



Programa de Pós-Graduação em Energia - PPGE  
Instituto de Energia e Ambiente - IEE  
Universidade de São Paulo - USP

## **PEN 5002: Recursos e Oferta de Energia**

**Prof. Célio Bermann**

**Profa. Virgínia Parente**

### **11ª aula - Energia Geotérmica e do Hidrogênio (Célula combustível)**

- . processos de conversão: aspectos tecnológicos
- . aspectos econômicos e ambientais
  
- . Grupo de alunos: usinas geotérmicas em operação/potenciais  
(mundial, ALC e Brasil)  
aplicações de células comb. (mundial, ALC e Brasil)

# **Energia Geotérmica**

# Energia Geotérmica

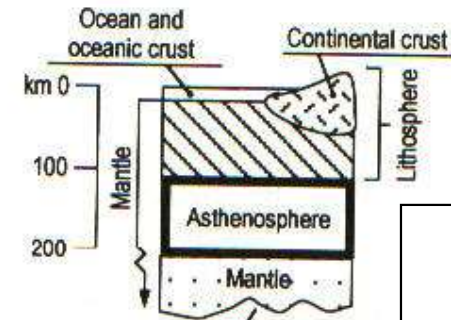
O núcleo da terra tem um nível térmico superior ao que apresenta na superfície

- pode alcançar até 4000 °C

Gradiente térmico: denomina-se a variação da temperatura com a profundidade

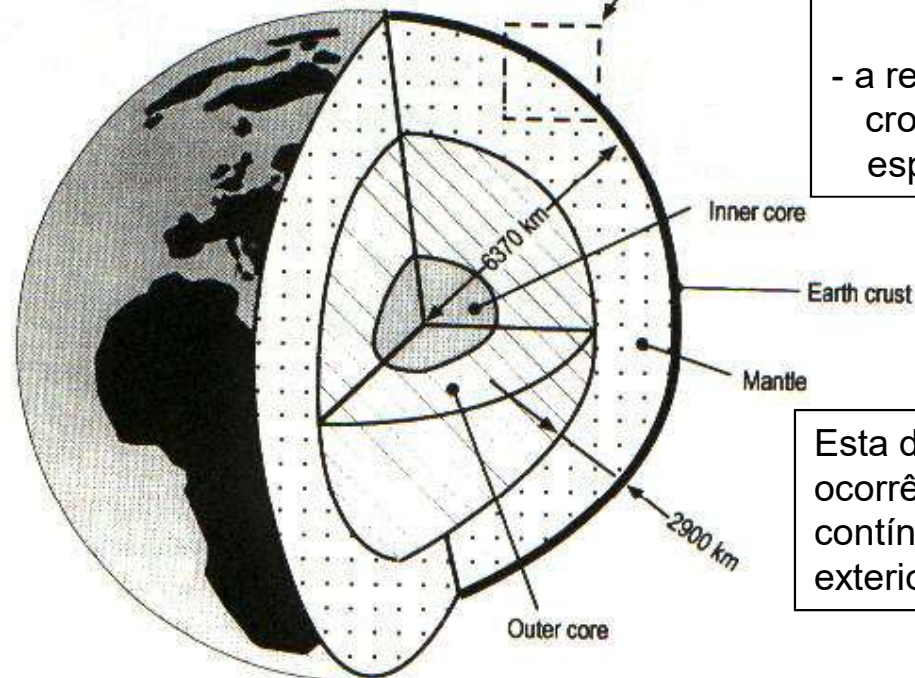
3 °C a cada 100 m

E. BARBIER



Entre o manto e a crosta podemos encontrar temperaturas desde 400 a 1000 °C

- a região externa, denominada crosta terrestre possui uma espessura média de 32 km



Esta diferença dá lugar à ocorrência de um fluxo de calor contínuo, desde o interior ao exterior da Terra

## Energia geotérmica



A energia geotérmica é, em senso lato, o calor contido no interior da Terra. A sua origem é associada à dissipação do calor primitivo originado no processo de formação do planeta e à desintegração de elementos radioativos contidos nas rochas, que continuamente se dissipa para o exterior através de três processos: condução, convecção e radiação.

O fluxo de calor libertado à superfície, em termos médios, é de  $82 \text{ mW/m}^2$ . Considerando a área da superfície da Terra, o fluxo de calor dissipado para o espaço é de cerca de 42 milhões de MWh. A temperatura estimada para o núcleo é de cerca de  $4.000^\circ\text{C}$ .

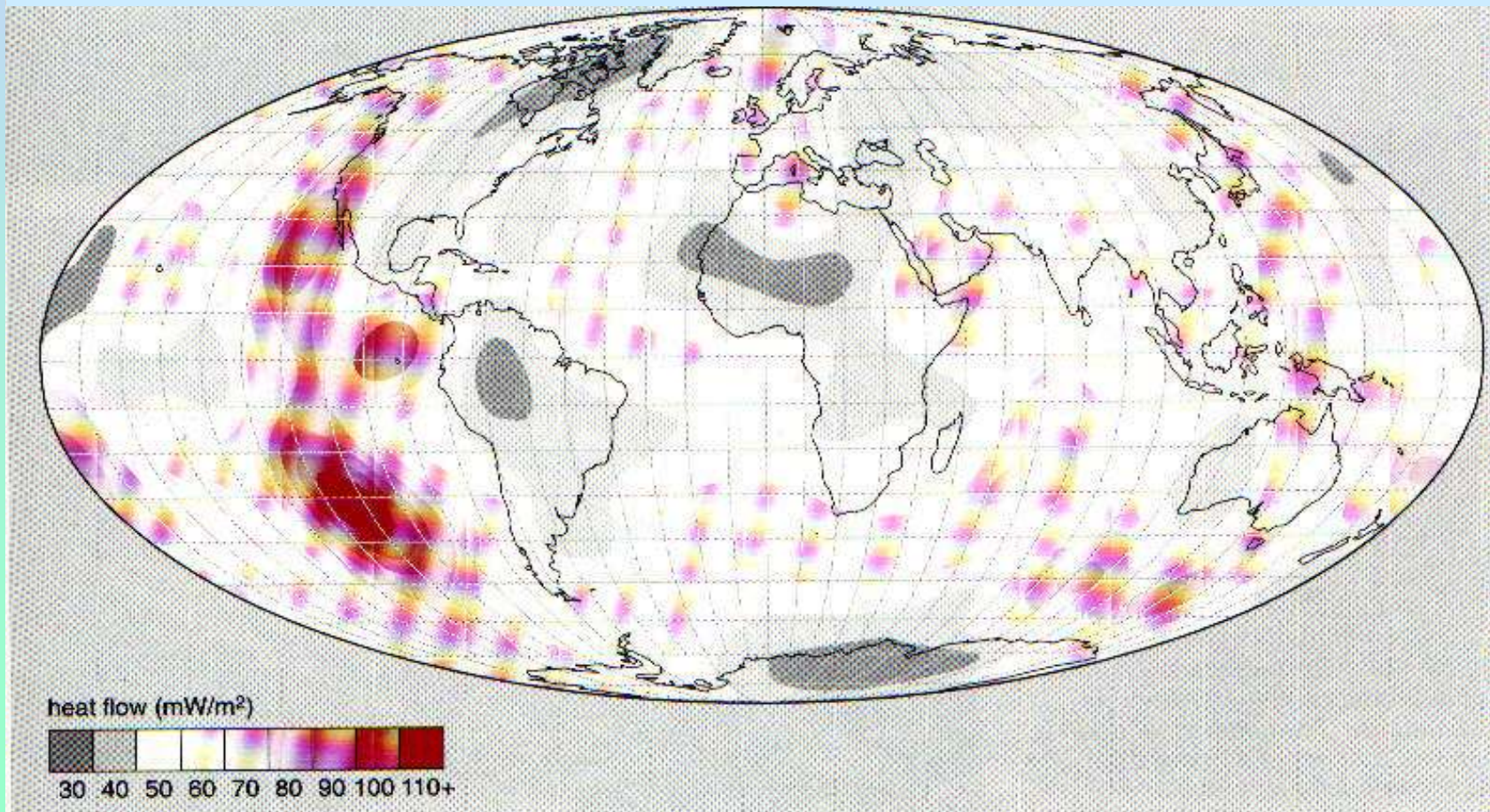
O gradiente geotérmico observado na crosta terrestre em áreas afastadas das zonas de vulcanismo ativo, estima-se geralmente da ordem de  $33^\circ\text{C/km}$ , enquanto que nas zonas geotermicamente anómalas este gradiente é muitas vezes superior a  $100^\circ\text{C/km}$ .

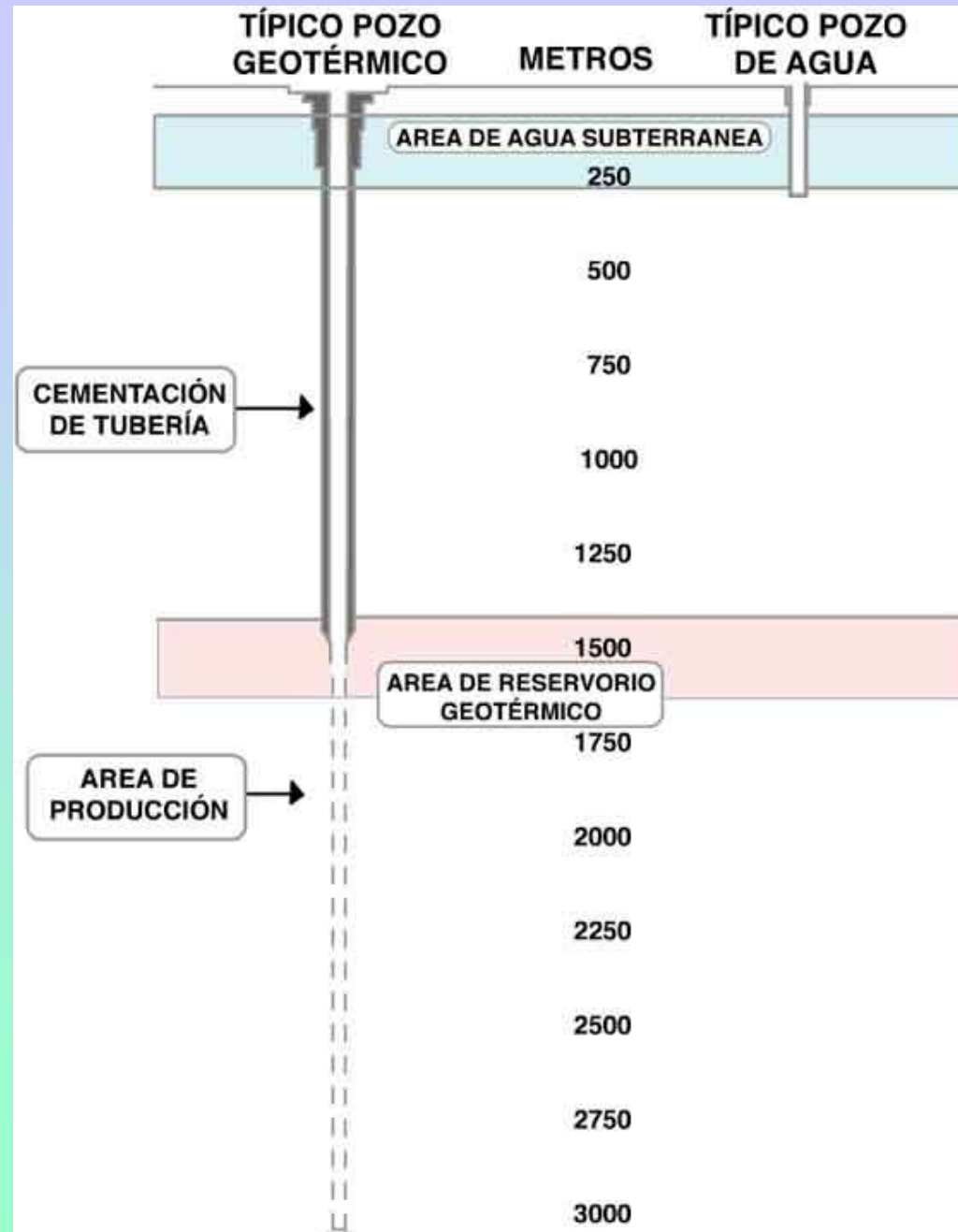


Algumas substâncias que constituem a crosta terrestre são substâncias radioativas, portanto a energia liberada no processo de desintegração é um dos fenômenos que contribui no mencionado fluxo de calor.

- o valor médio em profundidades passíveis de utilização é 60 mW/m<sup>2</sup>.

As temperaturas que se alcançam no interior da Terra justificam o interesse por utilizar sua energia térmica, entretanto, o baixo fluxo de calor, devido essencialmente a baixa condutividade dos materiais que a constituem, torna muito difícil seu aproveitamento.





## **Geotermia para geração de eletricidade**

### **Energía geotérmica de alta temperatura:**

Existe nas zonas ativas da crosta terrestre (zonas vulcânicas, limites de placas litosféricas, dorsais oceânicas). A partir de aquíferos cuja temperatura está compreendida entre 150 e 400 °C, se produz vapor na superfície que enviando às turbinas, gera eletricidade. Parâmetros requeridos: uma camada composta de uma cobertura de rochas impermeáveis; um depósito, ou aquífero, de permeabilidade elevada, entre 300 e 2000 m de profundidade; rochas fraturadas que permitam uma circulação convectiva de fluidos, e a transferência de calor da fonte à superfície, a partir de uma fonte de calor magmático (entre 3 e 10 km de profundidade a 500-600 °C).

### **Energía geotérmica de temperaturas médias:**

É aquela em que os fluidos dos aquíferos estão a temperaturas menos elevadas (70-150 °C). Por conseguinte, a conversão vapor-eletricidade se realiza com um menor rendimento, e deve utilizar-se como intermediário um fluido volátil (isopentano ou isobutano, que possuem um ponto de ebulição mais baixo que a água). Pequenas centrais elétricas podem explorar estes recursos.



## Tecnologias de geração

A produção de energia elétrica através do aproveitamento da energia geotérmica pode ser efetuada por vários processos de conversão de calor em eletricidade. A tecnologia a adotar, ciclo convencional ou ciclo binário, depende essencialmente da entalpia e da composição do fluido geotérmico.

Nas tecnologias de ciclo convencional, a fase líquida é separada da fase gasosa e apenas é utilizado o vapor geotérmico que é expandido diretamente na turbina e posteriormente libertado para a atmosfera ou condensado em torres de refrigeração, obtendo-se maior rendimento do sistema no segundo caso.

No ciclo binário é utilizado um fluido de trabalho, orgânico ou não, para o qual é transferida a energia do fluido geotérmico. Nesta tecnologia é utilizado um fluido que se encontra num circuito fechado. Ao ser aquecido nos trocadores de calor, vaporiza e expande-se nas turbinas, posteriormente é arrefecido e condensado e por intermédio de uma bomba reinicia o ciclo.

Neste processo não existe contacto entre os fluidos geotérmico e de trabalho e as emissões para a atmosfera são muito reduzidas, visto que a quase totalidade do vapor é condensada e reinjetada com a água.



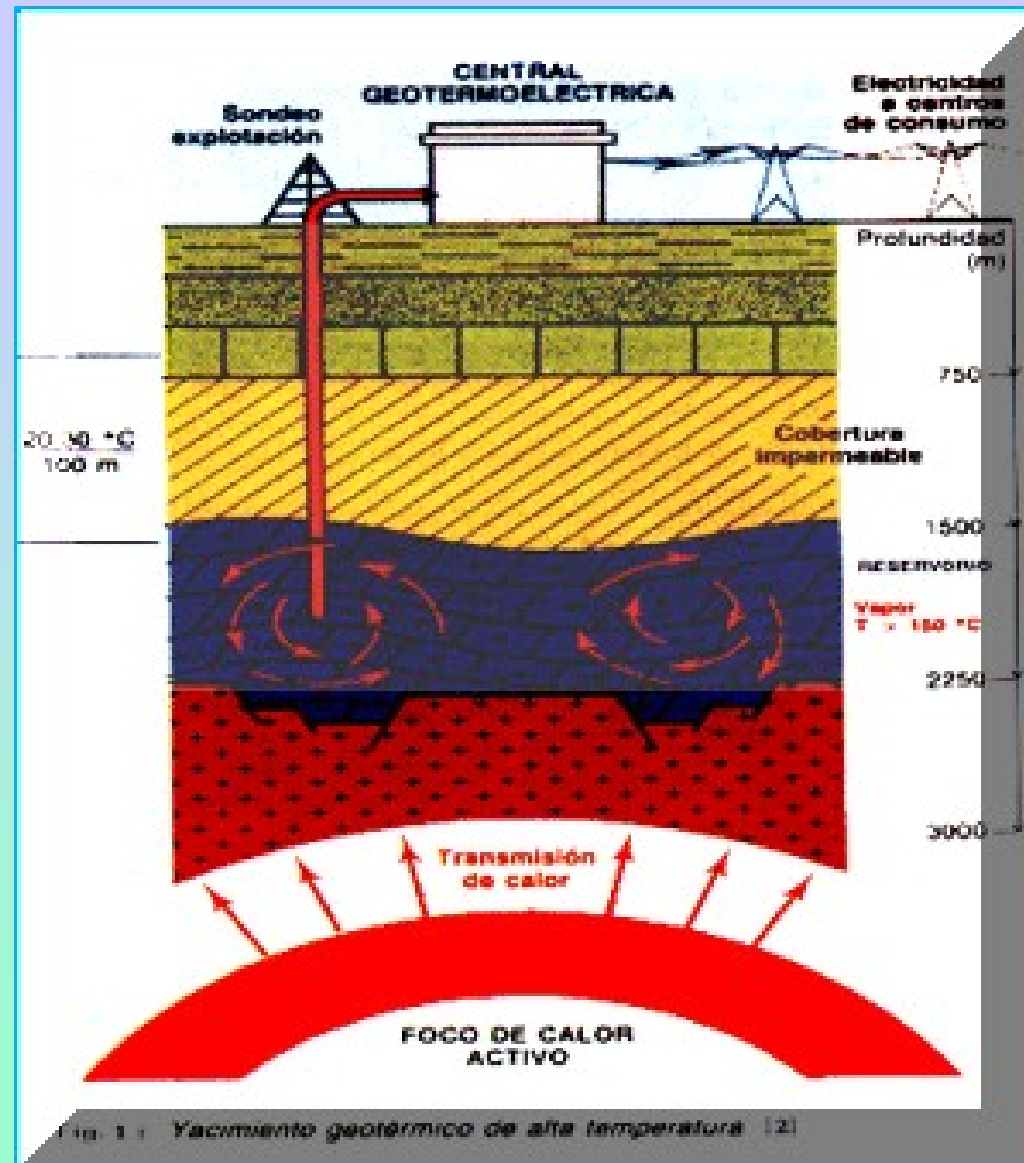
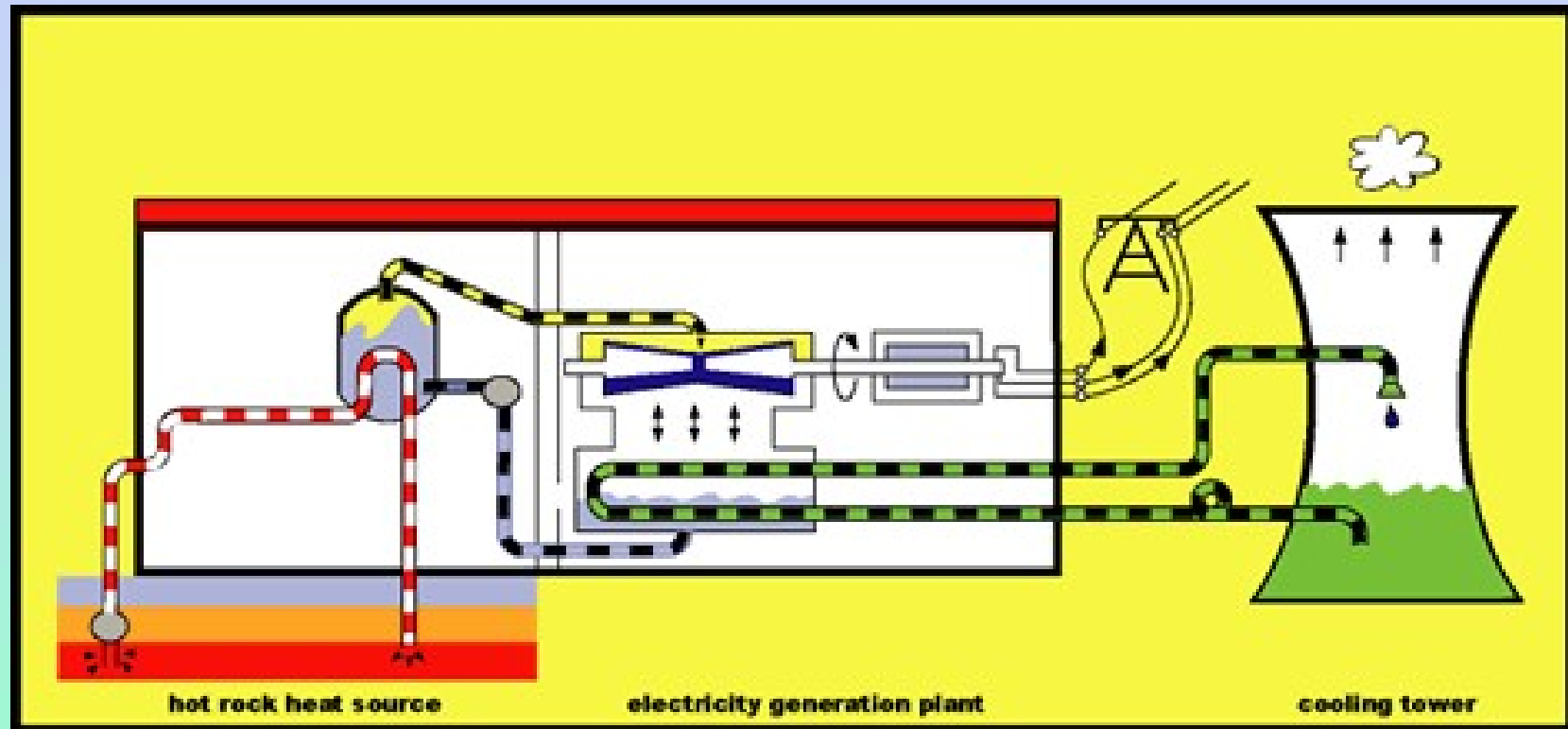


Fig. 1 : Yacimiento geotérmico de alta temperatura [2]



## Dimensionamento de uma usina geotérmica:

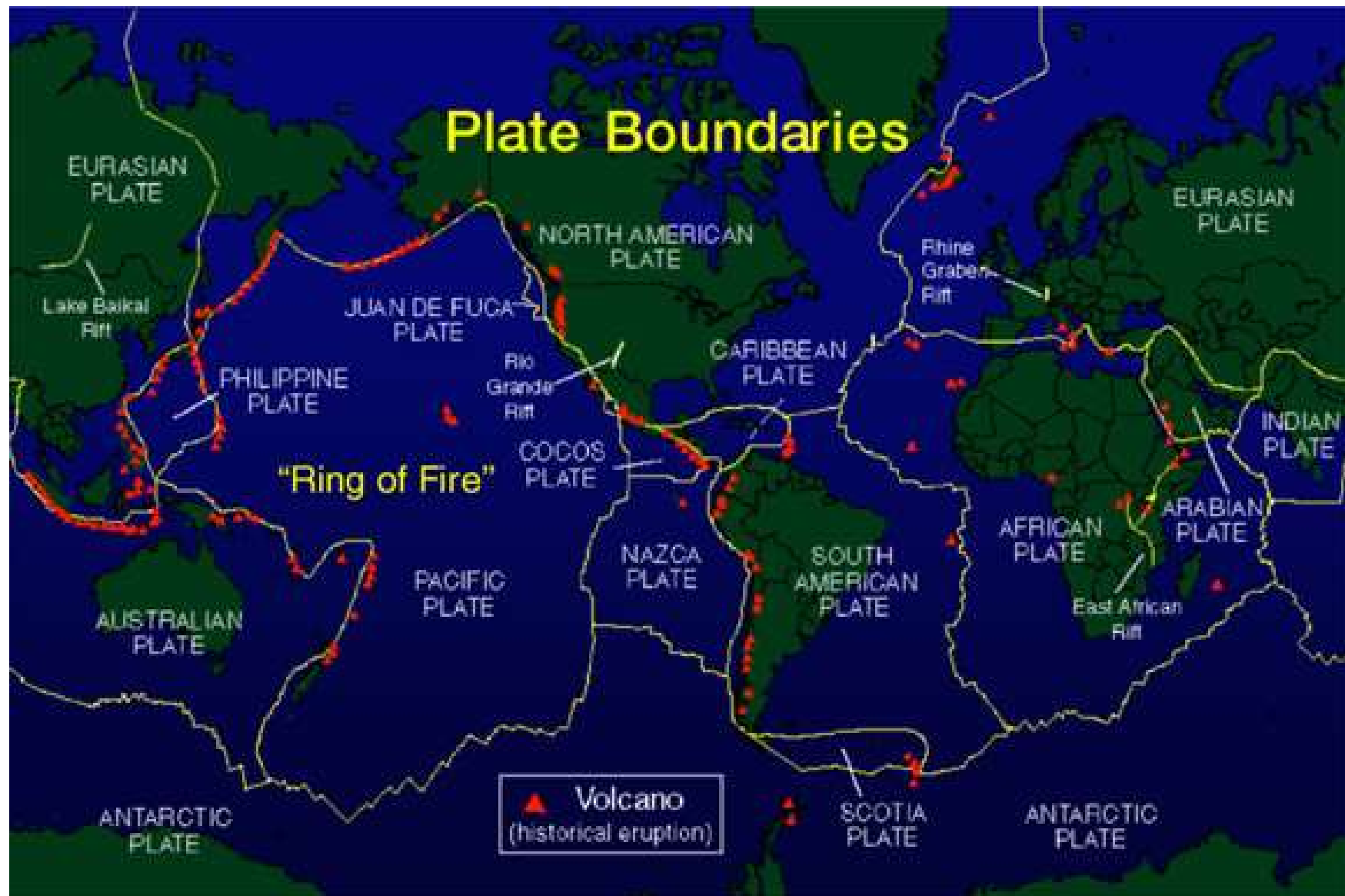
A energia útil de um reservatório depende da taxa do fluxo, temperatura, e calor latente específico do fluido.

A eficiência termodinâmica ideal para um ciclo recebendo calor a uma temperatura  $T_2$ , rejeitando calor a uma temperatura  $T_1$  e operando a uma temperatura de condensação  $T_0$  é dada por:

$$\eta_i = 1 - \frac{T_0}{T_2 - T_1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

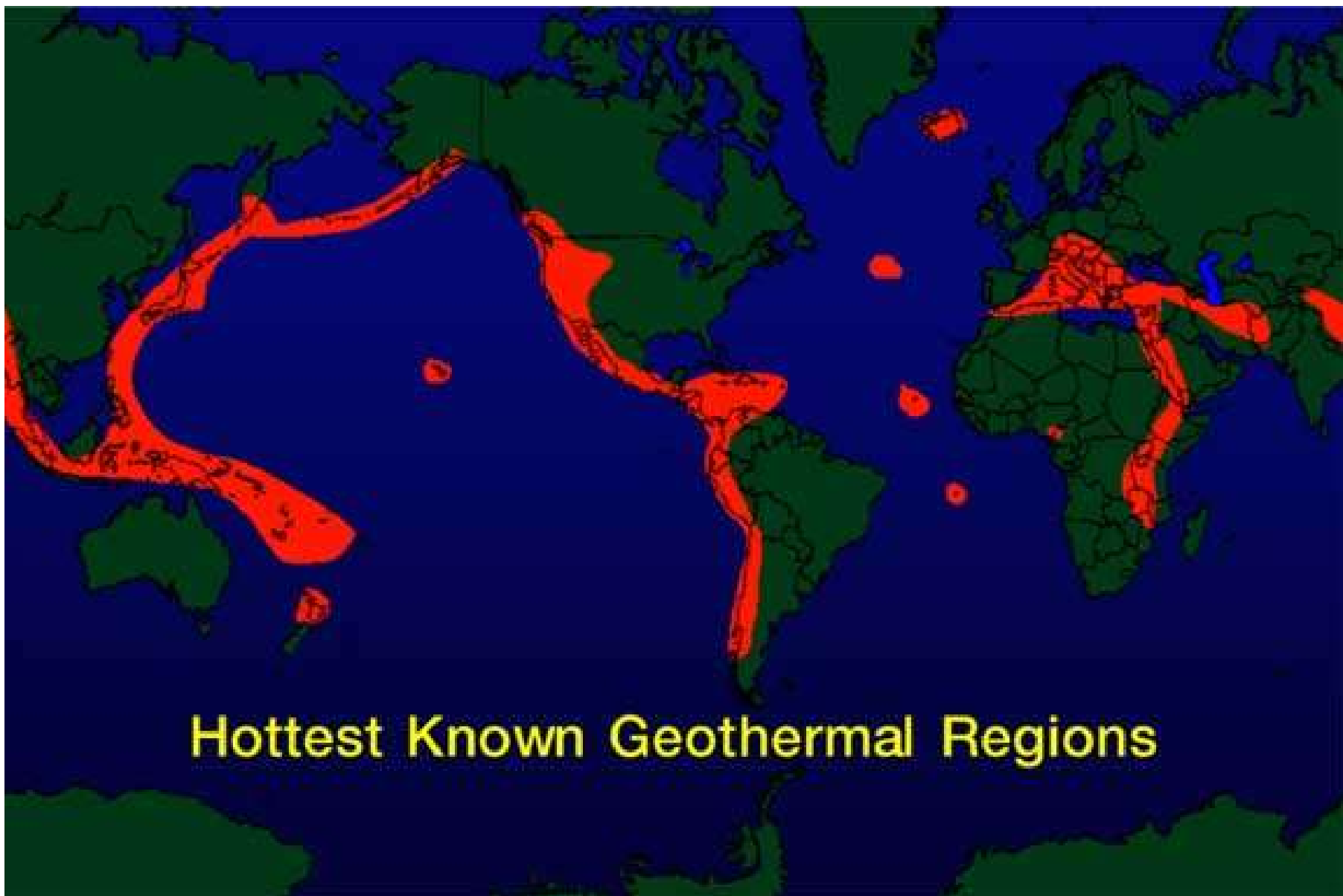
Na prática, no entanto, para temperaturas na casa de 150-200 °C, eficiência de 60% de  $\eta_i$  são obtidas. Esse valor não leva em conta a energia requerida para fazer funcionar aparelhos auxiliares.

O tamanho da fábrica é então limitado pela saída termal e pela eficiência.



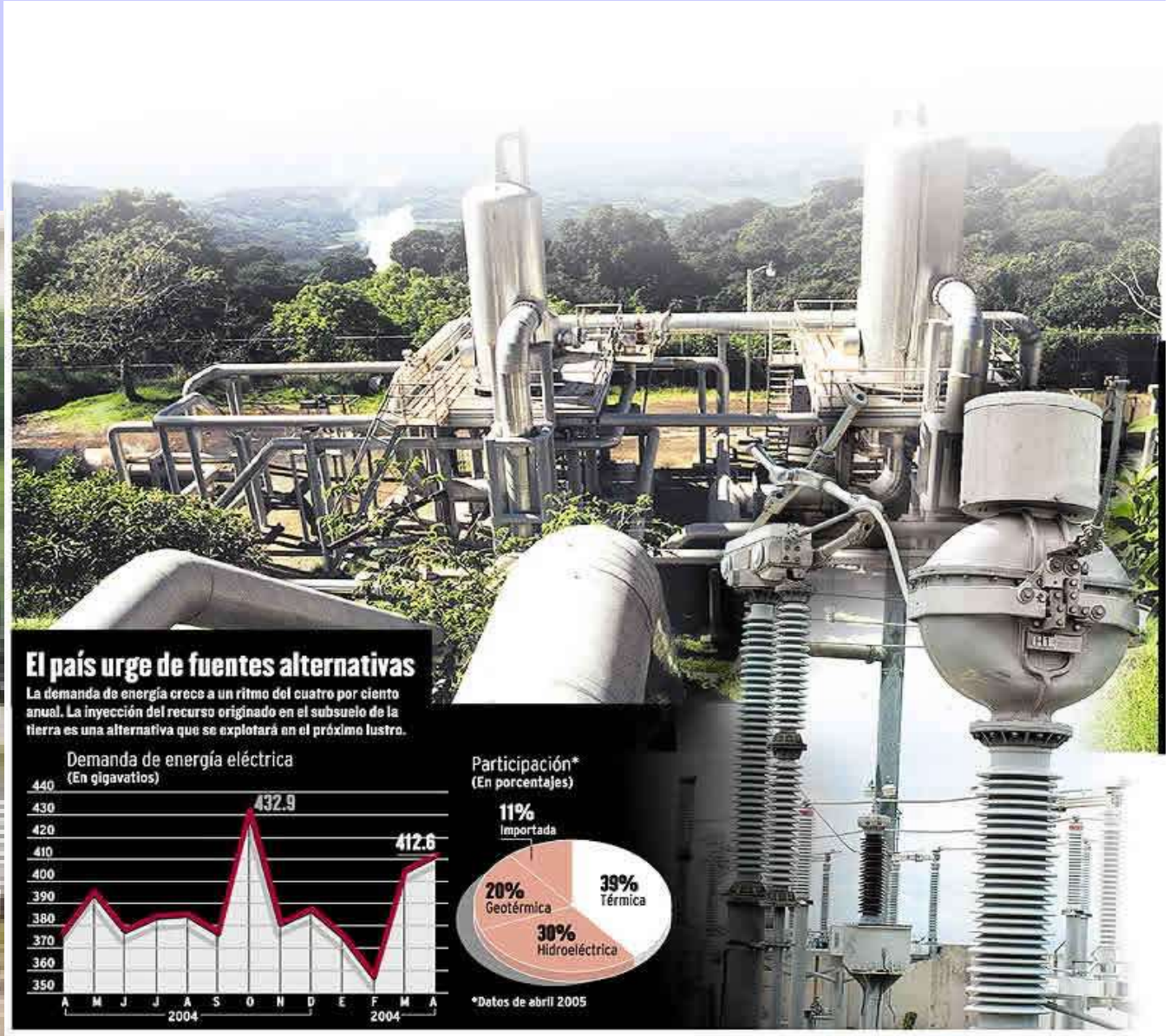
Anel de fogo. Fonte: Geothermal Education Office, disponível em <http://geothermal.marin.org/GEOpresentation/sld006.htm> , acessado em 27/07/06





Regiões mais propícias para aproveitamento da energia geotérmica. Fonte: Geothermal Education Office, disponível em

<http://geothermal.marin.org/GEOpresentation/sld015.htm>, acessado em 27/07/06



**El Salvador – Cap. Inst. Geotérmica: 204 MW, 26% da oferta**





Figure 14: Location of Ahuachapán [A, 95 MW], Berlin [B, 109 MW] and Chinameca [C].

Fonte: Bertani, 2010



**Berlin (109.4 MW)**



**Ahuachapán (95 MW)**

Fonte: Lageo, 2011





**Location of Larderello [A, 594 MW],  
Travale/Radicondoli [B, 160 MW], Bagnore [C,  
20 MW] and Piancastagnaio [D, 68 MW].**

Fonte: Bertani, 2010



Usina Geotérmica de Larderello (Itália)







Usina Geotérmica de Larderello (Itália)

## Usinas Geotérmicas

### **Custo de investimento:**

O capital requerido para o desenvolvimento de um campo geotérmico varia de campo em campo, entre US\$1.150 a 1750 por kW instalado, incluindo o desenvolvimento completo do campo, tanto dos poços, separadores, vapordutos, turbina, gerador, transformadores, terreno, entre outros.

A vida útil de uma planta é de 30 a 45 anos

### **Custos de Operação e Manutenção:**

Os custos de operação e manutenção de uma planta geotérmica variam entre US\$ 0.015 a US\$ 0.03 o kWh, dependendo do tipo de planta. As usinas geotérmicas operam entre 97 a 95% do tempo.

### **Avaliação econômica:**

Com um preço de geração em torno de 30 mills/kWh, se calcula uma taxa de retorno de 17% para um projeto sem financiamento. Considera-se um investimento da ordem de US\$ 220.000.000 para uma usina geradora de 100MW. O desenvolvimento dos poços exige um custo médio de US\$ 2.7 milhões cada.

## Usinas Geotérmicas

- ▶ A energia geotérmica é restrita, não sendo encontrada em todos os lugares, o que dificulta a implantação de projetos em determinadas localidades.
- ▶ Por causa dos altos índices de desperdícios que ocorrem quando o fluido geotérmico é transmitido a longas distâncias através de dutos, a energia deve ser posta em uso no campo geotérmico ou próximo deste . Dessa maneira o impacto ambiental é sentido somente nos arredores da fonte de energia.
- ▶ Geralmente os fluxos geotérmicos contém gases dissolvidos, e esses gases são liberados para a atmosfera, junto com o vapor de água. Na maioria são gases sulfurosos ( $H_2S$ ), com odor desagradável, corrosivos e com propriedades nocivas à saúde humana.
- ▶ Há a possibilidade de contaminação da água nas proximidades de uma usina geotérmica, devido a natureza mineralizada dos fluidos geotérmicos e à exigência de disposição de fluidos gastos. A descarga livre dos resíduos líquidos para a superfície pode resultar na contaminação de rios, lagos.

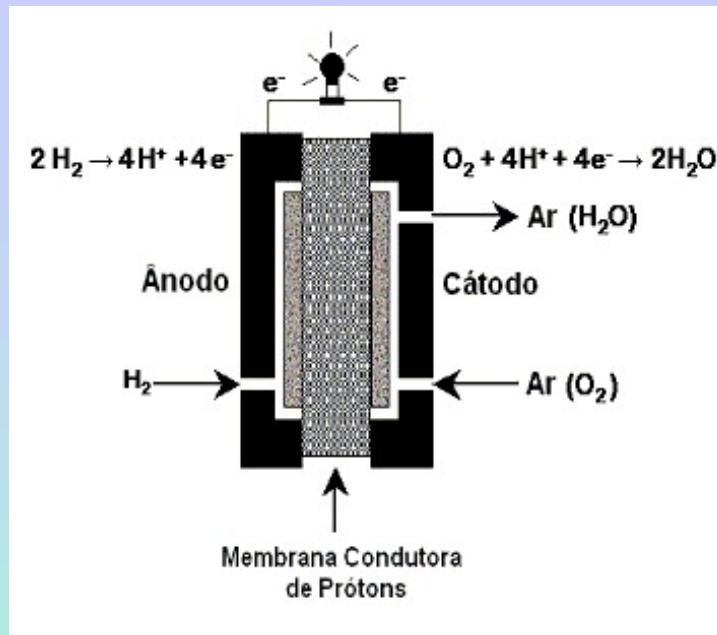
## Usinas Geotérmicas

- ▶ Quando uma grande quantidade de fluido é retirada da terra, sempre há a chance de ocorrer um abalo, e nesses lugares deve ser injetado água para não ocorrer o aluimento da terra.
- ▶ Os testes de perfuração das fontes são operações barulhentas, geralmente as áreas geotérmicas são distante das áreas urbanas. O calor perdido das usinas geotérmicas é maior que de outras usinas, o que leva a um aumento da temperatura do ambiente próximo à usina.



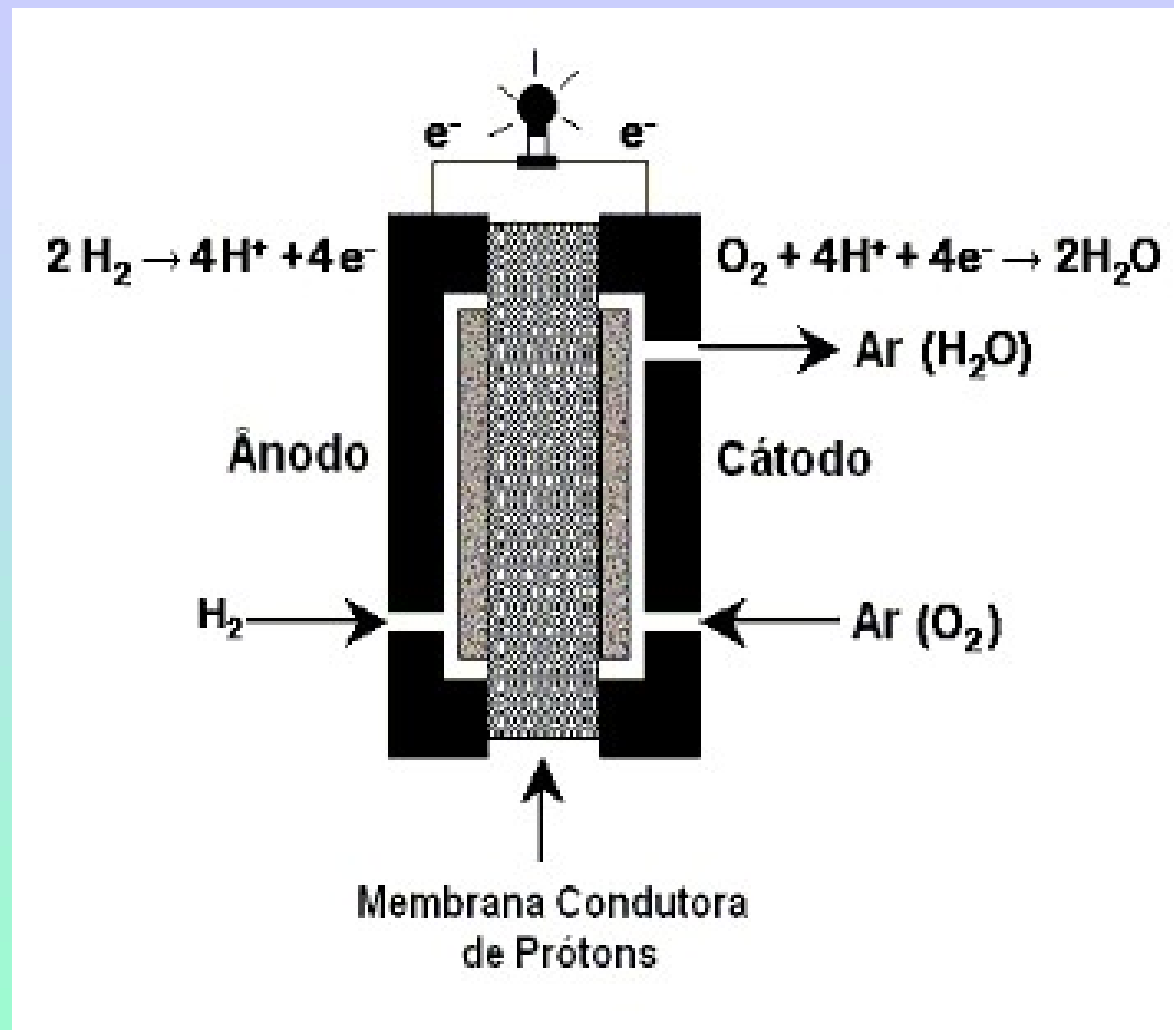
# **Energia do Hidrogênio (Célula Combustível)**

## Composição da célula combustível

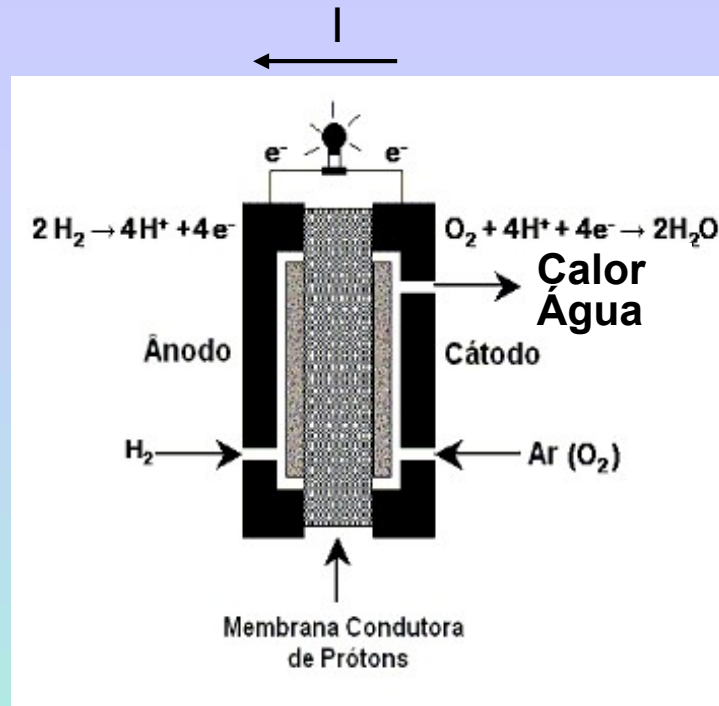


A célula combustível compõe-se de um anodo (pólo negativo), de um cátodo (pólo positivo), e uma membrana eletrolítica para bloquear o fluxo de elétrons.

Na reação eletroquímica ocorre a oxidação, com o hidrogênio que flui pelo anodo se separando em elétrons e prótons, dirigindo os elétrons para um circuito externo para serem usados como eletricidade, enquanto os prótons fluem pela membrana. O oxigênio é bombeado do lado do cátodo, reagindo com os prótons do hidrogênio para formar água.



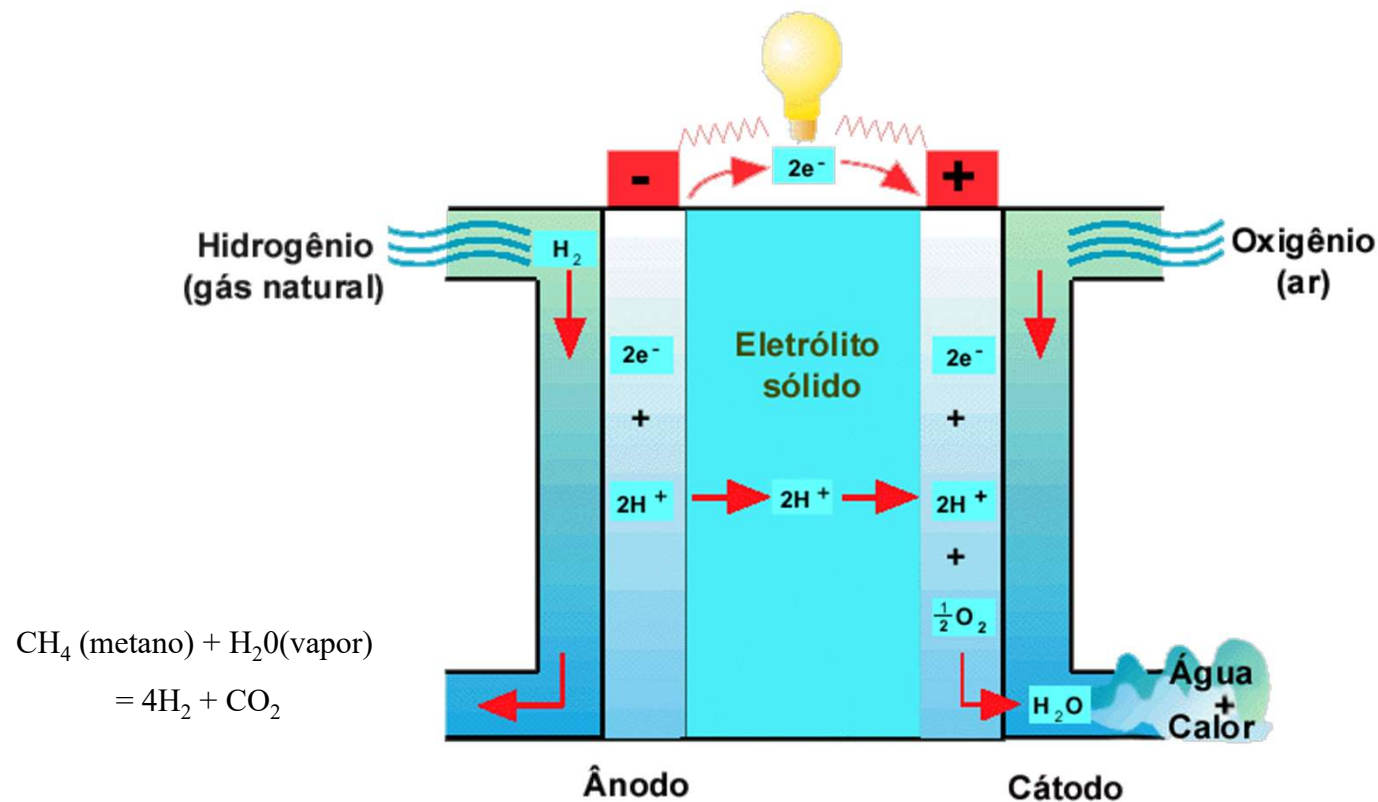
*Diagrama de uma célula a combustível*



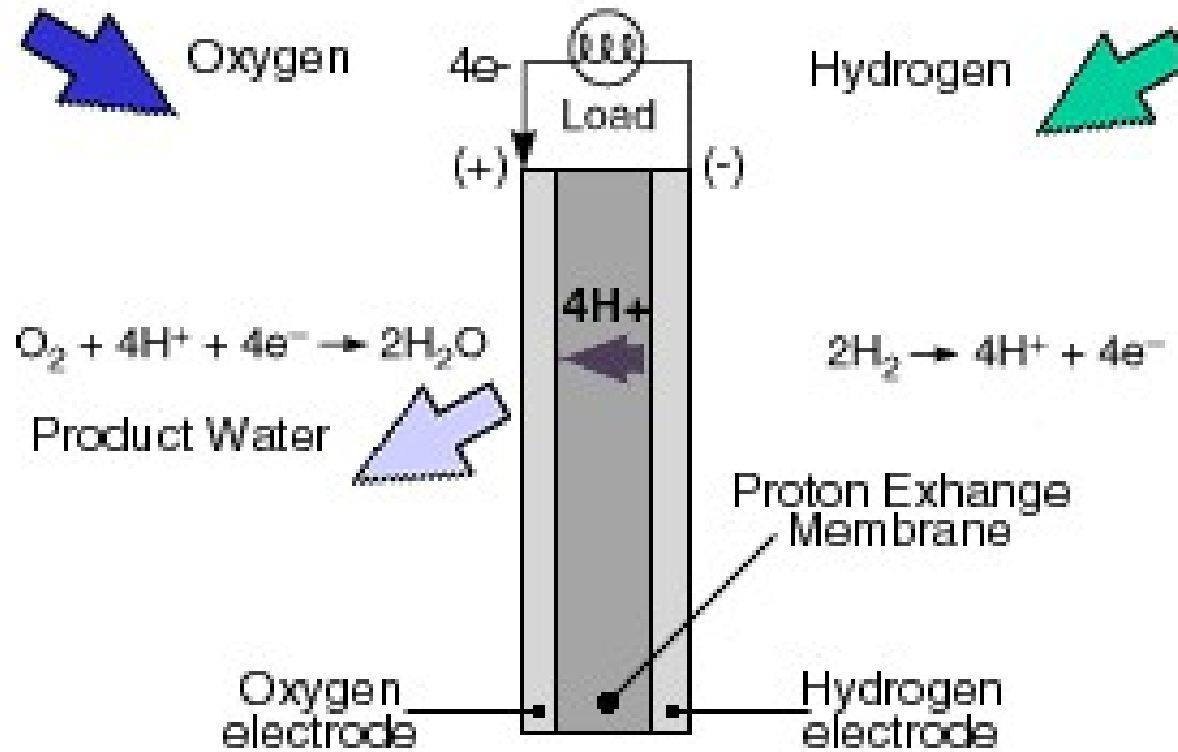
Por convenção, o sentido da corrente elétrica é contrário ao do fluxo dos elétrons. Dessa forma, a corrente elétrica numa célula de combustível sai pelo cátodo e entra pelo anodo.

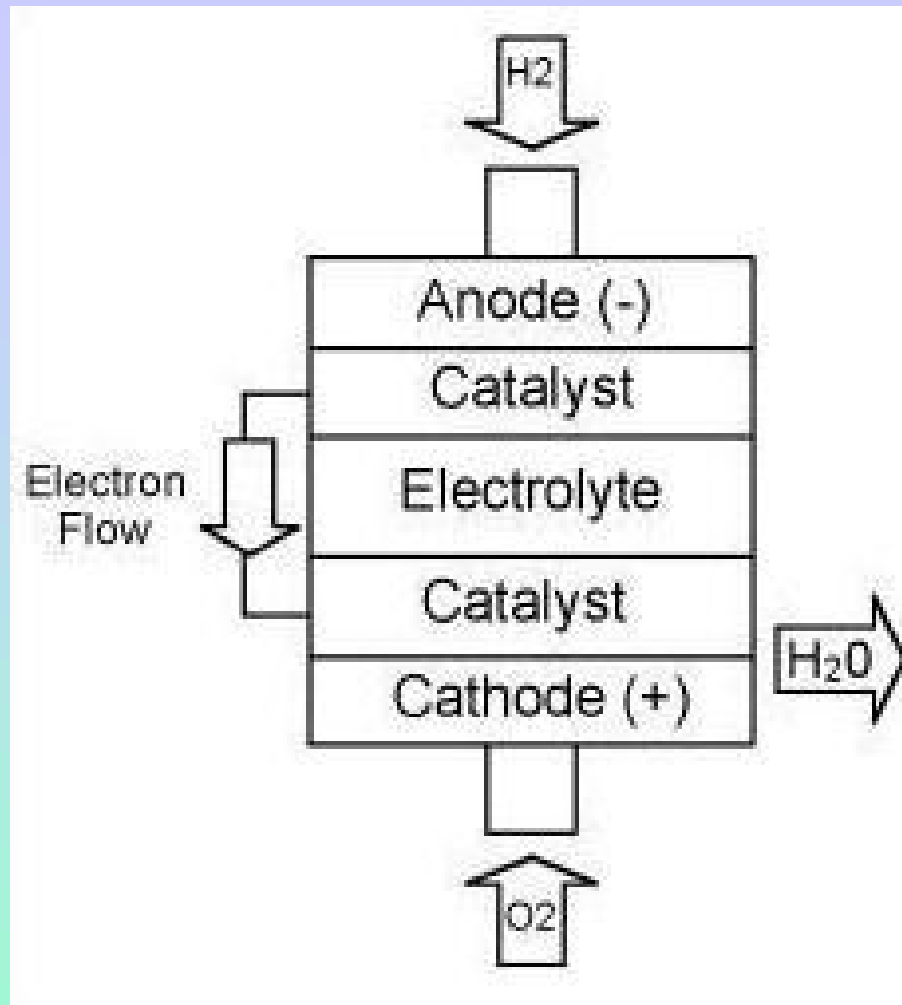


# Princípio de Funcionamento

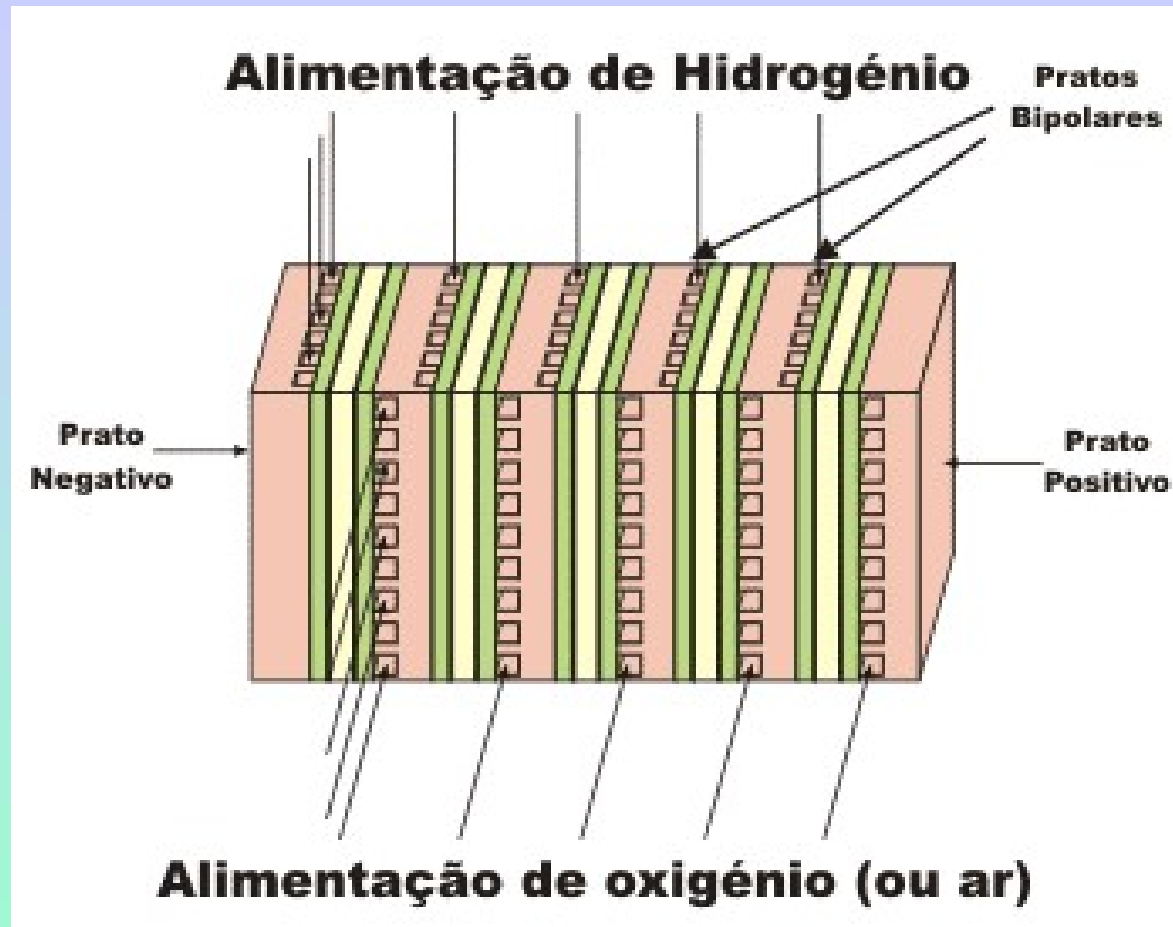


## Fuel Cell Mode





Para aumentar a eficiência da reação química utiliza-se catalisadores à base de metais nobres (p.ex. platina; níquel).



A tensão obtida por cada elemento da célula combustível é de 0,7 – 1 V. Através do empilhamento de elementos em conjuntos denominados pilhas de células, a tensão pode ser elevada a qualquer valor.

# O Desenvolvimento da Tecnologia



A primeira célula de combustível foi construída em 1839 por Sir William Grove, um juiz Galês e cientista.

O interesse nas células de combustível como um gerador prático, começou nos anos 60, quando o programa espacial dos Estados Unidos escolheu a célula de combustível no lugar da energia nuclear (mais arriscada), e da energia solar (mais cara).

As células de combustível abasteceram de energia as naves Apolo e Geminis e ainda fornecem eletricidade e água ao tranbordador espacial.

Fonte: Smithsonian Institute (2005)  
Smith et al. (2002)

**1839** - Sir William Grove descobre o princípio de funcionamento e monta a primeira célula.

**1955** - Willard Thomas Grubb desenvolve uma membrana trocadora de íons (General Electric).

**1958** - Leonard Niedrach desenvolveu um processo de depósito de Pt em Titânio e posteriormente colar na membrana polimérica.



## **Equivalência energética do hidrogênio**

Um quilo de hidrogênio libera a mesma quantidade de energia de 4 litros de gasolina ou 3,7 metros cúbicos de gás natural.

## Fontes para obtenção do Hidrogênio

### ➤ hidrogênio puro:

Não é facilmente encontrado na natureza, mas mais frequentemente encontrado em compostos nos quais os átomos de hidrogênio ligam-se quimicamente a um ou mais dos outros elementos. Separar essas ligações exige energia, diminuindo, assim, a eficiência relativa das células combustíveis.

A forma mais tradicional para produção de hidrogênio puro é pela hidrólise da água. —→ **Hidrogênio Verde**

## Fontes para obtenção do Hidrogênio

### ➤ hidrogênio puro:

Não é facilmente encontrado na natureza, mas mais frequentemente encontrado em compostos nos quais os átomos de hidrogênio ligam-se quimicamente a um ou mais dos outros elementos. Separar essas ligações exige energia, diminuindo, assim, a eficiência relativa das células combustíveis.

A forma mais tradicional para produção de hidrogênio puro é pela hidrólise da água. —→ **Hidrogênio Verde**

Processar, armazenar e distribuir hidrogênio puro é demasiadamente difícil em curto prazo para tornar-se viável em escala planetária. O hidrogênio puro é simplesmente difícil de obter-se e, mesmo quando se o tem, são necessários uma grande pressão e um grande volume para armazená-lo, para colher a eficiência da relação energia/peso.

## Fontes para obtenção do Hidrogênio

### ➤ metanol (ou outro hidrocarboneto líquido):

Sua vantagem principal é a similaridade com a gasolina, e, portanto, uma familiaridade mundial com sua produção, transporte e distribuição. Dependendo da fonte, os combustíveis de hidrocarbonetos líquidos podem, também, tornar-se uma fonte de energia renovável. As desvantagens incluem armazenamento, corrosão e desperdício de combustível, devido ao “*cross-over*” na membrana da célula combustível.

A gasolina comum e o etanol são mais duas alternativas disponíveis em termos de hidrocarbonetos líquidos, mas as necessidades de “reformas” do combustível antes da introdução no sistema da célula combustível permanece uma constante em todas as fontes líquidas. O processo de reformar extrai hidrogênio das estruturas moleculares mais complexas; contudo, o fato de que o monóxido de carbono e o dióxido de carbono podem tornar-se subprodutos adicionais do ciclo de produção de energia torna esses sistemas menos atraentes.

## Fontes para obtenção do Hidrogênio

### ➤ metano (gás natural):

O hidrogênio pode ser obtido do gás natural pelo processo de reforma catalítica a vapor. O processo envolve a conversão catalítica do metano em presença de vapor d'água, que libera hidrogênio e óxidos de carbono (CO e CO<sub>2</sub>).

Como potencial fonte de hidrogênio para células combustíveis, o gás natural tem a seu favor uma infra-estrutura de distribuição estabelecida. Além dessa infra-estrutura estabelecida, a necessidade de comprimir o gás natural e de usar um equipamento especial para fornecê-lo reduz sua atração como fonte de hidrogênio.

# Classificação das Células Combustível

Dada pelo tipo de eletrólito usado:

- célula combustível polímero sólido (PEMFC);
- célula combustível alcalina (AFC);
- célula combustível ácido fosfórico (PAFC);
- célula combustível carbonato fundido (MCFC);
- célula combustível óxido sólido (SOFC).

## Geração de eletricidade – estágios da tecnologia

- Centrais elétricas de pequeno porte (até 50 kW)
  - tipo: **AFC; PEM** **MCFC; SOFC**
  - estágio: comercialização protótipo
- Centrais elétricas ou de co-geração de médio porte (de 50 a 1.000 kW)
  - tipo: **PAFC; PEM** **MCFC** **SOFC**
  - estágio: comercialização protótipo pesquisa
- Centrais elétricas ou de co-geração de grande porte (acima de 1.000 kW)
  - tipo: **MCFC** **SOFC**
  - estágio: protótipo pesquisa
- Motores de propulsão para veículos automotores
  - tipo: **PEM** **PAFC** **AFC**
  - estágio: comerc. restrita protótipo pesquisa

*Legenda:*

**células alcalinas - AFC**

**carbonato fundido - MCFC**

**membrana polimérica - PEM**

**ácido fosfórico - PAFC**

**óxido sólido - SOFC**





## Células a combustível no Brasil

- Em 2006 foi lançado o "Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio" que consistiu na aquisição, operação e manutenção de até quatro ônibus com célula a combustível a hidrogênio.
- O projeto e a fabricação do ônibus foram desenvolvidos por um consórcio formado por oito conceituadas empresas, nacionais e internacionais, coordenado pela EMTU/SP.
- O valor total do projeto foi cerca de US\$ 16 milhões.
- Em 2009 iniciaram-se os testes operacionais e em dezembro de 2010 o ônibus protótipo passou a ser testado com passageiros no Corredor Metropolitano ABD (São Mateus - Jabaquara).
- O ônibus brasileiro traz uma novidade mundial: é híbrido, ou seja, funciona com células a combustível de hidrogênio e baterias recarregáveis, com recuperação de energia (como os carros atuais da Fórmula 1).