

Seminário de  
Físico-Química e Termodinâmica dos Sólidos

## FROM LIGHT TO POWER: THERMODYNAMIC INSIGHTS INTO SOLAR CELLS



**IFSC** UNIVERSIDADE  
DE SÃO PAULO  
Instituto de Física de São Carlos

Doutorando:

**MSc. Yosthyn M. Ariza Florez**

Instituto de Física de São Carlos  
Universidade de São Paulo

IFSC-USP  
**Grupo de**  
Bernhard Gross **Polímeros**

 **i-mat**  
intelligent materials laboratory

# Sumário

01

## INTRODUÇÃO

Motivação e Termodinâmica em células solares.

02

## PRINCIPIOS BÁSICOS DE UMA CELULA SOLAR

Parâmetros de uma células solar e circuito equivalente.

03

## TERMODINÂMICA NA ENERGIA FOTOVOLTAICA

Célula solar como un motor térmico e a célula solar ideal de dois níveis

04

## MOTORES TÉRMICOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA

Diferentes tipos de motores térmicos.

05

## CONCLUSÃO

Conclusão

# Energia Solar Fotovoltaica

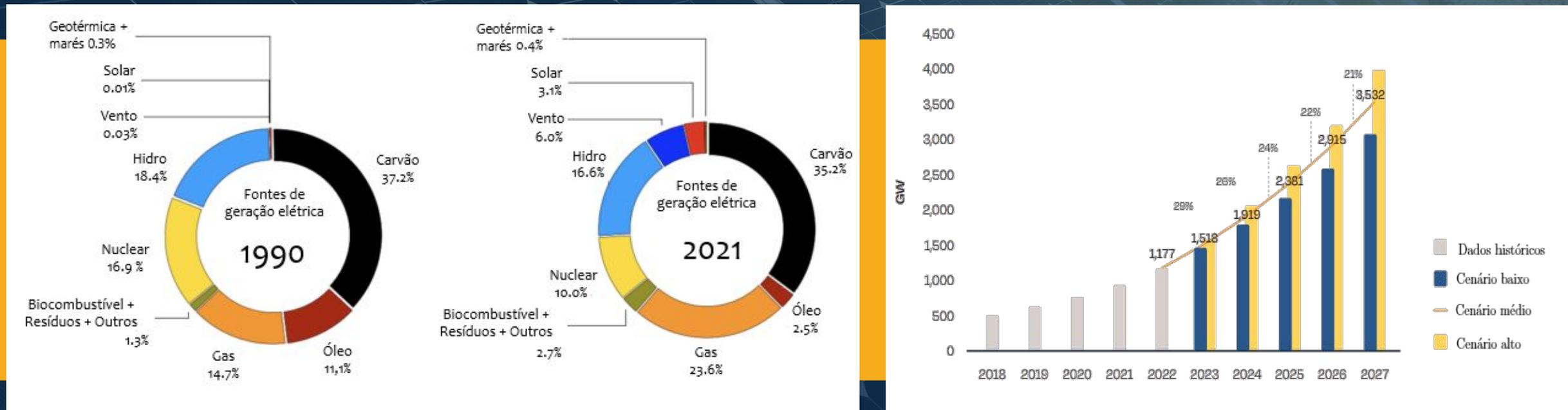


Figura 1. Consumo mundial anual de energia. Dados: IEA(2022) (esquerda) [1]. Relatório de perspectivas do mercado fotovoltaico global 2017-2026 (direita) [2].

## Importância da termodinâmica nas células solares

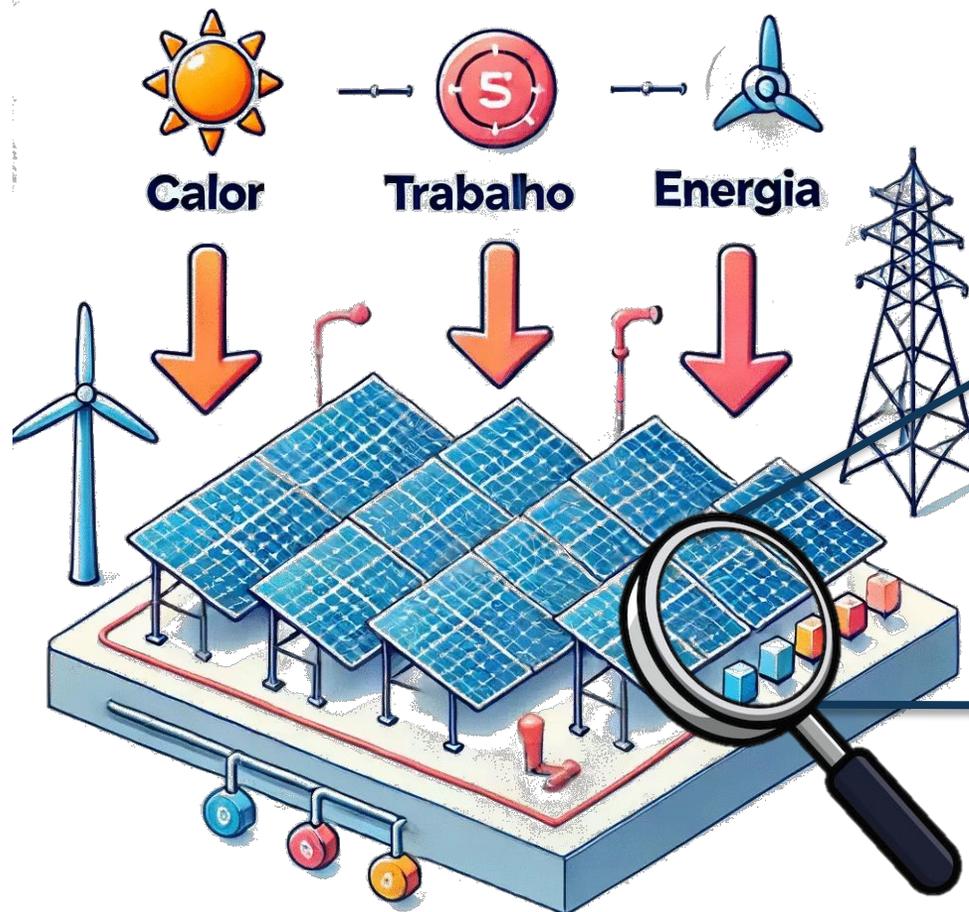


Figura 1. Conceitos essenciais da termodinâmica. (Criado por AI)

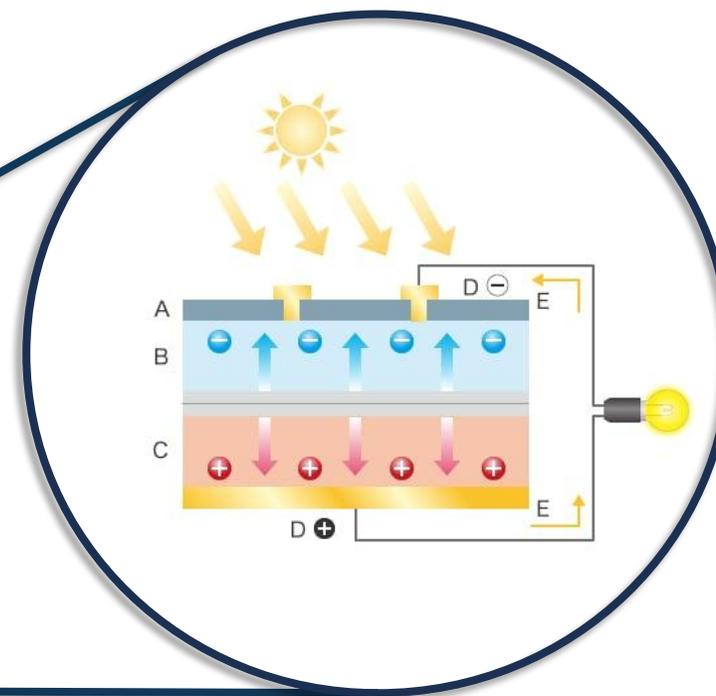


Figura 2. Funcionamento interno de uma célula solar [3]. A: filme antirreflexo; B: silício tipo n; C: silício tipo p; D: eletrodos e E: corrente.

## Curva característica de uma célula solar

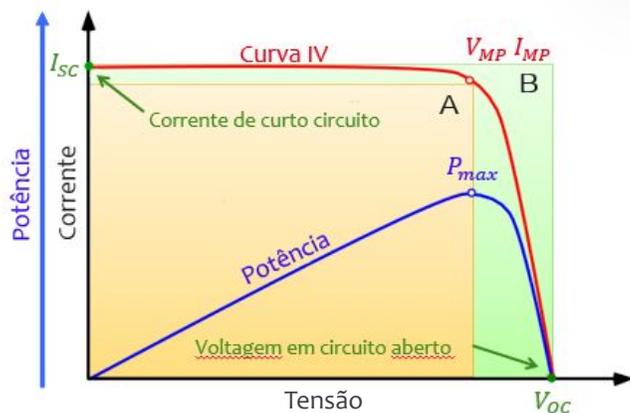


Figura 3 – Curvas características de uma célula solar sob iluminação.

## Modelo de circuito equivalente

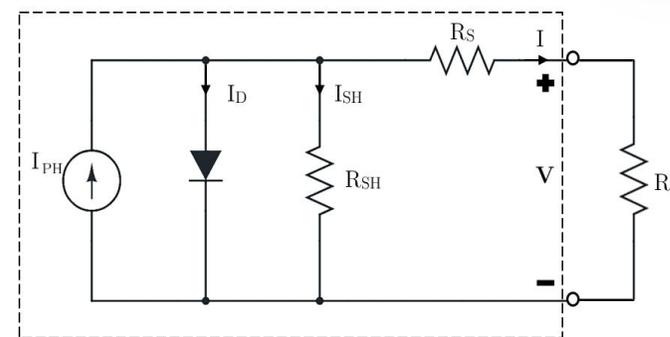


Figura 4 – Circuito equivalente de uma célula solar.

$I_{ph}$  = corrente gerada por luz  
 $I_D$  = corrente através do diodo  
 $I_{SH}$  = corrente através da resistência Shunt  
 $R_s$  = resistência em série  
 $R_{sh}$  = resistência em paralelo ou Shunt  
 $R_E$  = resistência externa

### Equação característica de uma célula solar

$$I(V) = I_s \left[ \exp\left(\frac{q(V + R_s I)}{nk_B T}\right) - 1 \right] + \frac{V + R_s I}{R_{sh}} - I_{ph}(V) \quad (1)$$

$I_s$  = corrente saturação reversa  
 $n$  = fator de idealidade do diodo  
 $q$  = carga elementar  
 $k_B$  = constante de Boltzmann ( $k = 1.346 \times 10^{-23}$  J/K)  
 $T$  = Temperatura (298K)

### PARÂMETROS

### EQUAÇÃO

Potencial de circuito aberto,  $V_{oc}$   $V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right)$  (2)

Corrente de curto circuito,  $I_{sc}$   $I_{sc} \approx I_{ph}$  (3)

Fator de preenchimento,  $FF$   $FF = \frac{V_{MP} * I_{MP}}{V_{OC} * I_{sc}} = \frac{\text{Área A}}{\text{Área B}}$  (4)

Eficiência,  $\eta$  ou  $PCE$   $\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{mp} * V_{mp}}{I_{in} * A} = \frac{I_{sc} * V_{oc} * FF}{I_{in}}$  (5)

Tabla 1: Parâmetros de una celda solar

## Conversão fotovoltaica

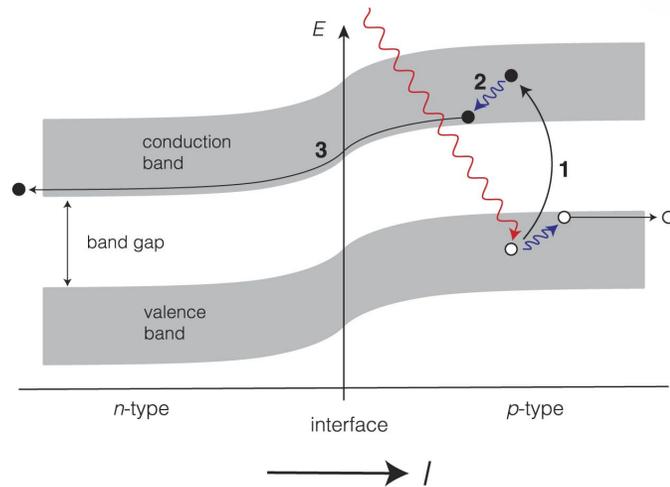


Figura 5 – Processos que acontecem durante o efeito fotovoltaico para uma célula solar de Union p-n [4].

1. Um fóton é absorvido na fase tipo do semiconductor, gerando um par elétron e buraco.
2. O par se termaliza rapidamente com os fônons na rede, dissipando o excesso de energia acima do gap.
3. O elétron é conduzido para a esquerda pela diferença de potencial na interface.

## Cenário ideal



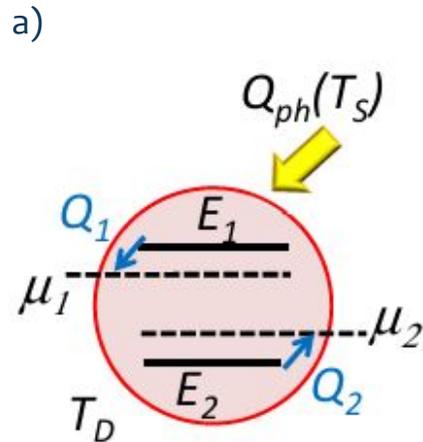
• Absorção total

• Só recombinação radiativa

• Sol monocromático



## Sistema de dois níveis



b)

$$f_i = \frac{1}{e^{(E_i - \mu_i)/k_B T_D} + 1} \quad (2)$$

$\mu$  = Potencial eletroquímico  
 $k_B$  = Constante de Boltzman  
 $T_D$  = Temperatura absoluta do sistema de 2 níveis

Figura 5 – a) Diagrama de banda de energia ilustrando o sistema de 2 níveis e [5]. b) A distribuição de Fermi-Dirac (FD)

## Transições no processo (Up or down)



- Transição “up” ou de absorção

$$U(E_2 \rightarrow E_1) = \alpha f_2 (1 - f_1) n_{ph} \quad (3)$$

- Transição “down” ou emissão

$$U(E_1 \rightarrow E_2) = \alpha f_1 (1 - f_2) (n_{ph} + 1) \quad (4)$$

$\alpha$  = Constante

$+1$  = transição para baixo descreve a emissão espontânea

$n_{ph}$  = Distribuição de Bose-Einstein (BE) para fótons isotrópicos

$$n_{ph}(T_S) = \frac{1}{e^{[(E_i - \mu_i) - (\mu_1 - \mu_2)_S]/k_B T_D} - 1}$$

## Sistema de dois níveis



- Até agora, temos dois níveis mantido à temperatura  $T_D$  [Eq. 2] e iluminado por fótons de uma fonte à temperatura  $T_S$  [Eq. 5]:

$$f_i = \frac{1}{e^{(E_i - \mu_i)/k_B T_{D+1}}} \quad (2)$$

$$n_{ph}(T_S) = \frac{1}{e^{[(E_i - \mu_i) - (\mu_1 - \mu_2)_S]/k_B T_{D-1}}} \quad (5)$$

- A absorção (Up) deve ser balanceada pela emissão (Down), de modo que são igualadas as equações (3) e (4):

$$\alpha f_2 (1 - f_1) n_{ph} = \alpha f_2 (1 - f_1) (n_{ph} + 1) \quad (6)$$

- Substituindo eq. (5) em (6), obtemos:

$$\frac{E_2 - \mu_2}{T_D} + \frac{E_1 - E_2}{T_S} = \frac{E_1 - \mu_1}{T_D} \quad (7)$$

- Ou, de forma equivalente:

$$qV_{OC} \equiv (\mu_1 - \mu_2)_D = (E_1 - E_2) \left[ 1 - \frac{T_D}{T_S} \right] \quad (8)$$

Fator de Carnot, que envolve a relação entre dos reservatórios de temperatura.

$$\left[ 1 - \frac{T_D}{T_S} \right]$$

Em nosso caso,  $T_D$  Temperatura de dispositivo e  $T_S$  temperatura do sol.

# EFICIÊNCIA DE UM CÉLULA SOLAR DE DOIS NÍVEIS

Eficiência termodinâmica máxima

## Diagramas do fluxo de energia

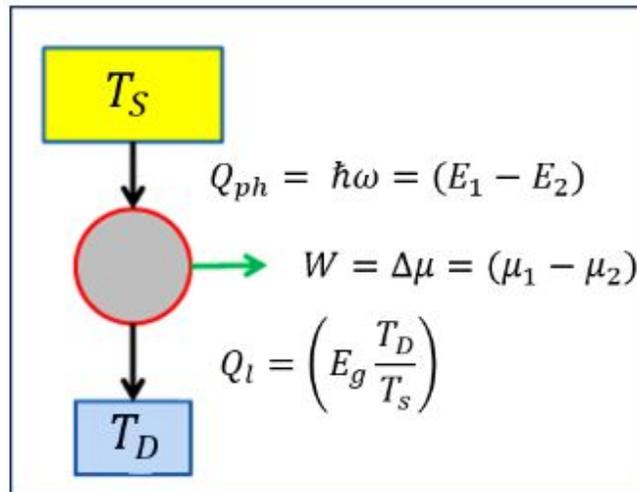


Figura 6 – representando um "motor de fótons (photon engine)" [5].

$$\eta = \frac{(\mu_1 - \mu_2) \times N}{(E_1 - E_2) \times N} = \left[ 1 - \frac{T_D}{T_S} \right]$$

Em resumo

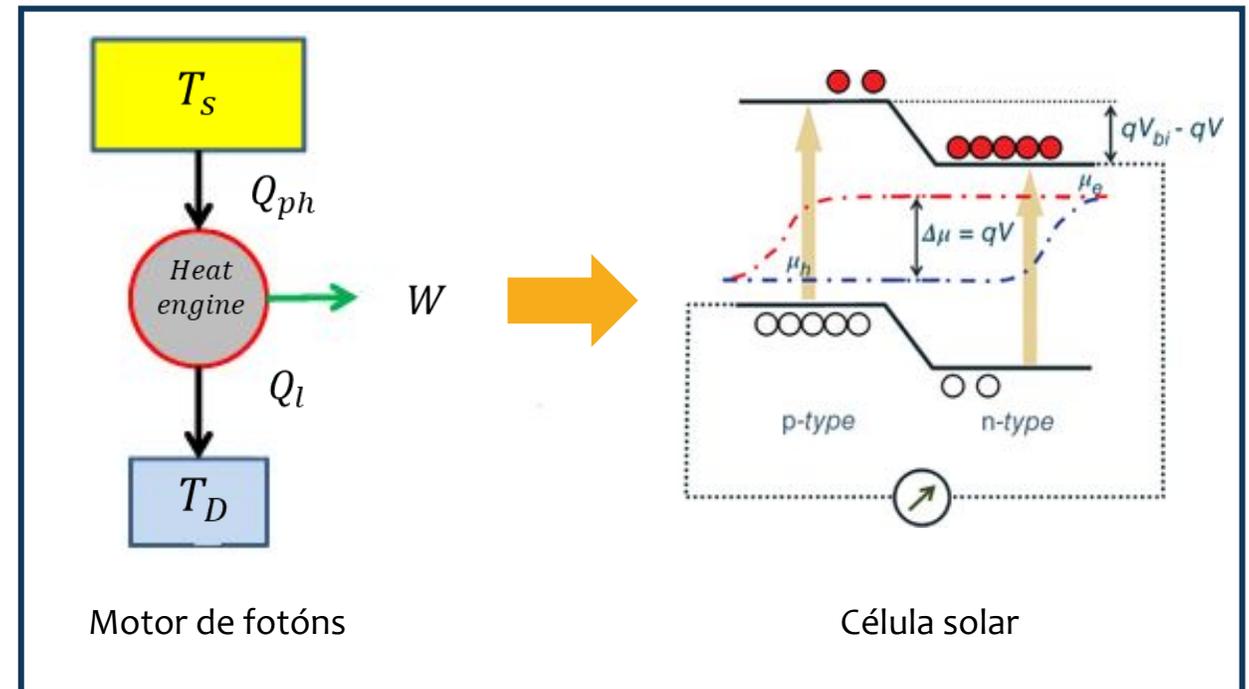
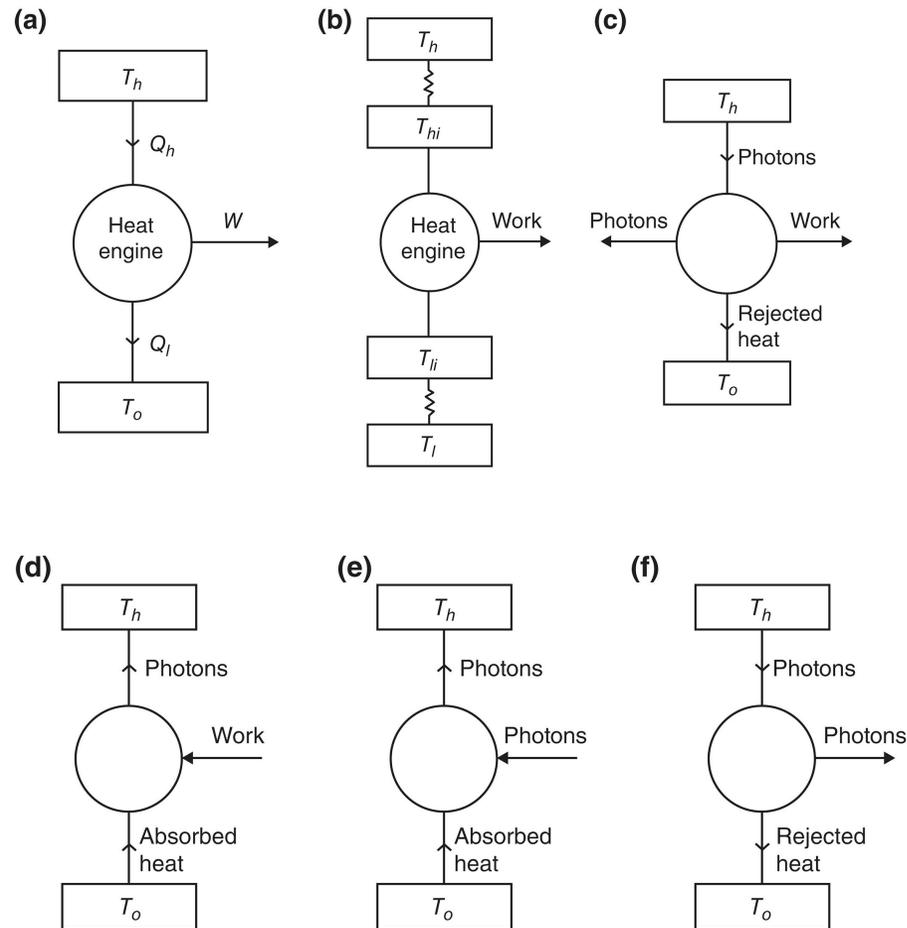


Figura 7 – Resumo gráfico. Photons engine [5] and solar cells

- Eficiência de uma célula solar de dois níveis

# DIFERENTES MOTORES TÉRMICOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR



## Tipos conversão de energias



- Ciclo de Carnot, com absorção de calor em  $T_h$  e rejeição em  $T_o$ .
- Motor endo-reversível, operando entre  $T_{hi}$  e  $T_{li}$ .
- Conversor de energia solar, absorvendo fótons em  $T_h$ , rejeitando calor em  $T_o$  e emitindo fótons durante a execução do trabalho.
- Bomba de calor óptica, convertendo entrada elétrica e calor de baixo grau em  $T_o$  em emissão de fótons em  $T_h$ .
- Modelo de dispositivo de fotoluminescência.
- Dispositivo emissor de luz como modelo para uma célula solar.

Figura 8 – Vários tipos de motores térmicos na conversão de energia solar são descritos [6].

- A radiação solar, representada como calor de alta temperatura, pode ser convertida efetivamente em trabalho útil ou eletricidade segundo as leis da termodinâmica.
- Discussão dos limites fundamentais da operação fotovoltaica.
- Explicação da operação básica da célula solar e dos mecanismos de perda em situações ideais usando um modelo de dois níveis.
- Potencial para conversão de energia solar de alta eficiência em condições ideais e a importância da pesquisa contínua para minimizar perdas e melhorar as aplicações práticas da tecnologia solar.



**OBRIGADO  
PELA  
ATENÇÃO!!**

# Agradecimentos!



## Diretores

- Prof. Dr. Gregorio Couto Faria
- Prof. Dr. Roberto Mendonça Faria



## Email de contato

- Yosthyn M. Ariza Florez:  
[ymariza@usp.br](mailto:ymariza@usp.br)
- Prof. Dr. Gregorio Couto Faria:  
[gcfaria@ifsc.usp.br](mailto:gcfaria@ifsc.usp.br)



## Equipe



Web site: <https://gcfario.wixsite.com/i-mat>

# REFERÊNCIAS

---

- [1] World Final Energy. Disponível em: <<https://www.worldenergydata.org/world-final-energy/>>.
- [2] La capacidad fotovoltaica mundial alcanzará los 1.300 GW en 2023. Disponível em: <<https://elperiodicodelaenergia.com/la-capacidad-fotovoltaica-mundial-alcanzara-los-1-300-gw-en-2023/>>. Acesso em: 25 nov. 2023.
- [3]. Observation and Analysis for Evaluation of Solar Cells | Electronic Device Industry | 4K Digital Microscope - Application Examples and Solutions | KEYENCE UK & Ireland. (s. f.-a). <https://www.keyence.co.uk/ss/products/microscope/vhx-casestudy/electronics/photovoltaic-cell.jsp>
- [4] ALICKI, Robert; GELBWASER-KLIMOVSKY, David; JENKINS, Alejandro. A thermodynamic cycle for the solar cell. *Annals of Physics*, 2017, vol. 378, p. 71-87.
- [5] Muhammad A. et. al. Fundamentals of PV efficiency interpreted by a two-level model. *American Journal of Physics*, 81(9):655–662, 2013
- [6] MARKVART, Tom. From steam engine to solar cells: can thermodynamics guide the development of future generations of photovoltaics?. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 2016, vol. 5, no 5, p. 543-569.