

Energia para utilização humana

José Henrique Vuolo

Instituto de Física - USP - Abril/2009

1. Energia

A energia pode ser definida como qualquer atributo de um sistema que possa ser convertido em trabalho. A Tabela 1 resume as várias formas de energia. A distinção entre as várias formas de energia é na verdade um pouco artificial e bastante complicada. Omite-se aqui uma discussão em detalhes da questão, mas seguem algumas observações a respeito.

Tabela 1: Formas de energia

Energia Mecânica	Energia cinética mais a energia potencial de corpos macroscópicos ou de porções macroscópicas de um meio material (ondas mecânicas)
Energia Elétrica	Energia armazenada em cargas elétricas em presença de campo elétrico (por extensão incluem-se energia armazenada em dipolos elétricos, quadripolos elétricos e outros multipolos elétricos)
Energia Magnética	Energia armazenada em dipolos magnéticos em presença de campo magnético (inclui-se energia armazenada em correntes elétricas) em presença de campo magnético
Energia térmica	Energia distribuída de maneira aleatória aos diversos graus de liberdade microscópicos do sistema: translação, rotação, vibração de átomos e/ou moléculas, translação e excitação de elétrons, etc.
Energia da Radiação Eletromagnética	Energia dos campos elétrico e magnético transportada por uma onda eletromagnética (ondas de radio, microondas, radiação infravermelha, luz (radiação visível), radiação ultravioleta, raios-X, e raios- γ)
Energia Química	Energia armazenada em ligações químicas efetivadas pelos elétrons de valência. Pode ser liberada ou absorvida em reações químicas
Energia Nuclear	Energia armazenada em ligações nucleares no núcleo do átomo, (isto é, energia de ligação de prótons e neutrons no núcleo). Semelhante à energia química, mas da ordem de milhão de vezes maior e pode ser liberada ou absorvida em reações nucleares
Energia de Massa	Qualquer massa m tem energia total de repouso $E = mc^2$. Energias química, nuclear ou de radiação podem aparecer como diferenças de massas em reações químicas ou nucleares

Tabela 2: Exemplos de processos de conversão de energia

Exemplos de conversão direta de energia	Para Mecânica	para Elétrica/Magnética	para Térmica	para Química	para Radiação	para Nuclear
de Mecânica	- conversão en. cinética/potencial - conversão onda/Vibração - máquinas simples	- microfones piezo/magnético - gerador eletromagnético - cristal piezo	- atrito - compressão de gás - bomba de calor			
de Elétrica/Magnética	- motor elétrico - alto-falante - cristal piezoeletrônico - bússola	- transformador	- efeito Joule (resistores) - aquecimento por indução	- carga de bateria - eletrólise	- lâmpadas, lasers - tubos de raios-X - antenas de rádio - forno microondas	- reações nucleares com aceleradores de partículas
de Térmica	- máquina a vapor (pistão/turbina) - motor combustão	- termopar - gerador termoeletrônico - sensor piroelétrico	- trocador de calor	- reações químicas endotérmicas	- radiação de corpo aquecido	
de Química		- pilha e bateria - gerador MHD	- reações químicas exotérmicas - motor a combustão	- reações químicas	- reações químicas luminescentes	
de Radiação	- radiômetro	- célula solar fotovoltaica - célula fotoelétrica	- absorção de radiação - coletor solar	- fotossíntese - reações fotoquímicas	- fluorescência - efeito Compton	- reações fotonucleares
de Nuclear		- pulso eletromagnético da bomba nuclear	- reator nuclear - bomba termonuclear		- fonte radiativa - reator nuclear - bomba termonuclear	- reações nucleares

Observações sobre as diferentes formas de energia

1. As formas de energia mostradas na Tabela 1 não são independentes, mas existe bastante superposição entre elas. Por exemplo, uma variação na energia nuclear aparece como uma variação nas massas dos núcleos envolvidos, portanto trata-se da mesma energia. Mas em outros casos, massa pode ser convertida em energia de radiação e vice-versa. Por exemplo na aniquilação entre um elétron e um pósitron (antipartícula do elétron) são produzidos 2 fótons (radiação).
2. **Macroscópico versus microscópico :** A palavra “microscópico” usada antes se refere a moléculas, átomos, elétrons e outras partículas, enquanto “macroscópico” corresponde a número muito grande de tais partículas.
3. A energia é considerada mecânica quando envolve movimentos coletivos (não aleatórios) de porções de um sistema, mesmo que tais porções sejam muito pequenas. Por exemplo, uma onda sonora somente se propaga num meio material e os deslocamentos das porções de matéria podem ser muito pequenos da ordem de 1 nm ou menos. Mas a energia correspondente é considerada mecânica.
4. Em muitos casos pode-se distinguir razoavelmente bem a energia elétrica da energia magnética. Mas em certos casos importantes esta separação fica difícil. Por exemplo, num motor ou num gerador eletromagnético.
5. **Conversão de energia.** As diferentes formas de energia podem ser convertidas entre si. A Tabela 2 mostra exemplos de processos de conversão. Em muitos casos, a conversão envolve mais de uma conversão em sequência. Por exemplo, na Tabela 2 o motor a combustão converte energia química em mecânica. Na realidade, melhor seria dizer que a energia química é convertida em energia térmica que em seguida realiza trabalho mecânico.

Diferentes tipos de energia útil

As Tabelas 1 e 2 se referem a diferentes formas de energia de um ponto de vista mais fundamental em Física. A Tabela 3 mostra uma outra classificação do ponto de vista de utilização da energia para aproveitamento humano.

Na maioria dos casos, a energia vem da radiação eletromagnética recebida do sol. Isto é, o sol é a fonte primária de energia.

Por exemplo, no caso da biomassa, a energia da radiação solar é armazenada em plantas por meio da fotossíntese. Essa energia é aproveitada em combustíveis tais como álcool, biodiesel, madeira ou carvão vegetal, ou ainda, como alimentos, que fornecem a energia para os seres vivos. Combustíveis fósseis também foram produzidos num passado remoto (há milhões de anos) a partir da energia da radiação solar por meio da fotossíntese.

A energia hidroelétrica vem da energia potencial armazenada nas águas e se deve ao ciclo de evaporação da água, movimentação de massas de ar/vapor e precipitação (chuvas). A fonte primária de energia é a radiação solar. A energia eólica vem da movimentação de grandes massas de ar e também se origina no aquecimento pela radiação solar.

Tabela 3: Principais tipos de energia para aproveitamento humano

Energia	Fonte imediata	Fonte primária	Sistema de conversão	Produtos
Biomassa	Radiação solar	Sol	Fotossíntese	Alimentos Materiais Combustíveis
Solar térmica	Radiação solar	Sol	Coletor solar	Água quente Energia elétrica (turbina/gerador)
Solar fotovoltaica	Radiação solar	Sol	Célula solar	Energia elétrica
Hidro-elétrica	Água de represa	Sol	Usina hidroelétrica (turbina/gerador)	Energia elétrica
Eólica	Vento	Sol	Catavento Vela	Energia elétrica (turbina/gerador) Trabalho mecânico
Combustíveis fósseis	Petróleo Gas Carvão	Sol	Motor/combustão Usina termo-elétrica Combustão	Trabalho mecânico Energia elétrica (turbina/gerador) Aquecimento
de Marés	Água de marés	Sol/ Terra/ Lua	Usina maremotora (turbina/gerador)	Energia elétrica
Nuclear	Elementos pesados físséis	Terra	Usina nuclear (trocador de calor/ turbina/gerador)	Energia elétrica
Geotérmica	Vapor quente Água quente Rocha quente	Terra	Usina geotérmica (turbina/gerador) Água quente	Energia elétrica Aquecimento

Como mostra a Tabela 3, o Sol é a grande fonte de energia para a vida na Terra. A única grande fonte de energia útil que não vem do sol é a energia nuclear, que vem de núcleos de elementos extraídos da própria Terra. Além desta, existem algumas instalações para aproveitamento de energia alternativas tais como energia das marés ou geotérmica, pouco significativas quanto ao volume de energia produzido.

A Tabela 3 mostra apenas os tipos de energia mais importantes, sendo incompleta em vários sentidos. A seguir são resumidas outras formas de energia omitidas na Tabela 3 porque não são muito significativas em termos quantitativos, embora algumas tenham sido importantes no passado e outras possam eventualmente se tornar importantes no futuro.

1. Energia hidráulica.

Entende-se por “energia hidráulica” a energia (potencial ou cinética) da água usada para realizar trabalho mecânico, aproveitando diretamente este trabalho tal como em monjolos e moinhos ou moendas de roda d’água. A fonte primária de energia é o sol, da mesma maneira que para a energia hidroelétrica.

2. Tração animal.

A “tração animal” também foi extensivamente utilizada no passado e ainda é usada. O homem ou o animal realiza trabalho às custas da energia armazenada nos alimentos, que foram produzidos por meio de fotossíntese a partir da radiação solar. Portanto a fonte primária de energia também é o próprio sol.

3. OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion).

Correntes oceânicas de águas quentes e águas frias podem constituir reservatórios quente e frio para máquinas térmicas. Já foram construídos protótipos de OTECs.

4. Energia das ondas do mar.

As ondas do mar transportam uma quantidade enorme de energia mecânica que em princípio pode ser aproveitada para movimentar turbinas ou bombear água. Existem projetos e testes a respeito.

5. Mistura água doce/água salgada.

Na mistura de água doce de um rio com água salgada do mar ocorre liberação de energia térmica da ordem de $1kW/m^3$. Existem projetos para aproveitamento desta energia térmica.

6. Energia química original da terra.

Uma grande quantidade de energia química obtida da terra vem da biomassa (alimentos e combustíveis orgânicos ou fósseis), que não se originam na própria terra, mas vêm da radiação solar no presente ou num passado remoto. Energia química original da própria terra é muito pequena e não é significativa comparado ao volume total de energia.

2. Princípios da conversão de energia

Além da conservação de energia (1ª Lei da Termodinâmica), os processos de conversão de energia devem satisfazer também à 2ª Lei da Termodinâmica, que estabelece que a entropia de um sistema isolado só pode aumentar ou permanecer igual.

Moto-contínuo de 1ª espécie. Uma máquina que não obedece à Lei de Conservação da Energia é chamada “moto-contínuo” de 1ª Espécie.

Moto-contínuo de 2ª espécie. Se uma máquina obedece à Conservação da Energia, mas não obedece à 2ª Lei da Termodinâmica é chamada “moto-contínuo” de 2ª Espécie.

A seguir são dados 2 exemplos de “moto-contínuo” de 2ª Espécie.

Exemplo 1. Usina fantástica. Considere uma usina para produzir energia elétrica transformando tijolos em energia. A massa de um tijolo comum é cerca de 2 kg . Assim a energia correspondente conforme a fórmula de Einstein é

$$\Delta E = mc^2 \approx (2\text{ kg})(3 \times 10^8)^2 \approx 1,8 \times 10^{17} \text{ J}$$

Se a usina “queima” um tijolo por dia ($\Delta t = 8,64 \times 10^4 \text{ s}$) e a eficiência em produzir energia elétrica é 30 %, a potência elétrica gerada será

$$P = 0,30 \frac{\Delta E}{\Delta t} = 625 \times 10^9 \text{ W} = 625 \text{ GW}$$

Para se ter uma idéia do que significa esta potência, basta observar que a Usina Hidroelétrica de Itaipu, a maior do mundo, pode gerar cerca de 14 GW . Evidentemente, a usina que “queima tijolos” é um “moto-contínuo” de 2ª Espécie, pois a Conservação de Energia não é contrariada, mas converter simplesmente a massa de um tijolo em energia contraria a 2ª Lei.

Exemplo 2. Navio maravilhoso. Considere um navio que extrai água do mar a 20°C a uma taxa de 1000 kg/s . Resfriando 1000 kg de água de 20 para 0°C a energia liberada será

$$\Delta E = (10^6 \text{ g}) \times \left(\frac{1 \text{ cal}}{\text{g}^\circ \text{C}}\right) \times (20^\circ \text{C}) = 8,4 \times 10^7 \text{ J}$$

Se os motores do navio aproveitam a energia liberada a cada segundo com eficiência de 20 %, a potência mecânica disponível será

$$P = 0,20 \frac{\Delta E}{\Delta t} = 1,7 \times 10^7 \text{ W} \cong 22\,600 \text{ cv} \quad (1 \text{ cv} \approx 1 \text{ HP} \approx 740 \text{ W})$$

Além de boa potência para os motores do navio, a água gelada produzida ainda pode ser aproveitada para resfriamento das geladeiras do navio e para ar-condicionado nas cabines. Tal navio maravilhoso é impossível pois contraria frontalmente a 2ª Lei da Termodinâmica, embora a Conservação da Energia seja perfeitamente satisfeita (Moto-contínuo de 2ª Espécie).

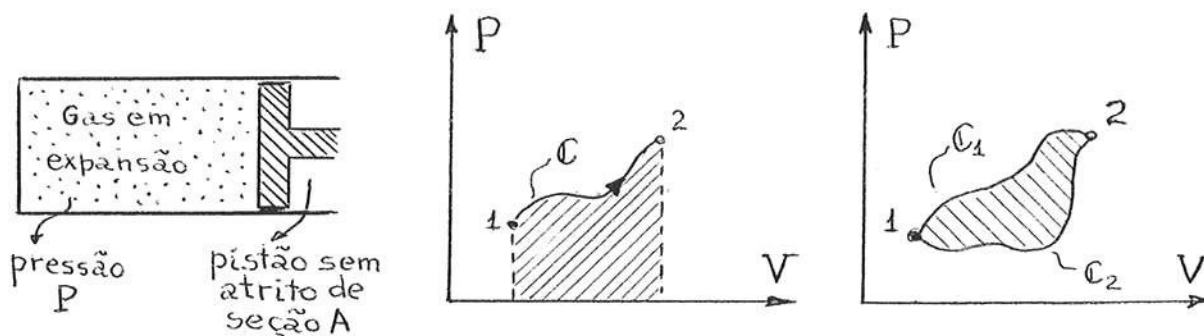
Os exemplos mostram que do ponto de vista de aproveitamento da energia, a 2ª Lei da Termodinâmica é mais importante que a própria Conservação da Energia, uma vez que limita drasticamente os processos de conversão de energia.

2.1. Trabalho

O trabalho é definido para o deslocamento $d\vec{x}$ do ponto

de aplicação de uma força $\vec{F}$: $dW = \vec{F} \cdot d\vec{x}$

Exemplo: Trabalho realizado por um gas devido à pressão P do gas.



$$F = PA \quad dW = F dx = PA dx$$

onde dx é o deslocamento e $A dx = dV$ é a expansão em volume. Assim,

$$dW = P dV \quad e \quad W = \int_{C_1} P dV$$

Assim, o trabalho realizado pelo gas num percurso de 1 a 2 é a área sob a curva C_1 .

Num percurso fechado C (indo de 1 a 2 por C_1 e voltando de 2 a 1 por C_2):

$$W = \int_C P dV = \int_{1C_1}^2 P dV + \int_{2C_2}^1 P dV$$

$$\int_{2C_2}^1 P dV = - \int_{1C_2}^2 P dV$$

Resultando

$$W = \int_{1C_1}^2 P dV - \int_{1C_2}^2 P dV = \oint_C P dV$$

Assim, W é a diferença entre as áreas sob as curvas C_1 e C_2 , que é a área delimitada pelo percurso C . Deve ser observado que o trabalho realizado **pelo gas** é positivo se a curva C é percorrida em sentido horário.

2.2. 1ª Lei da Termodinâmica

É a Lei de Conservação de energia: a energia inicial E_i de um sistema deve ser igual à energia final E_f mais o trabalho realizado pelo sistema:

$$E_i = E_f + W$$

Deve ser observado que o trabalho W realizado pelo sistema representa outra forma de energia transferida do sistema para o exterior (meio ambiente, por exemplo).

2.3. Entropia e 2ª Lei da Termodinâmica

A definição de entropia, bem como a 2ª Lei da Termodinâmica podem ser formuladas de diferentes maneiras. Conforme a chamada “definição macroscópica”, a variação da **entropia** S de um sistema é:

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

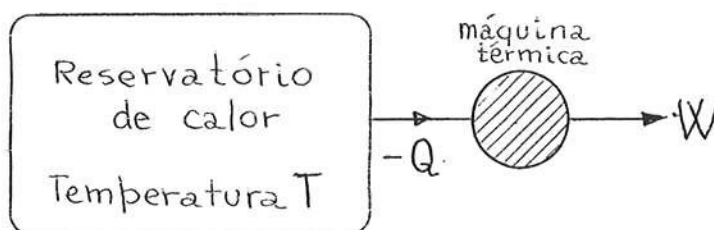
onde dQ é o **calor recebido** pelo sistema e T a temperatura absoluta (em *kelvin*). A 2ª Lei da Termodinâmica estabelece que se o sistema é isolado, S aumenta ou permanece constante em qualquer processo:

$$dS \geq 0 \quad (\text{para processo em sistema isolado})$$

Uma outra formulação da 2ª Lei é o chamado **enunciado de Kelvin-Planck**:

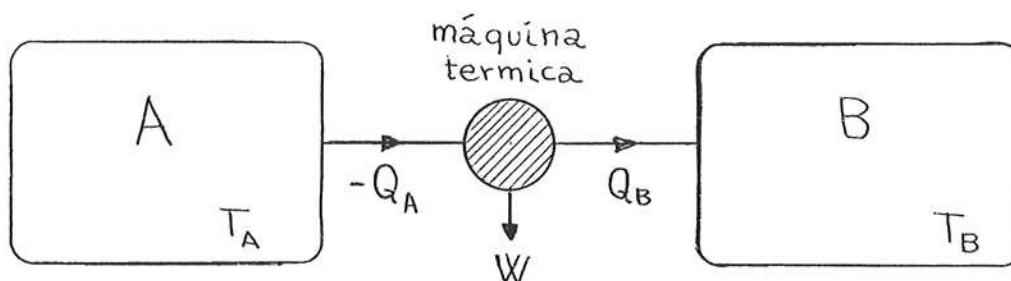
Não pode existir nenhuma máquina térmica que extraia calor de um reservatório de calor convertendo-o integralmente em trabalho.

Este enunciado pode ser mostrado a partir de $dS \geq 0$:
Se $W > 0$ o “calor recebido” pelo sistema é negativo ($Q < 0$) e a variação de entropia ($\Delta S = Q/T$) seria negativa o que é impossível para um sistema isolado.



O navio maravilhoso, descrito antes no Exemplo 2 é um exemplo de motocontínuo de 2ª Espécie, que contraria a 2ª Lei, convertendo integralmente calor em trabalho.

A solução para converter calor de um reservatório A em trabalho é ter um 2º Reservatório de calor B como mostrado na figura a seguir.



Neste caso, $-Q_A$ é calor “fornecido” por A, Q_B é calor “recebido” por B e

$$-Q_A = |Q_A| = Q_B + W \quad \text{e} \quad \Delta S = \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B}$$

onde Q_A é negativo e Q_B é positivo. Portanto, se $T_B < T_A$ é possível ter $\Delta S \geq 0$:

$$\Delta S = \frac{Q_A}{T_A} + \frac{Q_B}{T_B} \geq 0 \quad \text{ou} \quad \frac{Q_B}{|Q_A|} \geq \frac{T_B}{T_A}$$

A eficiência da máquina térmica é:

$$\eta = \frac{W}{|Q_A|} = \frac{|Q_A| - Q_B}{|Q_A|} = 1 - \frac{Q_B}{|Q_A|}$$

Assim, conforme a 2ª Lei:

$$\eta \leq 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Por exemplo, se A está a 100°C e B a 0°C a eficiência máxima é:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_B}{T_A} = 1 - \frac{273,15}{373,15} \cong 0,27 \quad (27\%)$$

Para temperaturas T_A e T_B muito próximas a eficiência diminui dramaticamente.

Exemplo: Enunciado de Clausius para a 2ª Lei

Um exemplo simples da 2ª Lei é

O calor não pode fluir espontaneamente de um corpo para outro mais quente

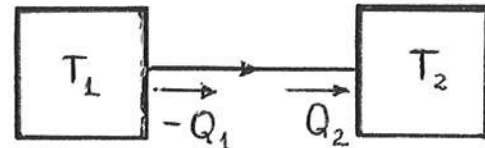
Pode ser demonstrado a partir de que a entropia não pode diminuir:

$$dQ_1 + dQ_2 = 0$$

$$dS = \frac{dQ_1}{T_1} + \frac{dQ_2}{T_2}$$

Para $dQ_1 < 0$ e $dQ_2 > 0$

$$dS \geq 0 \quad \text{implica em} \quad T_1 > T_2$$



Entropia - Interpretação microscópica

Do ponto de vista microscópico, a entropia é definida por

$$S = k_B \ln \Omega$$

onde k_B é a constante de Boltzmann e Ω é o número de estados quânticos acessíveis ao sistema para uma determinada energia. O número de estados acessíveis ao sistema pode ser associado ao conceito de “desordem” do sistema. Quanto mais estados acessíveis maior a “desordem”, no sentido que o sistema pode estar em muitos estados diferentes.

Uma analogia que tem sido feita é com uma sala de aula de crianças:

- Com professor presente as crianças ficam quietas e em seus lugares (grande ordem).
- Se o professor se distrai, as crianças ficam nas carteiras, mas começam a se agitar, virar para os lados ou para trás conversar, trocar de lugares, etc. A desordem aumenta porque aumentam as atividades e posições possíveis (“estados acessíveis”).
- Se o professor sai da sala as crianças podem correr pela sala, subir nas carteiras, etc. A desordem aumenta ainda mais porque aumenta o número de “estados acessíveis”.

Conforme a “definição microscópica”, quanto maior o número de estados acessíveis maior a desordem e maior a entropia. A 2ª Lei da Termodinâmica pode ser entendida como uma lei de tendência de aumento da desordem de um sistema isolado e enunciada como:

A desordem num sistema isolado nunca pode diminuir.

Disponibilidade de trabalho (ou de energia).

A disponibilidade de trabalho ou de energia é uma propriedade termodinâmica que indicar o potencial de um sistema para realizar trabalho ou liberar energia.

A energia se conserva, mas a disponibilidade de energia tende a diminuir. O conceito de entropia pode também ser associado diretamente ao conceito de **indisponibilidade de energia**, que tende sempre a aumentar ou permanecer constante.

Exemplo (F. W. Sears): A partir de 1 litro de água a 100°C (T_A) e de 1 litro de água a 0°C (T_B), pode-se obter uma certa quantidade de trabalho dW com eficiência máxima

$$\eta = 1 - \frac{T_B}{T_A} = 1 - \frac{273,15}{373,15} \cong 0,27 \quad (27\%)$$

A variação de entropia é

$$dS = dS_A + dS_B = \frac{dQ_B}{T_B} + \frac{dQ_A}{T_A}$$

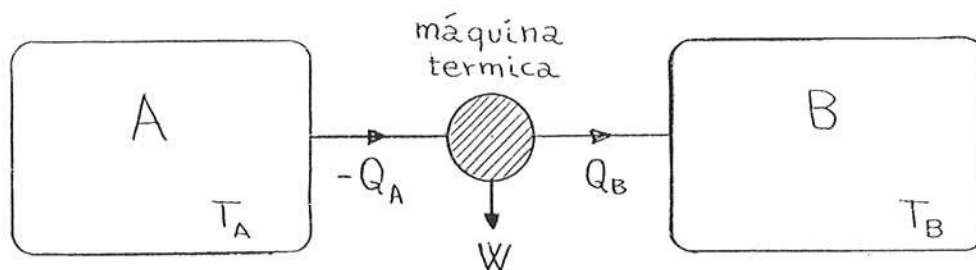
onde $dQ_A + dQ_B + dW = 0$ ($dQ_A < 0$, $dQ_B > 0$, $dW > 0$). Assim,

$$dS = dQ_B \left(\frac{1}{T_B} - \frac{1}{T_A} \right) - \frac{dW}{T_A}$$

O aumento de entropia é máximo quando $dW = 0$ pois dQ_B é máximo para $dW = 0$. Isto corresponde simplesmente a misturar a água fria com a água quente. Obtém-se 2 litros de água a 50°C , dos quais não se pode extrair qualquer trabalho ou energia. A disponibilidade de trabalho ou energia foi destruída no ato de misturar os 2 litros de água.

O mínimo aumento de entropia ocorre quando se extrai trabalho com eficiência máxima:

$$dS = \eta \frac{dQ_B}{T_B} - \frac{dW}{T_A} \quad (Q_B \text{ mínimo e } dW \text{ máximo})$$



3. Máquinas térmicas e outros dispositivos.

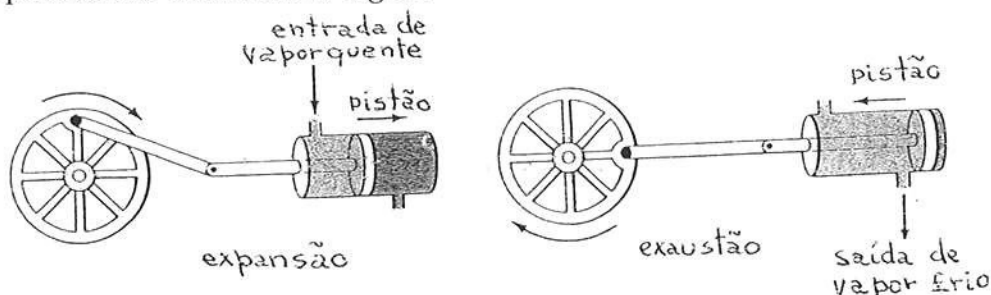
3.1 Motores térmicos.

O motor térmico (M) funciona como esquematizado na figura e realiza trabalho às custas do calor $-Q_A$ fornecido por um reservatório de calor A. A eficiência máxima teórica do processo é

$$\eta = \frac{W}{|Q_A|} = 1 - \frac{T_B}{T_A}$$

Eficiências reais podem ser bem menores ainda devido a outras perdas. As eficiências de máquinas reais é da **ordem de grandeza** da metade da eficiência máxima teórica.

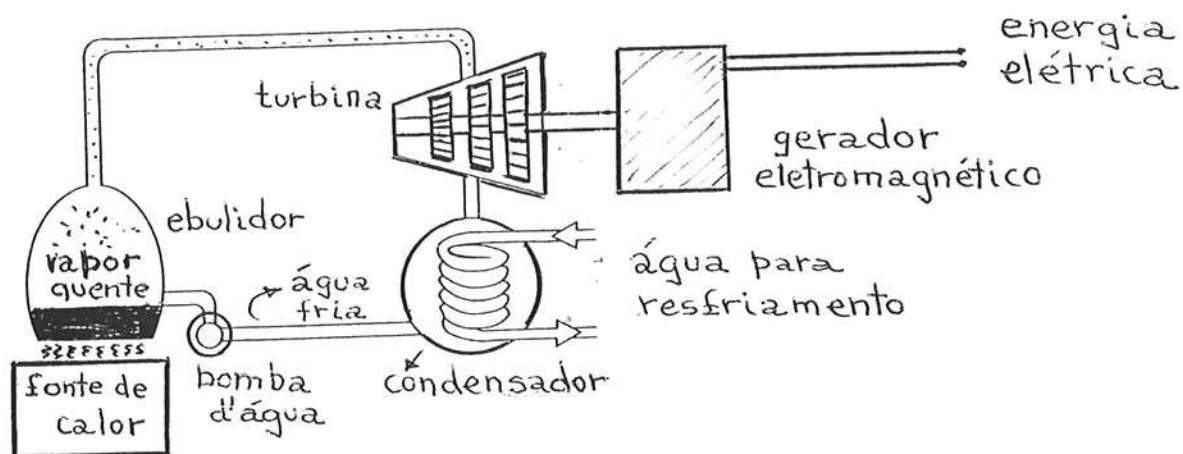
Existe uma grande variedade de motores térmicos que produzem trabalho a partir de uma fonte quente. (em geral, o reservatório frio é o meio ambiente). Várias destas máquinas são discutidas um pouco mais detalhadamente nas Referências de 1 a 7. As máquinas mais importantes na prática são resumidas a seguir.



Máquina a vapor a pistão. Extensivamente usadas desde o final do Século 18 até o início do século 20 em locomotivas, máquinas agrícolas e industriais, e praticamente não são mais usadas. O princípio de funcionamento é mostrado na figura. O vapor aquecido entra na câmara e se expande, forçando o movimento de um pistão e realizando trabalho. O vapor resfriado depois da expansão é liberado para o meio ambiente. A fonte de energia é uma caldeira aquecida com carvão ou madeira.

Motor de combustão interna (pistão). Extensivamente usados em geradores elétricos e motores pequenos, automóveis, tratores, caminhões, barcos, locomotivas, navios, etc.

O princípio de funcionamento é o mesmo da máquina a vapor a pistão, exceto que a fonte de calor é uma mistura de ar/combustível que explode no interior da câmara de combustão. A expansão dos gases aquecidos na queima realiza trabalho sobre o pistão. No motor a gasolina ou álcool, a mistura explode por meio de faísca elétrica, mas no motor diesel, a mistura explode devido a alta temperatura que se obtém por compressão da mistura ar/combustível.

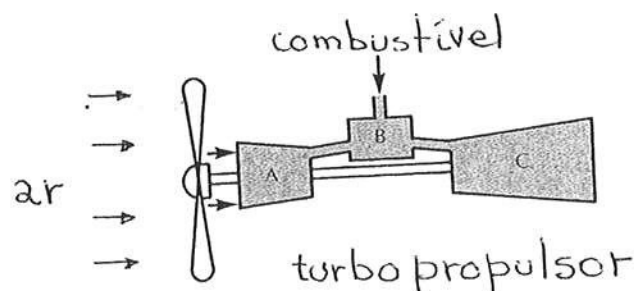


Turbina a vapor. A rotação de uma turbina é forçada pela expansão de vapor aquecido. Muitas grandes instalações modernas utilizam a turbina a vapor. As figuras mostram esquematicamente o princípio de funcionamento de uma usina termoeleétrica ou nuclear para geração de eletricidade. Na termoeleétrica o calor é produzido por combustível usual e na nuclear o calor é gerado por um reator nuclear ("combustível" nuclear)

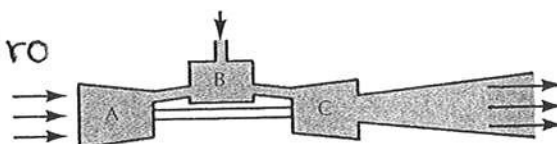
A - compressor

B - câmara de combustão

C - turbina



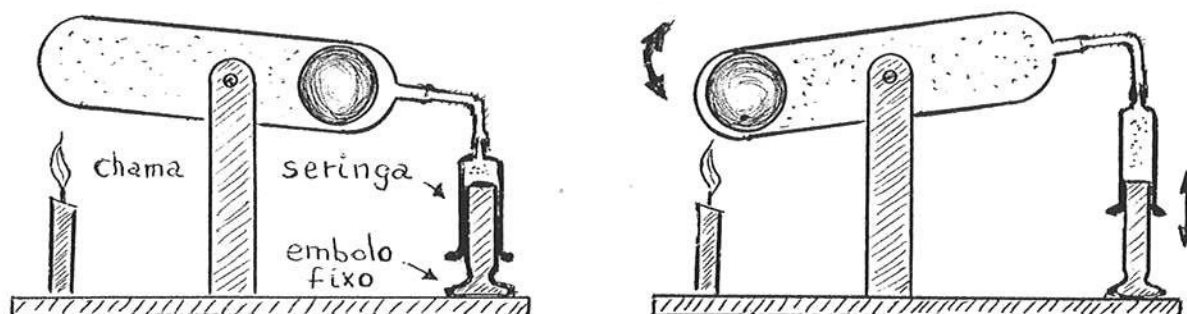
jato puro



Turbina a gas com hélice (turbo-propulsor). A rotação de uma turbina é forçada pela expansão do gas aquecido resultante da combustão na própria turbina. Um hélice é ligado ao eixo da turbina para propulsão. Jatos mais antigos (turbohélice) usavam estas turbinas.

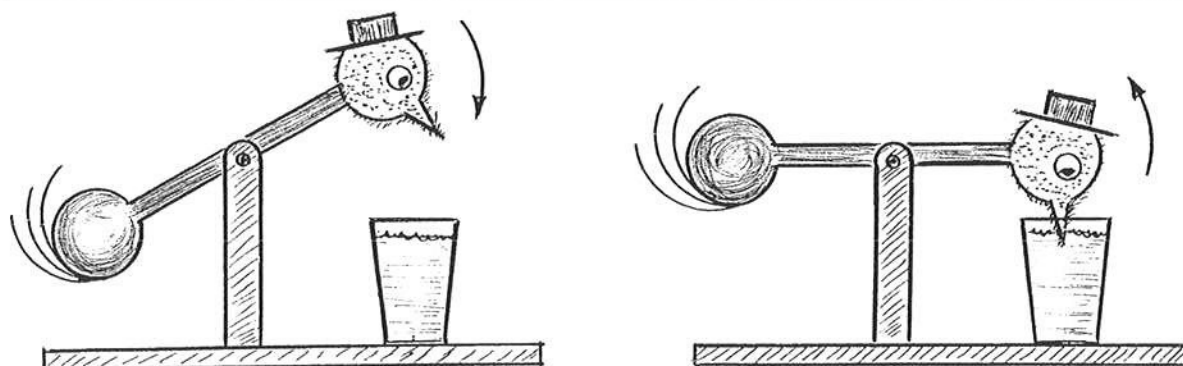
Turbina a gas. A rotação de uma turbina é forçada pela expansão do gas aquecido resultante da combustão na própria turbina. Esta turbina é usada em jatos puros. A propulsão é produzida pelo momento do gas ejetado.

Outras máquinas e dispositivos. Existe uma variedade de outras máquinas ou dispositivos térmicos que de alguma forma realizam trabalho às custas de energia térmica. Alguns estão sendo estudados e aperfeiçoados e eventualmente poderão se tornar viáveis tal como a máquina de Stirling discutida na Referência 7. Outros são apenas curiosidades, que apenas demonstram movimento mecânico a partir de energia térmica. A seguir são apresentados 3 exemplos dessas curiosidades.



Exemplo 1. Máquina de Stirling de vidro para demonstração.

Existem vários tipos de máquinas de Stirling. Por “máquina de Stirling”, em geral entende-se qualquer máquina que trabalha sempre com uma mesma quantidade de gas, que alternadamente se expande em contacto com fonte quente e se resfria em contacto com o reservatório frio. A expressão “máquina de Stirling” se refere mais a um princípio de funcionamento que a um tipo de máquina específico. Um exemplo de tal máquina, apenas para demonstração do princípio é mostrado na figura. Um esfera de vidro ou metal pode-se mover livremente num tubo de vidro. Quando a extremidade A do tubo é aquecida (fonte quente) o ar se expande e a extremidade B sobe, devido à expansão do volume V . A seguir a esfera se move para A, expulsando o gas aquecido que imediatamente se resfria, resultando em processo inverso: diminuição do volume V , retorno da esfera para B e o ciclo é reiniciado.

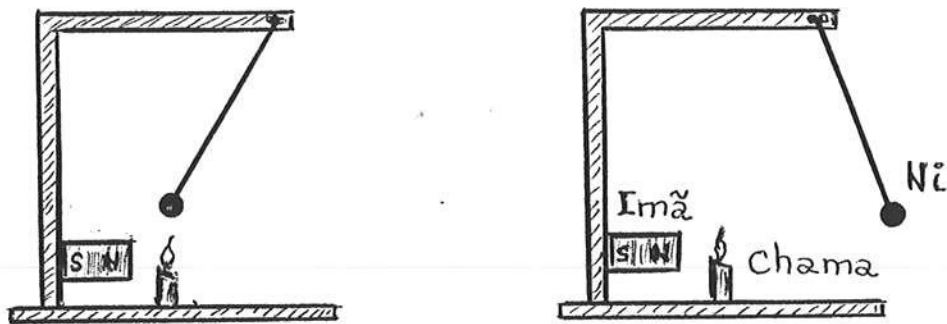


Exemplo 2. Passarinho movido a água.

O passarinho é construído de vidro com líquido bem volátil dentro. A água evapora da cabeça do passarinho que é revestida com material que absorve água. O resfriamento da cabeça produz contração do vapor e transporte de líquido para a parte superior. O aumento de peso na cabeça desequilibra o passarinho, fazendo o bico mergulhar na água. Nesta

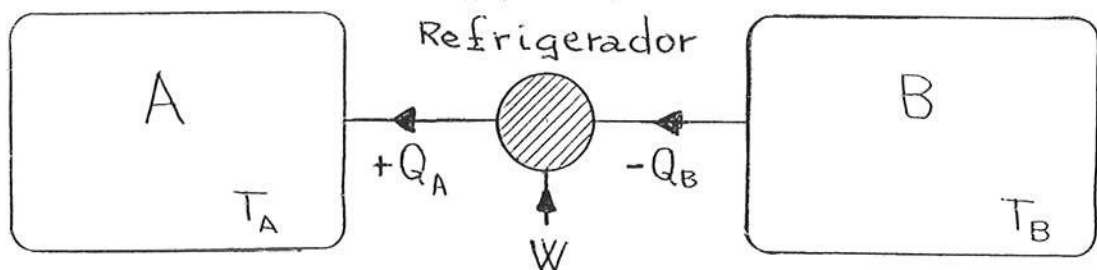
posição mais horizontal, o líquido pode voltar para baixo, a posição inicial é restabelecida e o ciclo é reiniciado. O “aparente moto-contínuo” de sobe e desce funciona enquanto existir água para molhar o bico do passarinho.

A “fonte quente” neste caso é o meio ambiente e a “fonte fria” é produzida pela evaporação da água. Na verdade, há uma fonte fria muito maior (camadas superiores da atmosfera), para que a umidade do ar ambiente seja baixa o suficiente para haver bastante evaporação de água. Se o meio ambiente estivesse perfeitamente em equilíbrio térmico, a umidade ambiente seria a de vapor saturado, não haveria evaporação e o passarinho não funcionaria.



Exemplo 3. Pêndulo de material ferromagnético.

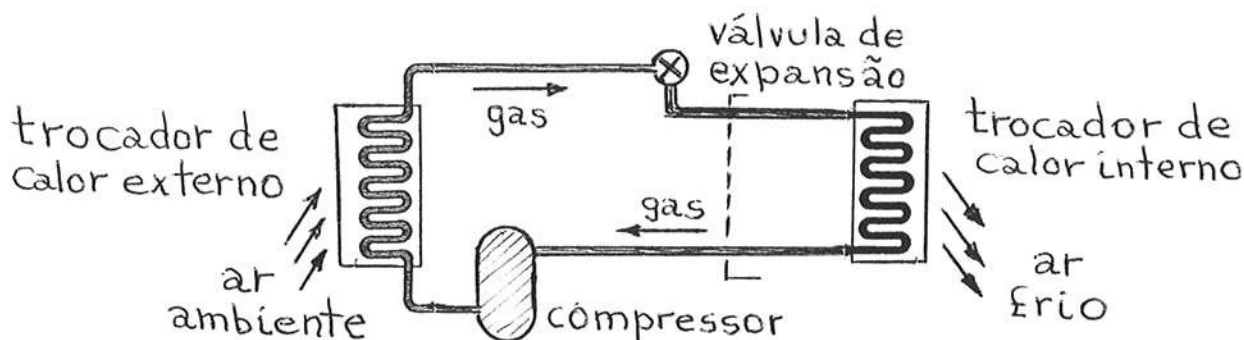
Um material ferromagnético perde suas propriedades ferromagnéticas quando chega na chamada “temperatura de Curie”. Por exemplo, para o níquel a temperatura de Curie é 358°C . O níquel Ni é atraído pelo ímã A, mas ao chegar perto é aquecido pela chama, atinge a temperatura de Curie, a atração forte desaparece e o pêndulo volta. Ao esfriar, o níquel se torna novamente ferromagnético, volta a ser atraído e o ciclo é reiniciado. O movimento do pêndulo ocorre às custas da fonte quente que é a chama e da fonte fria que é o ar ambiente.



3.2 Refrigerador e bomba de calor

O refrigerador funciona de maneira inversa ao motor térmico como esquematizado na figura. Realizando algum trabalho pode-se retirar calor $|Q_B|$ de um corpo frio B, transferindo calor Q_A para um corpo mais quente A. Neste caso, há diminuição da entropia do sistema às custas de trabalho externo W realizado sobre o sistema e

$$Q_A = W + |Q_B| \quad \text{ou} \quad W = Q_A + Q_B \quad (Q_B < 0)$$



Um refrigerador é usado para resfriar um compartimento, em relação ao meio ambiente mais quente. No refrigerador comum, o trabalho mecânico é realizado por um compressor. Na compressão ocorre grande aquecimento do gás. O gás comprimido é resfriado num trocador de calor externo (condensador) e o calor é liberado para o meio ambiente. O gás volta a se expandir novamente numa serpentina no interior do refrigerador e se resfria, resfriando assim o interior do refrigerador. A “eficiência” do refrigerador pode ser avaliada pelo “coeficiente de desempenho” COP (coefficient of performance), que é a razão entre o “calor retirado” do compartimento frio $|Q_B|$ pelo trabalho W realizado: $COP = |Q_B|/W$. Em condições ideais em que a variação de entropia é nula:

$$COP = \frac{|Q_B|}{W} = \frac{-Q_B}{Q_A + Q_B} = \frac{T_B}{T_A - T_B}$$

Por exemplo, se a temperatura ambiente é $27^\circ C$ ($T_A = 300 K$), para resfriamento até $-3^\circ C$ ($T_B = 270 K$), resulta $COP = 10$. Na prática, valores do COP podem ser bem menores, pois diversos fatores contribuem para reduzir o valor.

Bomba de calor.

A bomba de calor funciona com o mesmo princípio do refrigerador, mas o objetivo é **aquecer** um compartimento (um quarto, por exemplo). O cop é definido de maneira um pouco diferente pois neste caso interessa a quantidade de calor Q_A transferida ao compartimento quente A: $cop = Q_A/W = (W - Q_B)/W = 1 + COP$. Isto é, o cop para a bomba de calor é uma unidade maior que o COP tal como definido para a geladeira. Para a bomba de calor o cop pode ter valores razoavelmente grandes, quando as diferenças de temperatura não são muito grandes, da ordem de alguns graus ou dezena de graus. Por exemplo, para aquecer um quarto a $27^\circ C$ ($T_A \cong 300 K$), sendo $7^\circ C$ a temperatura ambiente exterior ($T_B \cong 280 K$) obtém-se $cop = 1 + COP \cong 15$. Isto é, teoricamente o “calor produzido” pode ser até 15 vezes o trabalho realizado. Na prática o cop é menor, mas de qualquer forma uma bomba de calor é muito mais eficiente para aquecimento ambiente que uma resistência elétrica, por exemplo.

3.3 Compressão adiabática.

No refrigerador, o calor é extraído do gas de trabalho basicamente por compressão. Um processo é chamado adiabático quando não há nenhuma troca de calor entre o sistema considerado e o exterior. Assim, uma compressão rápida (ou descompressão rápida) de um gas é adiabática porque não há tempo para o gas perder ou receber calor do meio exterior.

Numa transformação adiabática de um gas vale a relação :

$$PV^\gamma = \text{constante}$$

onde P é a pressão, V é o volume e $\gamma = C_p/C_v$ é a razão entre calores específicos a pressão constante e a volume constante. Para gas diatômico $\gamma \simeq 1,4$. Para aproximação de gas ideal ($PV = NK_B T$), tem-se $PV/T = \text{constante}$ e combinando com a equação anterior :

$$TV^{(\gamma-1)} = \text{constante} \quad \text{ou} \quad TV^{(\gamma-1)} = T_o V_o^{(\gamma-1)}$$

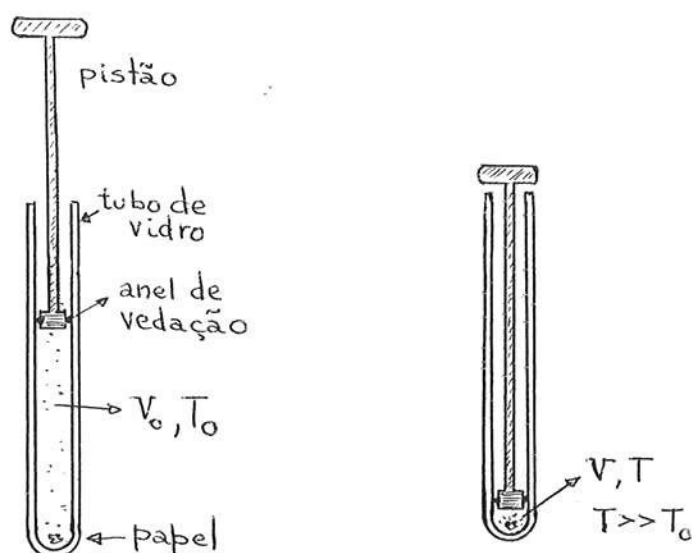
onde T_o e V_o são valores iniciais, por exemplo à temperatura ambiente.

A equação mostra que comprimindo o gas pode-se aquecê-lo a temperaturas bastante altas. Por exemplo, comprimindo ar ($\gamma \simeq 1,4$) à temperatura ambiente $T_o = 27^\circ C \simeq 300 K$ e uma compressão de 10 para 1 ($V_o/V = 10$), resulta

$$T \simeq T_o \left(\frac{V_o}{V}\right)^{(\gamma-1)} \simeq 753 K \simeq 480^\circ C$$

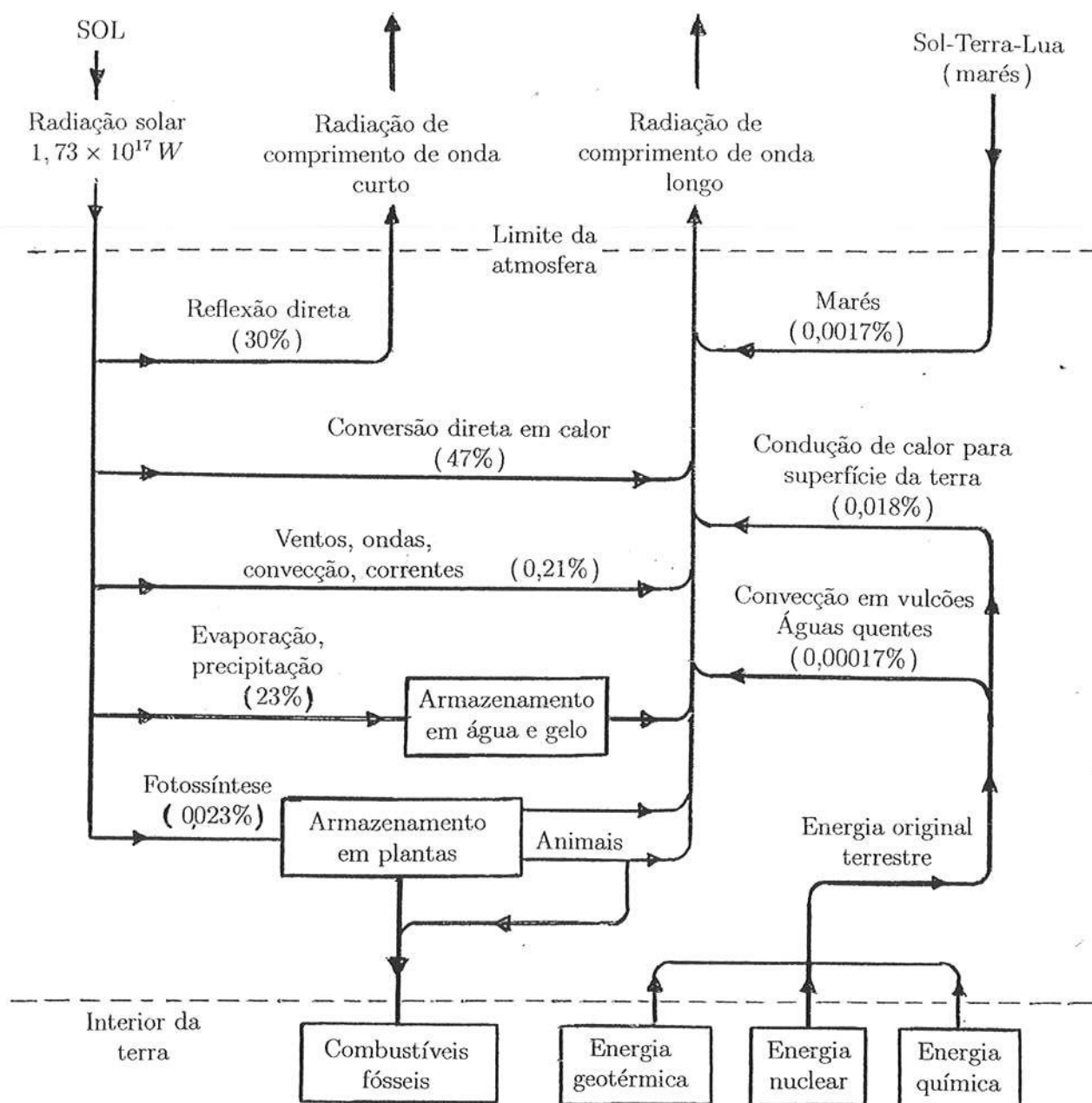
No dispositivo da figura abaixo, pode-se incendiar um pedacinho de papel por compressão. A temperatura para ignição do papel é $T \sim 451^\circ F \simeq 233^\circ C$.

Num motor diesel não há necessidade de velas de ignição para explodir a mistura de ar e combustível, pois a ignição ocorre devido ao aumento de temperatura pela compressão da mistura da ordem de 15 para 1 ou mais.



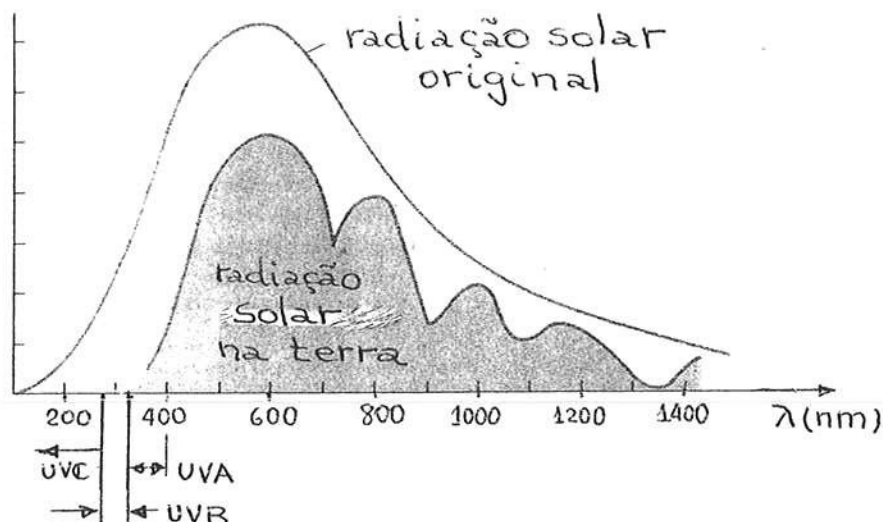
4. Fluxos de energia na terra

A figura abaixo (conforme dados das Referências 4 e 6) representa os fluxos de energia na terra. As porcentagens foram calculadas sobre a energia total envolvida, sendo os números são bastante aproximados. Como pode ser visto quase toda energia (mais de 99,9%) vem direta ou indiretamente da **radiação solar**. Uma pequena parte ($\sim 0,002\%$) é energia das marés e se deve aos movimentos do sistema terra-lua-sol. Outra pequena parte ($\sim 0,02\%$) é energia originária da própria terra: energia geotérmica, energia química e energia nuclear.



Como mostra a figura, o sol é a grande fonte de energia para a vida na terra. Não por acaso, várias civilizações antigas consideravam o sol como divindade máxima, numa clara percepção da importância do sol para a vida na terra.

Seguem algumas observações sobre os fluxos de energia da figura.



4.1 Radiação solar

A figura mostra a distribuição aproximada de comprimentos de onda λ para a radiação solar que chega na atmosfera. O espectro corresponde aproximadamente a um corpo negro a 5800 K. A irradiância é o fluxo de radiação em *watts* por unidade de área em m^2 :

$$I = 1395 W/m^2 \quad (\text{constante solar})$$

A área considerada é um disco correspondente à projeção da terra num plano perpendicular à direção da radiação solar.

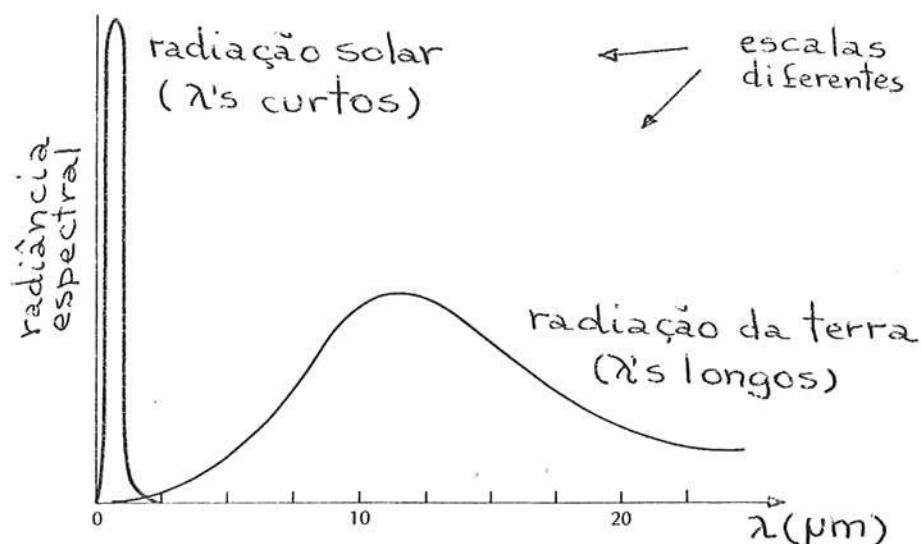
A figura mostra também o espectro aproximado da radiação que chega na terra, que é modificado devido a absorção, reflexão e espalhamento pelos gases da atmosfera terrestre.

Deve ser observado que a irradiância (em W/m^2) na terra é bem menor. Cerca de 30% do fluxo original é refletido e cerca 38% é absorvido pela atmosfera.

4.2 Radiação refletida

Cerca de 30% da radiação incidente é refletida, incluindo-se a reflexão difusa e, portanto a radiação espalhada. A própria atmosfera reflete cerca de 6%, as nuvens cerca de 20% e a superfície cerca de 4%. Esta radiação refletida é chamada *albedo*.

A reflexão pode ser um pouco diferente para diferentes comprimentos de onda. Por exemplo, o espalhamento na atmosfera é maior para luz azul e ultravioleta (UV). Mas a *grosso modo* a radiação refletida tem as mesmas características da própria radiação solar incidente. Isto é, está na faixa de comprimentos de onda curtos ($\sim 0,2 a 3 \mu m$).



4.3 Conversão direta em calor

Cerca de 47% da radiação incidente é absorvida e convertida diretamente em energia térmica (calor). Cerca de 38% da radiação é absorvida pela própria atmosfera por oxigênio, ozona, vapor de água, CO_2 e outros gases. A radiação UVC é totalmente absorvida na atmosfera superior (estratosfera) por oxigênio e ozona. A radiação UVB é fortemente absorvida na estratosfera, principalmente pelo ozona. A radiação infravermelha (IR) é absorvida em diferentes faixas principalmente por vapor de água e CO_2 . Cerca de 6% são absorvidos e convertidos em calor pela própria terra.

Devido ao aquecimento produzido, ocorre emissão de radiação na faixa de comprimentos de ondas longos ($\sim 3 \text{ a } 60 \mu\text{m}$). O espectro aproximado é mostrado na figura e corresponde a emissão por um corpo negro a temperatura próxima de 255 K. Para comparação é mostrado também o espectro da luz solar incidente (fora de escala).

4.4 Ventos e ondas

Cerca de 0,21% da energia da radiação solar é convertida em energia mecânica dos ventos, ondas do mar, convecção de colunas de ar e correntes de ar. No final, esta energia também é convertida em calor.

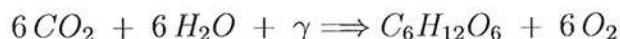
4.5 Evaporação

Cerca de 23% da radiação solar absorvida pela superfície da terra e água é consumida na evaporação de água. O vapor de água produzido alimenta o chamado "ciclo da água": evaporação, formação de nuvens, precipitação e escoamento das águas. Praticamente toda energia consumida como calor latente de evaporação da água é liberada nas nuvens como calor quando o vapor de água se condensa. Depois da precipitação (chuva, neve, granizo) parte da energia pode ficar armazenada na água ou gelo, como energia potencial gravitacional. No escoamento dessas águas para o mar, essa energia é convertida em energia cinética e, no final, em calor. Uma pequena fração é aproveitada em usinas hidroelétricas.

4.6 Fotossíntese

Uma pequena fração da radiação solar é armazenada em plantas e algas por meio da fotossíntese. É uma fração muito pequena (0,023%) mas importantíssima, pois tem tudo a ver com a vida na terra.

Parte da energia da radiação é absorvida pela clorofila em plantas e algas e convertida em energia química de carboidratos. O processo não é muito bem compreendido. Uma discussão um pouco mais detalhada pode ser encontrada na Referência 8, por exemplo. O processo mais básico é a produção de glicose a partir de gas carbônico e água, depois da absorção da radiação (γ). O processo é simplificadamente resumido pela reação química:



Além de armazenar energia química no carboidrato, o processo produz oxigênio, o que foi muito importante num passado remoto, para formação da atmosfera terrestre. Outros compostos são formados a partir da glicose.

A eficiência de plantas e algas na produção de energia química a partir da energia radiante é menor que 10%. Pode chegar perto de 10% para certas algas marinhas, mas para plantas em geral é da ordem de 1%. Globalmente entretanto, representa uma quantidade enorme de energia.

Combustíveis fósseis (petróleo, gas natural e carvão fóssil) têm energia química que foi armazenada há milhões de anos atrás a partir da energia solar pela fotossíntese. Combustíveis da chamada *biomassa* (madeira, carvão vegetal, álcool, biodiesel, etc.) também têm energia química produzida pela fotossíntese, a partir da energia solar. A energia química é liberada na combustão que consiste de reações exotérmicas (que liberam calor), principalmente as que liberam gas carbônico e água.

Num organismo animal herbívoro, a energia química das plantas ingeridas é aproveitada em reações inversas para produzir energia mecânica, térmica e outras. Parte dessa energia química é armazenada no próprio organismo e é aproveitada pelos animais carnívoros.

Em plantas vivas, a reação inversa à da produção de glicose também ocorre na ausência de luz, com liberação de calor, gas carbônico e água, em quantidades normalmente bem menores que as produzidas pela fotossíntese.

Com a morte e decomposição dos organismos vivos, normalmente a energia química também é liberada na forma de calor.

Em resumo, uma pequena fração da energia química produzida pela fotossíntese é armazenada na forma de combustíveis fósseis, mas a fração maior no final se degrada como energia térmica, que no final é devolvida para o espaço exterior na forma de radiação infravermelha distante (de comprimentos de onda longos).

Do ponto de vista da entropia, a fotossíntese representa uma diminuição da entropia às custas da energia da radiação solar. A partir de um sistema bem desordenado (CO_2 e H_2O), são produzidas moléculas bem mais complicadas e ordenadas, que armazenam energia química. Uma discussão mais detalhada de entropia é apresentada na Referência 6, por exemplo.

4.7 Energia das marés

Uma pequena fração da energia na terra ($\sim 0,0017\%$) consiste de energia mecânica das águas devido às marés. Essa energia vem das atrações gravitacionais do sol e da lua, que devido ao movimento relativo produz “oscilações nas águas” dos oceanos. A elevação do nível das águas num dado ponto representa uma quantidade enorme de energia potencial, que no final se dissipa na forma de calor.

4.8 Energia original da terra

Uma outra pequena fração do fluxo de energia na terra se origina na própria terra.

Energia geotérmica

A energia geotérmica é a fração da energia térmica da terra que flue para a superfície e finalmente é irradiada para o espaço exterior. A maior parte é o calor que se propaga do interior da terra para a superfície ($0,018\%$). Uma pequena fração ($0,00017\%$) é o calor transportado para a superfície em vulcões e fontes de águas quentes.

Energia nuclear

A energia nuclear é a energia que pode ser extraída de reações nucleares a partir de elementos químicos obtidos da própria terra.

Na fissão termonuclear, um núcleo de elemento pesado é quebrado em 2 núcleos leves e ocorre liberação de energia térmica. A fissão ocorre naturalmente para certos núcleos pesados (“fissão espontânea”), mas a energia liberada é uma fração completamente desprezível das demais energias envolvidas. Entretanto, as usinas termonucleares funcionam com base na fissão de elementos pesados (combustível nuclear) e a energia produzida é significativa do ponto de vista de aproveitamento humano.

Na fusão termonuclear, 2 núcleos bem leves se chocam produzindo um núcleo mais pesado e também ocorre liberação de energia térmica. Um projeto promissor para produção de energia é o reator a fusão, que funcionará a partir de deutério (isótopo do hidrogênio que tem um próton e um neutron no núcleo). Cerca de $0,015\%$ do hidrogênio comum (da água, por exemplo) é deutério. Portanto as águas dos oceanos têm uma quantidade enorme de deutério, que pode ser considerada inesgotável do ponto de vista de aproveitamento humano.

Energia química

Algumas substâncias originais da própria terra têm energia química armazenada e que podem ser liberadas para produzir energia térmica. Mas as quantidades não são significativas.

Uma das formas mais úteis de energia é a elétrica, uma vez que pode ser prontamente convertida em outras formas de energia de maneira muito conveniente, quando o conversor pode ficar ligado à rede elétrica ou usar baterias. Isto não é possível para meios de transporte em geral, com exceção de trens e ônibus elétricos, além de automóveis e máquinas movidos a bateria.

A energia elétrica pode ser gerada de várias maneiras. Para distribuição em larga escala, as formas mais importantes são a hidroelétrica, a termoe elétrica e a nuclear (elétrica), que geram de centenas de MW a vários GW (a usina de Itaipu, por exemplo, pode gerar até cerca de 13 GW em 18 turbinas). Além destas, existem várias formas de gerar energia elétrica em escala menor (de Watts a centenas de KW).

Energia eólica

A energia dos ventos resulta, em última análise, da radiação solar, que movimenta as massas de ar. A energia eólica foi muito importante no passado para barcos a vela e moinhos.

Na geração de energia elétrica, a utilização da energia eólica fica limitada a pequenas instalações de alguns W a centenas de KW. Um dos problemas sérios é a intermitência ou irregularidade dos ventos. Uma solução consiste em usar o moinho para carregar baterias. Outra solução promissora é realizar a eletrólise da água para armazenar H_2 e O_2 , a serem queimados regularmente numa "célula de combustível". Outro problema é o custo da instalação. Por KW instalado, o custo é maior que o de grandes

Energia das marés

A variação do nível do mar se deve à energia mecânica do sistema terra-lua-sol. A correspondente dissipação da energia resulta numa diminuta redução na rotação da terra da ordem de segundo por século.

A quantidade de energia total nas marés é fantástica, mas as possibilidades de aproveitamento comercial são muito limitadas. Uma usina maremotora para produção de energia elétrica depende de local adequado e grande desnível da maré (vários metros). Além disso, existem sérios problemas de corrosão dos equipamentos e a destruição de cenários naturais interessantes (baías, geralmente).

Existem instalações para potências da ordem de grandeza de centena de MW.

Energia termoeleétrica e nuclear.

A usina termoeleétrica é essencialmente uma máquina a vapor (com turbina) para alimentar o gerador magnético. A máquina a vapor é alimentado por combustíveis fósseis.

Na usina nuclear, o calor é gerado na fissão nuclear. A energia elétrica é gerada a partir do movimento de turbinas a vapor. Entretanto, em geral, o vapor não é aquecido diretamente pelo reator nuclear, mas aquecido num trocador de calor.

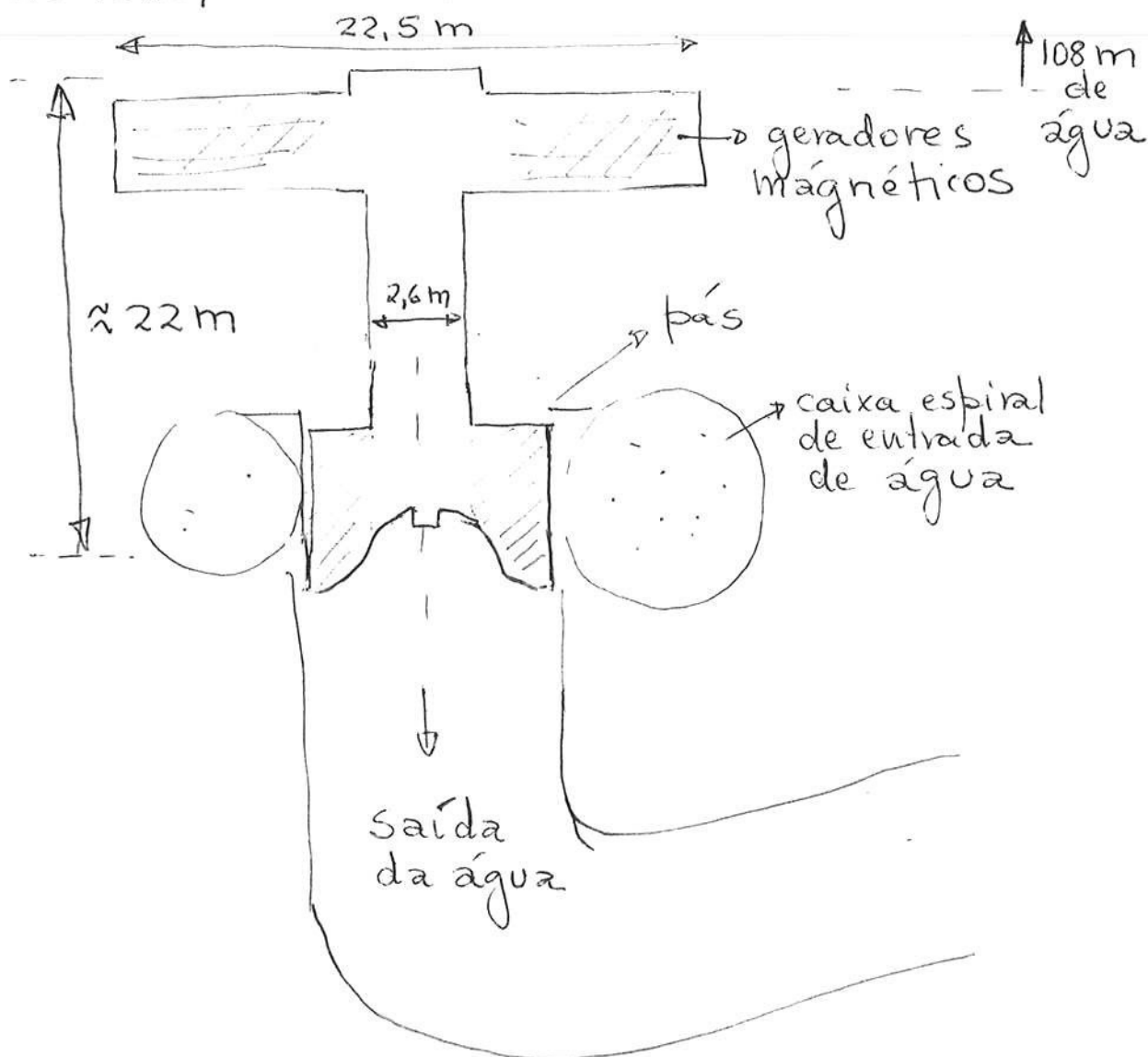
(Ver C.E. Steinhart and J.S. Steinhart, por exemplo)

Energia hidroelétrica

17.

A energia elétrica é gerada por indução magnética em uma turbina que gira devido à pressão da água. A energia potencial da água armazenada em uma barragem. Esta energia vem da radiação solar que evapora a água dos oceanos e do solo, e as chuvas reabastecem a barragem.

A seguir são resumidos alguns dados sobre uma turbina da Usina hidroelétrica de Itaipu. Ao todo, a usina tem 18 turbinas.



Potência nominal = 715 MW

Rotação = 92,3 rpm (60 Hz)

Queda = 112,9 m

Vazão = $690 \text{ m}^3/\text{s}$

Energia solar (elétrica) fotovoltaica)

A energia da radiação solar pode ser convertida diretamente em energia elétrica por meio de células solares. Uma limitação séria é que as células solares respondem somente a radiação de energias mais altas (luz visível e ultravioleta, essencialmente). Assim, as eficiências são baixas da ordem de 15%. A potência máxima para coletores fixos na horizontal é da ordem de 30 MW por km^2 de coletor.

O custo da instalação é proibitivamente alto para os materiais atuais e a aplicação fica limitada a pequenas instalações tais como alimentação elétrica de dispositivos espaciais, estações repetidoras de sinais em desertos, além de alimentação de pequenos dispositivos elétricos (relógios, calculadoras e outros).

Energia solar (térmica)

Coletores solares para aquecimento de água.

Energia geotérmica

Energia das marés

OTECs

Etc

Referências

1. F.W. Sears, M. W. Zemansky, H.D. Young, *Física 2, 2ª Ed.*, Livros Técnicos e Científicos Editora, São Paulo, 1984.
2. M. W. Zemansky, *Calor e termodinâmica, 5ª Ed.*, Editora Guanabara Dois, 1978.
3. B. Chalmers, *Energy*, Academic Press, New York, 1963.
4. R. C. Dorf, *Energy, Resources & Policy*, Addison-Wesley, London, 1978.
5. J. J. Kraushaar and R. A. Ristinen, *Energy and Problems of a Technical Society*, John Wiley, 1988.
6. R. S. Rouse and R. O. Smith, Macmillan *Energy, Resource Slave Pollutant*, Publishing Co., New York, 1975.
7. R. M. E. Diamant, *Total Energy*, Pergamon Press, New York, 1970.
8. G. J. Aubrecht II, *Energy*, Prentice Hall, New York, 1995.
9. *The Energy Sourcebook*, R. Howes and A. Fainberg (Editors), America Institute of Physics, New York, 1991.