Sistemas Energéticos

3º ano 6º semestre

Aula 25

Aula 25: Energia Geotérmica

Tópicos

1. Introdução: estrutura interna da Terra, gradiente e fluxo de calor
2. Fontes de energia, reservatórios e método volumétrico
3. Uso directo, classificação e uso em cascata (Lindal)
4. Conversão e aproveitamento do calor; poços
5. Centrais: vapor seco, flash, binárias e rocha seca quente
6. Bombas de calor geotérmicas (BCG)
7. Vantagens, desvantagens e geotermia em Moçambique

25.1 INTRODUÇÃO

Energia geotérmica é a energia obtida a partir do **calor proveniente do interior da Terra**.

Funciona graças à capacidade natural da Terra e da sua água subterrânea de **reter calor**.

A crosta está dividida em grandes **placas** que se assentam sobre o manto; o magma só existe em bolsas e câmaras magmáticas.

Com a profundidade, a temperatura aumenta; nas zonas de **intrusões magmáticas** é muito maior: aí há elevado potencial geotérmico.

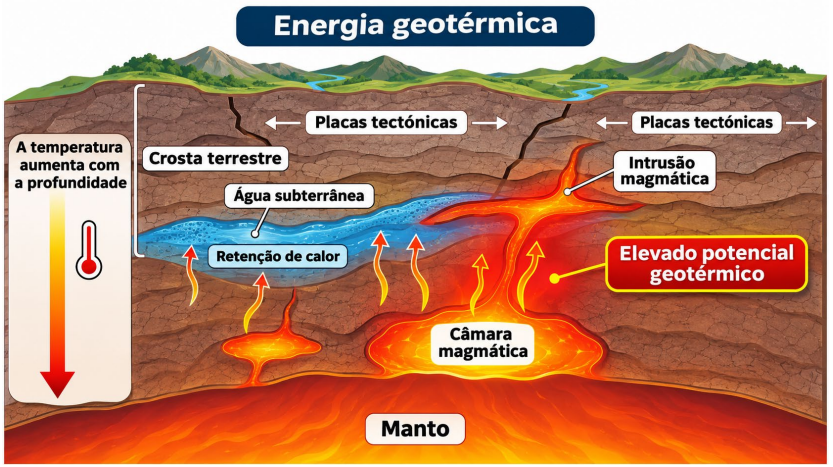


Figura 25.1 – Aproveitamento do calor do subsolo

25.1 INTRODUÇÃO: UM POUCO DE HISTÓRIA

"Geotérmico" vem do grego **geo** (terra) e **therme** (calor): significa calor terrestre. Desde sempre se usou a água quente que brota naturalmente da superfície.

Antiguidade

Romanos: termas, tratamento de doenças e aquecimento em Pompeia

≈ 10 000 anos

Povos indígenas da América: água termal para cozinhar e para a medicina

Séculos

Maoris da Nova Zelândia cozinham "geotermicamente"

1904

Larderello (Itália): primeira electricidade geotérmica do mundo

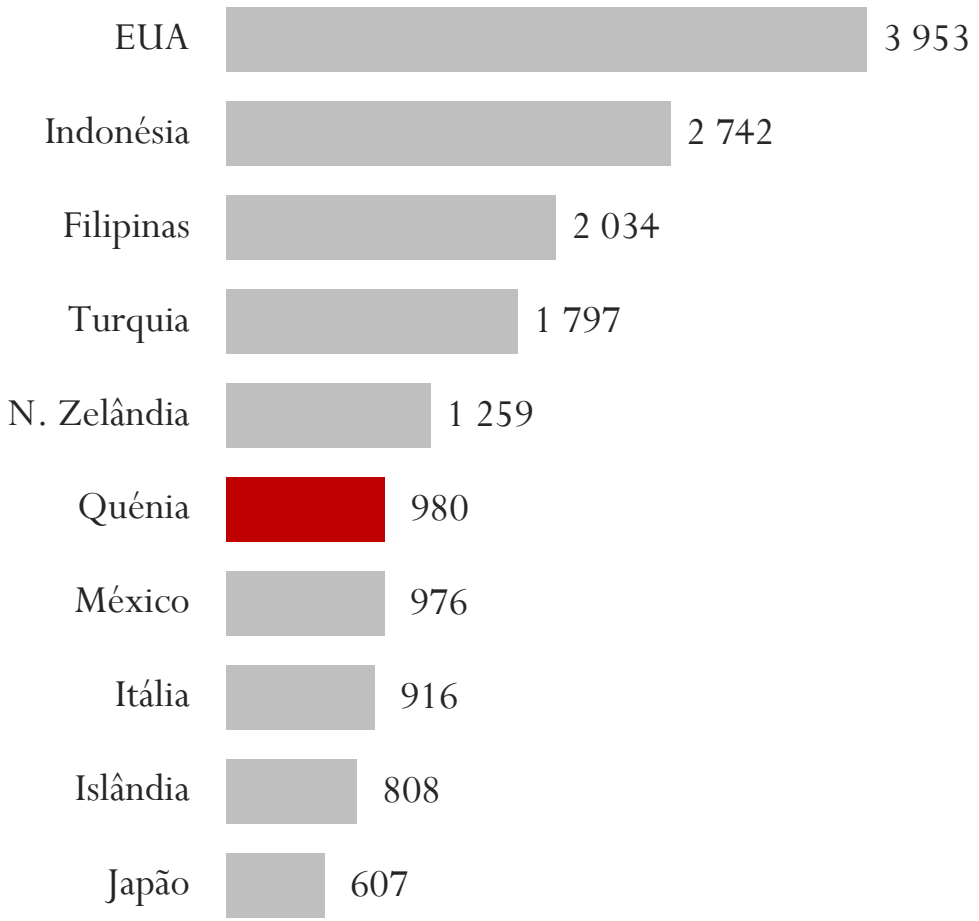
Desde 1960

França aquece até 200 mil casas com água geotérmica

Hoje

Geólogos, geoquímicos e engenheiros localizam e perfuram reservatórios

25.1 CAPACIDADE GEOTÉRMICA MUNDIAL



Fim de 2025

≈ 17 200 MW instalados em todo o mundo.

- EUA lideram (≈ 3 950 MW).
- Em África destaca-se o **Quénia** (≈ 980 MW), sobretudo no Rift (Olkaria).
- A geotermia é a renovável com maior factor de capacidade (≈ 70–90%).

Figura 25.2 – Top 10 da capacidade geotérmica, MW (ThinkGeoEnergy, 2025)

25.1.1 AS CAMADAS DA TERRA

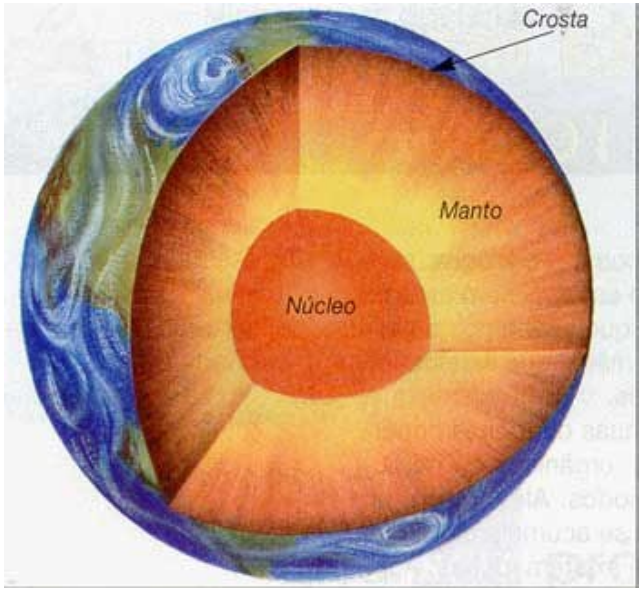


Figura 25.3 – Camadas da Terra

Camada	Espessura / raio	Temperatura
Crosta	5 – 70 km	até ≈ 1 000 °C
Manto	≈ 2 900 km	até ≈ 4 000 °C
Núcleo	raio ≈ 3 500 km	5 000 – 6 000 °C

- **Manto** – minerais em estado pastoso: é sólido, mas se deforma lentamente por convecção; divide-se em manto superior e inferior.
- **Magma** (do grego "massa") – rocha fundida que se forma em bolsas localizadas.
- **Nife (núcleo)** – núcleo externo líquido e interno sólido; predominam o níquel (Ni) e o ferro (Fe).

25.1.1 LITOSFERA E ASTENOSFERA

- **Astenosfera** (do grego asthenes = "fraqueza"): camada do manto superior, entre ≈ 100 e 350 km de profundidade, composta por material plástico que se deforma lentamente. Sobre ela assentam as **placas tectónicas**.
- Encontra-se a ≈ 100 km sob os continentes e a 50 km ou menos sob os oceanos.
- **Litosfera**: camada rígida, com 50 a 60 km de espessura, que compreende o sial e o sima.
  - **Sial** (Si + Al): 15 a 25 km, onde se formam o solo e o subsolo.
  - **Sima** (Si + Mg): 30 a 35 km, minerais mais densos do que os do sial.

Litosfera rígida
sial + sima · 50–60 km

Astenosfera dúctil
≈ 100–350 km

Manto profundo
até ≈ 2 900 km

25.1.2 A ESTRUTURA INTERNA DA TERRA

Dos ≈ 6 371 km até ao centro da Terra, as perfurações só alcançam os primeiros quilómetros: o furo mais profundo atingiu ≈ 12 km (poço superprofundo de **Kola**, Rússia). O conhecimento do interior é, por isso, sobretudo **indirecto**.

Perfurações	Ondas sísmicas	Vulcanismo e densidade
Observação directa, limitada à crosta.	A propagação e os desvios das ondas revelam camadas, propriedades e limites.	Composição dos minerais e grau geotérmico complementam a análise.

Grau geotérmico: profundidade, em metros, correspondente a um aumento de 1 °C (média do planeta ≈ 33 m/°C).

25.1.2 CONVECÇÃO E TECTÓNICA

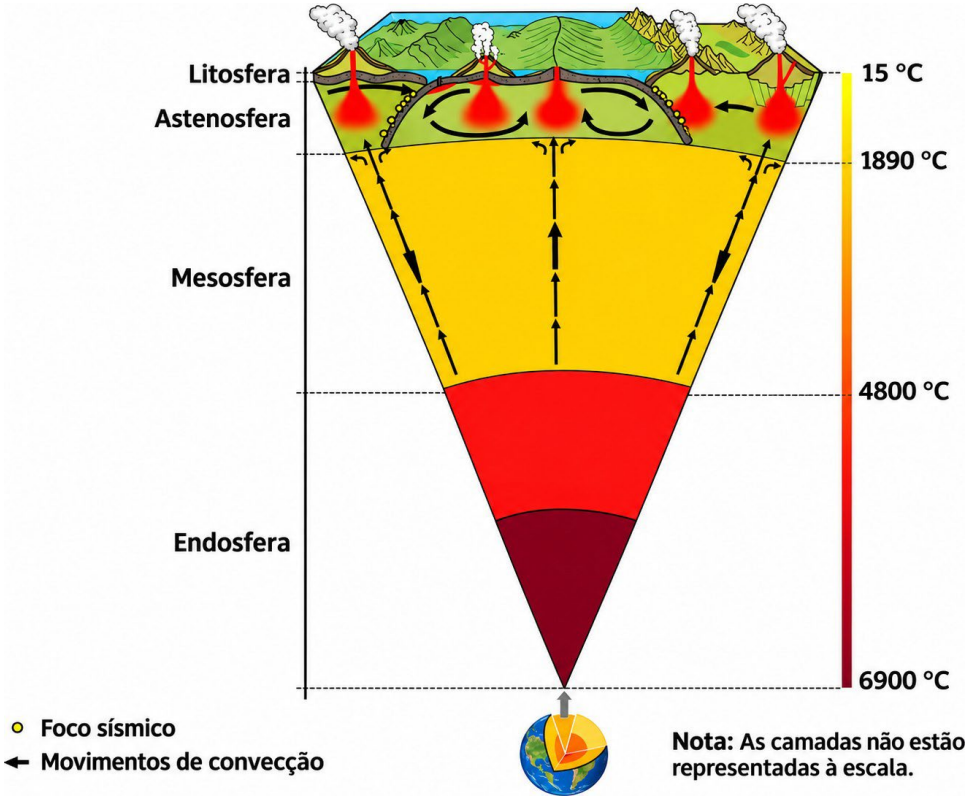


Figura 25.4 – Correntes de convecção no manto

- O calor interno gera **correntes de convecção** no manto.
- Essas correntes deslocam as placas tectónicas.
- Nos **limites das placas** e nos riftes o calor chega mais perto da superfície: vulcões, géiseres e fontes termais.
- É aí que se concentram os grandes recursos geotérmicos.

25.1.3 GRADIENTE GEOTÉRMICO

A temperatura cresce quase linearmente com a profundidade z:

$$T(z) = T_s + G\,z \qquad (25.1)$$

- T_s – temperatura média à superfície [°C];
- G – gradiente geotérmico [°C/km], ≈ 25–30 °C/km na crosta;
- G é o inverso do grau geotérmico (≈ 33 m/°C).

Exemplo

T_s = 25 °C,

G = 30 °C/km, z = 3 km:

T = 25 + 30 × 3 = **115 °C**

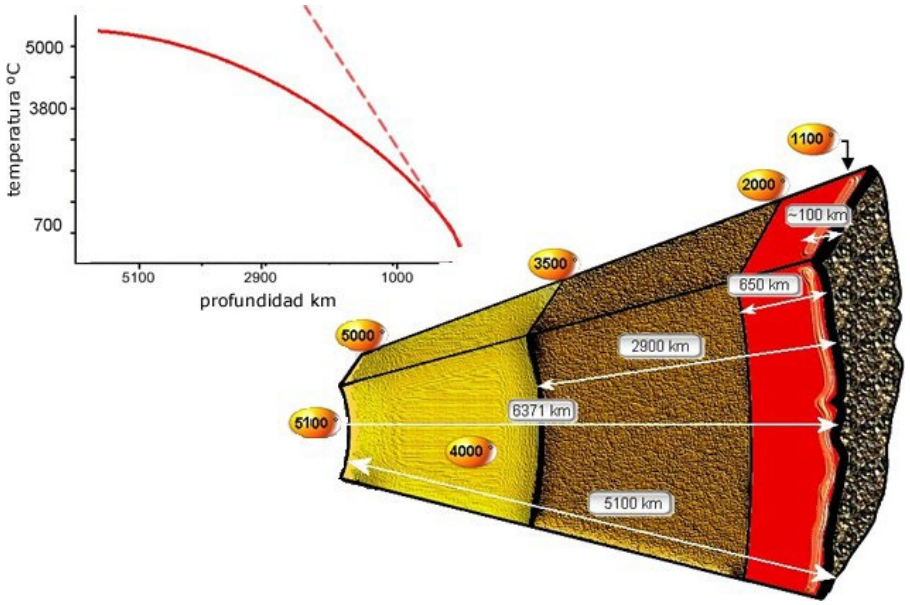


Figura 25.5 – Temperatura vs profundidade

25.1.3 FLUXO DE CALOR TERRESTRE

O calor que atravessa a crosta por condução segue a lei de Fourier:

$$q = -k\frac{dT}{dz} \quad \Rightarrow \quad |q| = k\,G \tag{25.2}$$

- q – fluxo de calor terrestre [W/m²];
- k – condutividade térmica da rocha, ≈ 2–3 W/(m·K).

Exemplo

k = 2,5 W/(m·K) e G = 30 °C/km = 0,030 K/m:

q = 2,5 × 0,030 = **0,075 W/m² = 75 mW/m²**

× 13 000

A radiação solar (≈ 1 000 W/m²) é mais de 10 000 vezes maior: só se aproveita o calor onde há **anomalias térmicas** que o concentram em reservatórios.

25.2 FONTES DE ENERGIA INTERNA DA TERRA

Calor primordial

Energia libertada há ≈ 4,5 mil milhões de anos pela colisão de partículas, acreção de materiais e diferenciação dos elementos. Parte desse calor permanece no núcleo e no manto.

Decaimento radioactivo

O urânio, o tório e o potássio, sobretudo na crosta e no manto, libertam calor ao decair. É um processo contínuo, que renova o calor interno.

O fluxo total de calor que sai da Terra é da ordem de 45 TW; cerca de metade tem origem radiogénica.

25.2 RESERVATÓRIOS GEOTÉRMICOS

Estruturas subterrâneas que armazenam o calor do interior da Terra. Classificam-se pela **composição** e pela **pressão** do fluido geotérmico:

Tabela 25.1 – Tipos de reservatórios geotérmicos

Tipo	Fluido	Condições	Aproveitamento
Água quente (hidrotermal)	Água líquida em rochas permeáveis ou fracturas	Alta T; a pressão mantém a água líquida	Flash, binário ou uso directo
Vapor natural	Vapor sobreaquecido	Alta T e pressão mais baixa	Vapor directo na turbina
Geopressionado	Salmoura quente + metano	Pressão muito acima da hidrostática	Calor, gás e energia mecânica

25.2.1 RESERVATÓRIOS DE ÁGUA QUENTE

- **Composição:** também conhecidos como sistemas hidrotermais; contêm água quente aprisionada em rochas permeáveis ou fracturas.
- **Condições:** a água está acima do ponto de ebulição à pressão atmosférica, mas permanece líquida devido à alta pressão do subsolo.
- **Aplicações:** levada à superfície por poços, vaporiza-se para accionar turbinas (centrais flash), cede calor a outro fluido (centrais binárias) ou é usada directamente.

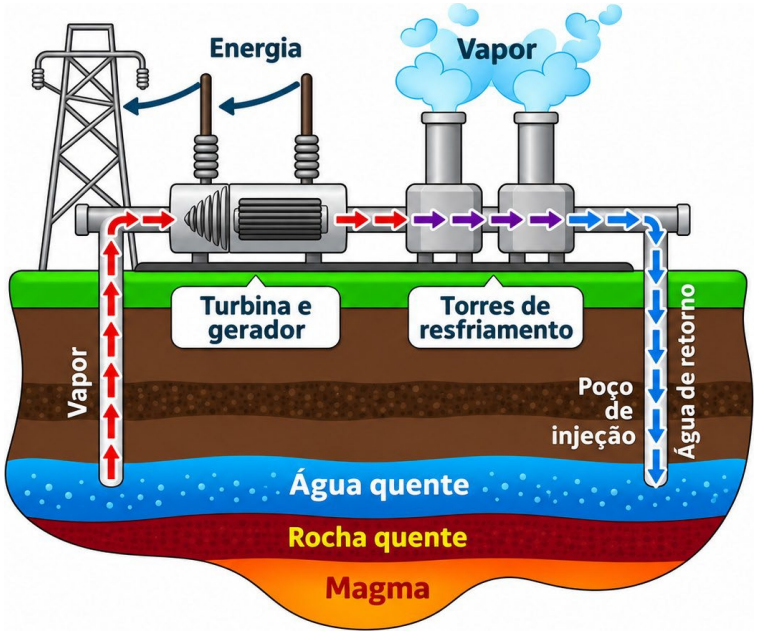


Figura 25.6 – Sistema hidrotermal

25.2.2 RESERVATÓRIOS DE VAPOR NATURAL

- **Composição:** dominada por vapor de água superaquecido, em vez de água líquida.
- **Condições:** alta temperatura e pressão relativamente baixa permitem a vaporização da água.
- **Aplicações:** o vapor é extraído e enviado directamente à turbina – a conversão mais simples e eficiente.

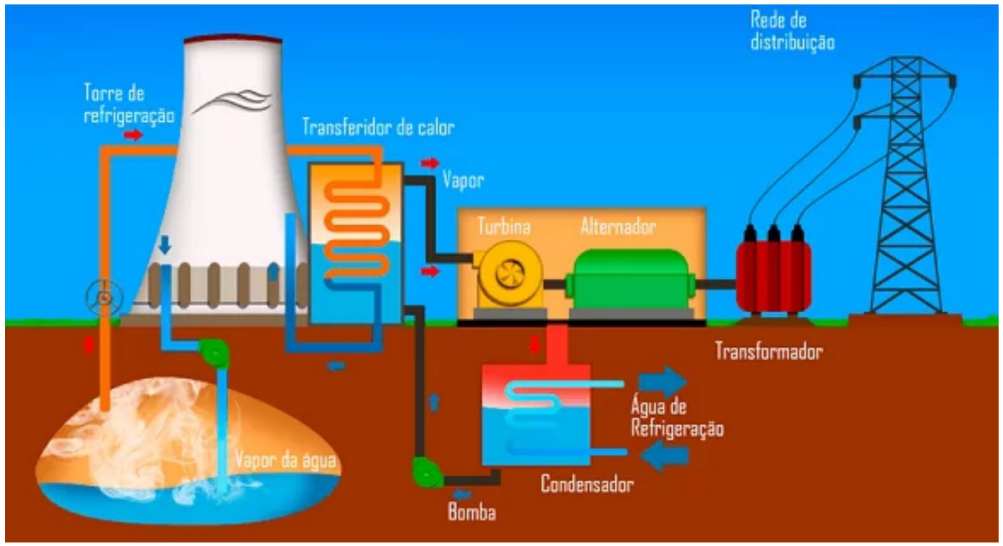


Figura 25.7 – Aproveitamento de um reservatório de vapor natural

25.2.3 RESERVATÓRIOS GEOPRESSIONADOS

Formações profundas em bacias sedimentares jovens, de soterramento rápido. Camadas impermeáveis isolam as camadas permeáveis e os fluidos ficam a **pressões e temperaturas muito acima** das esperadas para a profundidade.

Composição: salmoura aquecida, metano dissolvido, rochas-reservatório (arenito) e selantes (folhelho).

Três formas de energia exploráveis:

Geotérmica
O calor da salmoura gera electricidade

Gás natural
O metano dissolvido é extraído como combustível

Mecânica
A alta pressão da salmoura acciona uma turbina

25.2.4 MÉTODO VOLUMÉTRICO

Energia térmica armazenada no reservatório (rocha + fluido) acima de uma temperatura de referência:

$$Q = V[(1-\phi)\rho_r c_r + \phi\rho_w c_w](T_r - T_{ref}) \qquad (25.3)$$

V – volume [m³]; φ – porosidade; $\rho_r c_r$, $\rho_w c_w$ – capacidades térmicas volúmicas da rocha e da água [J/(m³·K)]; T_r – temperatura do reservatório; T_{ref} – temperatura de rejeição ou abandono.

Só uma fracção desse calor se recupera e converte em electricidade:

$$P_e = \frac{Q R \eta_c}{F t} \qquad (25.4)$$

R – factor de recuperação (≈ 0,10–0,25); η_c – rendimento de conversão (≈ 0,10–0,15); F – factor de capacidade (≈ 0,9); t – vida útil [s] (25–30 anos).

É o método usado na fase de exploração (USGS), antes de haver dados de produção.

EXEMPLO 25.1 – POTENCIAL DE UM RESERVATÓRIO

Reservatório de 2 km × 2 km × 1 km; $\varphi = 0{,}10$; $\rho_r c_r = 2{,}34$ MJ/(m³·K); $\rho_w c_w = 4{,}2$ MJ/(m³·K); $T_r = 230$ °C; $T_{ref} = 100$ °C; $R = 0{,}15$; $\eta_c = 0{,}12$; $F = 0{,}9$; $t = 30$ anos.

Grandeza	Cálculo	Resultado
Volume	$2\,000 \times 2\,000 \times 1\,000$	**4×10^9 m³**
Capacidade térmica volúmica	$0{,}9 \times 2{,}34 + 0{,}1 \times 4{,}2$	**2,53 MJ/(m³·K)**
Energia armazenada (25.3)	$4\times10^9 \times 2{,}53\times10^6 \times (230 - 100)$	**$1{,}31 \times 10^{18}$ J**
Vida útil	$30 \times 3{,}156 \times 10^7$	**$9{,}47 \times 10^8$ s**
Potência eléctrica (25.4)	$1{,}31\times10^{18} \times 0{,}15 \times 0{,}12 \,/\, (0{,}9 \times 9{,}47\times10^8)$	**≈ 28 MW**

Mesmo com 10^{18} J armazenados, só $R \times \eta_c = 0{,}018$ (≈ 2%) chega à rede como electricidade.

25.3 USO DIRECTO DA ENERGIA GEOTÉRMICA

Aplicação do calor do subsolo sem conversão em electricidade, a temperaturas geralmente entre **30 e 150 °C**. É mais eficiente e mais barato do que a geração eléctrica (dispensa turbinas e geradores).

- **Aquecimento** de edifícios e estufas (district heating);
- **Secagem** de cereais, frutas, peixe ou madeira;
- **Piscinas e balneários** termais;
- **Processos industriais**: papel, têxteis, alimentos e químicos.



Figura 25.8 – Estufa aquecida com calor geotérmico

25.3 CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS

Tabela 25.2 – Classificação pela temperatura do fluido

Recurso	Origem típica	Aproveitamento
Alta T (> 150 °C)	Zonas de actividade vulcânica, sísmica ou magmática	Electricidade: vapor seco e flash
Média T (100 – 150 °C)	Riftes, bacias sedimentares profundas	Electricidade em ciclo binário; uso directo
Baixa T (< 100 °C)	Água meteórica em falhas e fracturas; rochas porosas profundas	Aquecimento, águas, piscicultura, processos; BCG

O limite entre classes varia entre autores; o que decide a tecnologia é a temperatura (entalpia) do fluido à cabeça do poço.

25.3.1 USO EM CASCATA: DIAGRAMA DE LINDAL

A utilização ideal é **em cascata**: o mesmo fluido serve utilizadores a temperaturas progressivamente mais baixas, até ≈ 20 °C.

- Acima de ≈ 150 °C: produção de electricidade convencional;
- 85–170 °C: ciclo binário;
- Abaixo: o calor residual ainda serve vários usos directos.

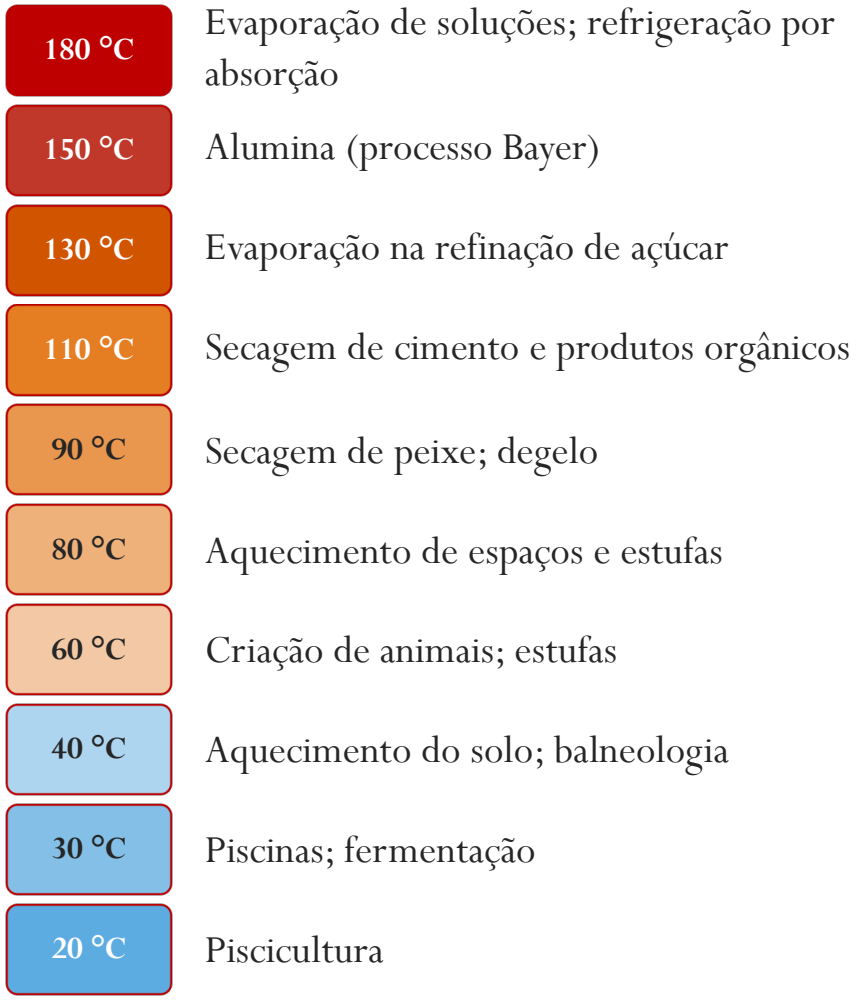


Figura 25.9 – Diagrama de Lindal (simplificado)

25.3.1 POTÊNCIA TÉRMICA NO USO DIRECTO

A potência térmica de um poço depende do caudal e da queda de temperatura do fluido:

$$\dot{Q} = \dot{m}\, c_p (T_{ent} - T_{sai}) \qquad (25.5)$$

$\dot{m}$ – caudal [kg/s]; c_p – calor específico ($\approx 4{,}19$ kJ/(kg·K)); T_{ent}, T_{sai} – temperaturas à entrada e saída do utilizador.

Exemplo: poço de 20 kg/s a 90 °C; estufas de 90 a 60 °C e depois piscinas de 60 a 35 °C



Estufas: $20 \times 4{,}19 \times (90 - 60) =$ **2 514 kW**

Piscinas: $20 \times 4{,}19 \times (60 - 35) =$ **2 095 kW**

Potência total aproveitada: **4,61 MW** (seria 2,51 MW só com as estufas)

25.4 CONVERSÃO: TECNOLOGIAS

- Nos processos geotérmicos há transferência de energia por **convecção**, tornando útil o calor do interior da Terra.
- O aproveitamento pode também fazer-se **injectando água** a partir da superfície em maciços rochosos quentes.
- Na electricidade usam-se turbogeradores convencionais (expansão directa do vapor geotérmico) ou a **tecnologia binária** (fluido intermédio em circuito fechado).

Vapor / alta T	**Média T**	**Calor de baixa T**
Turbina a vapor	Ciclo binário	Uso directo / BCG

A temperatura do recurso determina a tecnologia de aproveitamento.

25.4.1 POÇOS GEOTÉRMICOS

Sondagens construídas por **perfurações concêntricas** com revestimento em aço, que atravessam as formações até ao aquífero geotérmico; podem ter vários quilómetros.

- **Troço superficial:** tubagem cega, cimentada contra as formações;
- **Troço profundo:** tubagem perfurada, solta, que forma um ecrã drenante do geo-fluido;
- **Cabeça do poço:** conjunto de válvulas que controla pressão e caudal;
- **Poço de reinjecção:** devolve o fluido arrefecido ao reservatório.

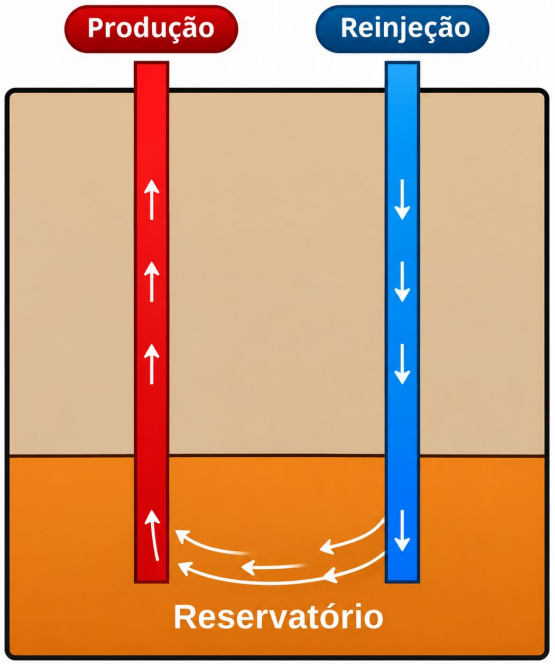


Figura 25.10 – Poços de produção e reinjecção

25.4.1 DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL GEOTÉRMICO

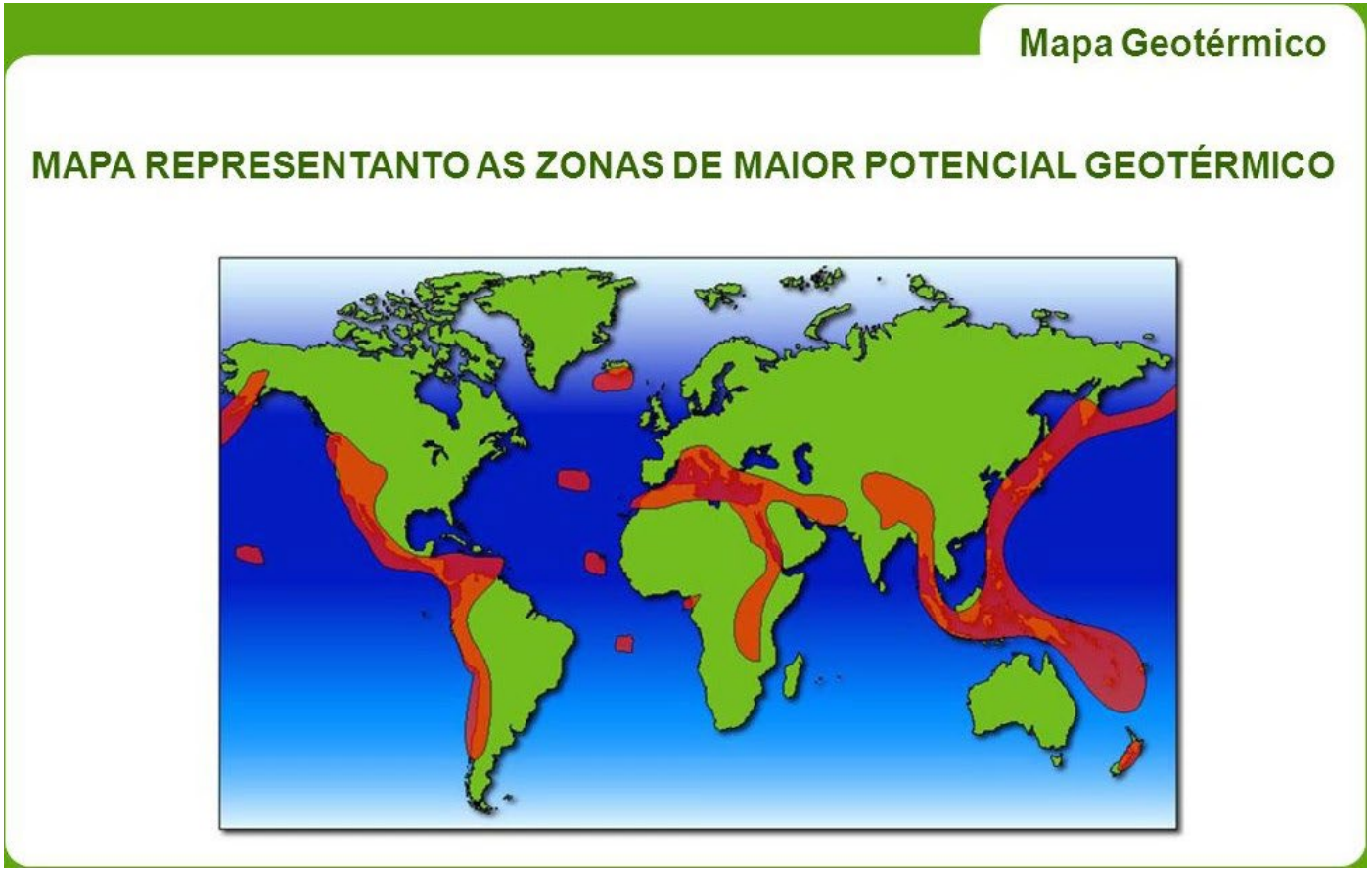


Figura 25.11 – Zonas de maior potencial geotérmico

Os maiores potenciais associam-se aos limites de placas (Círculo de Fogo do Pacífico, Islândia, Rift da África Oriental) e a anomalias térmicas.

25.5 CENTRAIS GEOTÉRMICAS

- Aproveitam fluidos a **altas temperaturas** (> 150 °C) para movimentar uma turbina e produzir electricidade.
- Os poços trazem à superfície o vapor e a água quente a alta pressão, que seguem para as turbinas.
- O gerador transforma o trabalho em electricidade; o condensador rejeita calor.
- O fluido arrefecido é **reinjectado** no reservatório, onde é reaquecido – preserva o equilíbrio e a sustentabilidade do recurso.

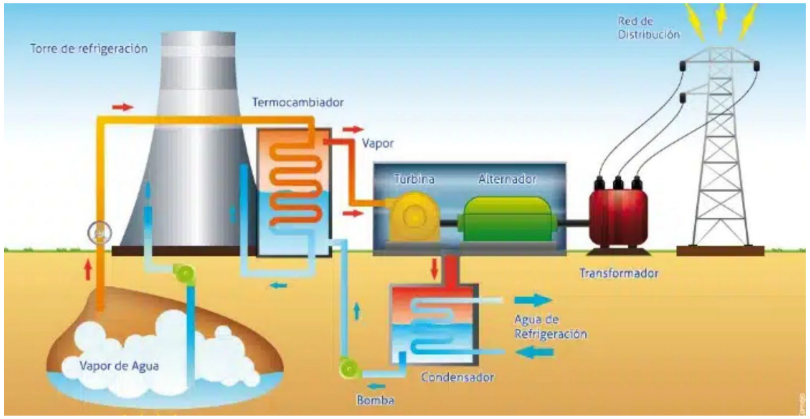


Figura 25.12 – Central geotérmica

25.5.1 CENTRAIS DE VAPOR SECO

O tipo **mais antigo e simples**: usa vapor sobreaquecido directamente do reservatório (ex.: Larderello, Itália; The Geysers, EUA).

- **Extracção:** o vapor seco emerge do subsolo a alta pressão;
- **Turbina:** o vapor é canalizado directamente para a turbina;
- **Geração:** a turbina acciona o gerador;
- **Condensação:** o vapor expandido condensa no condensador;
- **Reinjecção:** o condensado volta ao reservatório para manter a pressão.

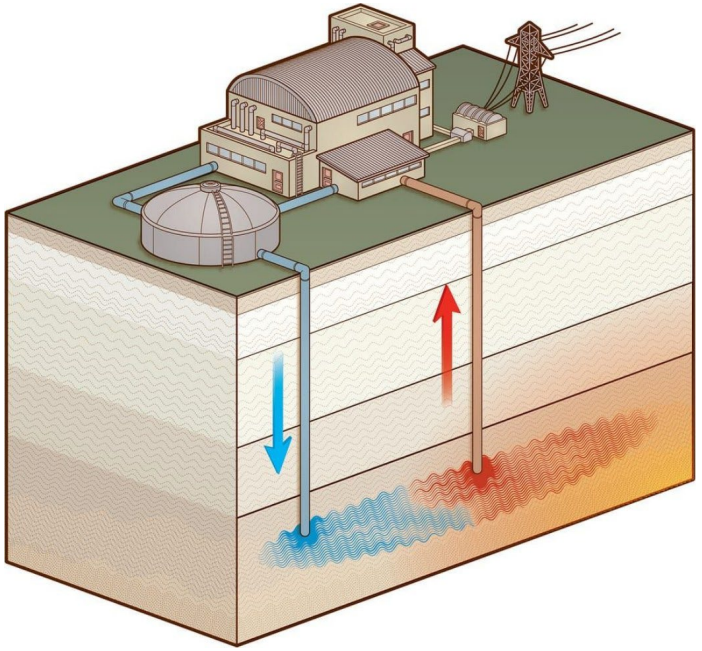


Figura 25.13 – Central de vapor seco

25.5.2 CENTRAIS DE VAPOR FLASH

A forma **mais comum** de central geotérmica.

- **Captação:** poços profundos extraem água quente (> 170 °C) e pressurizada;
- **Flash:** no separador a pressão cai bruscamente e parte da água vaporiza instantaneamente;
- **Turbina:** só o vapor separado acciona a turbina e o gerador;
- **Reciclagem:** o condensado e o líquido separado voltam ao reservatório por poços de injecção.
- **Duplo flash:** o líquido separado sofre um 2.º flash a pressão mais baixa – mais potência do mesmo poço.

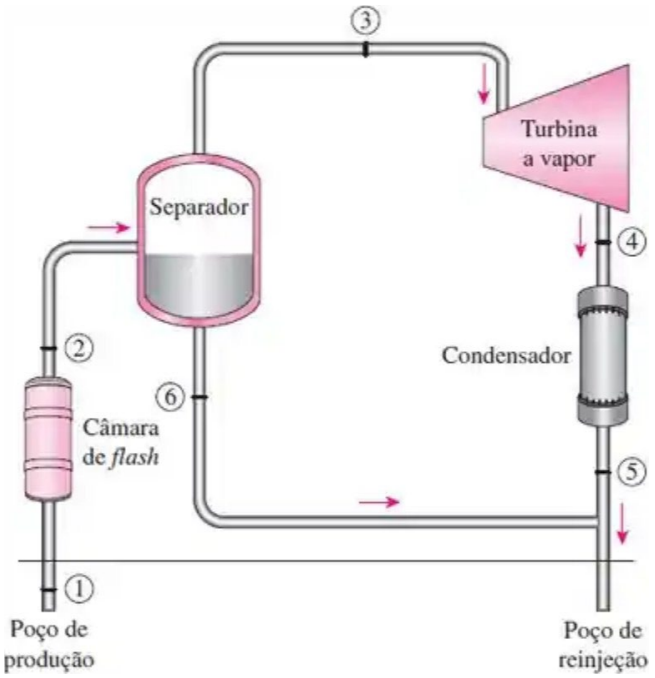


Figura 25.14 – Central flash simples

25.5.2 CÁLCULO DA CENTRAL DE VAPOR FLASH

O líquido do reservatório (estado 1) expande-se até à pressão do separador (processo ≈ isentálpico); a fracção que vaporiza é:

$$x = \frac{h_1 - h_f}{h_{fg}} \tag{25.6}$$

h_1 – entalpia do fluido geotérmico; h_f, h_{fg} – entalpia do líquido saturado e de vaporização à pressão do separador.

Só o vapor separado ($\dot{m} \cdot x$) passa na turbina; a potência eléctrica é:

$$P_e = \dot{m}\, x (h_g - h_{2s}) \eta_t \eta_g \tag{25.7}$$

h_g – entalpia do vapor saturado no separador; h_{2s} – entalpia à saída da turbina para expansão isentrópica até ao condensador; η_t, η_g – rendimentos da turbina e do gerador.

O líquido separado, $\dot{m} \cdot (1 - x)$, é reinjectado ou aproveitado num ciclo binário ou em uso directo.

EXEMPLO 25.2 – CENTRAL FLASH SIMPLES (1)

Poço com 100 kg/s de líquido saturado a 230 °C; separador a 160 °C (0,62 MPa); condensador a 50 °C; $\eta_t = 0{,}85$; $\eta_g = 0{,}97$. Propriedades: tabelas de vapor.

Propriedade	Estado	Valor
h_1	líquido saturado, 230 °C	990,2 kJ/kg
h_f ; h_{fg} ; h_g	saturação, 160 °C	675,5 ; 2 082,0 ; 2 757,4 kJ/kg
s_g	vapor saturado, 160 °C	6,749 kJ/(kg·K)
h_f ; h_{fg} ; s_f ; s_{fg}	saturação, 50 °C	209,3 ; 2 382,0 ; 0,704 ; 7,371

Fracção de vapor (25.6): $x = (990{,}2 - 675{,}5) / 2\,082{,}0 = \mathbf{0{,}151}$

Caudal de vapor na turbina: $\dot{m}\cdot x = 100 \times 0{,}151 = \mathbf{15{,}1\ kg/s}$

EXEMPLO 25.2 – CENTRAL FLASH SIMPLES (2)

Grandeza	Cálculo	Resultado
Título à saída (s = 6,749)	(6,749 − 0,704) / 7,371	**0,820**
Entalpia h_{2s}	209,3 + 0,820 × 2 382,0	**2 162,9 kJ/kg**
Potência eléctrica (25.7)	15,1 × (2 757,4 − 2 162,9) × 0,85 × 0,97	**≈ 7,4 MW**
Rendimento global	7 400 / [100 × (990,2 − 209,3)]	**≈ 9,5%**

Discussão

- Mais de 80% da massa extraída (84,9 kg/s) sai do separador como líquido a 160 °C.
- Esse líquido pode alimentar um **2.º flash** ou um **ciclo binário** (central combinada) ou uso directo em cascata.

25.5.3 CENTRAIS DE CICLO BINÁRIO

Ideais para recursos de **temperatura mais baixa** (≈ 85–170 °C), em que o fluido não produz vapor suficiente. Usam dois fluidos, daí o nome "binário".

- **Fluido geotérmico:** cede calor no permutador e é reinjectado;
- **Fluido orgânico** (isobutano, pentano…): de baixo ponto de ebulição, vaporiza no permutador;
- **Geração:** o vapor orgânico acciona a turbina e o gerador;
- **Condensação:** o fluido condensa e o ciclo (ORC) repete-se em circuito fechado.

Os dois fluidos nunca se misturam: emissões praticamente nulas.

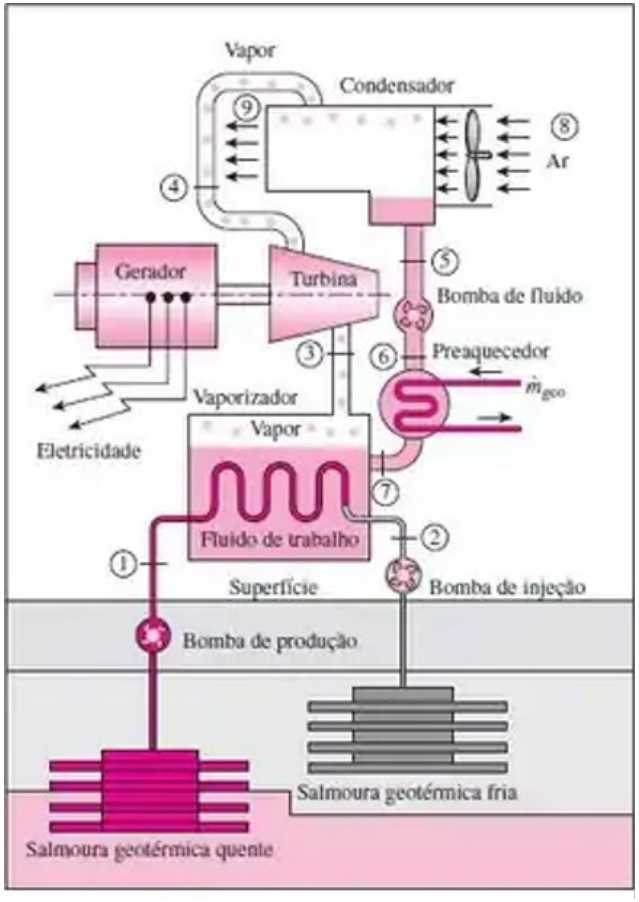


Figura 25.15 – Ciclo binário

25.5.3 FLUIDOS DE TRABALHO E CÁLCULO

Tabela 25.3 – Fluidos orgânicos típicos (temperatura de ebulição a 1 atm)

Fluido	T_{eb} a 1 atm	Observação
Isobutano	−11,7 °C	Recursos de mais baixa T
Isopentano	27,8 °C	Muito usado em ORC geotérmicos
n-Pentano	36,1 °C	Recursos de T moderada
R-245fa	15,1 °C	Não inflamável

Potência eléctrica de uma central binária, a partir do calor cedido pelo fluido geotérmico:

$$P_e = \eta_{th}\, \dot{m}\, c_p (T_{ent} - T_{reinj}) \qquad (25.13)$$

η_{th} – rendimento térmico do ciclo orgânico (≈ 0,08–0,13); T_{reinj} – temperatura de reinjecção (normalmente ≥ 60–70 °C para evitar incrustações de sílica).

EXEMPLO 25.3 – CENTRAL DE CICLO BINÁRIO

Salmoura a 150 °C, caudal de 50 kg/s, reinjectada a 70 °C; c_p = 4,19 kJ/(kg·K); rendimento do ciclo η_{th} = 0,10; condensação a 30 °C.

Grandeza	Cálculo	Resultado
Calor cedido (25.5)	50 × 4,19 × (150 − 70)	**16,76 MW**
Potência eléctrica (25.13)	0,10 × 16,76	**≈ 1,68 MW**
Rendimento de Carnot (25.8)	1 − 303,15 / 423,15	**28,4%**
Fracção do limite de Carnot	0,10 / 0,284	**≈ 35%**

Comparado com o Exemplo 25.2, o recurso é mais frio e a potência por kg/s é menor (34 vs 74 kW por kg/s), mas o ciclo binário permite aproveitar recursos que uma central flash não usaria.

25.5.4 RENDIMENTO DAS CENTRAIS GEOTÉRMICAS

O rendimento térmico de qualquer central é limitado pelo de Carnot:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_q} \leq \eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_c}{T_q} \qquad (25.8)$$

T_c, T_q – temperaturas absolutas [K] da fonte fria (condensador) e quente (fluido geotérmico). Ex.: 150 °C e 30 °C → $\eta_{Carnot} = 1 - 303{,}15/423{,}15 =$ **28,4%**.

Para comparar recursos usa-se o rendimento de utilização (2.ª lei), referido à exergia do fluido:

$$\eta_u = \frac{\dot{W}}{\dot{m}[(h - h_0) - T_0\,(s - s_0)]} \qquad (25.9)$$

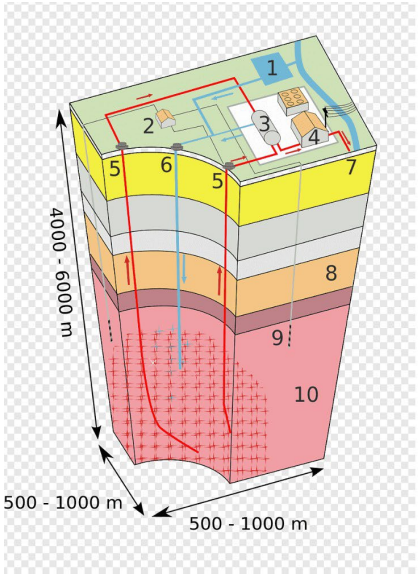
h, s – entalpia e entropia à cabeça do poço; h_0, s_0, T_0 – estado morto (ambiente). Valores típicos: **25–45%**.

25.5.5 ROCHA SECA QUENTE (EGS)

"Rocha seca quente" – do inglês **Hot Dry Rock (HDR)**, hoje Enhanced Geothermal Systems (EGS) – extrai calor onde não há água nem vapor naturais.

- **Perfuração:** dois poços próximos até rochas quentes a vários km;
- **Injecção:** água fria injectada num poço fractura a rocha e circula, aquecendo;
- **Extracção:** a água quente (ou vapor) regressa pelo 2.º poço e cede o calor na central.

Ex.: projecto piloto de Soultz-sous-Forêts (França).



1. Superfície / Área de Instalação
2. Central Geotérmica
3. Gerador Elétrico
4. Trocador de Calor / Sistema de Refrigeração
5. Poços Geotérmicos
6. Circuito de Fluido Geotérmico
7. Camada de Rochas Superficiais
8. Camada de Rochas Sedimentares Intermédias
9. Camada de Transição / Rocha Fraturada
10. Rocha Fonte de Calor (Granito Quente / Rocha Magmática)

Figura 25.16 – Sistema de rocha seca quente

25.6 BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS (BCG)

- Princípio: permuta de calor entre um fluido e o solo, através de tubos de polietileno enterrados.
- A essa profundidade, a temperatura do solo é praticamente **constante** e não depende do clima.
- No **aquecimento** o solo é fonte de calor; no **arrefecimento,** é sumidouro.
- Consome cerca de 70% menos energia do que um sistema convencional e 30–50% menos do que um sistema novo de aquecimento e arrefecimento.

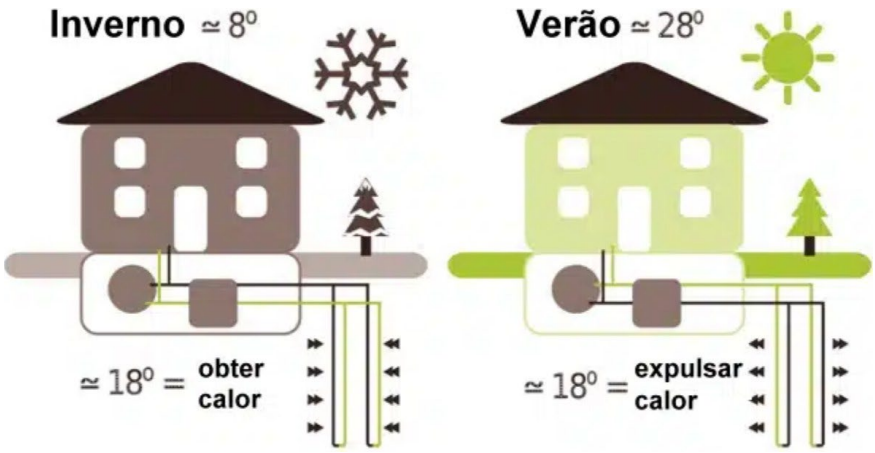


Figura 25.17 – Inverno e verão numa BCG

25.6.1 COLECTORES DE CALOR DO SOLO

Conjunto de tubos enterrados por onde circula um fluido (água + anticongelante).

- **Absorção:** o fluido percorre os tubos e troca calor com o solo;
- **Transferência:** o fluido segue para a bomba de calor no edifício;
- **Compressão:** o compressor eleva a temperatura do fluido frigorigénio para aquecer espaços e água;
- **Ciclo contínuo:** o fluido arrefecido regressa aos colectores.

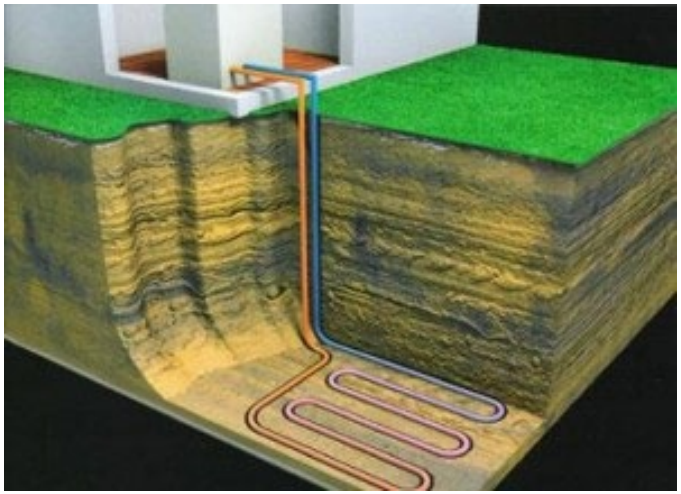


Figura 25.18 – Colectores horizontais e sondas verticais

Colector	q′ [W/m]
Horizontal	20 – 30
Vertical	40 – 60

25.6.2 DIMENSIONAMENTO DA BCG

Desempenho em aquecimento (COP), em arrefecimento (EER) e limite de Carnot:

$$COP = \frac{\dot{Q}_q}{\dot{W}} \qquad EER = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}} \qquad COP_{Carnot} = \frac{T_q}{T_q - T_f} \tag{25.10}$$

Calor trocado com o solo (aquecimento: extraído; arrefecimento: rejeitado):

$$\dot{Q}_{solo} = \dot{Q}_q\left(1 - \frac{1}{COP}\right) \qquad \dot{Q}_{solo} = \dot{Q}_f\left(1 + \frac{1}{EER}\right) \tag{25.11}$$

Comprimento do colector enterrado:

$$L = \frac{\dot{Q}_{solo}}{q'} \tag{25.12}$$

q' – potência trocada por metro de tubo [W/m]. Com o solo a temperatura constante, **COP ≈ 3,5–5**.

EXEMPLO 25.4 – ESCRITÓRIO EM MAPUTO

Carga de arrefecimento de 10 kW; BCG com EER = 4,5; sondas verticais com $q' = 50\,W/m$. Comparar com um ar condicionado convencional (EER ≈ 3).

Grandeza	Cálculo	Resultado
Potência eléctrica BCG (25.10)	10 / 4,5	**2,22 kW**
Potência eléctrica convencional	10 / 3	**3,33 kW**
Calor rejeitado no solo (25.11)	10 × (1 + 1/4,5)	**12,22 kW**
Comprimento das sondas (25.12)	12 220 / 50	**244 m (3 × 82 m)**
Poupança de electricidade	1 − 2,22 / 3,33	**≈ 33%**

Em Moçambique o uso principal é o arrefecimento: o solo funciona como sumidouro de calor mais fresco do que o ar exterior. Rejeitam-se 12,22 kW porque ao calor retirado ao edifício soma-se o trabalho do compressor.

25.7 VANTAGENS E BENEFÍCIOS

Limpa

Não queima combustíveis; reduz as emissões e conserva os combustíveis fósseis.

Pouco terreno

Menos área por MW do que quase todas as centrais; sem barragens nem minas.

Fiável

Funciona 24 h/dia todo o ano, por cima da sua fonte de "combustível".

Flexível

Desenho modular: unidades adicionadas conforme cresce a procura.

Poupa divisas

Não se importa combustível; os benefícios ficam na região.

Desenvolvimento

Leva electricidade a zonas remotas, sem poluição.

25.7 EXEMPLOS DE APROVEITAMENTO

- **Larderello (Itália):** primeira central elétrica geotérmica, em 1904.
- **Quénia:** ≈ 980 MW, sobretudo em Olkaria, no Rift da África Oriental – o maior produtor africano.
- **Islândia:** electricidade e aquecimento urbano de Reykjavík (Hellisheidi).
- **EUA:** The Geysers (Califórnia), o maior complexo de vapor seco do mundo.



Figura 25.19 – Central geotérmica de Hellisheidi (Islândia)

25.8 DESVANTAGENS DA ENERGIA GEOTÉRMICA

- **Custo inicial elevado:** exploração e perfuração são caras e arriscadas (o poço pode não ter o caudal ou a temperatura esperados).
- **Localização:** os recursos de alta temperatura estão em zonas específicas.
- **Poluentes no fluido:** H_2S, boro, arsénio e mercúrio – obrigam à reinjecção e ao controlo das emissões.
- **Corrosão e incrustações** nas tubagens encarecem a manutenção.

Atenção à gestão do recurso

- Extrair mais do que a recarga natural arrefece o reservatório e baixa a pressão.
- A reinjecção mantém a pressão e evita a subsidência do terreno.
- A estimulação de rochas (EGS) pode induzir pequenos sismos – exige monitorização.

25.9 ENERGIA GEOTÉRMICA EM MOÇAMBIQUE

- Moçambique está no **ramo sudoeste do Rift da África Oriental**.
- Fontes termais documentadas desde os anos 1970, com **40 a 95 °C**; a mais quente em Metangula (Niassa).
- Sistemas sem magmatismo activo: o calor circula por falhas e fracturas (tipo embasamento / EGS).
- Estudos magnetotelúricos e gravimétricos em seis locais (Tete, Zambézia e Niassa) apontam para **≈ 147 MW**, com reservatórios a 1 500–2 500 m, ainda por confirmar com sondagens.
- Não há centrais em operação.

Tabela 25.4 – Fontes termais

Província	Superfície	Reservatório (est.)
Niassa	até 95 °C	—
Tete	42 – 80 °C	90 – 120 °C
Zambézia	45 – 75 °C	≈ 150–165 °C
Manica / Sofala	27 – 58 °C	—

Aplicações adequadas

Recursos de média e baixa T: **ciclo binário**, uso directo em cascata (secagem, estufas, piscicultura) e **BCG** para arrefecimento.

Fonte: Geothermal Energy (2022) 10, doi:10.1186/s40517-022-00213-7.

FORMULÁRIO DA AULA 25

Grandeza	Expressão	Eq.
Gradiente geotérmico	$T(z) = T_s + G\,z$	25.1
Fluxo de calor	$q = k\,G$	25.2
Energia armazenada	$Q = V[(1-\varphi)\rho_r c_r + \varphi\rho_w c_w](T_r - T_{ref})$	25.3
Potência (volumétrico)	$P_e = Q\,R\,\eta_c\,/\,(F\,t)$	25.4
Potência térmica	$\dot{Q} = \dot{m}\,c_p\,(T_{ent} - T_{sai})$	25.5
Fracção de vapor (flash)	$x = (h_1 - h_f)\,/\,h_{fg}$	25.6
Potência flash	$P_e = \dot{m}\,x\,(h_g - h_{2s})\,\eta_t\,\eta_g$	25.7
Limite de Carnot	$\eta_{Carnot} = 1 - T_c/T_q$	25.8
Rendimento de utilização	$\eta_u = \dot{W}\,/\,\{\dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)]\}$	25.9
Desempenho da BCG	$COP = \dot{Q}_q/\dot{W}$; $EER = \dot{Q}_f/\dot{W}$	25.10
Calor trocado com o solo	$\dot{Q}_q(1 - 1/COP)$; $\dot{Q}_f(1 + 1/EER)$	25.11
Comprimento do colector	$L = \dot{Q}_{solo}\,/\,q'$	25.12
Potência binária	$P_e = \eta_{th}\,\dot{m}\,c_p\,(T_{ent} - T_{reinj})$	25.13

Temperaturas absolutas (K) em Carnot e na exergia; c_p da água ≈ 4,19 kJ/(kg·K); 1 ano ≈ 3,156 × 10^7 s.

SÍNTESE E ERROS FREQUENTES

O que reter

- A temperatura aumenta em ≈ 25–30 °C/km; só as anomalias térmicas tornam o recurso viável.
- O tipo de recurso determina a tecnologia: vapor seco, flash, binário, uso directo ou BCG.
- No volumétrico só ≈ 2% do calor armazenado chega à rede.
- O uso em cascata aumenta o calor útil recuperado.
- Numa BCG o solo é fonte ou sumidouro a temperatura constante.

Erros frequentes

- Usar °C em vez de K no rendimento de Carnot.
- Confundir grau geotérmico (m/°C) com gradiente (°C/km).
- Usar o caudal total $\dot{m}$, em vez de $\dot{m} \cdot x$, na turbina flash.
- Esquecer que, no arrefecimento, o solo recebe $\dot{Q}_f + \dot{W}$.
- Confundir potência térmica (MW_t) com eléctrica (MW_e).

PROBLEMAS PROPOSTOS

P1. Num local, $T_s = 24\ ^\circ C$ e $G = 35\ ^\circ C/km$. A que profundidade se encontra a isotérmica de 150 °C? Qual o fluxo de calor, se $k = 3\ W/(m \cdot K)$?

P2. Um poço fornece 30 kg/s a 85 °C, a ser utilizado em cascata: secagem (85 → 65 °C), estufas (65 → 45 °C) e piscicultura (45 → 30 °C). Calcule a potência de cada uso e a total.

P3. Um poço produz 80 kg/s de líquido saturado a 250 °C; separador a 150 °C, condensador a 50 °C, $\eta_t = 0{,}85$ e $\eta_g = 0{,}97$. Calcule x, o caudal de vapor e a potência eléctrica.

P4. Repita o Exemplo 25.1 com $T_r = 200\ ^\circ C$ e $R = 0{,}20$.

P5. Uma moradia precisa de 8 kW de aquecimento; BCG com COP = 4 e colector horizontal com $q' = 25\ W/m$. Calcule a potência eléctrica, o calor extraído do solo e o comprimento do colector.

PROBLEMAS PROPOSTOS – RESPOSTAS

Prob.	Resolução resumida	Resposta
P1	$z = (150 - 24)/35$; $q = 3 \times 0{,}035$	**3,6 km ; 105 mW/m²**
P2	$30 \times 4{,}19 \times 20$; $\times 20$; $\times 15$	**2,51 + 2,51 + 1,89 = 6,91 MW**
P3	$x = (1\,085{,}7 - 632{,}3)/2\,113{,}7$; $s = 6{,}837 \rightarrow h_{2s} = 2\,191{,}4$; $17{,}2 \times 554{,}5 \times 0{,}85 \times 0{,}97$	**x = 0,215 ; 17,2 kg/s ; ≈ 7,8 MW**
P4	$Q = 4\times10^{9} \times 2{,}53\times10^{6} \times 100$; $P = Q \times 0{,}20 \times 0{,}12 \,/\, (0{,}9 \times 9{,}47\times10^{8})$	**$1{,}01\times10^{18}$ J ; ≈ 28,5 MW**
P5	$\dot{W} = 8/4$; $\dot{Q}_{solo} = 8 \times (1 - 1/4)$; $L = 6\,000/25$	**2 kW ; 6 kW ; 240 m**

Próxima aula: mini-teste sobre energia geotérmica (Aula 25)!