enfriamiento.
- También hay otras pérdidas de vapor para final% reinyectar al pozo entre un 10-20% del vapor.
- Las torres de enfriamiento normalmente usadas son de tiro inducido a contra-flujo o flujo cruzado, y en algunas plantas se usan de tiro natural.
- También pueden usarse condensadores enfriados por aire; en este caso la re-inyección de agua al pozo es de un 100%.
- Se usa acero inoxidable (inox) en los circuitos de enfriamiento, ya que al condensarse el vapor en presencia de H_2S , el líquido se vuelve corrosivo.
- Existen diseños modulares para plantas pequeñas de menos de 20MW; los diseños son flexibles y permiten adaptación a las condiciones del vapor en una amplio rango.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

➤ Extracción de H_2S :

- El sistema de tratamiento de los H_2S – extraídos en el condensador - requiere de plantas químicas que tienen como subproducto azufre.
- El sistema Stretford tiene un 90% de abatimiento de H_2S . Este sistema no es apropiado para plantas pequeñas (15-25MW).
- Pero el sistema Stretford no siempre ha sido satisfactorio.
- Por ello se está testeando un método de abatimiento de H_2S aguas arriba de la TV: el vapor es enfriado a cierta temp. a la que el H_2S y los otros gnc no condensan y son removidos; luego el agua pura es re-evaporada y enviada a la TV. La pérdida de calor es reducida debido al uso de una IC regenerativo. Se pierde (destruye) u poco de exergía y un pequeño % de η , sin embargo es muy conveniente remover el H_2S a la entrada de la TV; se logra un 94% de abatimiento.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

2. Explotación de Sistemas Líquido Dominantes:

- Plantas de vapor flash:
 - La fracción líquida del recurso geotérmico se separa de la fracción gaseosa (título).
 - La presencia de agua en el recurso determina que en estas plantas se maneje una mayor cantidad de fluido, líquido, que en las plantas de vapor seco (Dry Steam).
 - $\rho_l/\rho_g \approx 175-350 \Rightarrow$ es posible una separación centrífuga efectiva. El fluido geotérmico entra tangencialmente al separador ciclónico (“estanque” cilíndrico vertical)
 - Se usan ciclones de separación de alta eficiencia, produciendo vapor con $x = 99,99\%$ (“calidad”).
 - El líquido tiende a fluir por la superficie del ciclón; el vapor se mueve a la parte superior del equipo.
 - El líquido separado es reinyectado al pozo y su energía térmica se usa en un IC para variadas aplicaciones.
 - Este líquido tb puede ser “flasheado” a una menor presión, obteniéndose una cantidad de vapor adicional a expandir en una TV de baja presión o en una TV con doble admisión.
 - Tienen un aprox. un 85% de re-inyección
- Las plantas de vapor flash pueden ser: single flash (1F) y doble flash (2F): las 2F requieren de más equipos, válvulas y piping que las 1F; producen entre un 20-25% +s potencia que la 1F.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

2. Explotación de Sistemas Líquido Dominantes:

▪ Plantas de ciclo binario:

- Usan un fluido de trabajo secundario, con características convenientes p-T-v cuando la temperatura del fluido geotérmico está entre 150-200°C
- A menores T° no permiten la generación de potencia, pero si puede usarse el recurso como fuente de calor. Usar flasheo implicaría grandes diámetros debido a la baja presión del vapor flash y además resultaría bajos rendimientos.
- Se usan fluidos orgánicos con bajo punto de ebullición, como el isobutano (C_4H_{10} , ebullición a -10°C), Freón -12 (ebullición a -30°C), amoniaco o propano.
- Si se usa Freon-12 como fluido de trabajo es posible tener 80°C en el fluido geotérmico.
- El fluido de trabajo opera a altas presiones y es sobrecalentado en un IC y opera en un ciclo Rankine cerrado, según lo permitan las propiedades del agua caliente geotérmica.
- Esta tecnología no presenta problemas de corrosión o incrustaciones en los componentes del ciclo (TV, condensador).
- El IC usado es el único equipo que sufre estos inconvenientes; el IC es de tubo y carcasa (agua por la carcasa), de 1 paso.
- Condensador del ciclo enfriado por agua de alguna fuente natural (si la hubiese) o con un sistema de recirculación y torre de enfriamiento.
- Consumo propio de electricidad de aprox. 35%.

- **Dato histórico:** Larderello fue del tipo binario, usando agua limpia como fluido de trabajo, el fluido geotérmico era vapor; la limitante eran los materiales.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

3. Explotación con Tecnología Híbrida:

- El concepto es aprovechar la relativa% baja T° del fluido geotermal en el extremo de baja de T° de un ciclo convencional y el calor de alta T de los combustibles fósiles en el extremo de alta T° del ciclo.
- El recurso natural geotérmico aporta una fracción del calor que requiere el ciclo, ↓ el consumo de combustibles fósiles (escasos, caros y no renovables).
- Hay dos arreglos posibles:
 - Plantas con Precalentamiento Geotérmico: aplica a sistemas liq. dte. de baja T° , así no se extrae vapor de la TV para el precalentamiento del agua de alimentación de la TV.
 - Plantas con Sobrecalentamiento Fósil: se usa con recursos vapor dte. o liq. dtes. de alta temperatura; en ellos se sobre calienta el recursos geotérmico con combustibles fósiles aguas arriba de la TV.

TECNOLOGÍAS CENTRALES GEOTERMICAS

4. Tecnologías en Etapa de Desarrollo:

- Turbina de Agua:
- Turbina de Flujo Total:

Ver

Power Plant Technology

M.M.El-Wakil

CENTRALES GEOTERMICAS

➤ Ventajas de las Centrales Geotérmicas

- El uso de un recurso natural produce ahorros de combustibles fósiles (importados y propios)
- Se evitan emisiones provenientes de la quema de combustibles fósiles (SO_2 , NO_x), ya que no hay calderas
- El sistema de enfriamiento no consume agua (el agua de reposición de las pérdidas en las torres de enfriamiento proviene del condensador)
- Alta disponibilidad del recurso geotérmico
- Menor impacto ambiental que una central termo-eléctrica convencional
- Economía similar a una termo-eléctrica convencional (+ o – dependiendo del yacimiento)

➤ Desventajas de las Centrales Geotérmicas

- La central debe estar ubicada sobre el yacimiento, lo que a veces significa lejanía del centro de consumo
⇒ ↑ inversiones en transmisión
- Mayor inversión inicial que en una central convencional:
 - Exploración y perforación de pozos
 - Gran cantidad de tuberías de superficie
 - Sistemas de extracción de gases no condensables
 - Uso de acero inoxidable en muchas partes del circuito de enfriamiento

Impacto Ambiental de una CENTRAL GEOTÉRMICA

Una central geotérmica, al igual que cualquier otra obra de ingeniería, si no se maneja adecuadamente, puede ocasionar impactos al ambiente, pero si se realiza con cuidado, utilizando las técnicas que hay actualmente disponibles y que no encarecen de manera significativa la obra, su impacto es mucho menor que sus equivalentes termo-eléctricas.

- *Emisiones a la atmósfera de una central geotérmica:*
 - *CO₂: 1/4 de una central termo-eléctrica convencional*
 - *No emite SO₂, ya que no quema combustible*
 - *El H₂S debe dispersarse adecuadamente en la atmósfera para evitar el olor; no produce lluvia ácida al mezclarse con la humedad del ambiente. También hay tecnologías para su abatimiento que obtienen azufre como sub-producto.*
 - *El agua separada al pie de cada pozo y los condensados contienen sales que pueden ser contaminantes. Por ello es necesario reinyectar todo este fluido al propio yacimiento, eliminando así esta fuente de contaminación.*
 - *Finalmente, durante el manejo de fluidos a alta presión a veces es necesario descargarlos a la atmósfera durante cambios bruscos de presión, lo que ocasiona un fuerte ruido. Este se puede abatir totalmente a límites aceptables usando silenciadores adecuados.*
 - *La geotermia mexicana ha hecho importantes logros mejorando considerablemente sus estándares ecológicos.*

Costos de Inversión y O&M de una CENTRAL GEOTÉRMICA

- Inversiones en una Planta Geotérmica (US\$):
 - Central: ingeniería, suministros y construcción
 - El campo geotérmico, el vapor para la central:
 - Incluye los gastos de la etapa de estudios, exploración y perforación de pozos
 - Inversiones necesarias para poner el campo en condiciones de producir vapor
 - Líneas de transmisión, ¡a veces!
- Costos de O&M (US\$/kWh): fijos + variables
 - O&M de Central
 - O&M de Campo \Leftrightarrow costo combustible de las centrales térmicas convencionales:
 - Cantidades (\$) utilizadas para mantener el campo geotérmico en condiciones de suministrar el vapor requerido por la central
 - Cuadrillas de: operación, mantenimiento, instalación de pozos, perforación de pozos productores e inyectores de reemplazo (de los que se secan o rompen), reparación de vapor-ductos y líneas de inyección, etc.

CENTRALES GEOTERMICAS

Agradecimientos a:

Gerardo Hiriart Le Bert

Jefe Unidad de Apoyo Técnico

Comisión Federal de Electricidad (CFE)

México