

Tecnologias para Sistemas de Energia Espaciais

2023/24

Capítulo 4

4. Produção de Energia: princípios e aplicações

7/11/2023

Carlos Marques

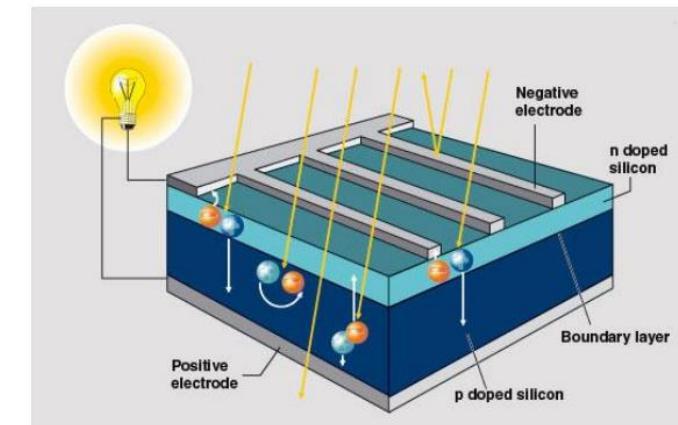
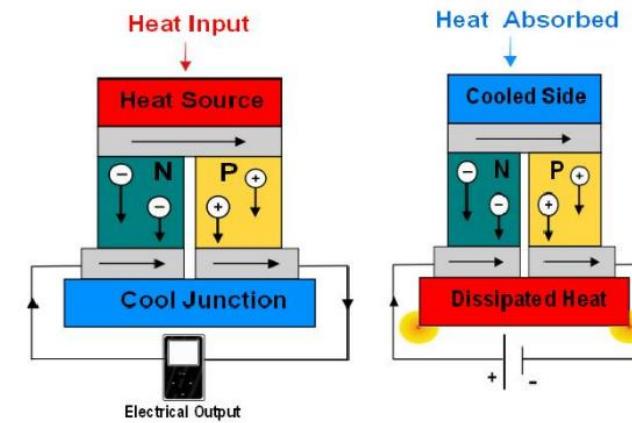
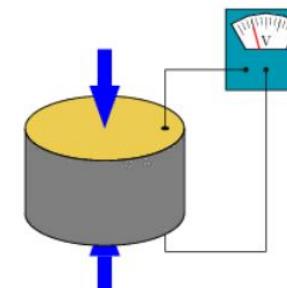
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

ENERGY CONVERSION

Several approaches to energy conversion can be followed as:

1. Thermoelectric conversion
2. Piezoelectric conversion
3. Photovoltaic conversion
4. Mechanic conversion



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

ENERGY CONVERSION – THERMOELECTRIC

Thomas Seebeck, 1821, found that an electric current would flow in a closed circuit made up of two dissimilar metals, if the junctions of the metals were maintained at two different temperatures.

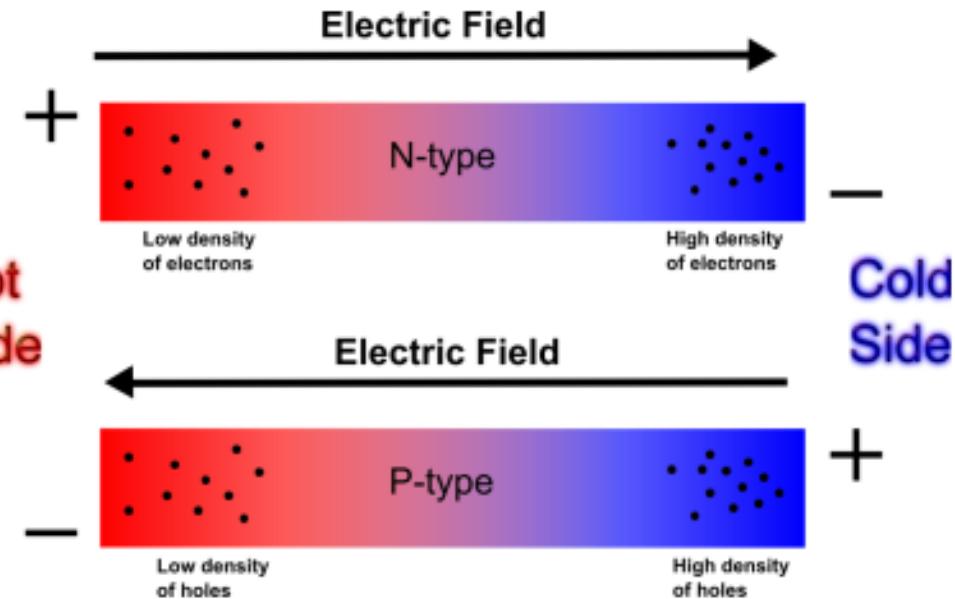
$$\alpha_{pn} = \frac{dV}{dT}$$

S is the Seebeck Coefficient with units of Volts per Kelvin

V is voltage and T is the temperature difference

$$V_{out} = N\alpha_{pn}\Delta T$$

Seebeck Effect



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Thermoelectric

- Low cost
- Reliable energy source
- No moving blocks
- Plain configuration
- Easily scalable
- Both heating and cooling process are possible
- Can work for more hours
- Less noise
- Little emission
- Recycles wasted heat energy
- Healthier atmosphere

Thermo-photovoltaic

- Cheaper
- Simple module
- Less noise and emission
- No moving blocks
- Easily amalgamated to other devices

Piezoelectric

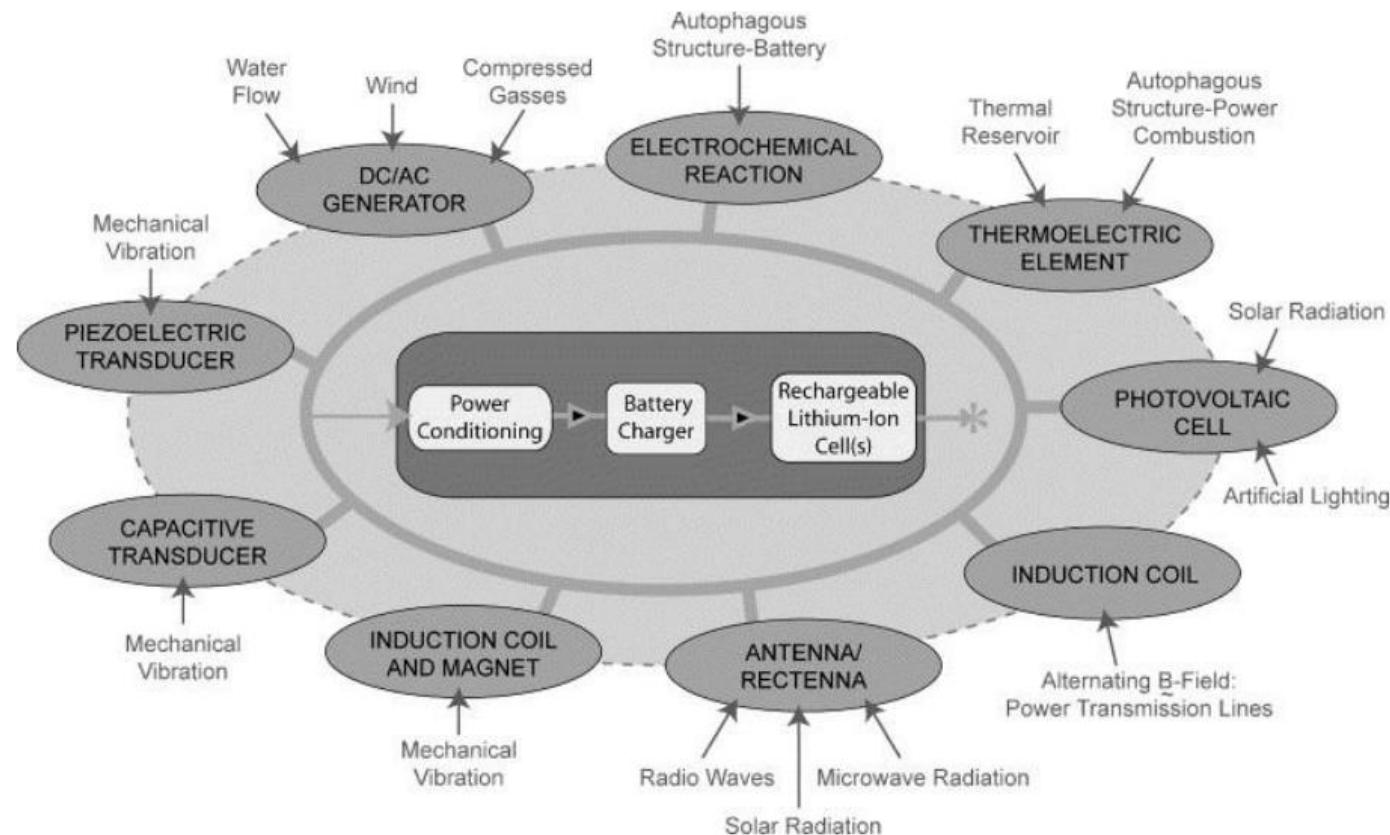
- Smaller size
- Higher output voltage
- Simple mechanism
- Highly sensitive to applied strain
- Higher frequency response
- Longer life cycle

Microbial Fuel Cell

- Ecologically healthy
- Non-hazardous
- Exploits organic wastes
- Treats effluent water
- Hydrogen gas fuel production
- Pollutant control approach

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Funcionamento de um dínamo (da palavra grega Dynamics, que significa força) – conversão mecânica em elétrica - destinado a transformar energia mecânica em energia elétrica.

GERADORES DE CORRENTE CONTÍNUA – DÍNAMOS

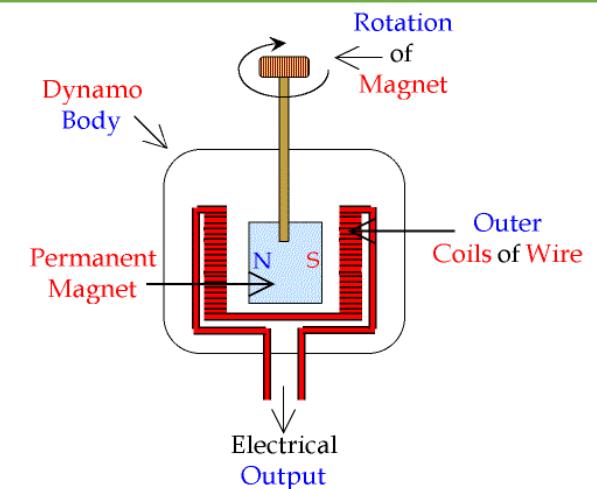
Designam-se por dínamos os geradores rotativos de corrente contínua cujo funcionamento é baseado nos princípios da indução electromagnética.

Como já sabemos, é possível gerar electricidade deslocando um condutor através de um campo magnético.

Aqui reside o princípio de funcionamento de qualquer gerador, desde o mais pequeno até aos grandes geradores das centrais que produzem milhares de MW.

A melhor forma de compreender o seu funcionamento parte do estudo de um gerador elementar...

Este equipamento consiste basicamente num íman fixo num eixo móvel, sendo que ao redor deste há uma bobine (um extenso fio enrolado em espiras e feito de material condutor elétrico, geralmente cobre), sem que haja contato físico entre a bobine e o íman.

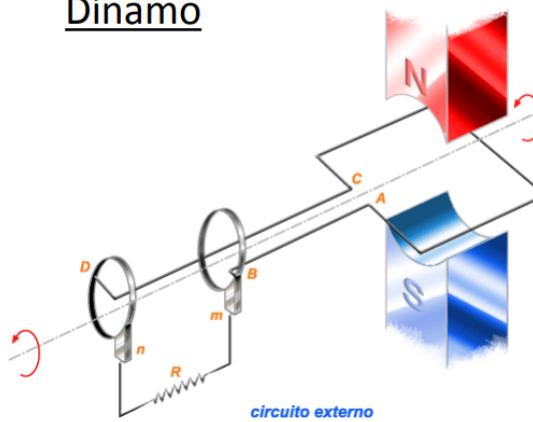


Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Funcionamento de um díamo – conversão mecânica

Díamo



Princípio de funcionamento?

Lei de Faraday:

$$\varepsilon = - \frac{Nd\Phi_B}{dt}$$

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA\cos(\omega t)$$

Força Eletromotriz Produzida:

$$\varepsilon(t) = -\omega B A \sin(\omega t)$$

intensidade da força eletromotriz induzida (ε) é igual a variação do fluxo magnético no interior da espira

A lei de Faraday expressa somente a intensidade da força eletromotriz induzida. Então em 1834 Heinrich E. Lenz (1804-1865) define que a força eletromotriz é igual ao negativo da variação do fluxo magnético no interior da espira, assumindo a forma:

$$\varepsilon = - \frac{d\phi_B}{dt}$$

Dois tipos de díamos são utilizados:

- díamo em corrente contínua, no qual seu conjunto fornece corrente contínua, ou seja, corrente que circula num só sentido apenas.
- o alternador, ou díamo de corrente alternada, fornecedor de corrente alternada, corrente que circula num e outro sentido alternadamente. Há certa confusão entre estas denominações, e algumas fontes costumam-se referir a este conjunto especificamente como alternador, apenas - díamo seria somente o gerador de corrente contínua.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

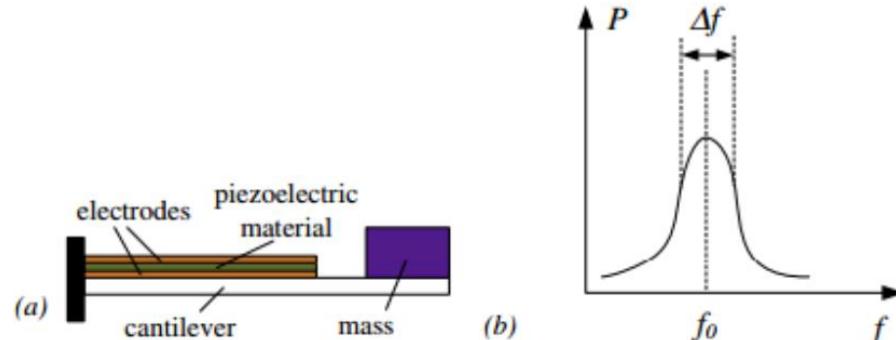


Figure 3: (a) Illustration of a piezoelectric energy harvester with a linear system of mass-cantilever structure; (b) frequency response of a typical linear energy harvester with a resonant frequency of f_0 and bandwidth of Δf [9].

A coleta de energia piezoelétrica do movimento vibracional é uma das tecnologias mais populares para fornecer energia para redes de sensores sem fio

De uma forma simples, a viga está localizada numa estrutura vibratória e a deformação dinâmica induzida na camada piezoelétrica gera uma saída de tensão alternada através dos elétrodos cobrindo a camada piezoelétrica

Table 1: Energy sources available in the surrounding for harvesting electricity [11].

Main sources	Type of source
Environment	Solar, light, wind, tide, temperature and pressure gradients, acoustic wave, sound, thundering, radioactive materials, water flows
Human body	Blood pressure, body temperature, walking, running, arm, leg, and finger motion, breathing
Vehicles	Automobiles, aircraft, trains, turbines, tires, ships
Structures	Building, bridges, roads, MEMS, control switch
Industrial	Motors, generators, compressors, fans, pumps, switch-gates

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Valores de consumo de energia de componentes comerciais prontos para uso, os valores variam entre 100 nW a 10 mW, que é a faixa típica da potência que pode ser recolhido da superfície do corpo humano



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Piezoelectricidade: capacidade de alguns materiais gerarem tensão elétrica por resposta a uma pressão mecânica.

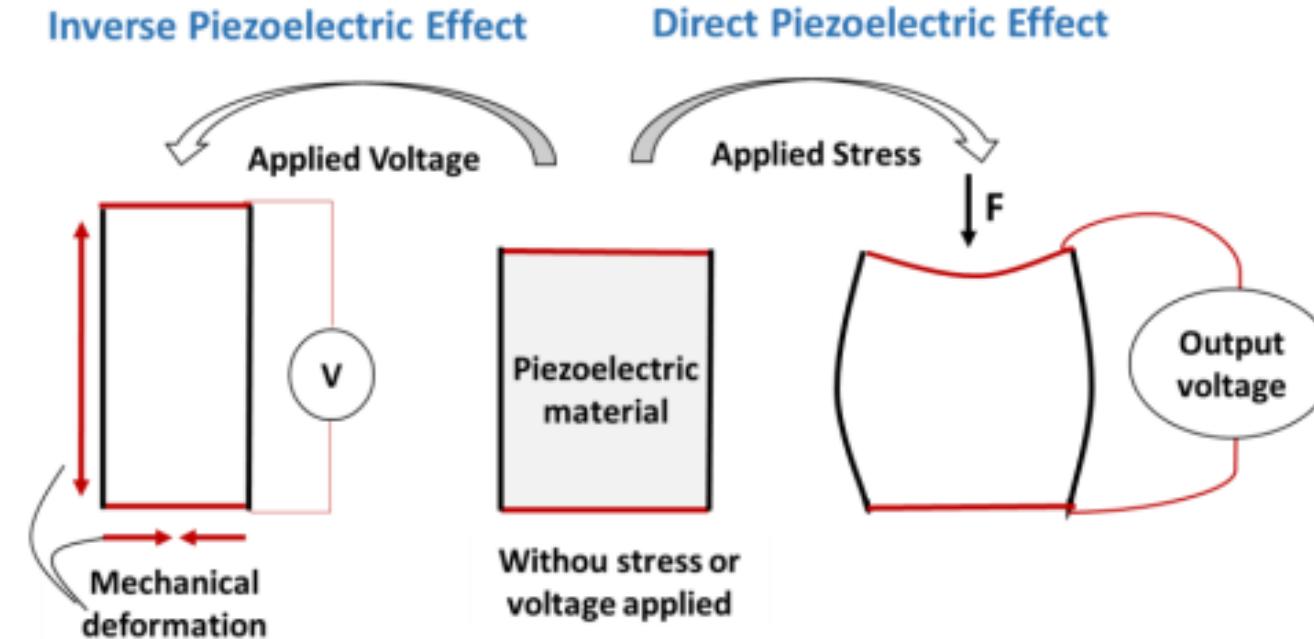
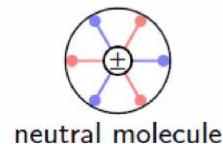
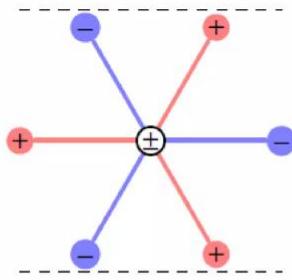


Figure 5: Schematic representation of the direct and inverse piezoelectric effects.

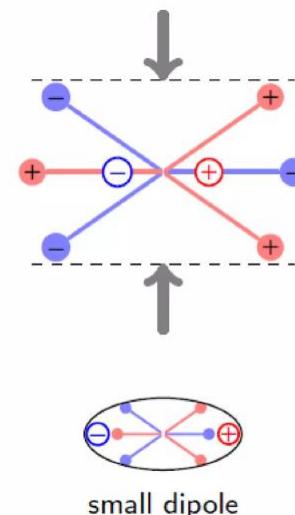
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Piezoelectricidade – modelo molecular



- Antes de sujeitar o material a algum stress externo
- Os centros de carga negativa e positiva de cada molécula coincide
- Os efeitos externos das cargas são reciprocamente canceladas
- Como resultado, uma molécula eletricamente neutra aparece.

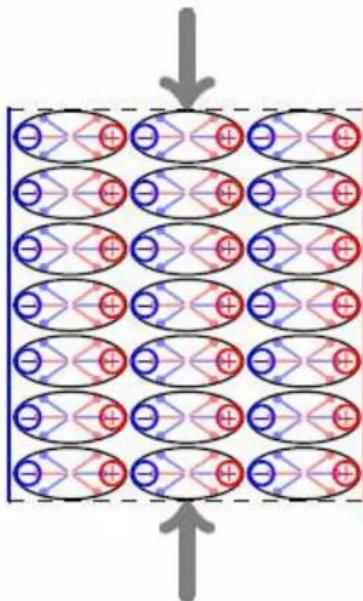


- Depois de exercer alguma pressão no material
- Estrutura interna é deformada
- Causa a separação de centros positivos e negativos das moléculas
- Como resultado, pequenos dipolos são gerados.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Piezoelectricidade – modelo molecular



- Pólos frente-a-frente dentro do material são mutuamente cancelados
- A distribuição de uma carga de ligação aparece na superfície do material e o material é polarizado
- A polarização gera um campo elétrico e pode ser usado para transformar energia mecânica da deformação do material em energia elétrica.

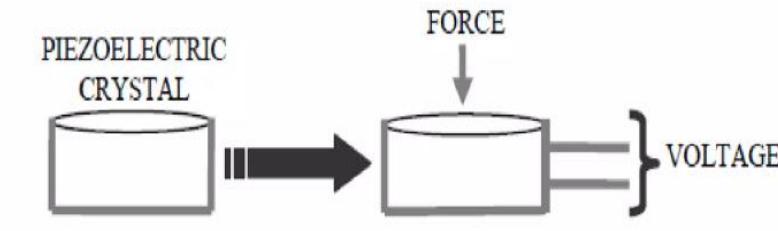
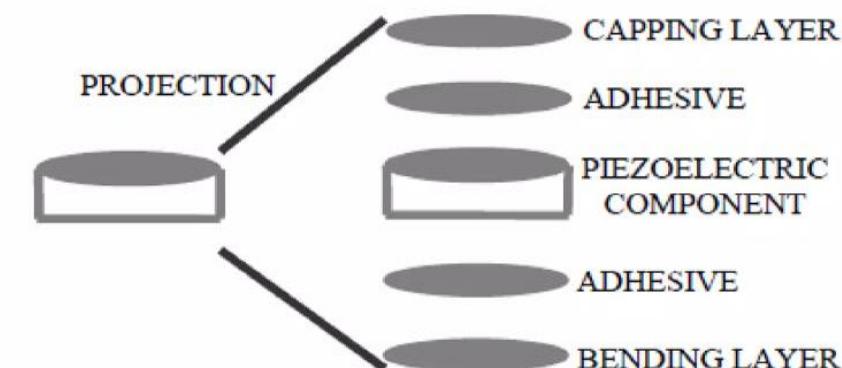


Fig 1. Principle of direct piezoelectric effect



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Piezoelectricidade



Pressões Mecânicas



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Piezoelectricidade

QUANTO MAIOR O PESO, MAIOR A ELETRICIDADE

Os geradores instalados sob o asfalto transformam em energia a força mecânica da pressão dos pneus dos veículos. Em testes, o tráfego gerou energia suficiente para iluminar 600 casas durante um mês



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

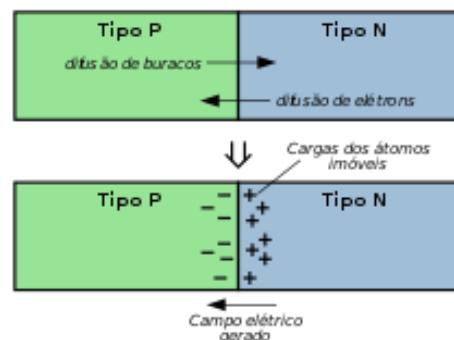
Uma célula solar é um dispositivo eletrônico que converte diretamente a luz solar em eletricidade.

A luz que brilha na célula solar produz uma corrente e uma tensão para gerar energia elétrica.

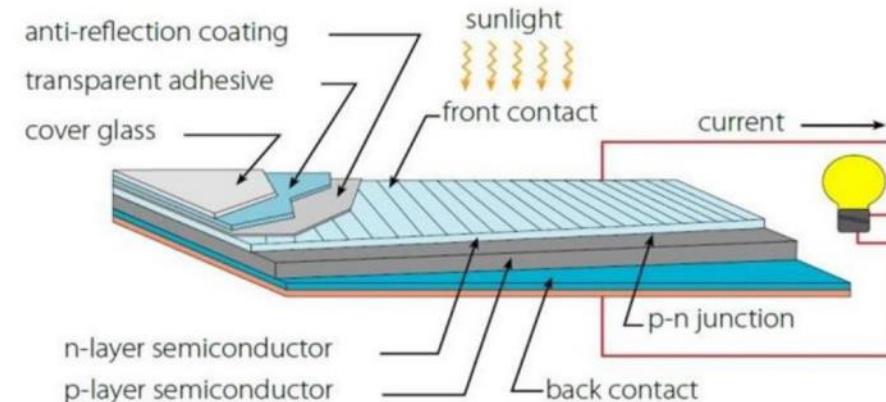
Este processo requer, em primeiro lugar, um material no qual a absorção de luz eleve um eletrão a um estado de energia mais elevado e, em segundo lugar, o movimento desse eletrão de energia mais elevada da célula solar para um circuito externo.

O eletrão dissipava sua energia no circuito externo e retorna para a célula solar.

Uma variedade de materiais e processos podem potencialmente satisfazer os requisitos de conversão de energia fotovoltaica, mas na prática quase toda conversão de energia fotovoltaica utiliza materiais semicondutores na forma de uma junção p-n.



- Junção P-N onde nota-se a formação da barreira de potencial após a difusão das cargas
- A maioria dos dispositivos semicondutores usados em componentes eletrônicos modernos utilizam junções P-N como sua estrutura fundamental



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar



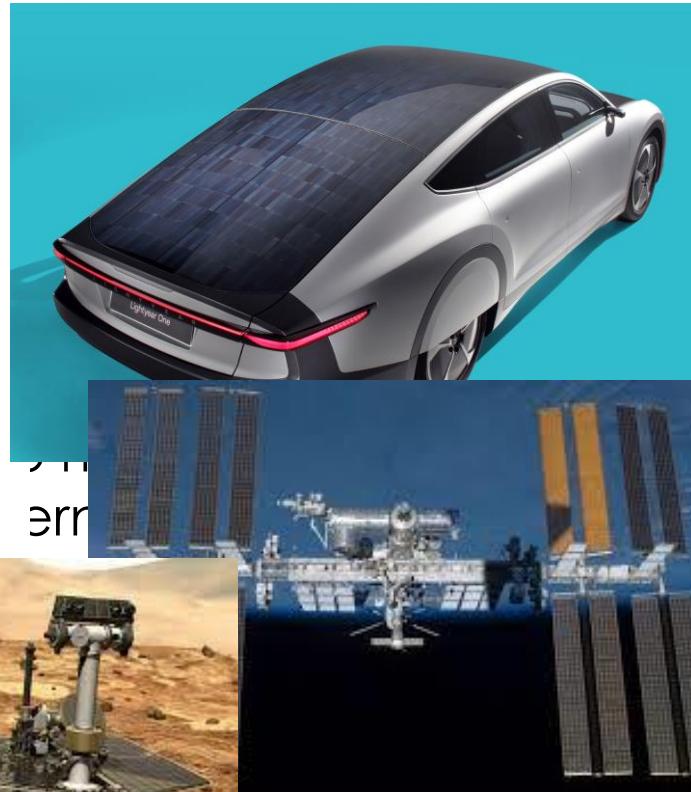
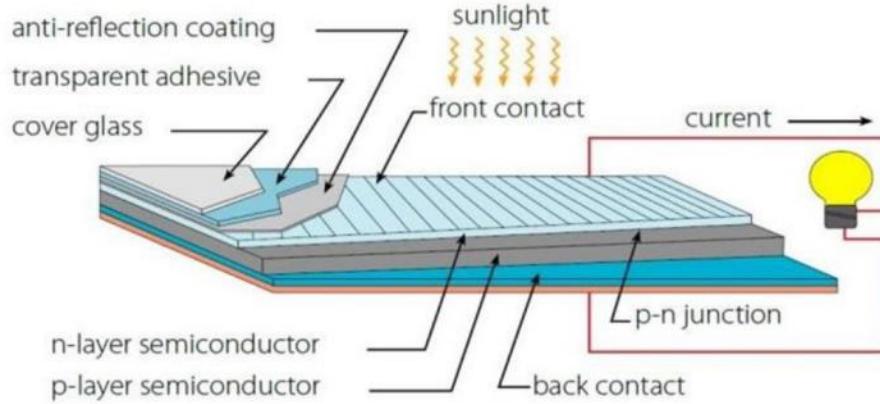
Residential



Commercial



Utility

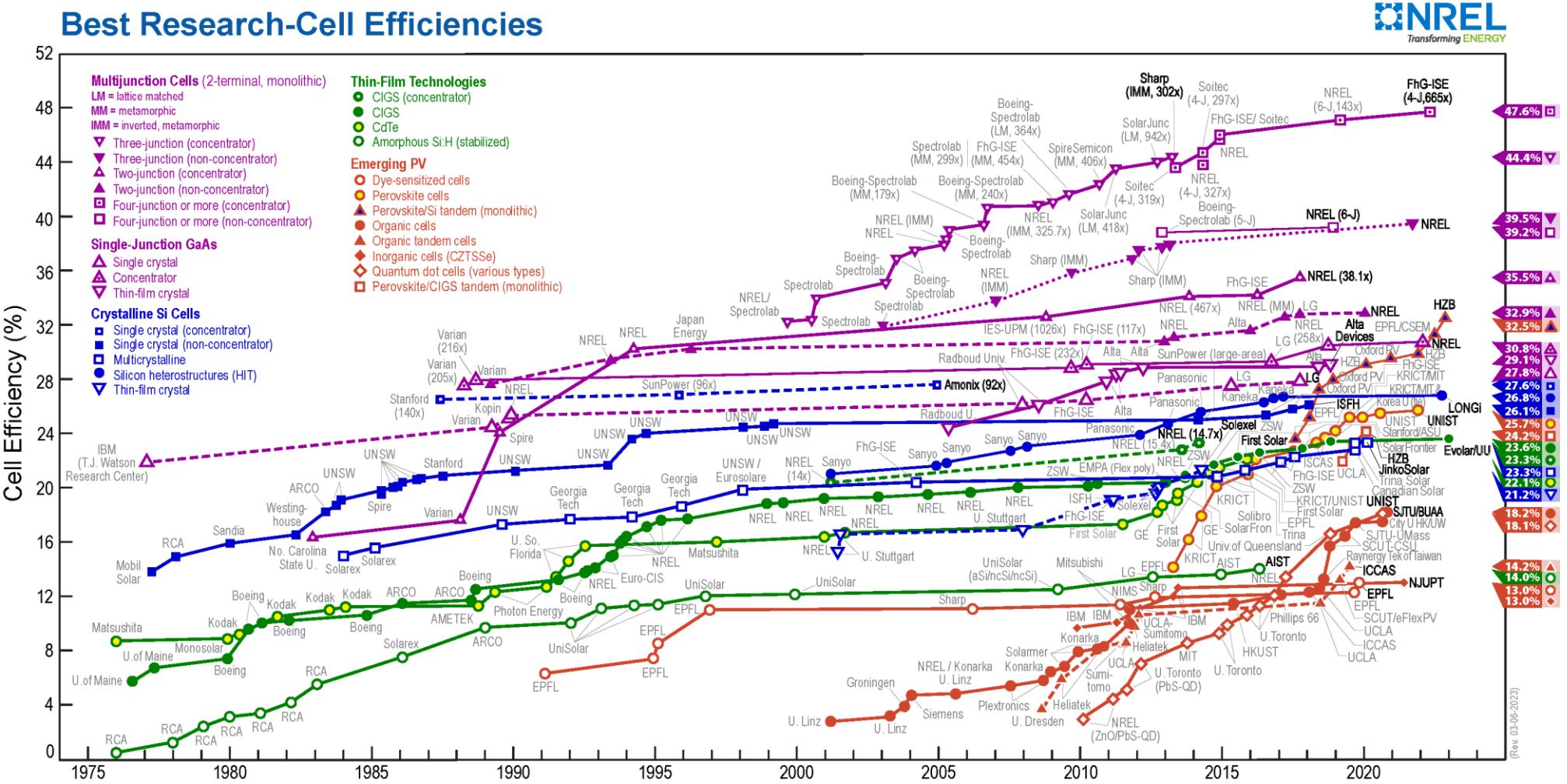


FOTOVOLTAICA UTILIZA MATERIAIS SEMICONDUTORES NA FORMA DE UMA

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Best Research-Cell Efficiencies

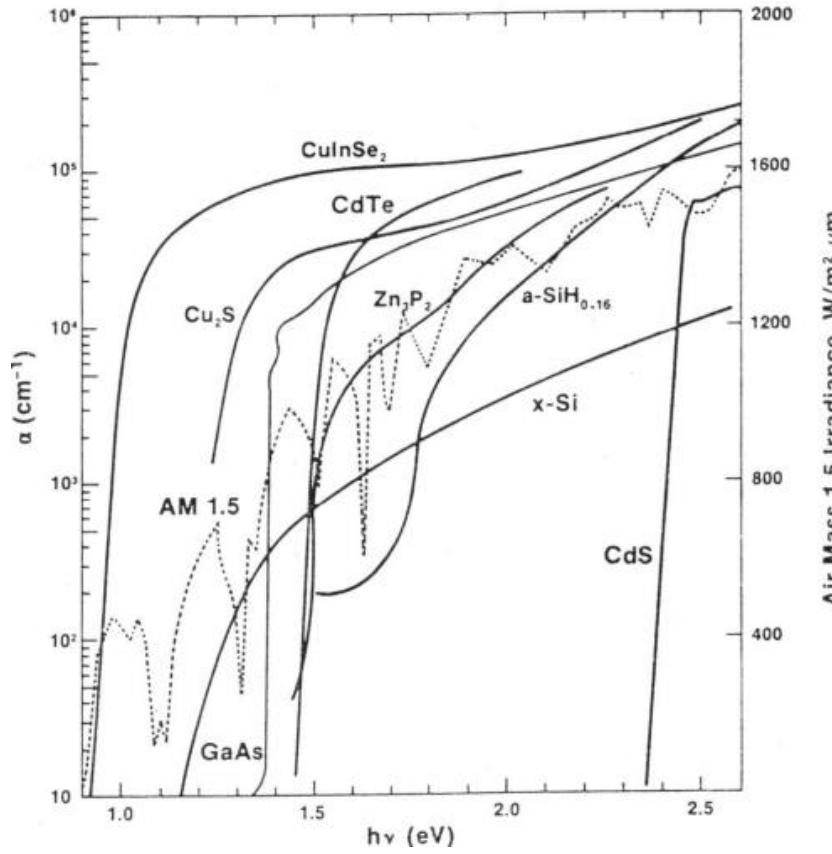


- Si - cristalino
 - Si - policristalino
 - Si - amorfó GaAs
 - CuInSe₂
 - CuIn_{1-x}GaxSe₂
 - CuInS₂
 - CdTe
 - Cu₂S
 - Cu₂O
 - TiO₂ -organicamente activado
 - Polímeros semicondutores
 - etc

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

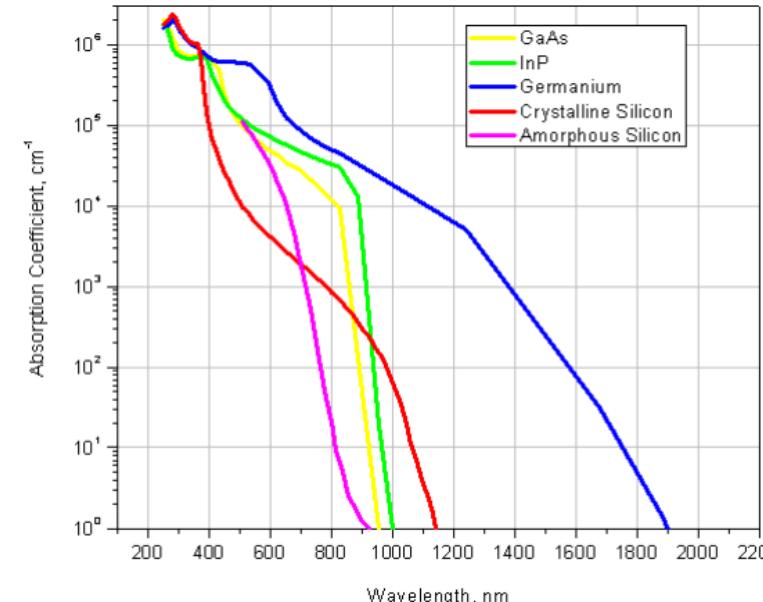
Mérito de vários materiais



$$G = \alpha N_0 e^{-\alpha x}$$

G=taxa temporal de produção de pares eletrão-lacuna por unidade de volume.

No=fluxo de fotões à entrada do material em (fotões/area/sec)



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

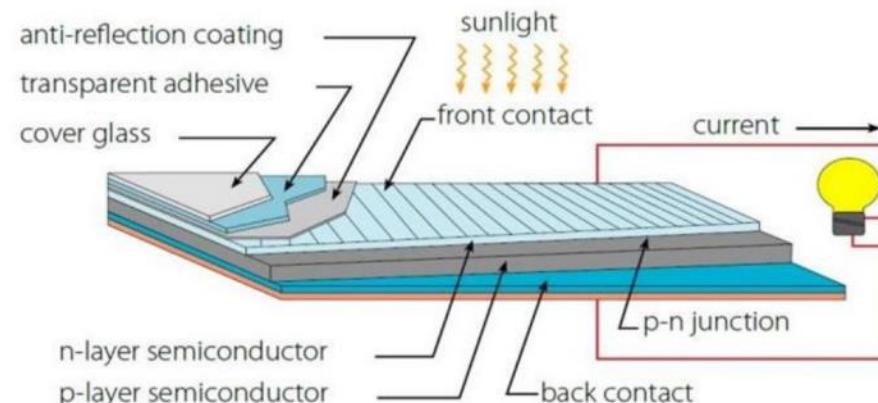


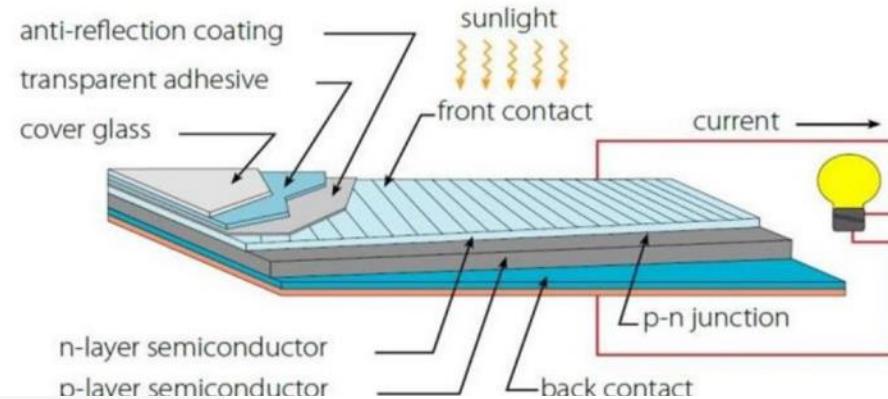
Table 1: Electrical Characteristics¹

Model	Typical Electrical Data at STC: 25° C, 1000 W/m ² and AM 1.5						
	SPR-E-Flex-50	SPR-E-Flex-100	SPR-E-Flex-110	SPR-E-Flex-170 (4x12)	SPR-E-Flex-170 (6x8)		
Nominal Power (P _{nom})	50 W	100 W	110 W	170 W	170 W		
Power Tolerance	+/-5%	+6/-3%	+6/-3%	+/-3%	+/-3%		
Rated Voltage (V _{mpp})	17.7 V	17.1 V	18.8 V	29.9 V	29.4 V		
Rated Current (I _{mpp})	2.8 A	5.9 A	5.9 A	5.79 A	5.84 A		
Open circuit voltage (V _{oc})	21.5 V	21.4 V	22.8 V	34.8 V	34.6 V		
Short circuit current (I _{sc})	3.1 A	6.3 A	6.3 A	6.10 A	6.15 A		
Power Temp Coefficient	-0.35%/ [°] C		-0.30%/ [°] C	-0.30%/ [°] C			
Voltage Temp Coefficient	-58.9 mV/ [°] C		-55.8 mV/ [°] C	-83.7 mV/ [°] C			
Current Temp Coefficient	2.6 mA/ [°] C		3.5 mA/ [°] C	3.5 mA/ [°] C			
Max. System Voltage	45V						
Series Fuse Rating	15 A						

Rated electrical characteristics are within 10% of measured values at Standard Test Conditions of: 1000W/m², 25°C cell temperature and solar spectral irradiation of AM 1.5 spectrum.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica



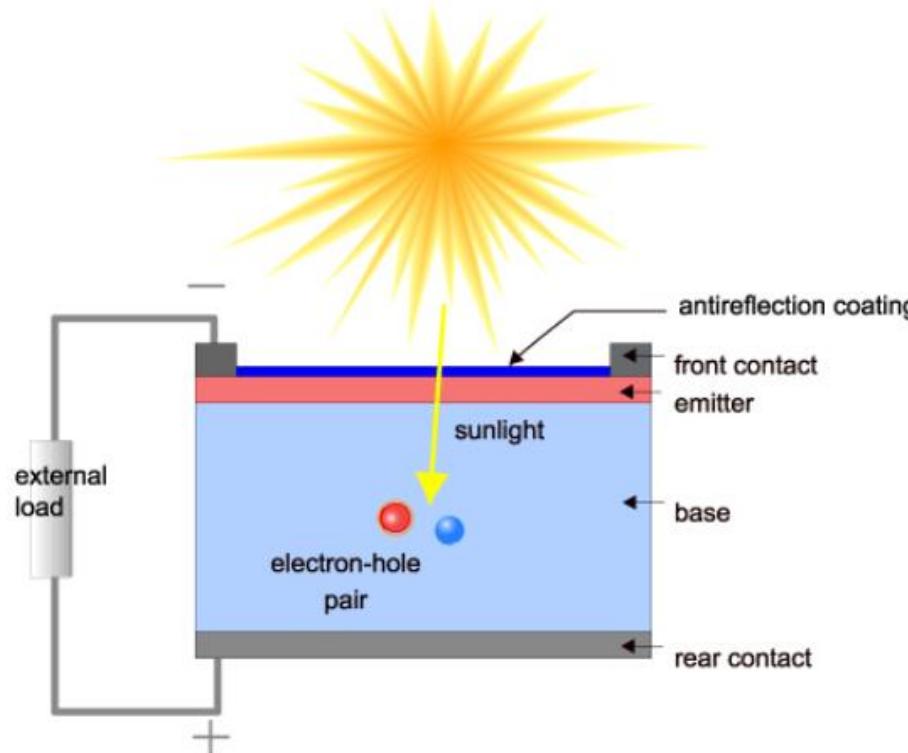
Product Characteristics

Model No.	SR-72M545HLP <small>RO</small>	SR-72M550HLP <small>RO</small>	SR-72M555HLP <small>RO</small>	SR-72M560HLP <small>RO</small>	SR-72M565HLP <small>RO</small>	Thermal Ratings
Warranty	12 Years					Operating Temperature Range
Product Warranty	10 Years of 90% Output Power, 25 Years of 84.8% Output Power					Temperature Coefficient of Pmax
Power Warranty						Temperature Coefficient of Voc
Electrical Data at STC	Maximum Power (Pmax)	545 Wp	550 Wp	555 Wp	560 Wp	565 Wp
Voltage at Maximum Power (Vmpp)	40.86 V	40.99 V	41.12 V	41.25 V	41.38 V	Temperature Coefficient of Isc
Current at Maximum Power (Impp)	13.34 A	13.42 A	13.5 A	13.58 A	13.66 A	0.05 %/°C
Open Circuit Voltage (Voc)	49.5 V	49.65 V	49.81 V	49.97 V	50.13 V	Maximum Ratings
Short Circuit Current (Isc)	14.04 A	14.13 A	14.21 A	14.29 A	14.38 A	Maximum System Voltage
Panel Efficiency	21.12 %	21.31 %	21.51 %	21.7 %	21.9 %	1500 V
Power Tolerance (Positive)	+ 5 %	+ 5 %	+ 5 %	+ 5 %	+ 5 %	Series Fuse Rating
	Standard Test Conditions (STC): air mass AM 1.5, irradiance 1000W/m ² , cell temperature 25°C					25 A
Material Data	Panel Dimension (H/W/D)	2278x1133x35 mm				
Weight	28 kg					Cell Type
Cell Size	182x182 mm					Monocrystalline
Cell Number	144					Glass Type
Glass Thickness	Tempered					3.2 mm
	20					

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar



Seção transversal de uma célula solar:

- Emissor e Base são termos históricos que não têm significado nas células solares modernas.
- Ainda os usamos porque não existem alternativas concisas. Emissor e Base estão muito enraizados na literatura e são termos úteis para mostrar a função das camadas numa junção p-n.
- A luz entra primeiro no emissor.
- O emissor geralmente é fino para manter a região de depleção próxima de onde a luz é fortemente absorvida e a base geralmente é espessa o suficiente para absorver a maior parte da luz.

As etapas básicas na operação de uma célula solar são:

- a geração de portadores gerados pela luz;
- a coleta dos condutores gerados pela luz para gerar uma corrente;
- a geração de uma grande tensão na célula solar;
- a dissipação de potência na carga e nas resistências parasitas.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

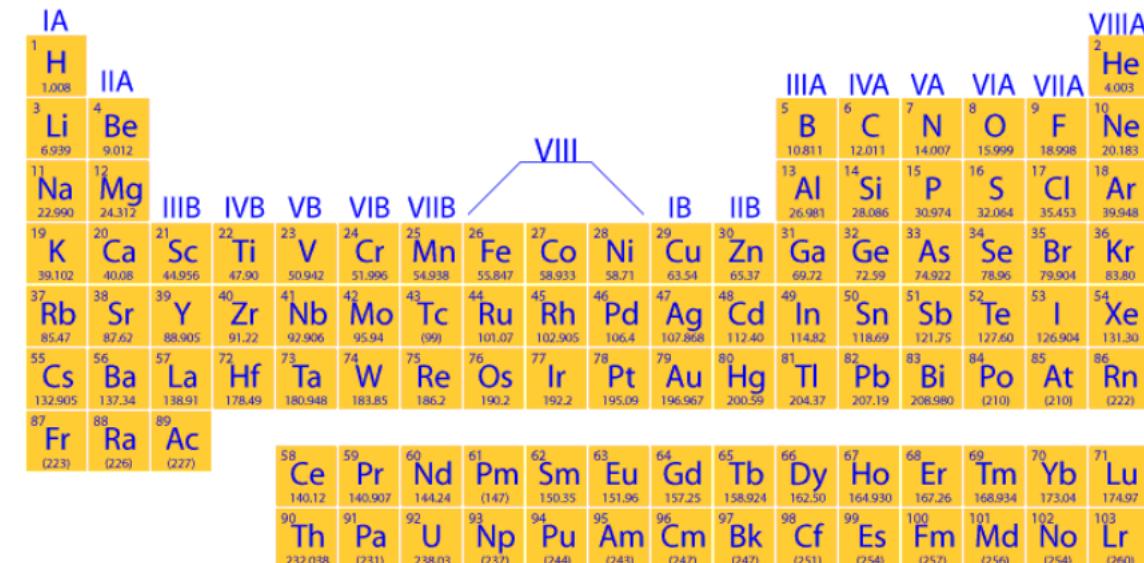
Materiais semicondutores

Os materiais semicondutores vêm de diferentes grupos da tabela periódica, mas compartilham certas semelhanças.

As propriedades do material semicondutor estão relacionadas às suas características atómicas e mudam de grupo para grupo.

Ao longo dos anos, cientistas aproveitam essas diferenças para melhorar o projeto e escolher o material ideal para uma aplicação fotovoltaica.

Os átomos num semicondutor são materiais do grupo IV da tabela periódica, ou de uma combinação do grupo III e do grupo V (chamados de semicondutores III-V), ou de combinações do grupo II e do grupo VI (chamados de semicondutores II-VI).



1 IA	2 IIA	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIIB	8 VIII	9 IB	10 IIB	11 IIIA	12 IVA	13 VA	14 VIA	15 VIIA	16 VIIIA	17 He											
H 1.008	Be 9.012									B 10.811	C 12.013	N 14.007	O 15.999	F 18.998	Ne 20.183												
Li 6.939	Mg 24.312									Al 26.981	Si 28.086	P 30.974	S 32.064	Cl 35.453	Ar 39.948												
Na 22.990										K 39.102	Ca 40.08	Sc 44.956	Ti 47.90	V 50.942	Cr 51.996	Mn 54.938	Fe 55.847	Co 58.933	Ni 58.71	Cu 63.54	Zn 65.37	Ga 69.72	Ge 72.59	As 74.922	Se 78.95	Br 79.904	Kr 83.80
										Rb 85.47	Sr 87.62	Y 88.905	Zr 91.22	Nb 92.906	Tc 95.94	(99)	Ru 101.07	Rh 102.905	Pd 106.4	Ag 107.868	Cd 112.40	In 114.82	Sn 118.69	Sb 121.75	Te 127.60	I 126.904	Xe 131.30
										Cs 132.905	Ba 137.34	La 138.91	Hf 178.49	Ta 180.948	W 183.85	Re 186.2	Os 190.2	Ir 192.2	Pt 195.09	Au 196.967	Hg 200.59	Tl 204.37	Pb 207.19	Bi 208.980	Po 210.0	At 210.0	Rn 222.0
										Fr 223.0	Ra 226.0	Ac 227.0															
										Ce 140.12	Pr 140.07	Nd 144.24	Pm 147.0	Sm 150.35	Eu 151.96	Gd 157.25	Tb 158.924	Dy 162.50	Ho 164.930	Er 167.26	Tm 168.934	Yb 173.04	Lu 174.97				
										Th 232.038	Pa 231.0	U 238.03	Np 237.0	Pu 244.0	Am 243.0	Cm 247.0	Bk 247.0	Cf 251.0	Es 254.0	Fm 257.0	Md 256.0	No 254.0	Lr 260.0				

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Materiais semicondutores

Como diferentes semicondutores são compostos de elementos de diferentes grupos da tabela periódica, as propriedades variam entre os semicondutores.

O silício, que é um grupo IV, é o material semicondutor mais usado, pois forma a base para chips de circuitos integrados e é a tecnologia mais madura e a maioria das células solares também são baseadas em silício.

Um semicondutor pode ser de um único elemento, como Si ou Ge, um composto, como GaAs, InP ou CdTe, ou uma liga, como $\text{SixGe}(1-x)$ ou $\text{Al}_x\text{Ga}(1-x)\text{As}$, onde x é a fração do elemento específico e varia de 0 a 1.

VIIIA						
		III A	IV A	V A	VIA	VIIA
		5 B 10.811	6 C 12.011	7 N 14.007	8 O 15.999	9 F 18.998
		13 Al 26.982	14 Si 28.086	15 P 30.974	16 S 32.064	17 Cl 35.453
		IB 29 Cu 63.54	IIB 30 Zn 65.37	31 Ga 69.72	32 Ge 72.59	33 As 74.922
		34 Se 78.96	35 Br 79.909	36 Kr 83.80		
		47 Ag 107.870	48 Cd 112.40	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75
		52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30		
		79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.19	83 Bi 208.980
		84 Po (210)	85 At (210)	86 Rn (222)		

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoeletrica

Estrutura de um semicondutor

Semicondutores são compostos de átomos ligados entre si para formar uma estrutura uniforme

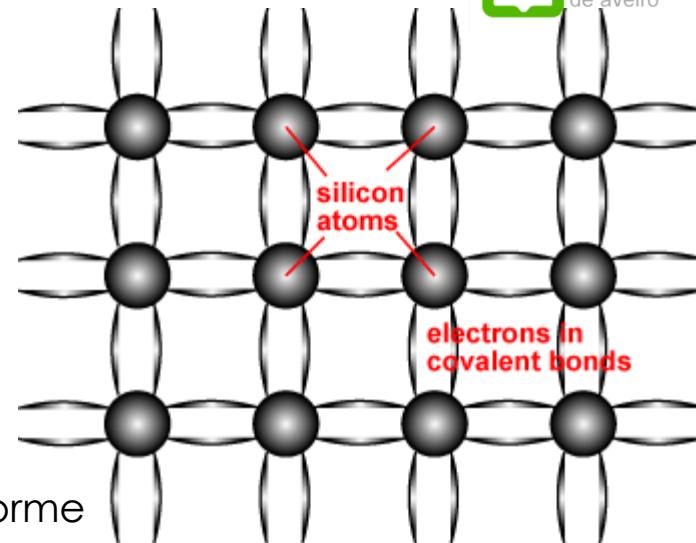
Cada átomo de silício possui quatro eletrões de valência que são compartilhados, formando ligações covalentes com os quatro átomos de Si circundantes. O número de eletrões e protões é igual, de modo que o átomo é eletricamente neutro.

Um átomo individual consiste num núcleo composto por um núcleo de protões (partículas com carga positiva) e neutrões (partículas sem carga) cercado por eletrões .

Uma ligação covalente consiste em dois átomos “compartilhando” um par de eletrões. Cada átomo forma 4 ligações covalentes com os 4 átomos circundantes.

- Portanto, entre cada átomo e os 4 átomos circundantes, 8 eletrões estão a ser compartilhados.

Compreender como esses átomos estão organizados é vital para compreender as propriedades dos materiais de diferentes semicondutores e a melhor forma de projetá-los.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

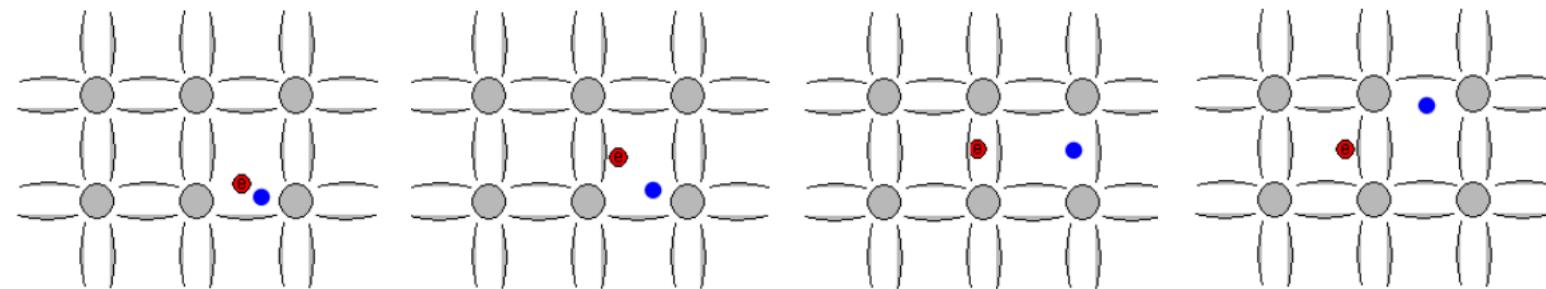
Condução num semicondutor

Os semicondutores atuam como isolantes em baixas temperaturas e como condutores em temperaturas mais altas.

A condução ocorre em temperaturas mais altas porque os eletrões que circundam os átomos semicondutores podem romper sua ligação covalente e mover-se livremente pela rede.

A propriedade condutiva dos semicondutores constitui a base para a compreensão de como podemos usar esses materiais em dispositivos elétricos.

O espaço deixado pelos eletrões permite que uma ligação covalente se move de um eletrão para outro, parecendo assim ser uma carga positiva movendo-se através da rede cristalina. Esse espaço vazio é chamado de "buraco" e é semelhante a um eletrão, mas com carga positiva.



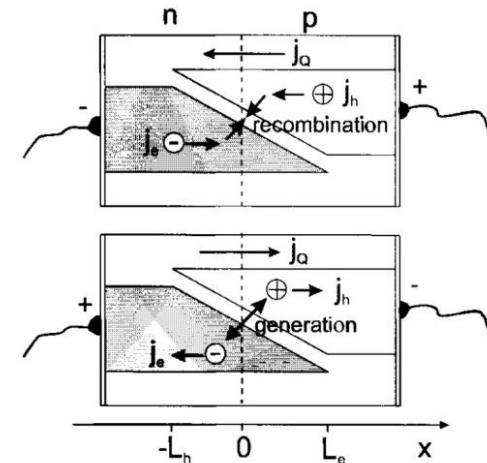
Os parâmetros mais importantes dum material semicondutor para operação de células solares são:

- o bandgap;
- o número de portadores livres (eletrões ou lacunas) disponíveis para condução;
- a "geração" e recombinação de portadores livres (eletrões ou lacunas) em resposta à luz que incide sobre o material.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

Definição de bandgap

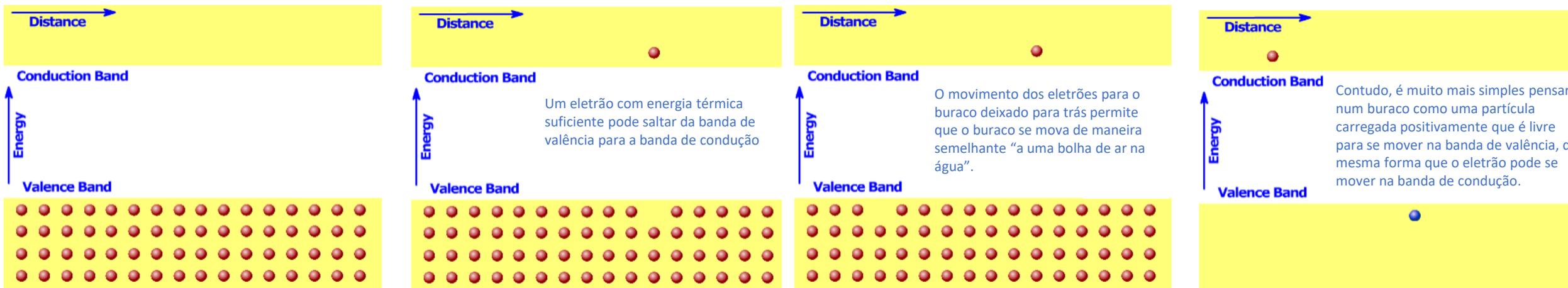


Bandgap é a quantidade mínima de energia necessária para um eletrão libertar-se do seu estado ligado.

Quando a energia do gap é atingida, o eletrão é excitado para um estado livre e pode, portanto, participar da condução.

O bandgap determina quanta energia do sol é necessária para a condução, bem como quanta energia é gerada.

Um buraco é criado onde o eletrão estava anteriormente ligado. Este buraco também participa da condução.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Definição de bandgap

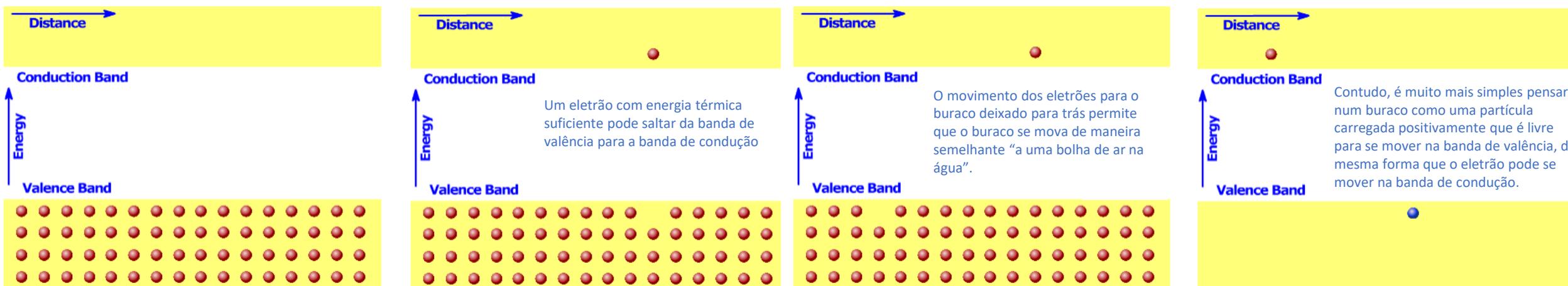
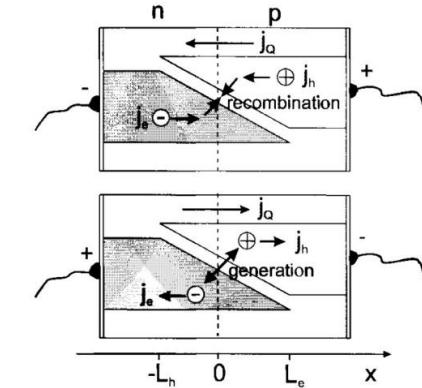
O bandgap de um semicondutor é a energia mínima necessária para excitar um eletrão que está preso no seu estado fundamental para um estado livre onde ele pode participar da condução.

A estrutura de bandas de um semicondutor fornece a energia dos eletrões no eixo y e é chamada de "diagrama de bandas".

O nível de energia mais baixo de um semicondutor é chamado de "banda de valência" (EV) e o nível de energia no qual um eletrão pode ser considerado livre é chamado de "banda de condução" (EC).

O bandgap é o intervalo de energia entre o estado ligado e o estado livre, entre a banda de valência e a banda de condução.

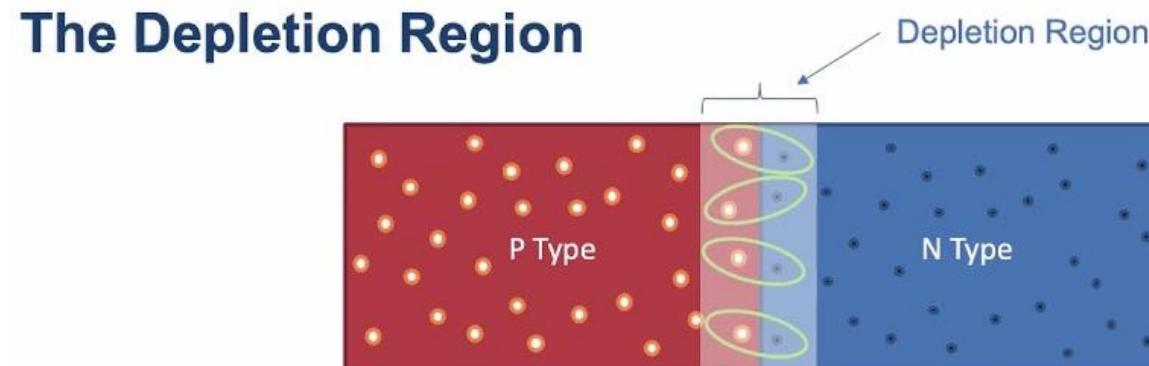
Conclusão: o bandgap é a mudança mínima na energia necessária para excitar o eletrão para que ele possa participar da condução.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Definição de zona de depleção



- Devido à difusão, eletrões e buracos movem-se e irão combinar para formar moléculas “completas”.
- Isso forma uma região onde não há eletrões.
- Isso é chamado de região de depleção.
- O campo elétrico da região de depleção depende diretamente do bandgap do semicondutor:
 - quando a luz é emitida por um eletrão, há uma mudança na energia do eletrão. Esta mudança na energia está relacionada ao campo elétrico da região de depleção.

A largura da região de depleção depende da quantidade de impurezas adicionadas ao semicondutor. Geralmente, a espessura da camada de depleção é de 1 µm

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

A geração de corrente numa célula solar envolve dois processos principais:

- 1) O primeiro processo é a absorção de fotões incidentes para criar pares eletrão-buraco.

Pares eletrão-buraco serão gerados na célula solar desde que o fotão incidente tenha uma energia maior que a do bandgap.

No entanto, os eletrões (no material do tipo p) e os buracos (no material do tipo n) são metaestáveis e só existirão, em média, por um período de tempo igual ao tempo de vida do portador minoritário antes de se recombinarem.

Se o portador se recombinar, o par eletrão-buraco gerado pela luz será perdido e nenhuma corrente ou energia poderá ser gerada.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

A geração de corrente numa célula solar envolve dois processos principais:

2) Um segundo processo, a coleta (separação) desses portadores pela junção pn, evita essa recombinação usando uma junção pn para separar espacialmente o eletrão e o buraco.

Os portadores são separados pela ação do campo elétrico existente na junção pn.

Se o portador minoritário gerado pela luz atingir a junção p-n, ele será varrido através da junção pelo campo elétrico na junção, onde agora é o portador majoritário.

Se o emissor e a base da célula solar estiverem conectados entre si (isto é, se a célula solar estiver em curto-circuito), os portadores de luz gerados fluem através do circuito externo.

Em suma:

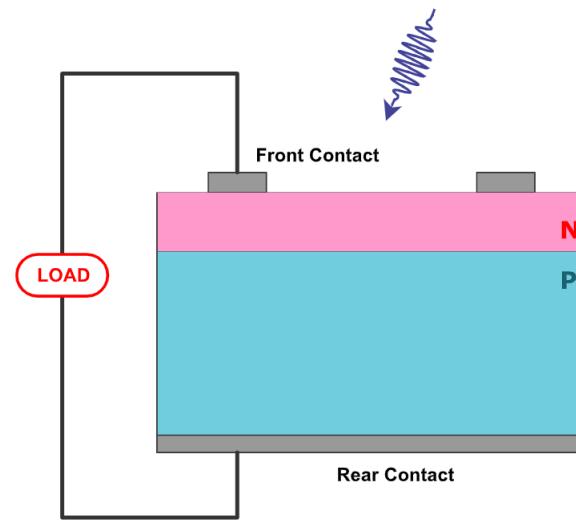
- Célula é produzida a partir da união desses dois tipos de semicondutor, com o tipo-n sobre o tipo-p, para que, ao receberem os fotões da luz, os eletrões da camada negativa migrem para a camada positiva, criando a corrente elétrica - energia solar fotovoltaica.

NOTA: o fluxo contínuo de eletrões entre as camadas negativa e positiva do semicondutor não acontece naturalmente, pois na área de junção forma-se um campo elétrico que interrompe esse processo. Então, as camadas são conectadas externamente para permitir a corrente contínua de eletrões.

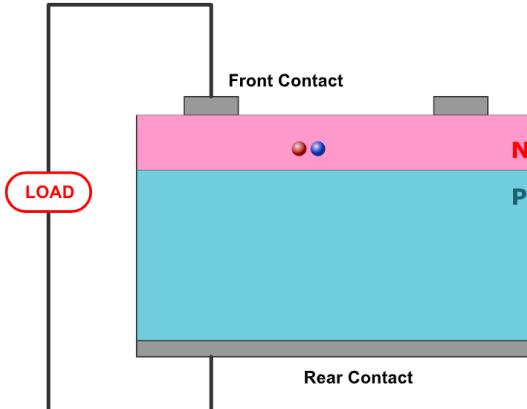
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

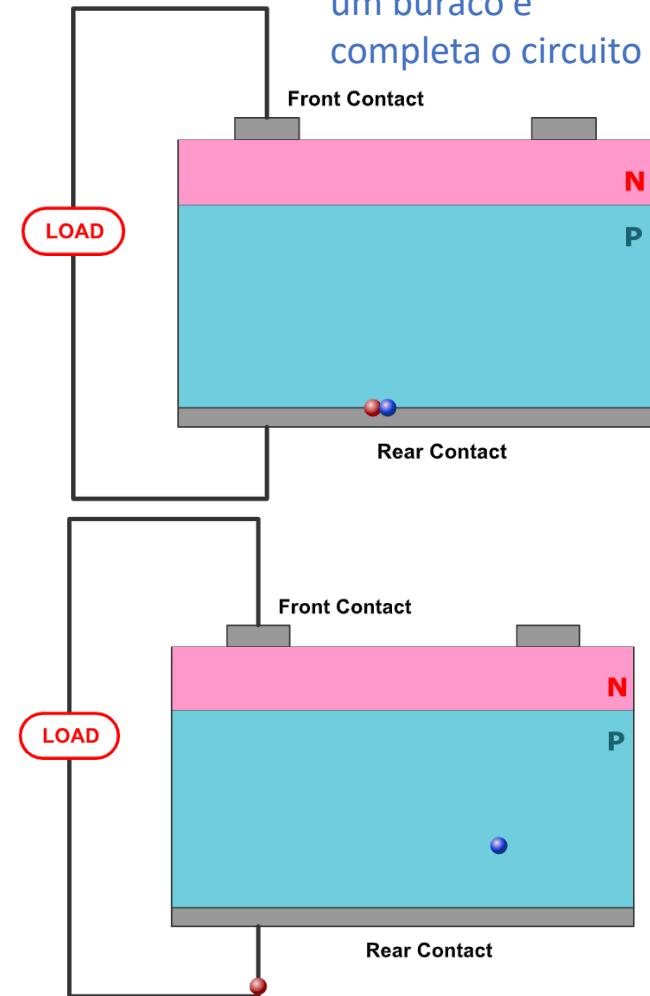
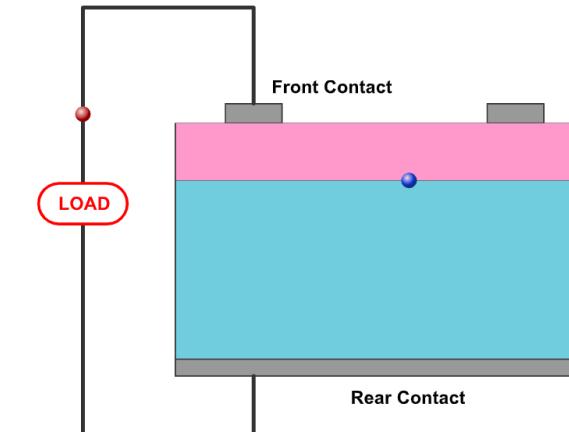
Estrutura de uma célula solar



A absorção de um fotão cria um par eletrão-lacuna



Idealmente, a portadora minoritária (eg. buraco) atravessa a junção e torna-se uma portadora maioritária



O fluxo de curto-circuito ideal de eletrões e lacunas numa junção p-n. Os portadores minoritários não podem cruzar a fronteira do metal semicondutor e, para evitar a recombinação, devem ser coletados (separados) pela junção, se quiserem contribuir para o fluxo de corrente.

Depois de passar através do load o eletrão encontra um buraco e completa o circuito

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

A "probabilidade de coleta" descreve a probabilidade de que um portador gerado pela absorção de luz numa determinada região do dispositivo seja coletado pela junção pn e contribua para a corrente gerada pela luz.

A probabilidade depende da distância que um portador gerado pela luz deve percorrer, em comparação com o comprimento de difusão.

A probabilidade de coleta também depende das propriedades da superfície do dispositivo.

A probabilidade de coleta de portadores gerados na região de depleção é unitária, pois o par eletrão-buraco é rapidamente separado pelo campo elétrico e recombinaido novamente.

Longe da junção, a probabilidade de coleta cai. Se o portador for gerado a mais de um comprimento de difusão da junção, então a probabilidade de coleta deste portador é bastante baixa.

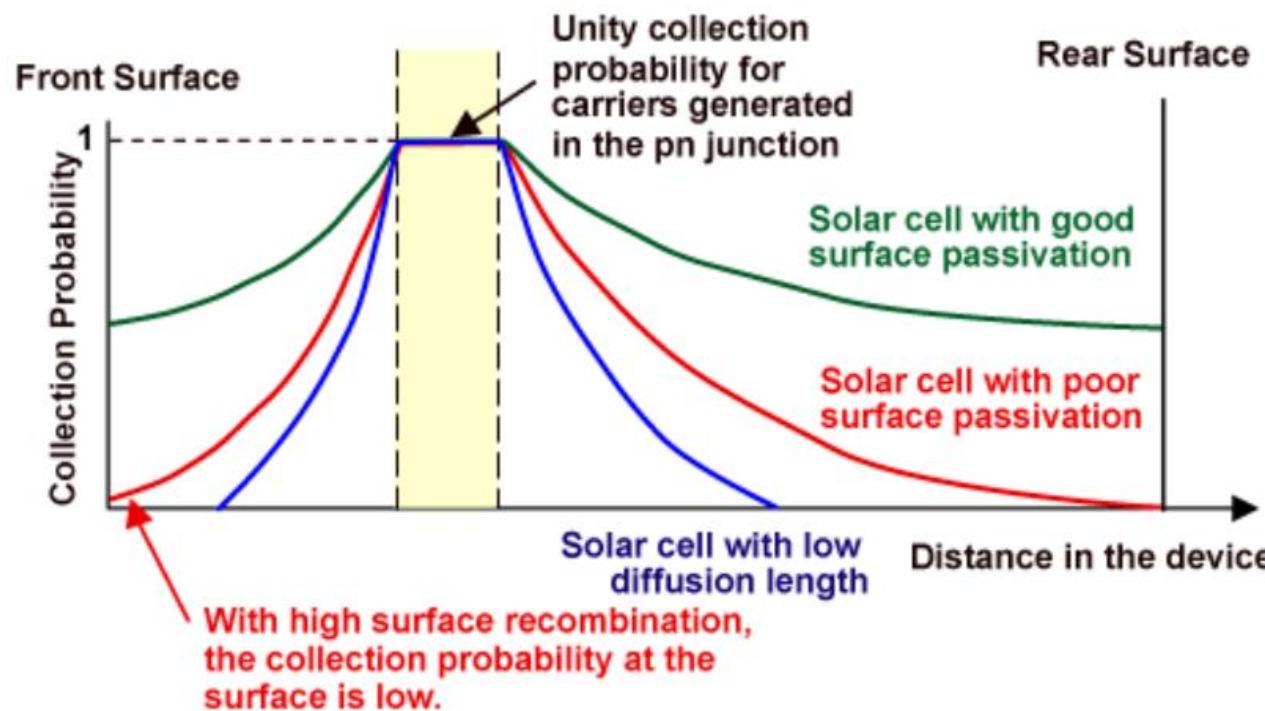
Da mesma forma, se o portador for gerado mais próximo de uma região, como uma superfície com maior recombinação do que a junção, então o portador irá recombinar-se.

O impacto da passivação da superfície e do comprimento da difusão na probabilidade de coleta é ilustrado a seguir

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar



Qualquer processo que tente reduzir a taxa de recombinação superficial é conhecido como passivação superficial.

A recombinação é um processo complementar que requer a presença de um eletrão e de um buraco e, na superfície, estados de interface adicionais também participam do processo como locais que facilitam a captura.

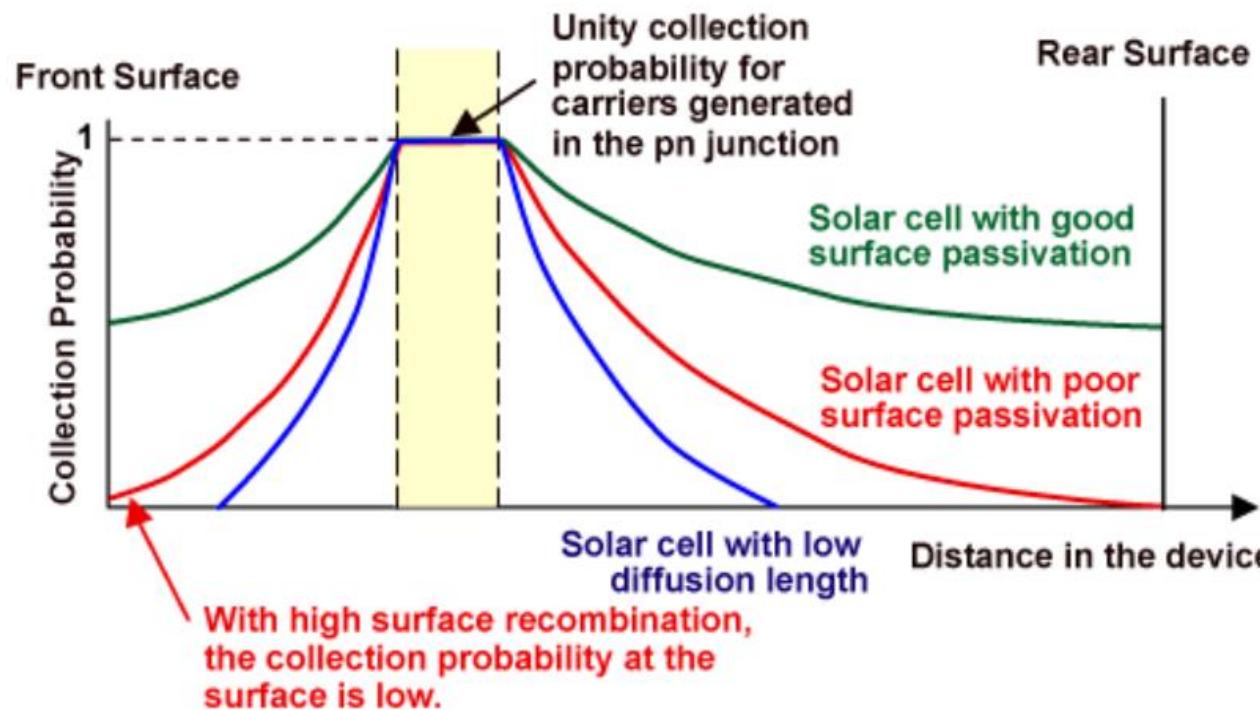
Os métodos de passivação de superfície podem ser categorizados em duas estratégias amplas:

- Reduza o número de sítios de interface na superfície.
- Reduza a população de eletrões ou buracos na superfície.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar



Para um dispositivo com dopagem uniforme e junção abrupta, a probabilidade de coleta é governada pela equação:

$$CP = \cosh \frac{x}{L} - \frac{\frac{SL}{D} \cosh \frac{W}{L} + \sinh \frac{W}{L}}{\frac{SL}{D} \sinh \frac{W}{L} + \cosh \frac{W}{L}} \sinh \frac{x}{L}$$

L é o comprimento de difusão dos portadores minoritários em cm, S é a velocidade de recombinação da superfície em cm/s, D é a difusividade dos portadores minoritários em cm²/s e W é a largura (espessura) da camada. x é a distância da junção, não a profundidade no dispositivo.

Para um comprimento de difusão muito curto ($L \ll W$) ou quando $SL/D = 1$, temos a simplificação:

$$CP = \exp \frac{-x}{L}$$

$$L = \sqrt{D\tau}$$

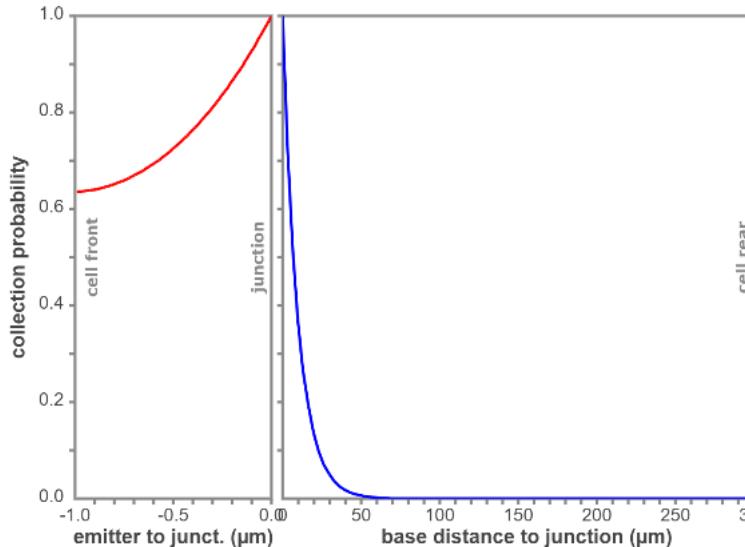
τ é o tempo de vida dos portadores minoritários. No Si, L é de cerca de 200-300 μm e τ é de cerca de 1 ms.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar

Cálculo da probabilidade de coleta: comprimento de difusão no emissor está em vermelho e na base em azul.

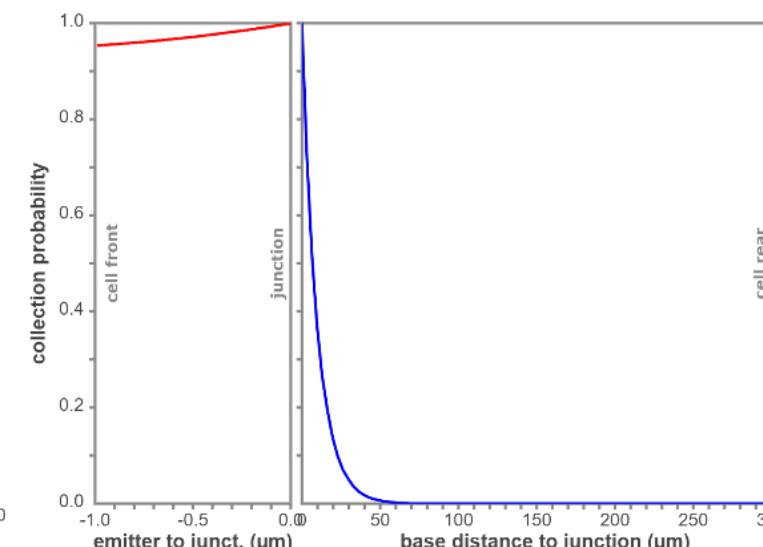


Emitter diffusion length, emitterL = 1.00 μm

Emitter surface recombination, emitterS = 1000.0 cm/s

Base diffusion length, Lbase = 10.0 μm

Base surface recombination, baseS = 1000.0 cm^2/s

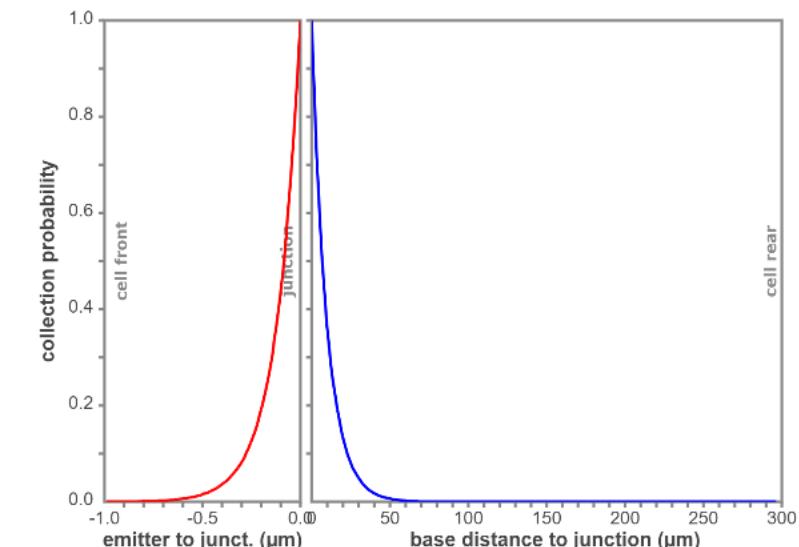


Emitter diffusion length, emitterL = 4.90 μm

Emitter surface recombination, emitterS = 1096.5 cm/s

Base diffusion length, Lbase = 10.0 μm

Base surface recombination, baseS = 1380.4 cm^2/s



Emitter diffusion length, emitterL = 0.12 μm

Emitter surface recombination, emitterS = 1096.5 cm/s

Base diffusion length, Lbase = 10.0 μm

Base surface recombination, baseS = 1380.4 cm^2/s

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – probabilidade de coleta

A probabilidade de coleta em conjunto com a taxa de geração na célula solar determina a corrente gerada pela luz a partir da célula solar.

A corrente gerada pela luz é a integração, em toda a espessura do dispositivo, da taxa de geração num determinado ponto do dispositivo, multiplicada pela probabilidade de coleta naquele ponto.

A equação para a densidade de corrente gerada pela luz (J_L), com taxa de geração arbitrária ($G(x)$) e probabilidade de coleta ($CP(x)$), é mostrada abaixo, assim como a taxa de geração em silício devido ao AM1.5 espetro solar:

$$J_L = q \int_0^W G(x) CP(x) dx$$

$$J_L = q \int_0^W \left[\int H_0 \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} d\lambda \right] CP(x) dx$$

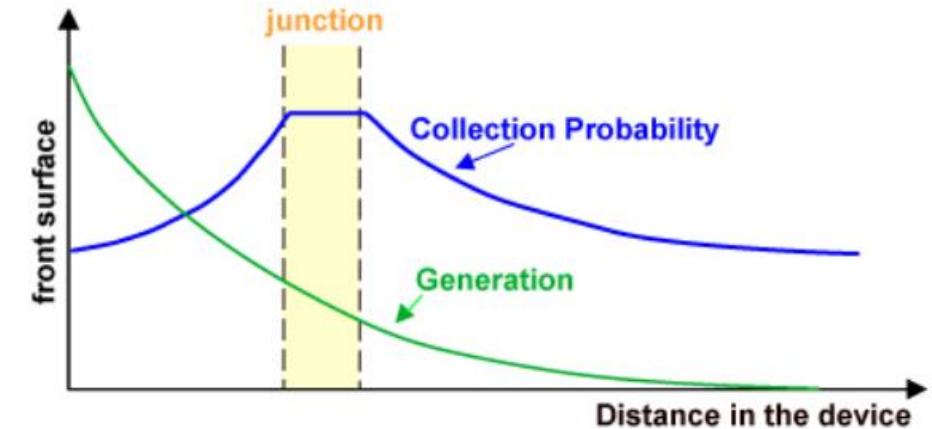
q é a carga do eletrão;

W é a espessura do dispositivo;

$\alpha(\lambda)$ é o coeficiente de absorção;

H_0 é o número de fotões em cada comprimento de onda.

A corrente gerada pela luz depende da geração de portadores e da probabilidade de coleta desses portadores

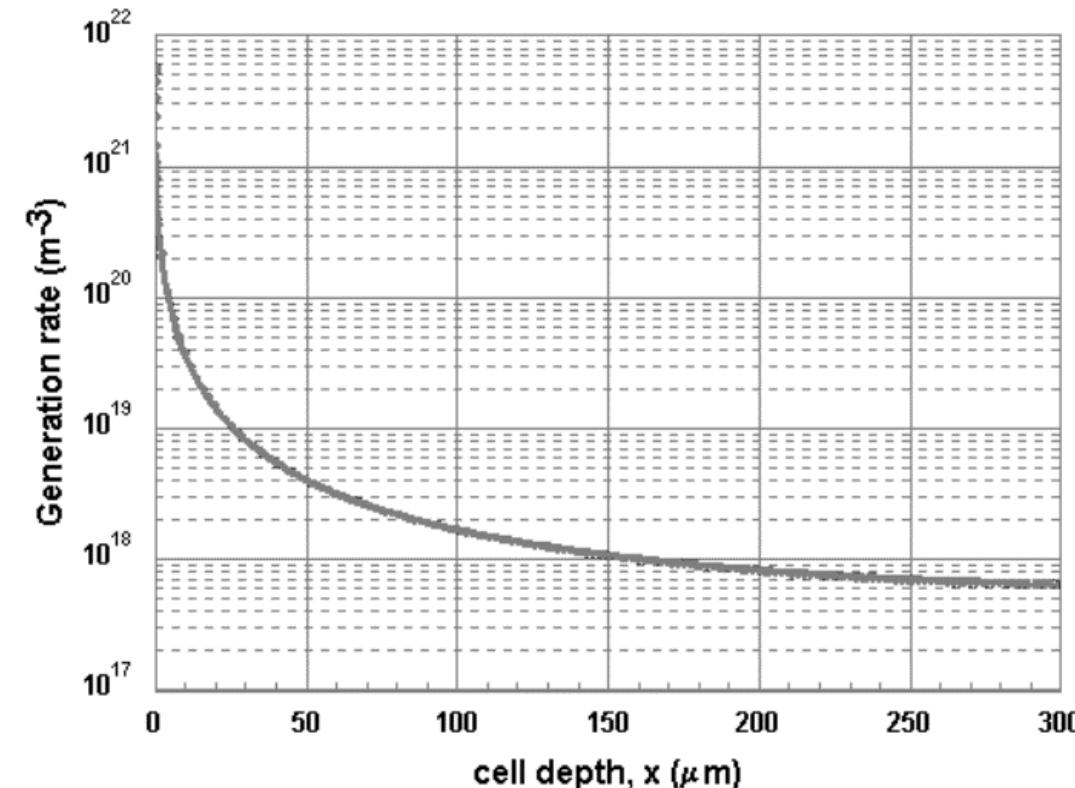


Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – probabilidade de coleta

Perfil de geração em silício devido ao espectro AM1.5. Observe que a geração de portadores é maior na superfície da célula solar, tornando os dispositivos fotovoltaicos muito sensíveis às propriedades da superfície.



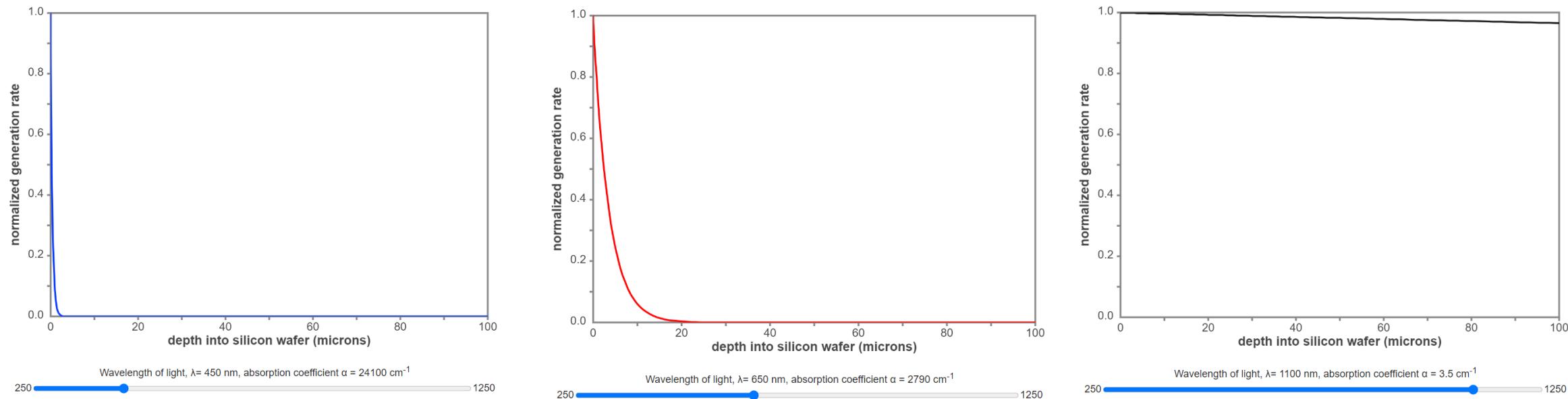
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – probabilidade de coleta

Uma probabilidade de coleta não uniforme causará uma dependência espectral na corrente gerada pela luz.

Exemplo: nas superfícies, a probabilidade de coleta é menor do que na junção. Comparando as taxas de geração de luz azul, vermelho e infravermelha, a luz azul é quase completamente absorvida nos primeiros décimos de μm no silício. Se a probabilidade de coleta na superfície frontal é baixa, nem a luz azul no espectro solar contribui para a corrente gerada pela luz.



A criação de pares eletrão-buraco para diferentes comprimentos de onda de luz no silício. A luz azul de $0,45 \mu\text{m}$ tem um alto coeficiente de absorção logo é absorvida muito próximo da superfície frontal. 38

Produção de Energia

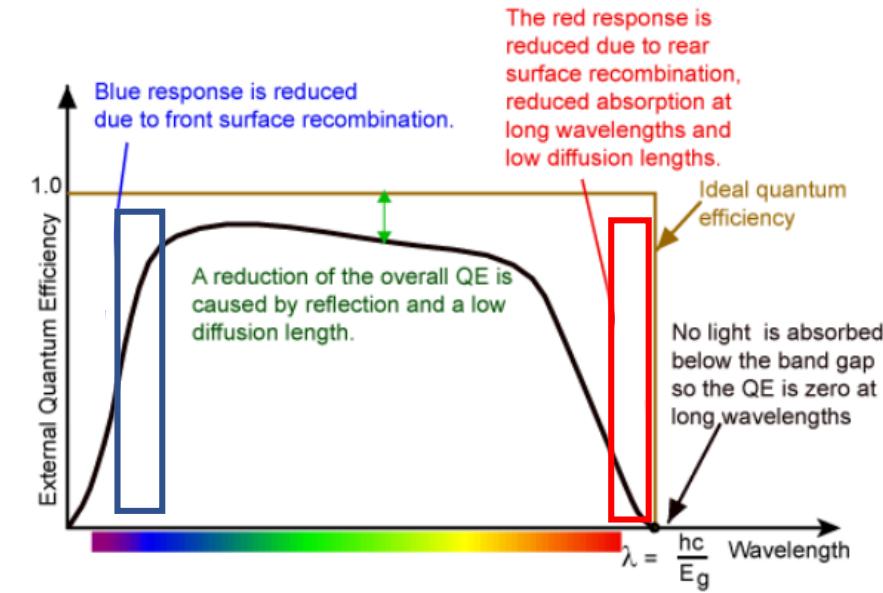
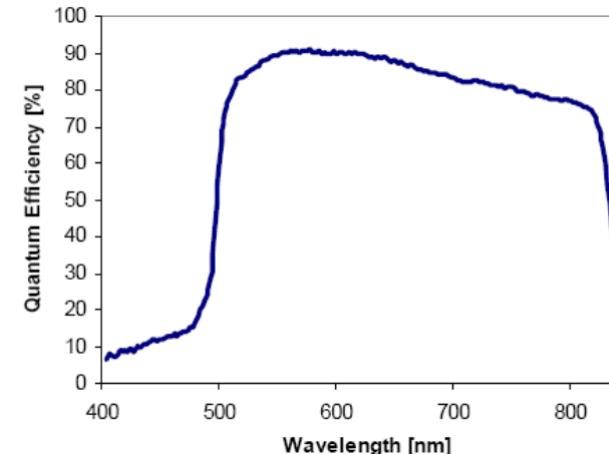
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – eficiência quântica

A "eficiência quântica" (QE) é a razão entre o número de portadores coletados pela célula solar e o número de fotões de uma determinada energia incidente na célula solar.

A QE pode ser dada em função do comprimento de onda ou da energia. Se todos os fotões de um determinado comprimento de onda forem absorvidos e os portadores minoritários resultantes forem coletados, então a QE nesse comprimento de onda específico será unitária. A QE para fotões com energia abaixo do band gap é zero. Uma curva de QE para uma célula solar ideal é mostrada abaixo:

A eficiência quântica geralmente não é medida muito abaixo de 350 nm, pois a potência do espetro AM1.5 contida nesses comprimentos de onda baixos é baixa.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – eficiência quântica

Embora a eficiência quântica tenha idealmente a forma quadrada mostrada atrás, a eficiência quântica para a maioria das células solares é reduzida devido aos efeitos de recombinação.

Os mesmos mecanismos que afetam a probabilidade de coleta também afetam a eficiência quântica.

Exemplo:

Passivação da superfície frontal afeta os portadores gerados perto da superfície, e como a luz azul é absorvida muito perto da superfície, a alta recombinação da superfície frontal afetará a porção "azul" da eficiência quântica.

A luz verde é absorvida na maior parte de uma célula solar e um comprimento de difusão baixo afetará a probabilidade de coleta da maior parte da célula solar e reduzirá a QE na porção verde do espectro.

A QE pode ser vista como a probabilidade de coleta devido ao perfil de geração dum único comprimento de onda, integrado na espessura do dispositivo e normalizado para o número incidente de fotões naquele comprimento de onda.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – eficiência quântica

A QE "externa" de uma célula solar de silício inclui o efeito de perdas óticas, como transmissão e reflexão.

No entanto, muitas vezes é útil observar a QE da luz deixada após a perda da luz refletida e transmitida.

A QE "interna" refere-se à eficiência com a qual os fotões que não são refletidos ou transmitidos para fora da célula podem gerar portadores colecionáveis.

Ao medir a reflexão e a transmissão de um dispositivo, a curva de eficiência quântica externa pode ser corrigida para obter a curva de eficiência quântica interna.

Externa:

$$QE(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qF(\lambda)}$$

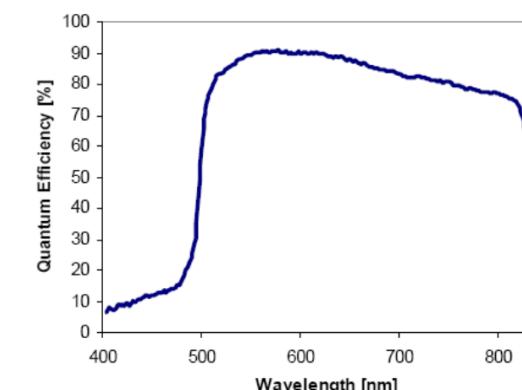
J_{sc} é a densidade de corrente de curto-círcito por unidade de largura de banda

F é o fluxo de fotões incidentes por unidade de largura de banda (Photons/cm²/s/μm)

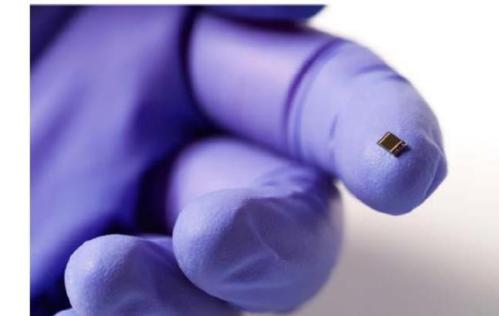
Interna:

$$IQE(\lambda) = \frac{J_{sc}(\lambda)}{qF(\lambda)(1 - R(\lambda))}$$

R é a refletividade da superfície da célula



4-junction cell with 44.7 % efficiency at 297 suns



World record solar cell with 44.7% efficiency, made up of four solar subcells based on III-V compound semiconductors for use in concentrator photovoltaics.
©Fraunhofer ISE

Produção de Energia

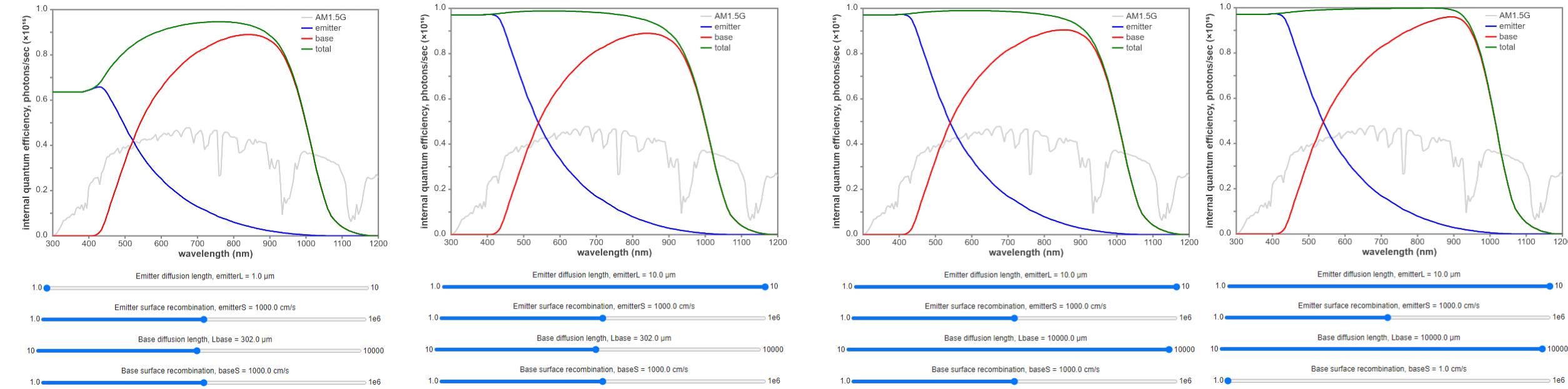
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – eficiência quântica

O efeito na recombinação da superfície e no comprimento da difusão na eficiência quântica interna de uma célula solar.

A espessura do emissor é de 1 μm , a espessura da base é de 300 μm (valores típicos)

Para comprimentos de difusão de base superiores à espessura do dispositivo de 300 μm , a velocidade de recombinação da superfície traseira tem um grande efeito no QE.



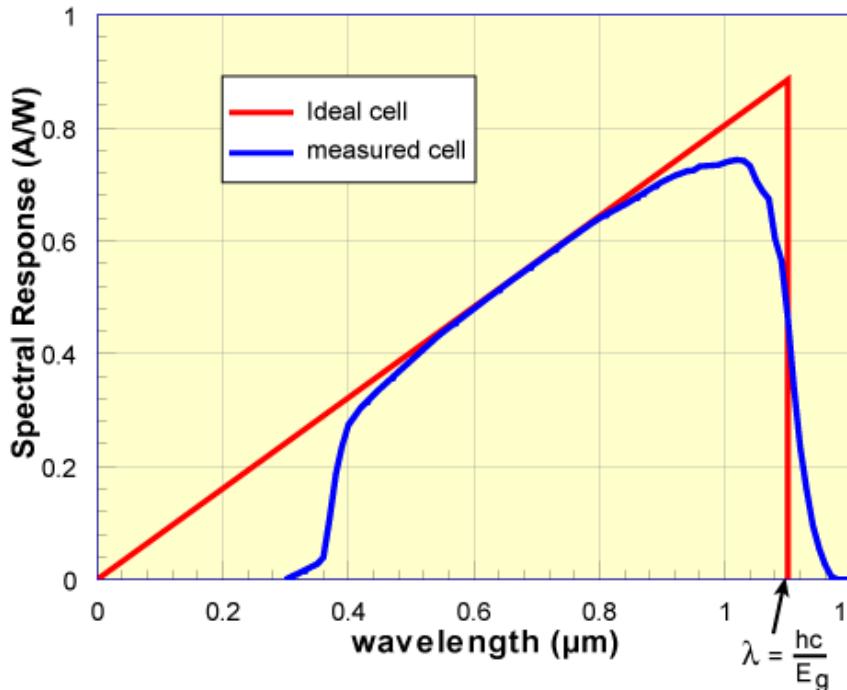
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – Resposta espectral

A resposta espectral é conceitualmente semelhante à QE. A QE fornece o número de eletrões emitidos pela célula solar em comparação com o número de fotões incidentes no dispositivo,

A resposta espectral é a razão entre a corrente gerada pela célula solar e a potência incidente na célula solar.



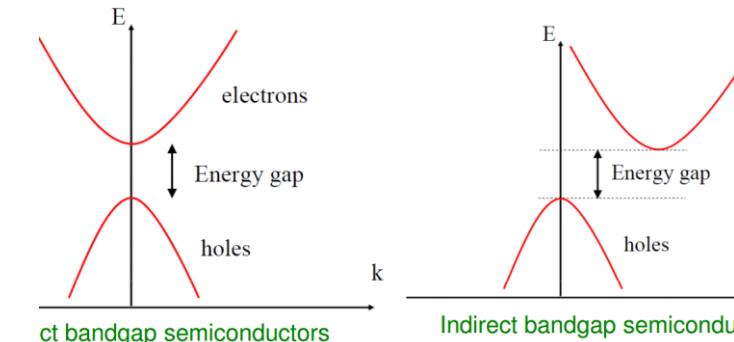
A resposta espectral de uma célula solar de silício sob vidro.

Em comprimentos de onda curtos, abaixo de 400 nm, o vidro absorve a maior parte da luz e a resposta da célula é muito baixa.

Em comprimentos de onda intermediários, a célula aproxima-se do ideal. Em comprimentos de onda longos, a resposta volta a zero.

O silício é um semicondutor de band gap indireto, portanto não há um corte acentuado no comprimento de onda correspondente ao band gap (por exemplo, = 1,12 eV).

O band gap é chamado de "direto" se: momento cristalino dos eletrões e lacunas for o mesmo tanto na banda de condução quanto na banda de valência – um eletrão pode emitir diretamente um fotão. "indireto": um fotão não pode ser emitido porque o eletrão deve passar por um estado intermediário e transferir momento para a rede cristalina.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – Resposta espectral

A resposta espectral ideal é limitada em comprimentos de onda longos pela incapacidade do semicondutor de absorver fotões com energias abaixo do band gap.

Este limite é o mesmo encontrado nas curvas de eficiência quântica.

No entanto, ao contrário da forma quadrada das curvas QE, a resposta espectral diminui em pequenos comprimentos de onda de fotões.

Nesses comprimentos de onda, cada fotão tem uma grande energia e, portanto, a proporção entre fotões e potência é reduzida.

Qualquer energia acima da energia do band gap não é utilizada pela célula solar e, em vez disso, vai para o aquecimento da célula solar.

A incapacidade de utilizar totalmente a energia incidente em altas energias e a incapacidade de absorver baixas energias de luz representa

- uma perda significativa de energia em células solares que consistem numa única junção pn.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – Resposta espectral

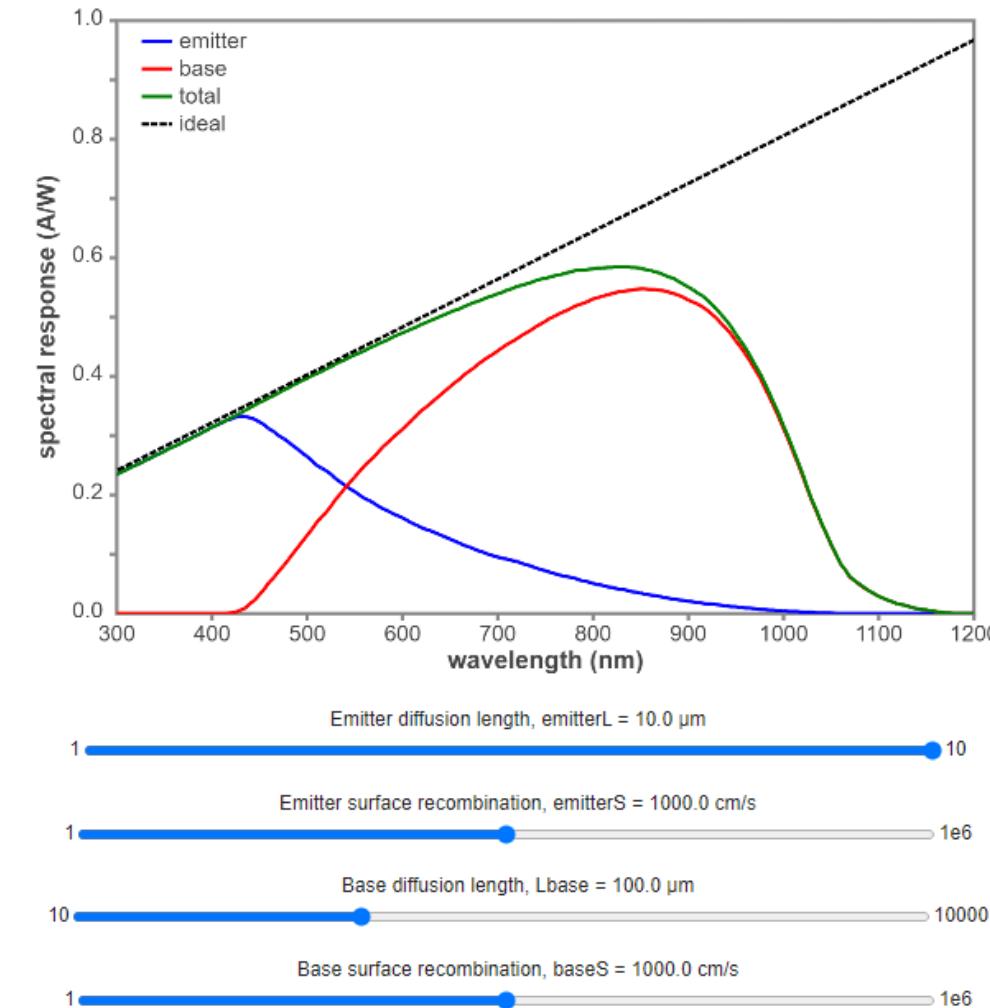
A resposta espectral e a QE são utilizadas na análise de células solares e a escolha depende da aplicação.

A resposta espectral utiliza a potência da luz em cada comprimento de onda, enquanto a QE utiliza o fluxo de fotões. A conversão de QE em resposta espectral é feita com a seguinte fórmula:

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE \quad \xrightarrow{\text{blue arrow}}$$

$$SR = \frac{QE \cdot \lambda(\mu\text{m})}{1.2398}$$

O gráfico é semelhante ao gráfico de QE:



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – efeito fotovoltaico

A coleta de portadores gerados pela luz não dá origem, por si só, à geração de energia.

- Para gerar energia, uma tensão deve ser gerada, bem como uma corrente.

A tensão é gerada numa célula solar por um processo conhecido como “efeito fotovoltaico”.

A coleção de portadores gerados pela luz pela junção pn causa um movimento de eletrões para o lado tipo n e buracos para o lado tipo p da junção.

Sob condições de curto-círcuito, não há acumulação de carga, pois os portadores saem do dispositivo como corrente gerada por luz.

Em suma:

- Efeito Fotovoltaico: deslocamento de eletrões entre a banda de valência e a banda de condução de materiais semicondutores através da absorção de fotões de luz (criando par eletrão-buraco/lacuna) de determinada frequência - processo que gera uma tensão elétrica.
- Os materiais semicondutores tendem a permanecer neutros, pois os eletrões ejetados dum átomo são logo absorvidos por outro, o que é chamado de efeito de recombinação.
- Para a fabricação de uma célula solar fotovoltaica de silício, o semicondutor é misturado com outros elementos químicos que modificam a sua estrutura original - processo de dopagem.

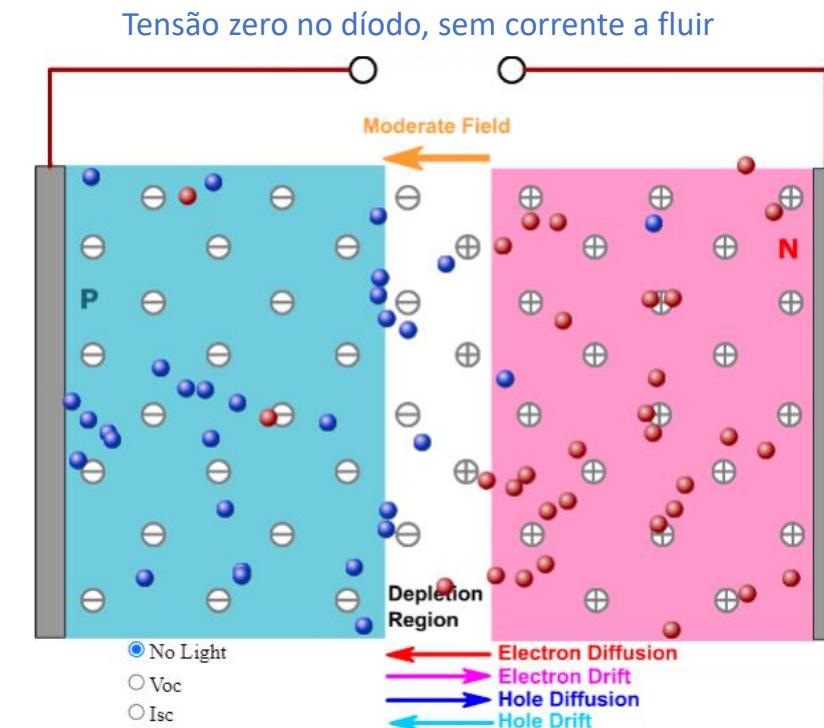
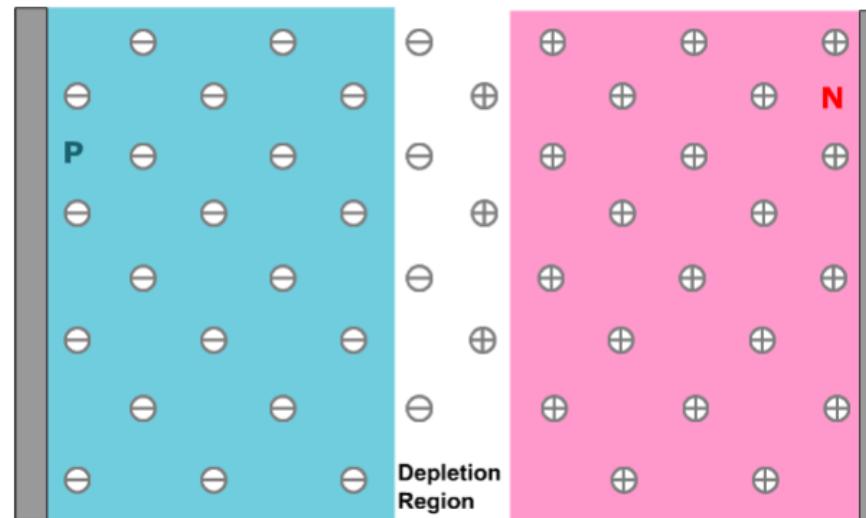
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – efeito fotovoltaico

O portador flui numa célula solar sob condições de **equilíbrio**, corrente de curto-círcuito e tensão de circuito aberto.

Observando as diferentes magnitudes das correntes que atravessam a junção, em equilíbrio (isto é, no escuro), tanto a corrente de difusão quanto a corrente de drift são pequenas.



Drift: movimento de partículas carregadas em resposta a um campo elétrico.

Difusão: processo pelo qual as partículas tendem a se espalhar a partir de regiões de alta concentração de partículas em regiões de baixa concentração de partículas como resultado de mudanças térmicas aleatórias ao movimento

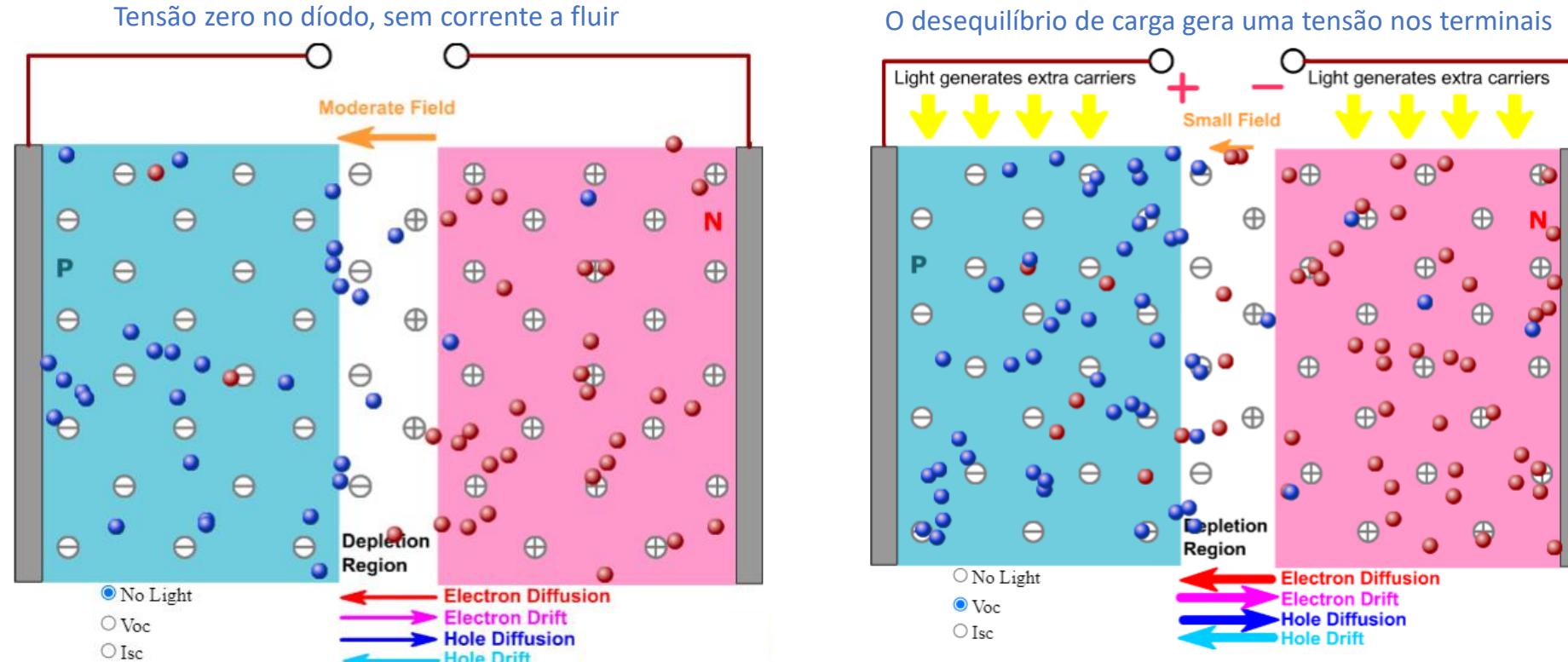
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Estrutura de uma célula solar – efeito fotovoltaico

O portador flui numa célula solar sob condições de equilíbrio, corrente de curto-circuito e **tensão de circuito aberto**.

Sob condições de circuito aberto, os portadores gerados pela luz desviam a junção, aumentando assim a corrente de difusão. Como drift e a corrente de difusão estão em direções opostas, não há corrente da célula solar em circuito aberto.



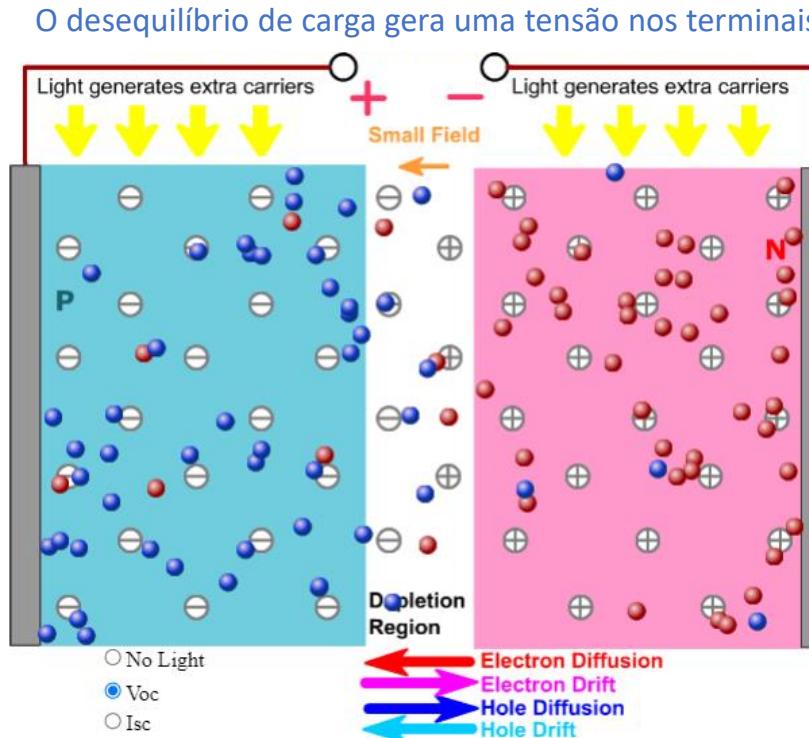
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

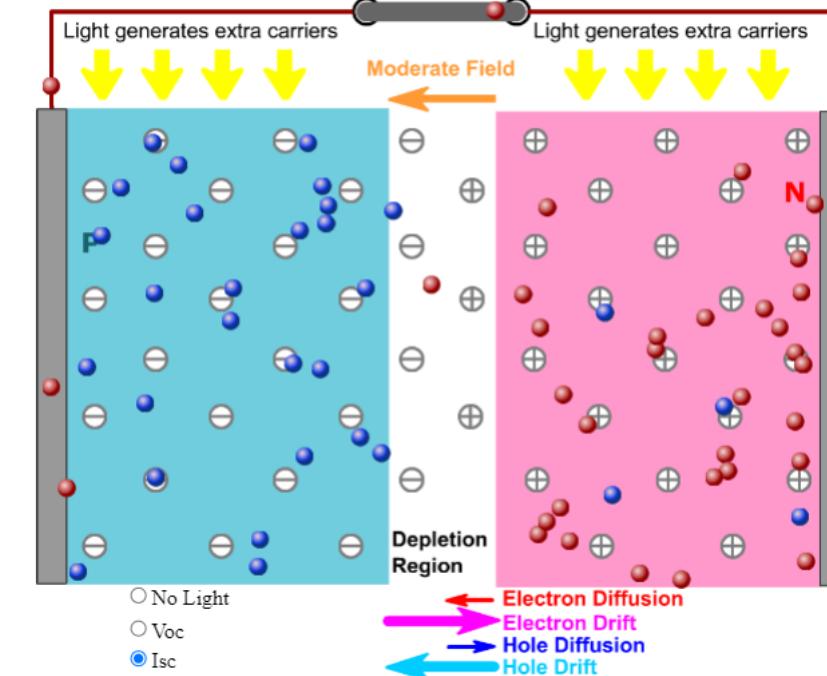
Estrutura de uma célula solar – efeito fotovoltaico

O portador flui numa célula solar sob condições de equilíbrio, **corrente de curto-circuito** e tensão de circuito aberto.

Sob condições de curto-circuito, a concentração de portadoras minoritárias em ambos os lados da junção aumenta e a corrente de drift, que depende do número de portadoras minoritárias, aumenta



Com os terminais conectados, uma corrente flui proporcionalmente ao nível de luz



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares

A curva IV de uma célula solar é a superposição da curva IV do diodo da célula solar no escuro com a corrente gerada pela luz.

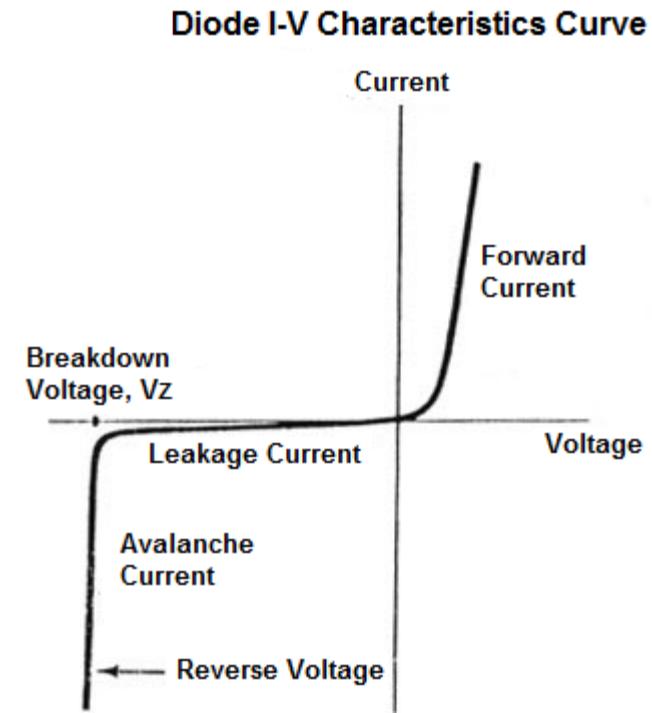
A luz tem o efeito de deslocar a curva IV para baixo, para o quarto quadrante, onde a energia pode ser extraída do diodo. A iluminação de uma célula aumenta as correntes "escuras" normais no diodo, de modo que a lei do diodo se torna:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L$$

onde I_L = corrente gerada pela luz.

Pela equação acima podemos obter a tensão de circuito aberto em termos de corrente:

$$V_{OC} = \frac{n k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares

A curva IV de uma célula solar é a superposição da curva IV do diodo da célula solar no escuro com a corrente gerada pela luz.

A luz tem o efeito de deslocar a curva IV para baixo, para o quarto quadrante, onde a energia pode ser extraída do diodo. A iluminação de uma célula aumenta as correntes "escuras" normais no diodo, de modo que a lei do diodo se torna:

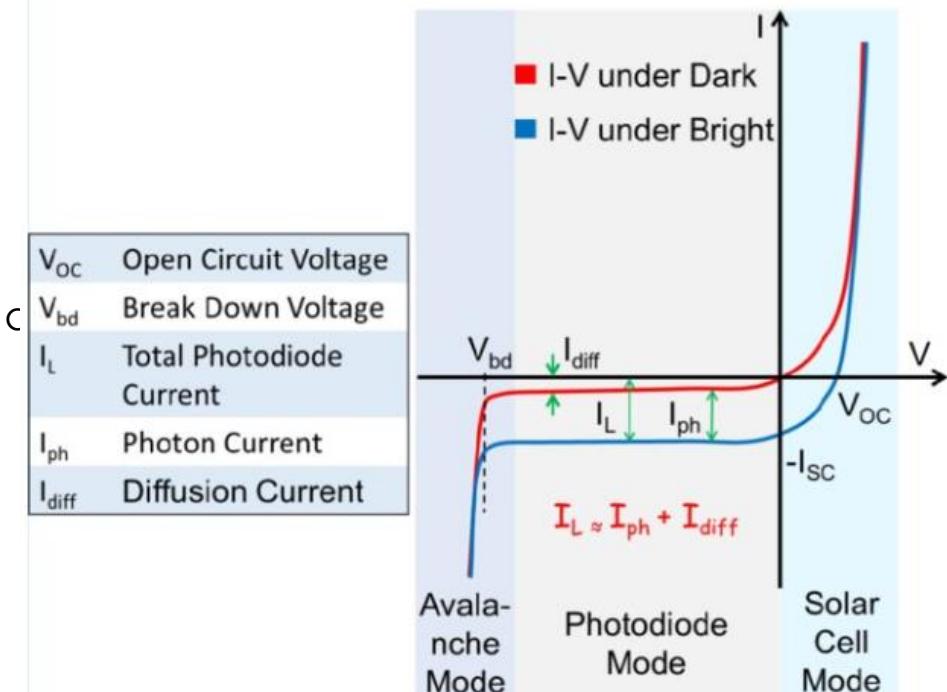
$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] - I_L$$

onde I_L = corrente gerada pela luz.

Pela equação acima podemos obter a tensão de circuito aberto em termos de

$$V_{OC} = \frac{n k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

V_{OC}	Open Circuit Voltage
V_{bd}	Break Down Voltage
I_L	Total Photodiode Current
I_{ph}	Photon Current
I_{diff}	Diffusion Current

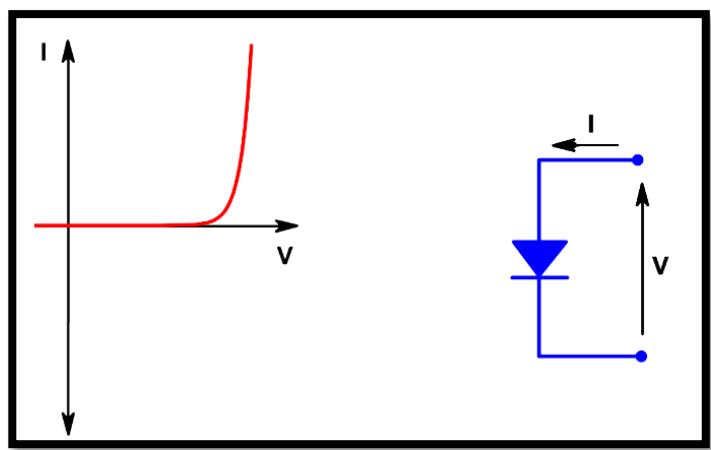


Produção de Energia

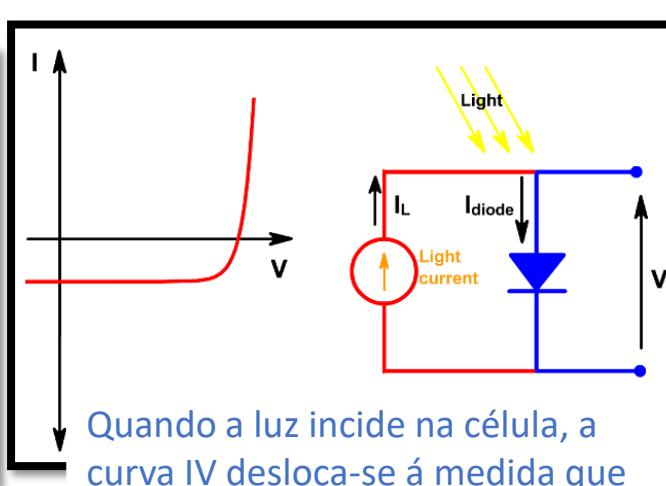
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares

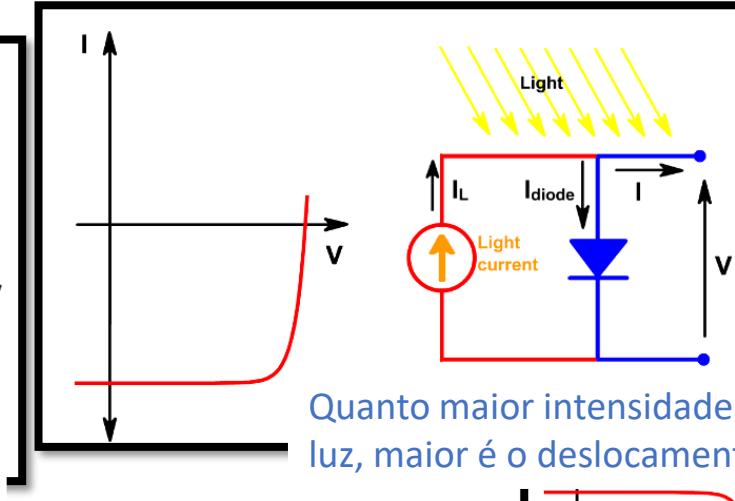
O fluxo de curto-círcuito ideal de eletrões e lacunas numa junção p-n. Os portadores minoritários não podem cruzar a fronteira metal-semicondutor e, para evitar a recombinação, devem ser recolhidos pela junção se quiserem contribuir para o fluxo de corrente.



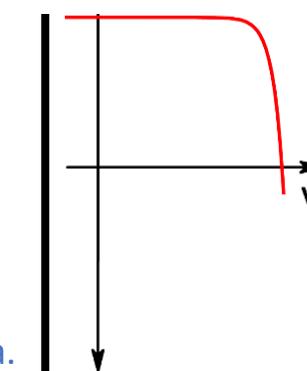
Sem iluminação, a célula tem as mesmas características elétricas como um díodo.



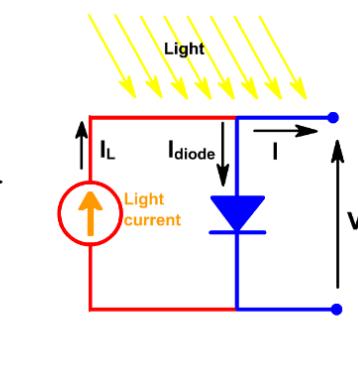
Quando a luz incide na célula, a curva IV desloca-se á medida que a que a célula começa a gerar potência.



Quanto maior intensidade de luz, maior é o deslocamento.



A curva da célula solar é virada por convenção da comunidade científica.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

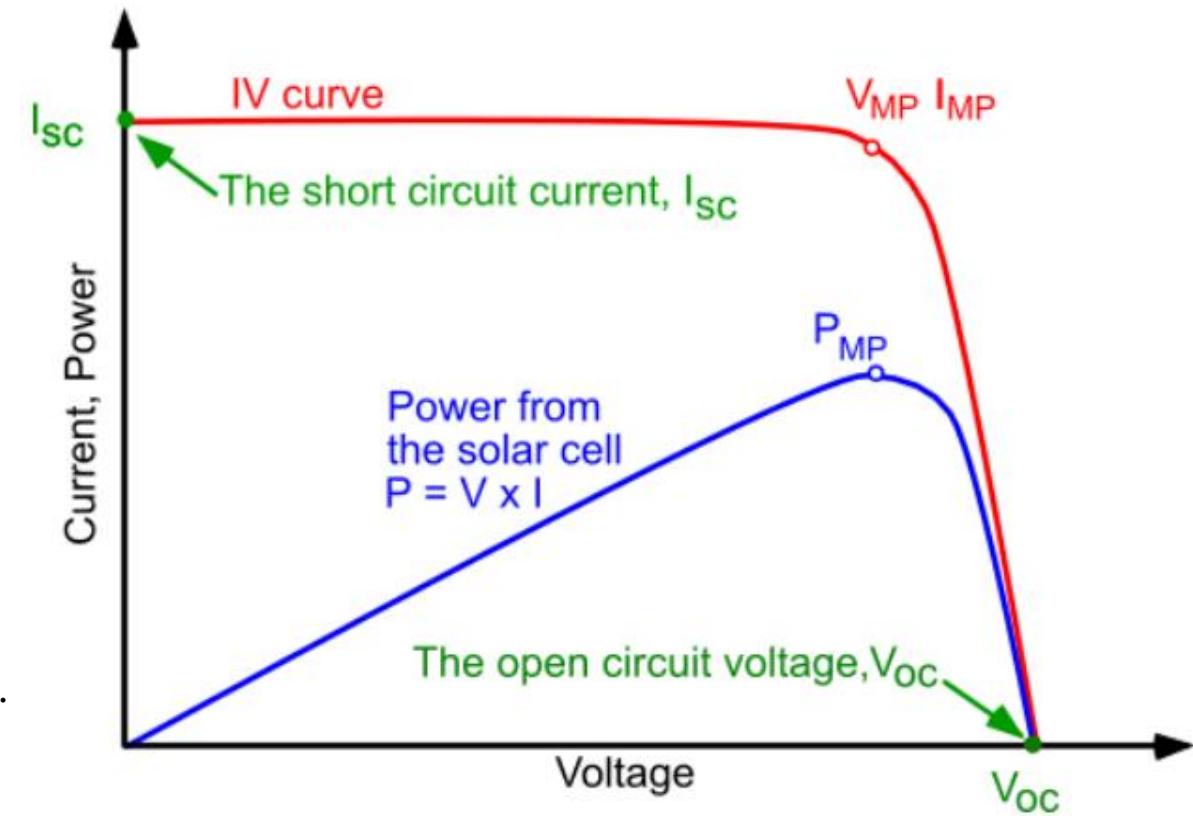
Parâmetros de células solares

A curva de potência tem um máximo indicado como P_{MP} onde a célula solar deve ser operada para fornecer a potência máxima de saída. Também é denominado P_{MAX} ou ponto de potência máxima (P_{mp}) e ocorre numa tensão de V_{MP} e uma corrente de I_{MP} .

Vários parâmetros importantes que são usados para caracterizar células solares:

- a corrente de curto-circuito (I_{SC}),
- a tensão de circuito aberto (V_{OC}),
- o fator de preenchimento (FF);
- a eficiência;
- Etc...

são todos parâmetros determinados a partir da curva IV.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

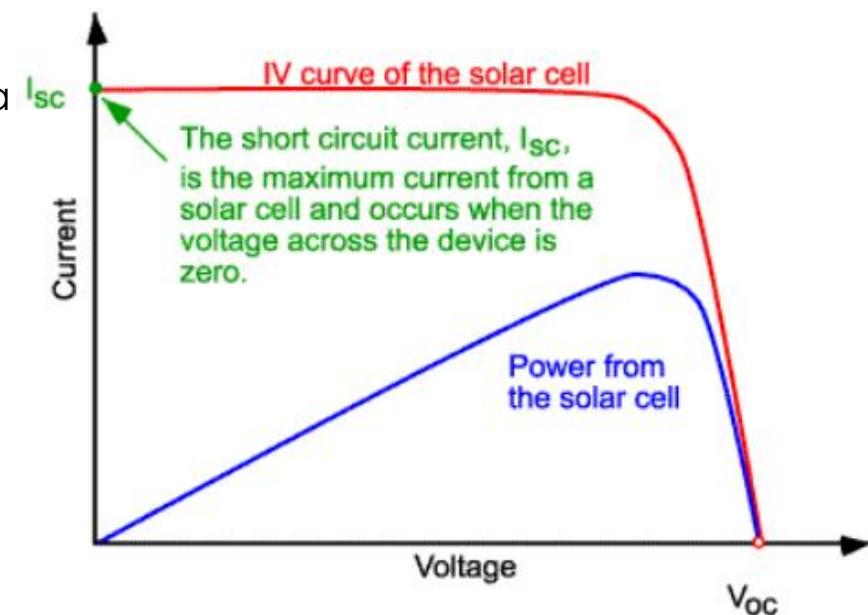
Parâmetros de células solares – corrente de curto circuito

A corrente de curto-circuito é a corrente que atravessa a célula solar quando a tensão na célula solar é zero (ou seja, quando a célula solar está em curto-circuito). Geralmente escrita como I_{sc} , a corrente de curto-circuito é mostrada na curva IV abaixo.

A corrente de curto-circuito é devida à geração e coleta de portadores gerados pela luz.

Para uma célula solar ideal com mecanismos de perda resistiva:

- corrente de curto-circuito e a corrente gerada pela luz são idênticas.
- corrente de curto-circuito é a maior corrente que pode ser extraída da célula



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – corrente de curto circuito

A corrente de curto-círcito depende de vários fatores:

- **a área da célula solar.** Para eliminar a dependência da área da célula solar, é mais comum fornecer a densidade da corrente de curto-círcito (J_{sc} em mA/cm^2) em vez da corrente de curto-círcito;
- **o número de fotões** (ou seja, a potência da fonte de luz incidente). O I_{sc} de uma célula solar depende diretamente da intensidade da luz
- **o espectro da luz incidente.** Para a maioria das medições de células solares, o espectro é padronizado para o espectro AM1.5;
- **as propriedades óticas** (absorção e reflexão) da célula solar;
- **a probabilidade de coleta de portadores minoritários** da célula solar, que depende principalmente da passivação da superfície e da vida útil dos portadores minoritários na base.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – corrente de curto circuito

Ao comparar células solares do mesmo tipo de material, os mais críticos do material são:

- o comprimento de difusão
- a passivação da superfície

Numa célula com superfície perfeitamente passivada e geração uniforme, a equação para a densidade de corrente de curto-circuito pode ser aproximada como:

$$J_{SC} = qG(L_n + L_p)$$

onde G é a taxa de geração e Ln e Lp são os comprimentos de difusão de eletrões e buracos, respetivamente.

Esta equação faz várias suposições que não são verdadeiras para as condições encontradas na maioria das células solares, mas conclui:

- a corrente de curto-circuito depende fortemente da taxa de geração e do comprimento de difusão.

A corrente de curto-circuito, Isc, pode ser dada por:

$$I_{SC} = J_{SC}A$$

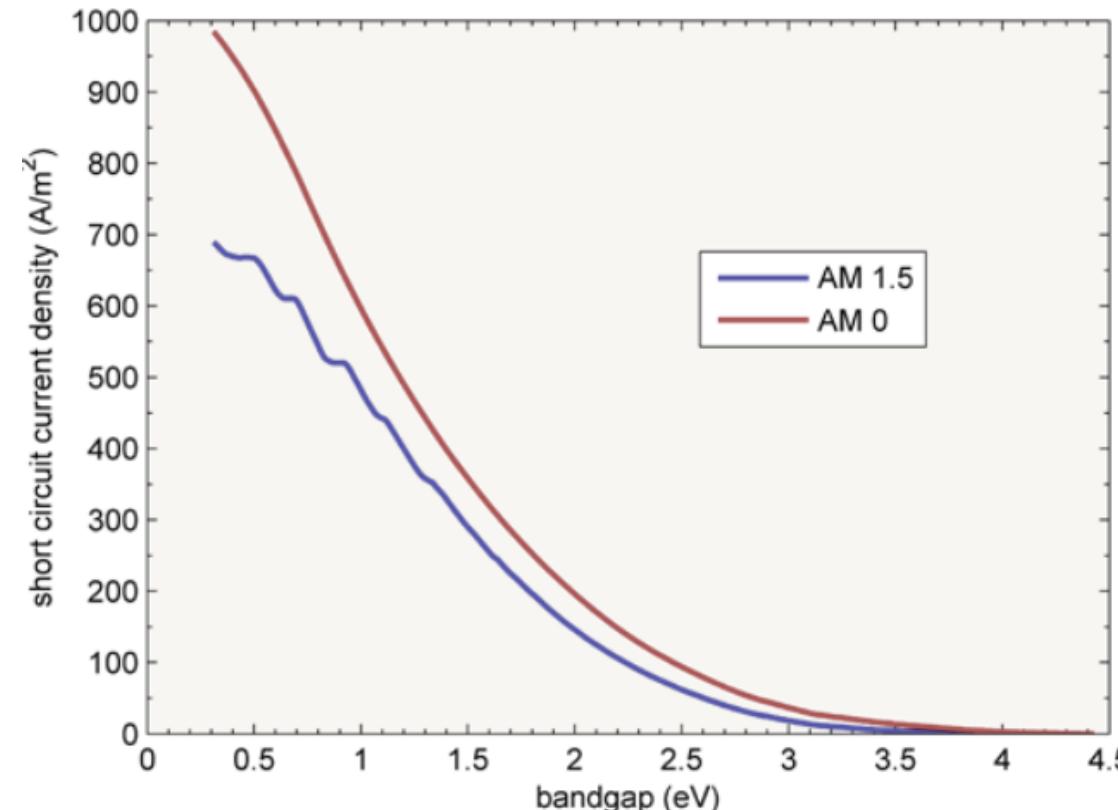
As células solares de silício sob um espectro AM1.5 têm uma corrente máxima possível de 46 mA/cm². Dispositivos de laboratório: superiores a 42 mA/cm²; células solares comerciais têm correntes de curto-circuito entre cerca de 28 mA/cm² e 35 mA/cm².

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – corrente de curto circuito

Num dispositivo ideal, cada fotão acima do bandgap fornece um portador de carga no circuito externo, de modo que a corrente mais alta é para o bandgap mais baixo.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – tensão de circuito aberto

A tensão de circuito aberto, V_{oc} , é a tensão máxima disponível numa célula solar, e isso ocorre com corrente zero.

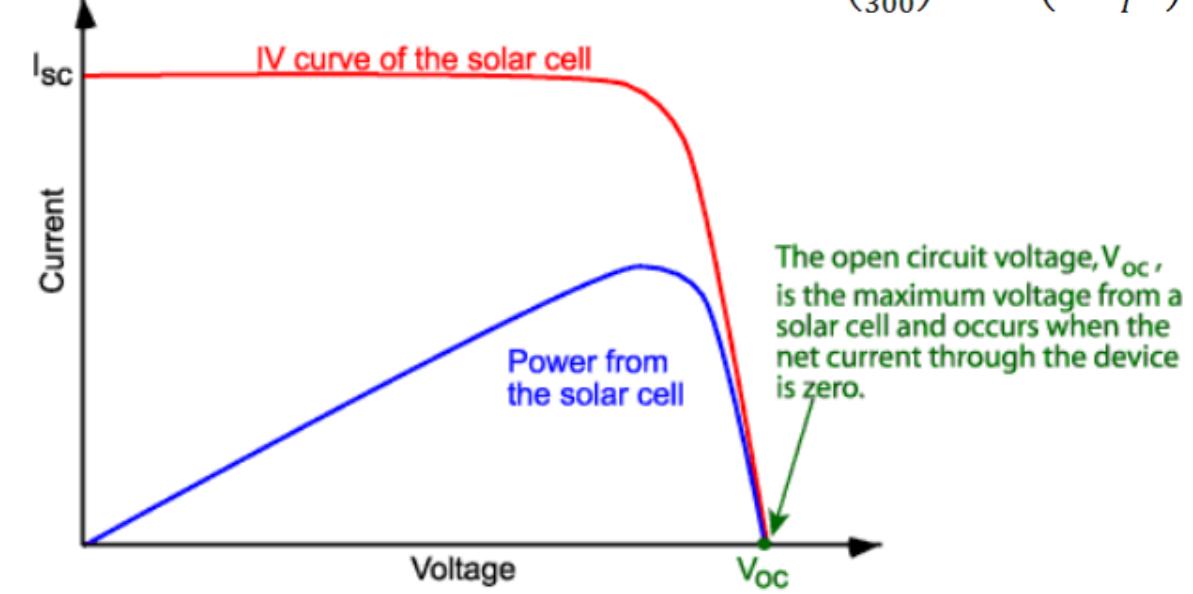
A tensão de circuito aberto corresponde à quantidade de polarização direta na célula solar devido à polarização da junção da célula solar com a corrente gerada pela luz.

Nota: V_{oc} aumenta linearmente com a temperatura. No entanto, este não é o caso único, uma vez que I_0 aumenta rapidamente com a temperatura, principalmente devido a alterações na concentração intrínseca do portador, n_i .

$$V_{oc} = \frac{n k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

Se a temperatura mudar, I_0 também mudará:

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{n k T} \right) - 1 \right] - I_L$$



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

$$V_{OC} = \frac{n k_B T}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right)$$

Parâmetros de células solares – tensão de circuito aberto

A equação acima mostra que V_{OC} depende:

- corrente de saturação da célula solar (I_0)
- corrente gerada pela luz

Embora I_{SC} normalmente tenha uma pequeníssima variação, o efeito principal é a corrente de saturação, uma vez que esta pode variar em ordens de grandeza.

A corrente de saturação, I_0 , depende da recombinação na célula solar.

A tensão de circuito aberto é então uma medida da quantidade de recombinação no dispositivo.

O V_{OC} também pode ser determinado a partir da concentração de portadores:

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{(N_A + \Delta n) \Delta n}{n_i^2} \right] \quad n_i = 9.38 \times 10^{19} \left(\frac{T}{300} \right)^2 \exp \left(-\frac{6884}{T} \right)$$

onde kT/q é a tensão térmica, N_A é a concentração de dopagem, Δn é o excesso de concentração de portadores e n_i é a concentração intrínseca de portadores.

Células solares de silício em material monocristalino de alta qualidade têm tensões de circuito aberto de até 764 mV sob condições de um sol e AM1.5, enquanto dispositivos comerciais de silício normalmente têm tensões de circuito aberto em torno de 690 mV.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

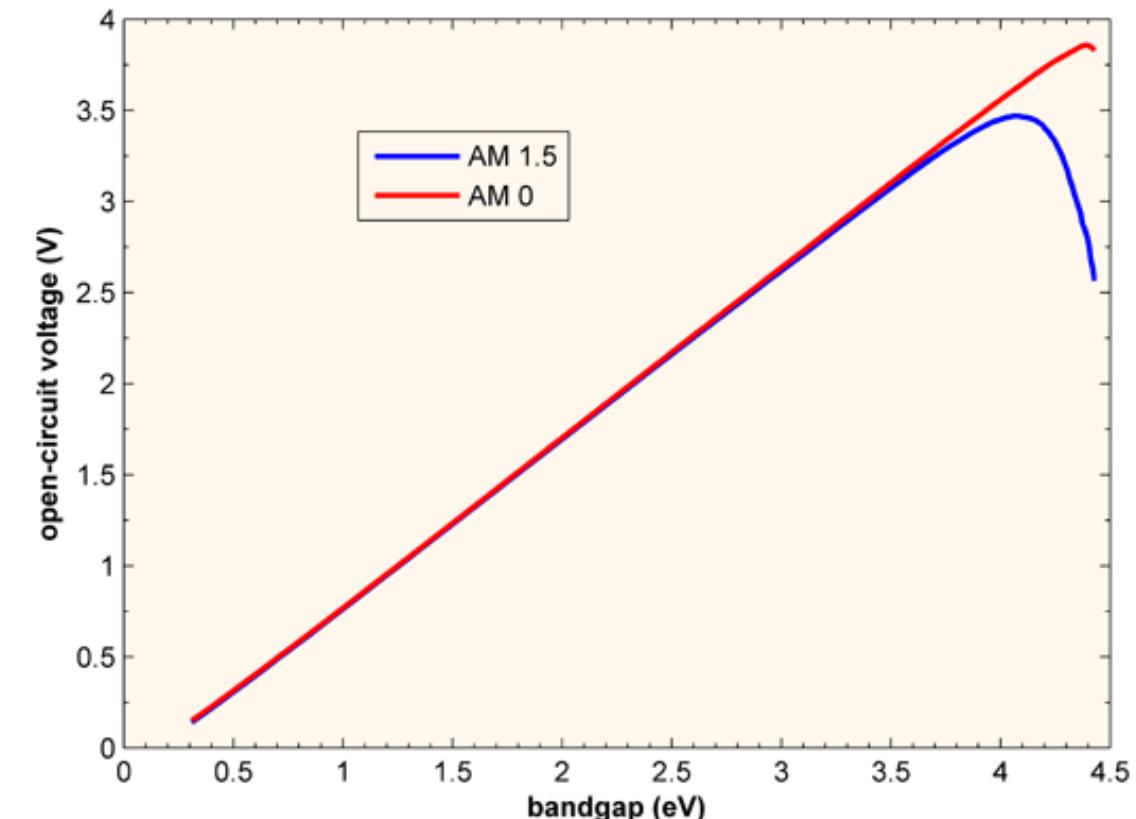
Parâmetros de células solares – tensão de circuito aberto

Quando a corrente de curto-circuito (I_{sc}) diminui com o aumento do bandgap, a tensão de circuito aberto aumenta à medida que o bandgap aumenta.

V_{oc} em função do bandgap para uma célula com AM0 e AM 1.5.

O V_{oc} aumenta com o bandgap à medida que a corrente de recombinação cai.

Há queda no V_{oc} em intervalos de banda muito altos devido ao I_{sc} muito baixo.



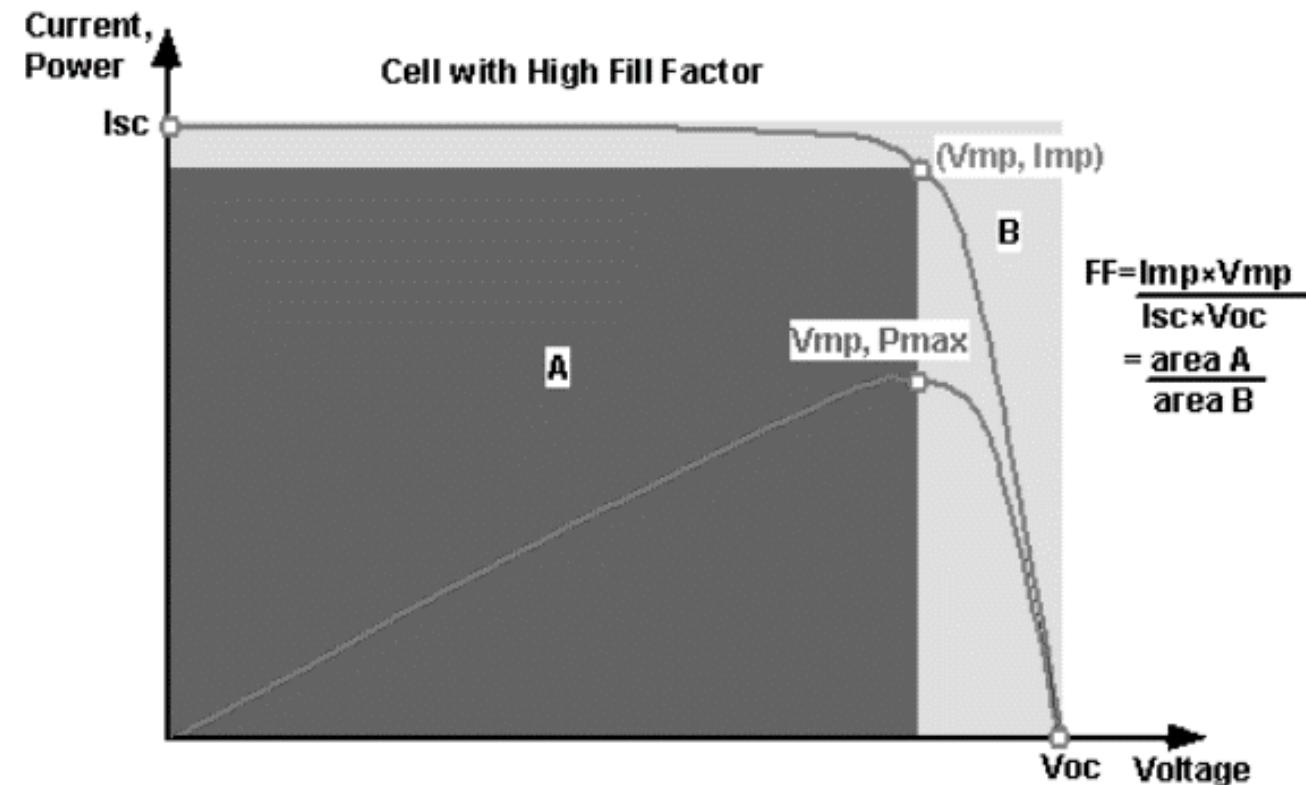
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{P_M}{V_{OC} I_{SC}}$$

Parâmetros de células solares – Fill Factor (FF)

Como FF é uma medida da "quadratura" da curva IV, uma célula solar com uma tensão mais alta tem um FF possível maior, uma vez que a porção "arredondada" da curva IV ocupa menos área.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

$$FF = \frac{V_M I_M}{V_{OC} I_{SC}} = \frac{P_M}{V_{OC} I_{SC}}$$

Parâmetros de células solares – Fill Factor (FF)

Como FF é uma medida da "quadratura" da curva IV, uma célula solar com uma tensão mais alta tem um FF possível maior, uma vez que a porção "arredondada" da curva IV ocupa menos área.

O FF teórico máximo de uma célula solar pode ser determinado diferenciando a potência de uma célula solar em relação à tensão e descobrindo onde esta é igual a zero. Por isso

$$\frac{d(IV)}{dV} = 0$$

dando:

$$V_{MP} = V_{OC} - \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{qV_{MP}}{nkT} + 1\right)$$

FF será menor devido a presença de perdas resistivas parasitas.

A equação acima também demonstra a importância do fator de idealidade, também conhecido como “fator n” de uma célula solar.

O fator de idealidade é uma medida da qualidade da junção e do tipo de recombinação numa célula solar. Para os mecanismos de recombinação simples, o fator n tem um valor de 1.

- alguns mecanismos de recombinação, especialmente se forem grandes, podem introduzir mecanismos de recombinação de 2.
- Um valor n alto não apenas degrada o FF, mas como geralmente também sinaliza alta recombinação, fornece baixas tensões de circuito aberto.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – Eficiência (policrist. ~ 15%)

A eficiência é o parâmetro mais comum usado para comparar o desempenho de uma célula solar com outra.

A eficiência é definida como a relação entre a produção de energia da célula solar e a energia de entrada do sol.

Além de refletir o desempenho da própria célula solar, a eficiência depende:

- espectro da luz solar incidente
- intensidade da luz solar incidente
- temperatura da célula solar

Portanto, as condições sob as quais a eficiência é medida devem ser cuidadosamente controladas para comparar o desempenho de um dispositivo com outro. As células solares terrestres são medidas sob condições AM1.5 e a uma temperatura de 25°C.

- As células solares destinadas ao uso espacial são medidas sob condições AM0

Eficiência de uma célula solar é determinada como a fração da energia incidente que é convertida em eletricidade e é definida como:

$$\eta = \frac{V_{OC}I_{SC}FF}{P_{in}}$$

A potência de entrada para cálculos de eficiência é de 1 kW/m² ou 100 mW/cm²:

a potência de entrada para uma célula de 100×100 mm² é 10 W e para uma célula de 156×156 mm² é 24,3 W

Produção de Energia

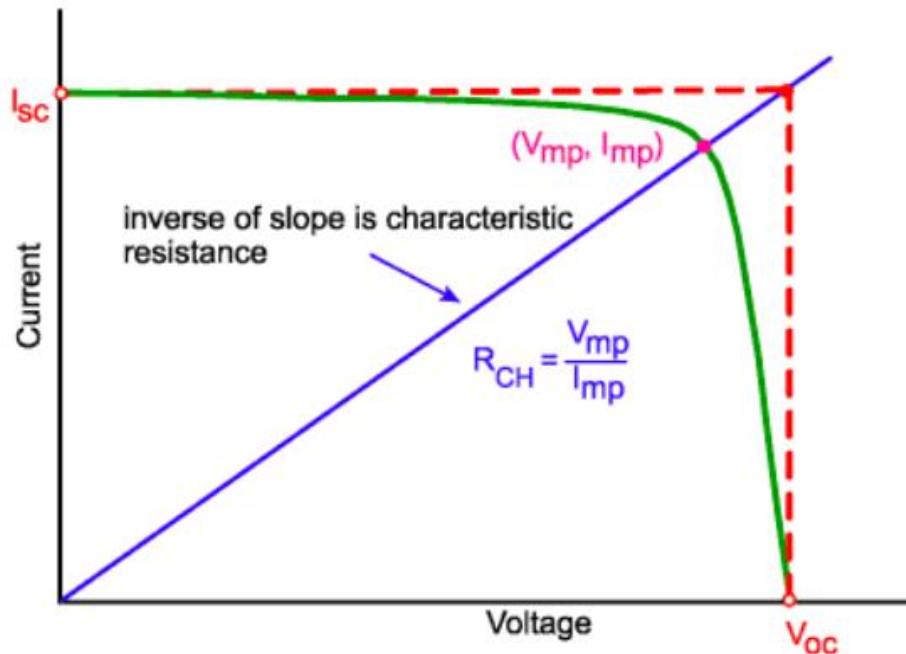
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência característica

A resistência característica de uma célula solar é a resistência de saída da célula no seu ponto de potência máxima.

Se a resistência da carga for igual à resistência característica da célula solar, então a potência máxima é transferida para a carga e a célula solar opera no seu ponto de potência máxima.

É um parâmetro útil na análise de células solares, especialmente quando se examina o impacto dos mecanismos de perda parasitária.



$$R_{CH} = \frac{V_{MP}}{I_{MP}} \approx \frac{V_{OC}}{I_{SC}}$$

R_{CH} está em Ω (ohms) ao usar I_{MP} ou I_{SC} , como é típico num módulo ou área de célula completa. Ao usar a densidade de corrente (J_{MP} ou J_{SC}), as unidades de R_{CH} são Ωcm^2 (ohm cm^2)

Produção de Energia

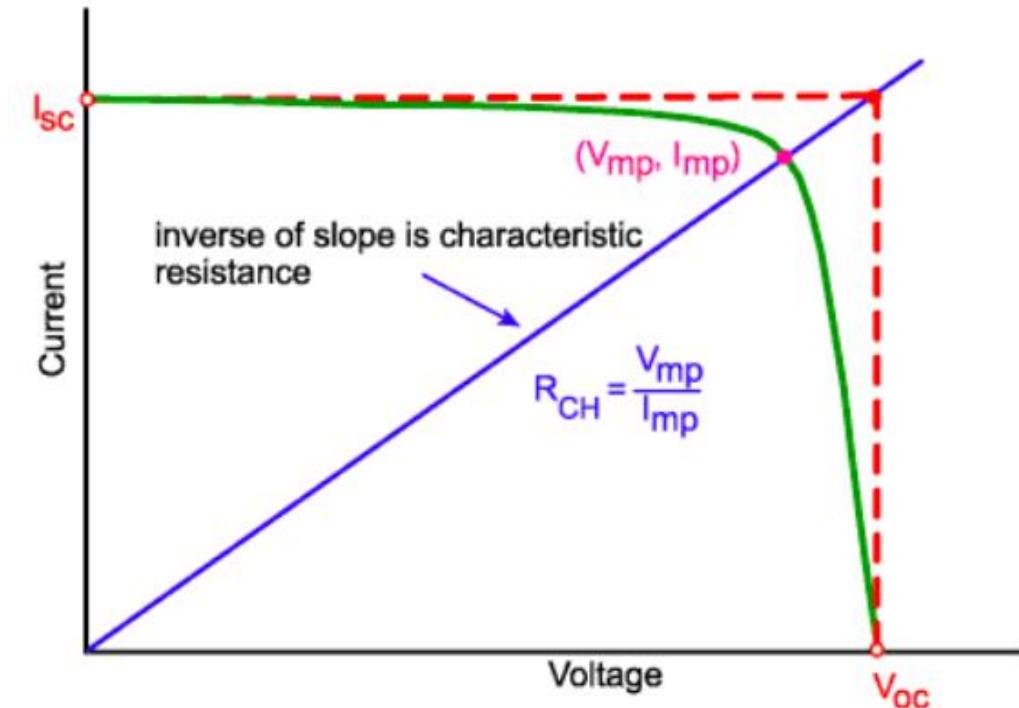
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência característica

A resistência característica é útil porque coloca a resistência em série e paralela (shunt) no contexto.

Por exemplo, células solares comerciais de silício são dispositivos de corrente muito alta e baixa tensão.

- Uma célula solar quadrada de 15,6 cm tem uma corrente de ~ 9 A e uma tensão máxima de ponto de potência de 0,6 V, dando uma resistência característica, R_{CH} , de 0,067 Ω.
- Um módulo de 72 células das mesmas células tem $R_{CH} \sim 5 \Omega$.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência característica

A resistência em SÉRIE: a resistência característica também permite uma conversão entre a perda de potência fracionada e a resistência em série em Ω ou $\Omega \text{ cm}^2$.

$$R_{series} = f \times R_{CH}$$

Onde f é a fração de perda de potência de 0 a 1. A R em série está nas mesmas unidades que R_{CH} , ou Ω ou $\Omega \text{ cm}^2$.

$$f = \frac{R_{series}}{R_{CH}}$$

Por exemplo. Uma célula solar típica tem série $R = 1 \Omega \text{ cm}^2$, $V_{MP} = 0,650 \text{ V}$ e $J_{MP} = 36 \text{ mA/cm}^2$. O R_{CH} resultante = $18 \Omega \text{ cm}^2$ e a perda de potência fracionária é $1/18 = 5,5\%$.

Da mesma forma, a resistência shunt está relacionada à perda de potência por:

$$f = \frac{R_{CH}}{R_{shunt}}$$

Exemplo: uma célula solar típica tem $R_{shunt} = 10000 \Omega \text{ cm}^2$, $V_{MP} = 0,650 \text{ V}$ e $J_{MP} = 36 \text{ mA/cm}^2$. O R_{CH} resultante = $18 \Omega \text{ cm}^2$ e a perda de potência fracionária é $18/10000 = 0,18\%$.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – efeito de resistência parasitas

Os efeitos resistivos nas células solares reduzem:

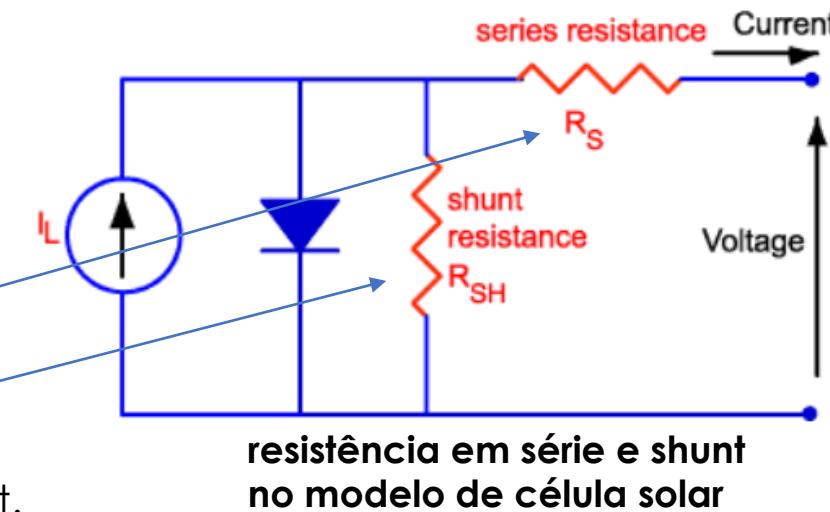
- a eficiência da célula solar
 - Dissipando a energia nas resistências.

As resistências parasitas mais comuns são a resistência em série e a resistência shunt.

Para valores típicos de resistência em shunt e em série, o principal impacto da resistência parasita é:

- reduzir o fator de preenchimento.
- Tanto a magnitude quanto o impacto da resistência em série e em shunt (derivação/paralela) dependem da geometria da célula solar
- Como o valor da resistência dependerá da área da célula solar, ao comparar a resistência em série de células solares que podem ter áreas diferentes, uma unidade comum para resistência é Ωcm^2 .
 - Esta resistência normalizada por área resulta da substituição da corrente pela densidade de corrente na lei de Ohm, conforme mostrado abaixo:

$$R' (\Omega\text{cm}^2) = \frac{V}{J}$$



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

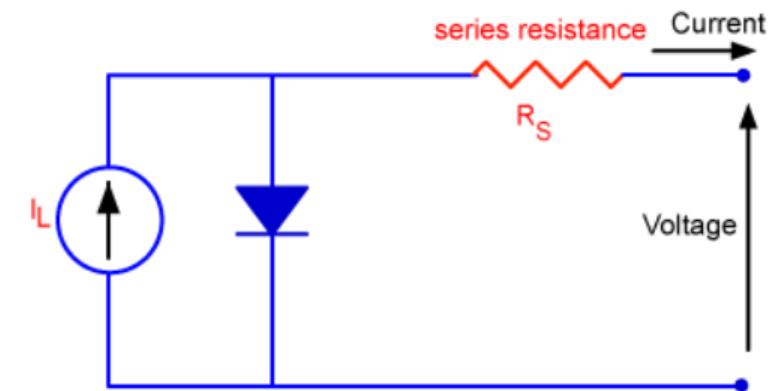
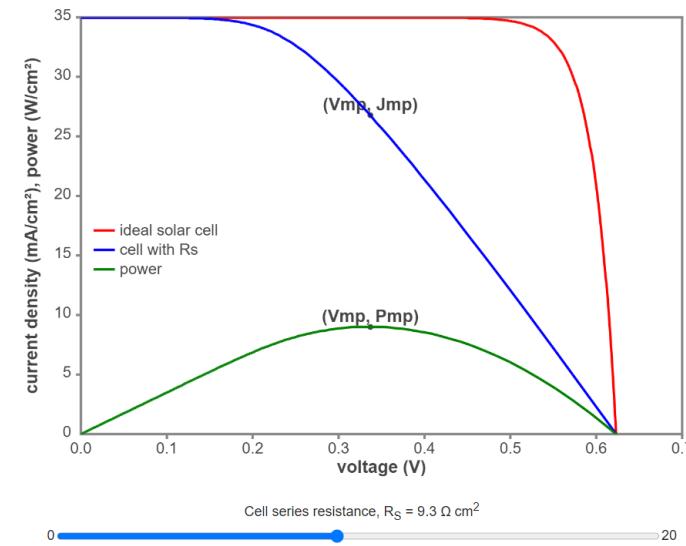
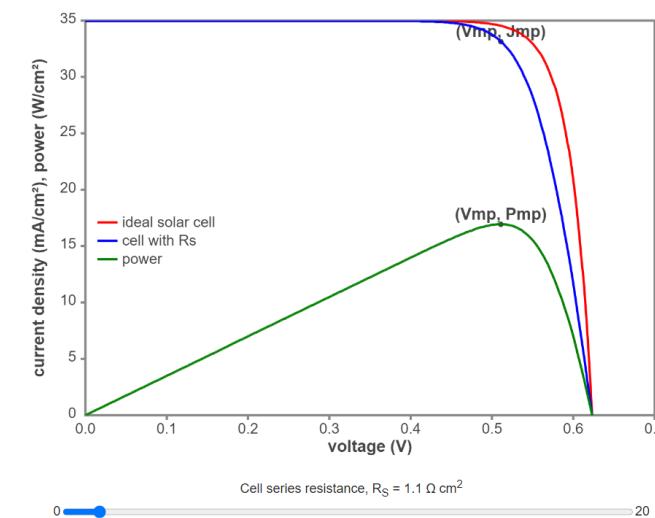
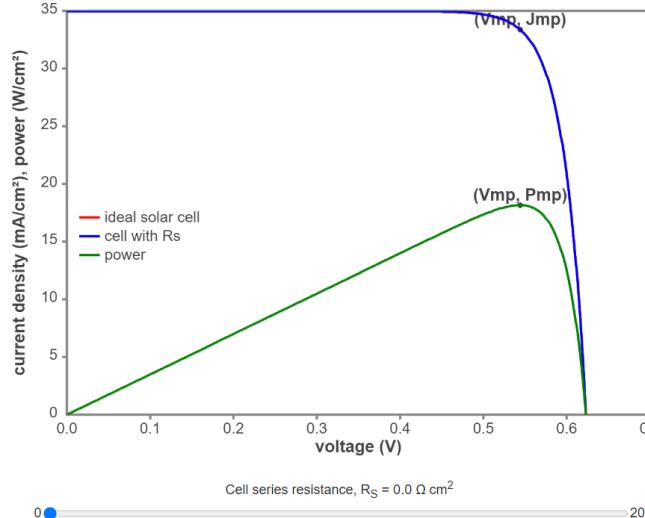
Parâmetros de células solares – resistência em série

A resistência em série numa célula solar tem três causas:

1. o movimento da corrente através do emissor e da base da célula solar;
2. a resistência de contato entre o contato metálico e o silício;
3. a resistência dos contatos metálicos superior e traseiro.

O principal impacto da resistência em série é a redução do FF

- embora valores excessivamente elevados também possam reduzir a ISC.



$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{q(V+IR_S)}{nkT} \right]$$

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

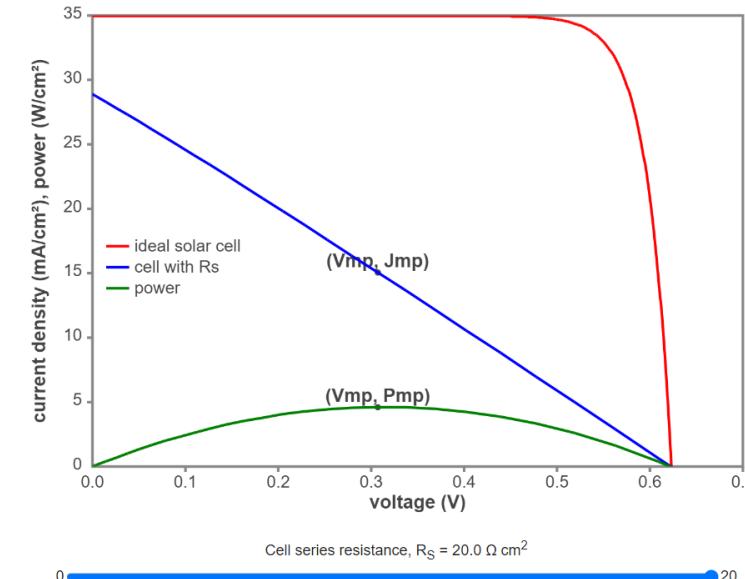
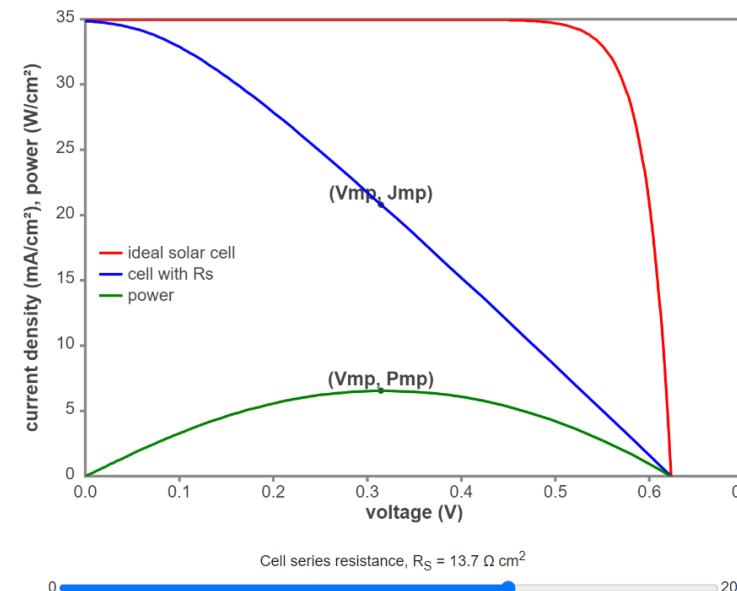
Parâmetros de células solares – resistência em série

A resistência em série não afeta a célula solar na tensão de circuito aberto

- uma vez que o fluxo geral de corrente através da célula solar (e através da resistência em série) é zero

No entanto, perto da tensão de circuito aberto, a curva IV é fortemente afetada pela resistência em série.

- Um método direto de estimar a resistência em série duma célula solar é encontrar a inclinação da curva IV no ponto de tensão de circuito aberto (aplicar o inverso dessa inclinação).



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência shunt

Perdas de energia significativas causadas pela presença de uma resistência shunt, R_{SH} , são normalmente devidas:

- a defeitos de fabricação, e não a um projeto “deficitário” de células solares.

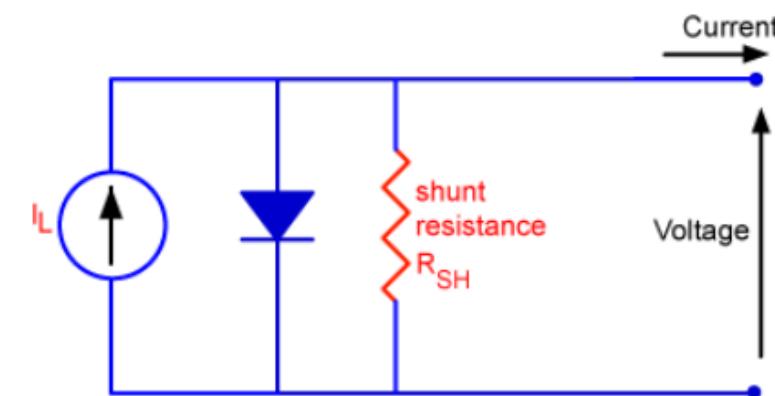
A baixa resistência shunt causa perdas de energia nas células solares, fornecendo um caminho de corrente alternativo para a corrente gerada pela luz.

Tal desvio reduz:

- a quantidade de corrente que flui através da junção da célula solar
- reduz a tensão da célula solar

O efeito de uma resistência shunt é particularmente grave em níveis baixos de luz, uma vez que haverá menos corrente gerada por luz.

- A perda desta corrente para o shunt tem um impacto maior. Em tensões mais baixas, onde a resistência efetiva da célula solar é elevada, o impacto de uma resistência em paralelo é grande.



Produção de Energia

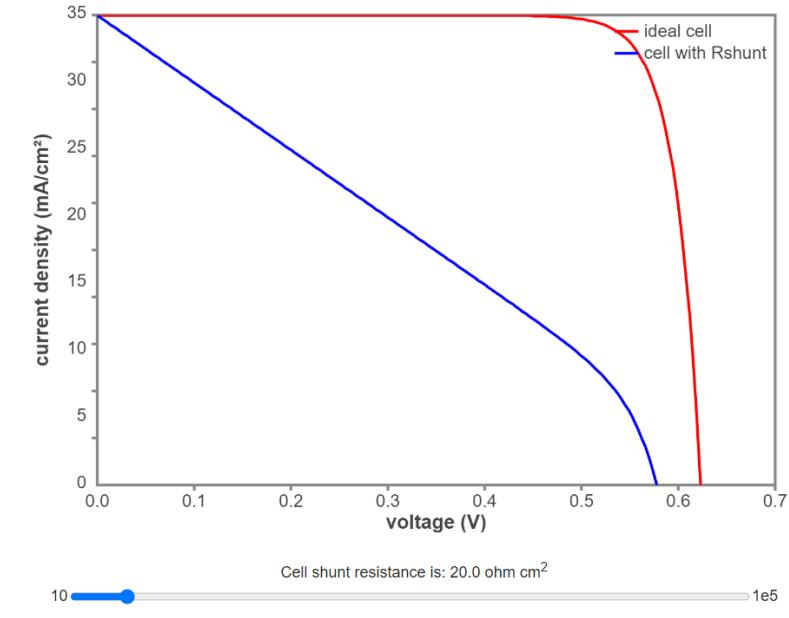
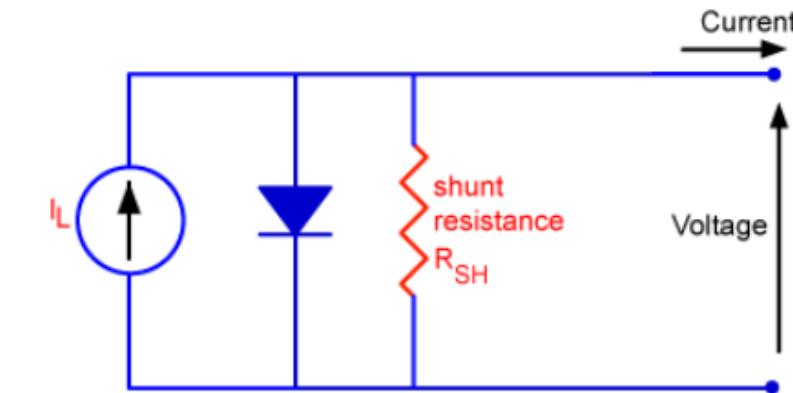
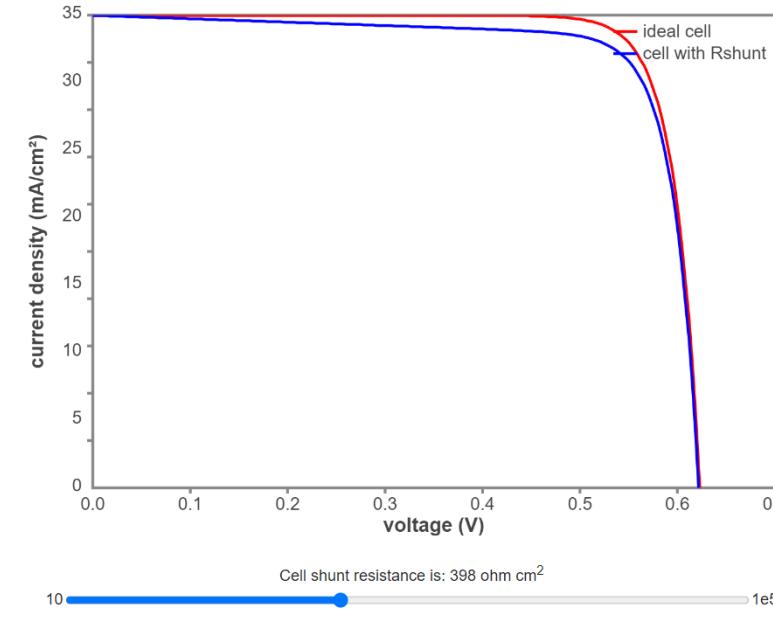
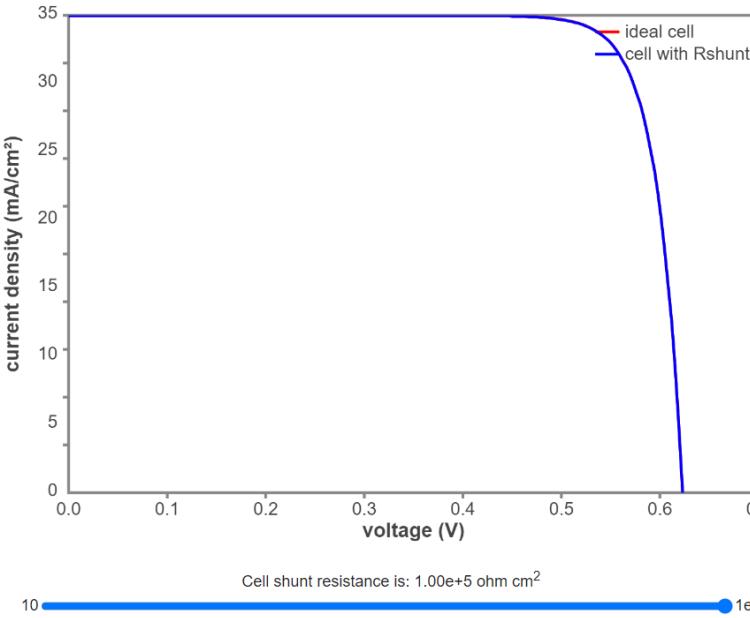
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência shunt

A equação para uma célula solar na presença de uma resistência shunt é:

$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{qV}{nkT} \right] - \frac{V}{R_{SH}}$$

I é a corrente de saída da célula, I_L é a corrente gerada pela luz, V é a tensão nos terminais da célula, T é a temperatura, q e k são constantes, n é o fator de idealidade e R_{SH} é a resistência shunt da célula.



Produção de Energia

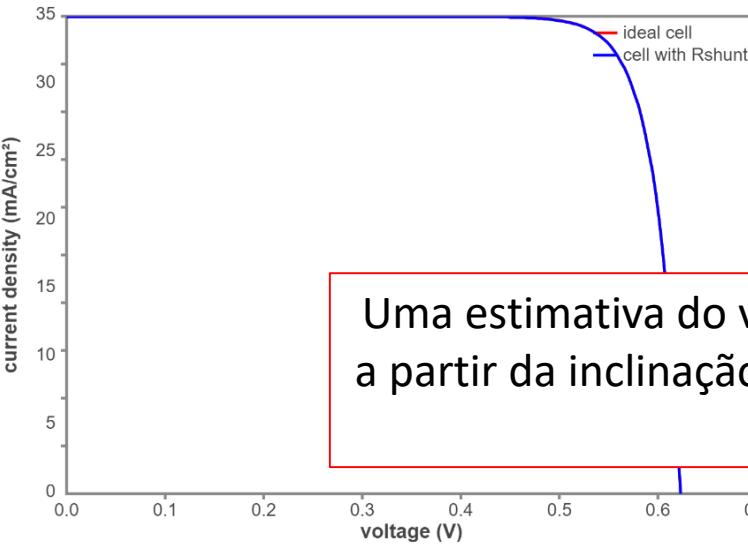
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – resistência shunt

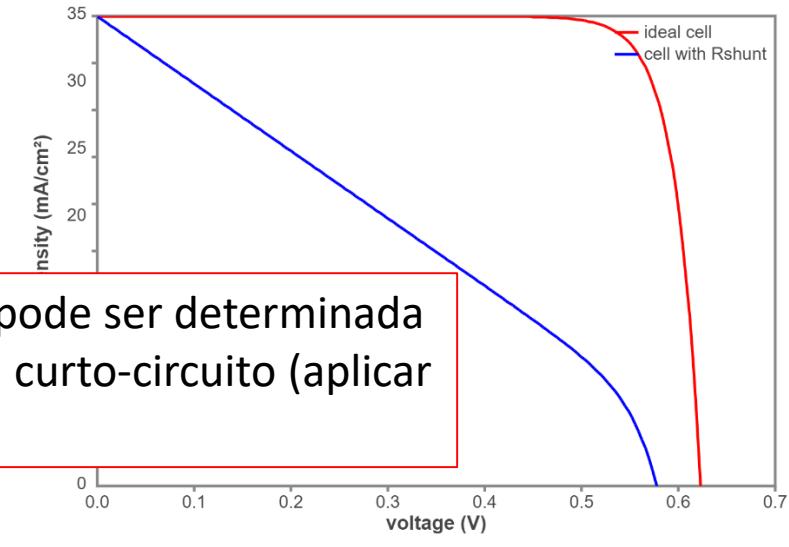
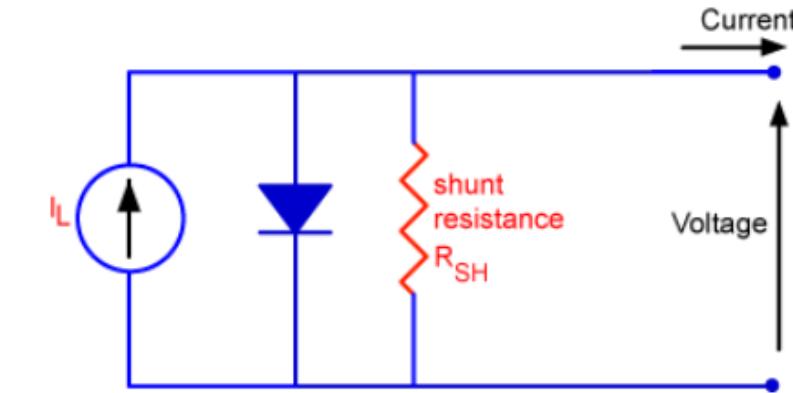
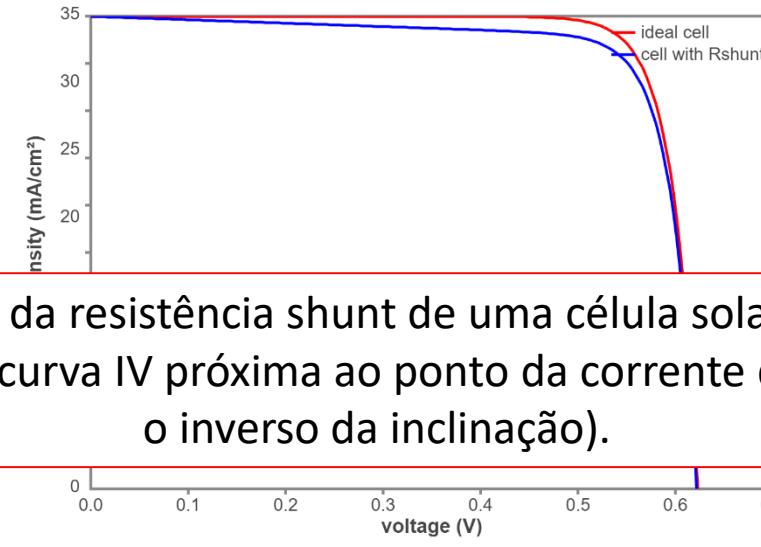
A equação para uma célula solar na presença de uma resistência shunt é:

$$I = I_L - I_0 \exp \left[\frac{qV}{nkT} \right] - \frac{V}{R_{SH}}$$

I é a corrente de saída da célula, I_L é a corrente gerada pela luz, V é a tensão nos terminais da célula, T é a temperatura, q e k são constantes, n é o fator de idealidade e R_{SH} é a resistência shunt da célula.

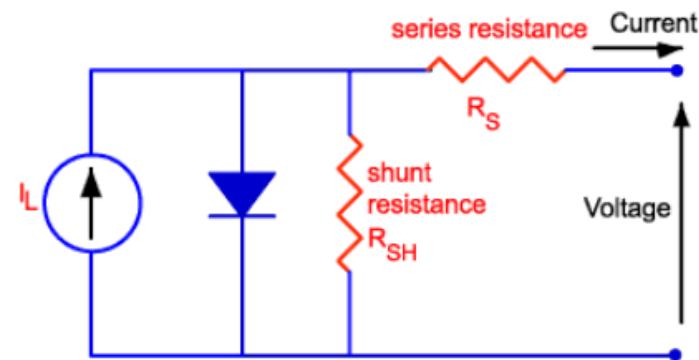


Uma estimativa do valor da resistência shunt de uma célula solar pode ser determinada a partir da inclinação da curva IV próxima ao ponto da corrente de curto-círcuito (aplicar o inverso da inclinação).



Produção de Energia

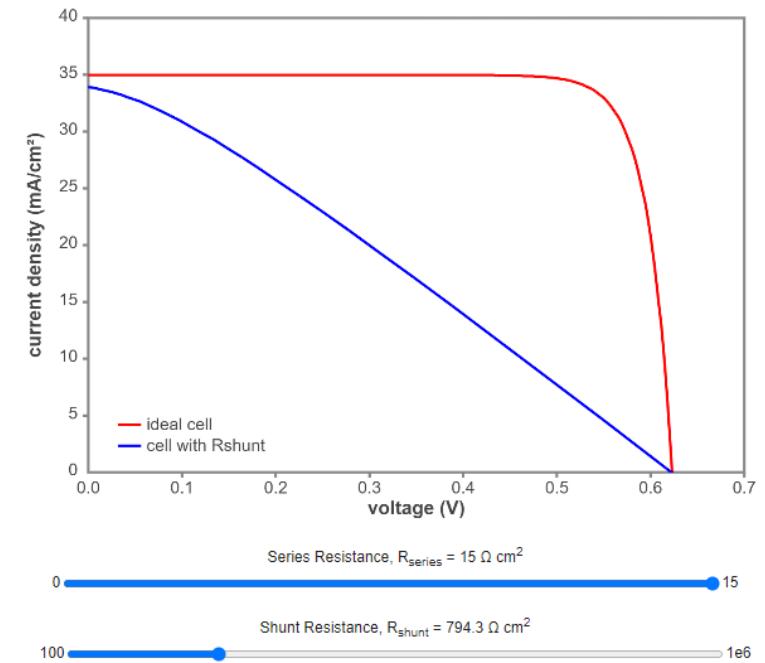
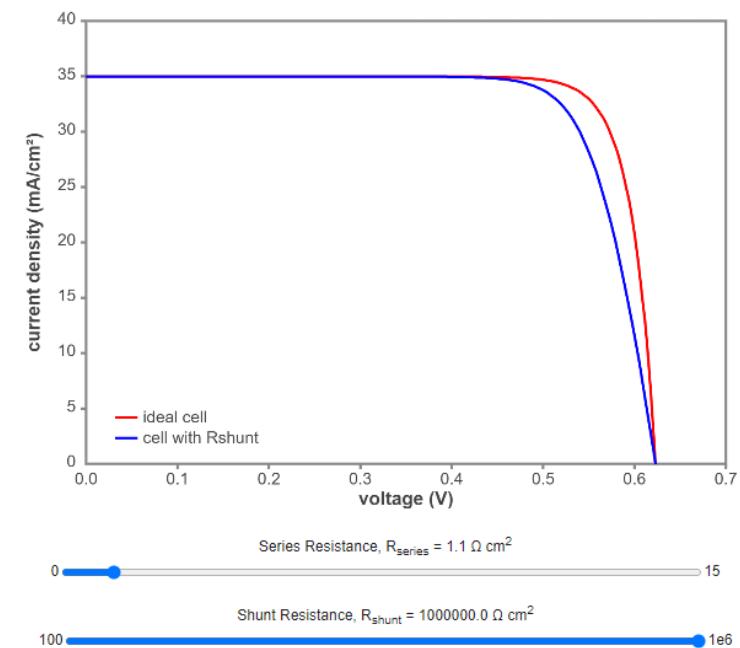
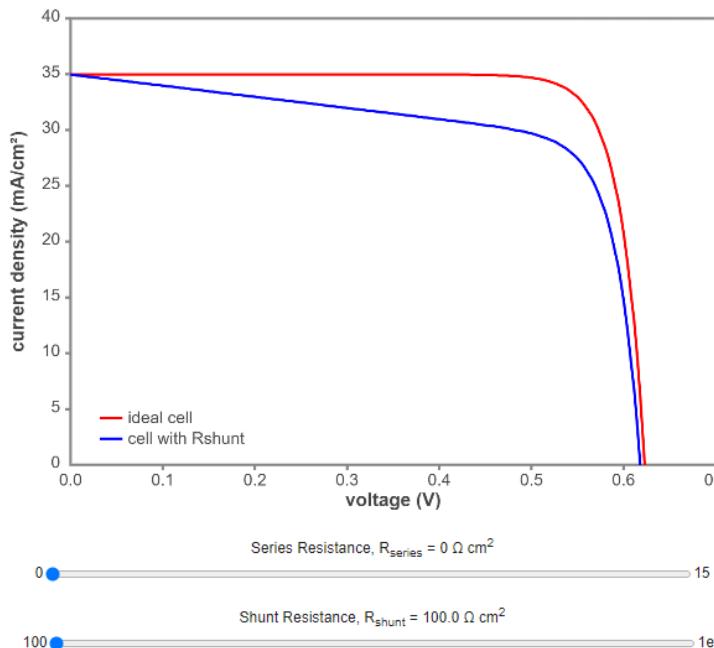
Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica



Parâmetros de células solares – Impacto de resistência em série e resistência shunt

A equação para uma célula solar na presença de ambas as resistências:

$$I = I_L - I_0 \exp\left[\frac{q(V + IR_S)}{nkT}\right] - \frac{V + IR_S}{R_{SH}}$$



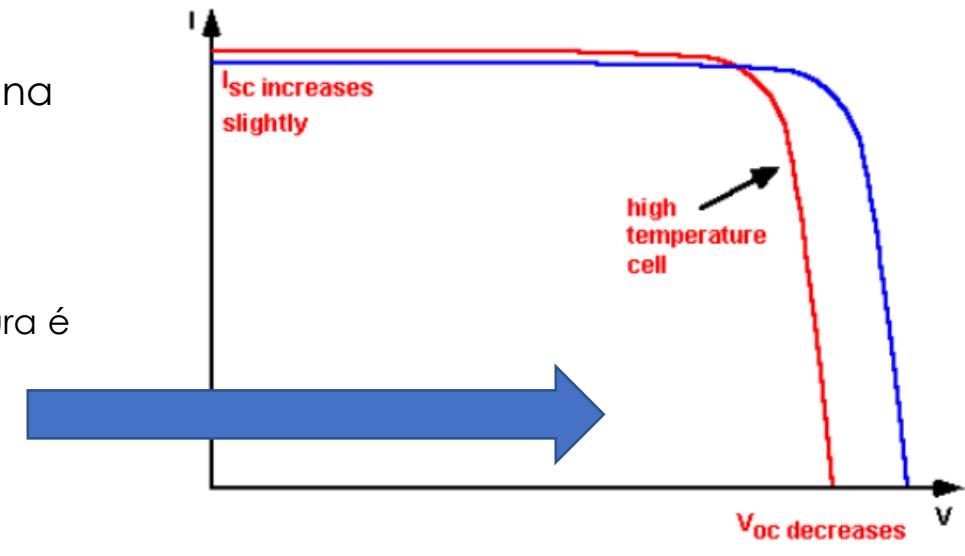
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – efeito da temperatura

Como todos os outros dispositivos semicondutores, as células solares são sensíveis à temperatura.

- Aumentos na temperatura reduzem o bandgap de um semicondutor
 - afetando assim a maioria dos parâmetros do material semicondutor.
 - A diminuição do band gap de um semicondutor com o aumento da temperatura pode ser vista como um aumento na energia dos eletrões no material.
 - Portanto, é necessária menos energia para quebrar a ligação.
- No modelo de ligação de um bandgap semicondutor, uma redução na energia de ligação também reduz o bandgap.
 - Aumentar a temperatura reduz o bandgap.
 - Numa célula solar, o parâmetro mais afetado pelo aumento da temperatura é a tensão de circuito aberto.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Parâmetros de células solares – efeito da temperatura

A tensão de circuito aberto diminui com a temperatura devido à dependência de I_0 com a temperatura. A equação para I_0 de um lado de uma junção pn é dada por:

$$I_0 = qA \frac{Dn_i^2}{LN_D}$$

D é a difusividade da portadora minoritária dada para o silício em função da dopagem

L é o comprimento de difusão do portador minoritário

N_D é o doping

n_i é a concentração intrínseca de portadores dada para o silício

Factor de idealidade:

representa uma medida da qualidade da junção p-n e do tipo de recombinação dos pares eletrão-buraco, sendo que um valor de n próximo de 2 pode degradar o fator de forma de uma célula (considerar 1 como valor típico).

$$n = \frac{V_M - V_{OC}}{\frac{k_B T}{q} \ln \left(1 - \frac{I_M}{I_{SC}} \right)}$$

Recombination Type	Ideality factor	Description
SRH, band to band (low level injection)	1	Recombination limited by minority carrier.
SRH, band to band (high level injection)	2	Recombination limited by both carrier types.
Auger	2/3	Two majority and one minority carriers required for recombination.
Depletion region (junction)	2	two carriers limit recombination.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Usando energia solar em naves espaciais

As células fotovoltaicas foram utilizadas pela primeira vez no satélite Vanguard 1, lançado pelos EUA em 1958. Desde então, a tecnologia solar foi bastante adaptada e otimizada para se adequar às condições do espaço.

Os painéis solares convencionais monocristalinos ou policristalinos usados em ambientes residenciais e comerciais não são duráveis o suficiente para suportar as condições extremas do espaço:

- Temperaturas excessivas
- chuva constante de radiação solar

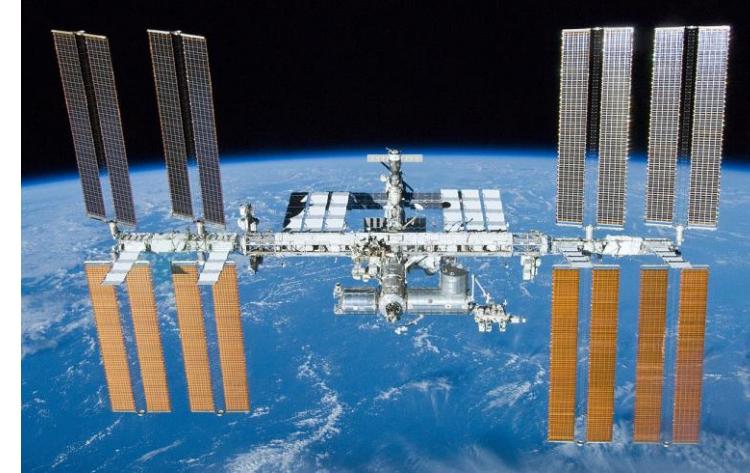
Devido a estes fatores ambientais únicos, a tecnologia dos painéis solares utilizados no espaço é bastante diferente dos painéis convencionais.

O satélite Vanguard 1 e suas pequenas células fotovoltaicas



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica



Por que a energia solar é necessária nos satélites?

- As naves espaciais e os satélites no espaço precisam de uma enorme quantidade de energia para funcionar. Antes que a energia solar fosse uma solução viável para fornecer essa energia, eram usadas baterias. O único problema é que as baterias têm uma capacidade definida e, sem meios para recarregá-las, tornam-se inúteis quando ficam sem energia.
- Painéis solares combinados com baterias são uma opção muito melhor
 - fornecem um fluxo constante de energia renovável. No momento, a energia solar é usada para fornecer eletricidade aos sistemas de computador e outros sistemas usados para monitorizar e controlar várias partes da nave.
- O objetivo final é usar energia solar para impulsionar naves espaciais e minimizar ou eliminar completamente a necessidade de outras fontes de combustível. Isto teria sérias implicações para as viagens espaciais de uma **forma muito positiva**.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Considerando o material mais usado, silício, em células solares temos:

- **Células de silício monocristalino:** Uma célula de silício monocristalino é produzida a partir de silício puro (cristal único). Como o silício monocristalino é puro e livre de defeitos, a eficiência da célula será maior.

- **Células de silício policristalino:** Na célula solar policristalina, o silício líquido é utilizado como matéria-prima e o silício policristalino é obtido do processo de solidificação. Os materiais contêm vários tamanhos cristalinos.
 - a eficiência deste tipo de célula é menor do que a da célula monocristalina

- **Células de silício amorfo:** O silício amorfo é obtido depositando filme de silício no substrato como uma placa de vidro.
 - O material de silício amorfo tem mais tolerância a defeitos do que o cristalino.
 - Danificar uma parte do painel, isso não afetará significativamente a potência geral.
 - Em contraste, os painéis cristalinos são muito mais frágeis e todo o painel irá falhar se for manuseado de maneira inadequada.
 - A eficiência das células amorfas é muito inferior à dos outros dois tipos de células: utilizados principalmente em equipamentos de baixo consumo de energia, como relógios e calculadoras de bolso.

Material	Efficiency (%)
Monocrystalline silicon	14-17
Polycrystalline silicon	13-15
Amorphous silicon	5-7

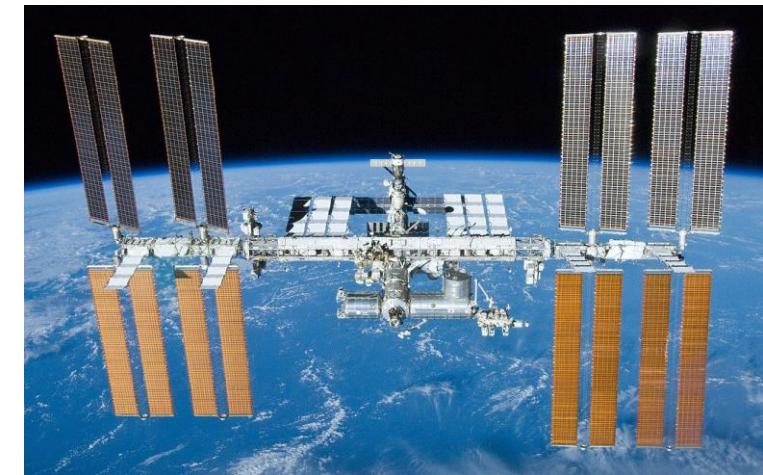
Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

Que tecnologia solar se usa no espaço?

Existem dois tipos de células solares comuns em naves espaciais:

- Células de silício cobertas por vidro fino
- Células multi-junções compostas de arseneto de gálio (GaAs) e outros materiais semelhantes
- As células de silício cobertas com vidro são muito semelhantes aos painéis solares convencionais, mas foram melhoradas para lidar com radiação e temperaturas extremas.
 - Esse tipo de painel pode ser encontrado na Estação Espacial Internacional, que atualmente abriga a maioria dos painéis solares encontrados no espaço.



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

- As células solares compostas de GaAs são muito mais eficientes:
- Esses painéis podem atingir cerca de 34% de eficiência contra 15-20% que a maioria dos painéis solares comerciais pode atingir.
- Os satélites no espaço também estão equipados com painéis solares que podem seguir a direção do sol para maximizar a absorção da luz solar.
 - Seguidores solares
- Os raios solares no espaço são ainda mais abundantes do que na Terra, devido à ausência de atmosfera.
 - Cerca de 51-70% da energia solar é refletida ou absorvida no seu caminho para a superfície da Terra através de nuvens, gases e poeira.



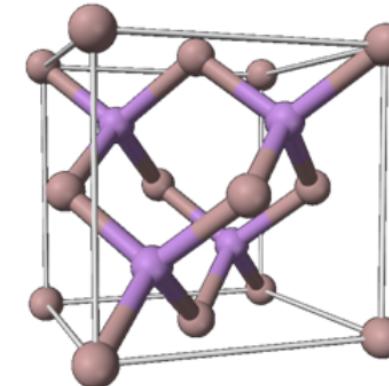
Painéis de GaAs de alta eficiência do satélite Dawn

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

GaAs – propriedades únicas!

- Gallium is the only liquid element of the group (m.p.29.7 °C). It expands on freezing and unlike mercury, wets glass.
- Gallium arsenide, when compared to silicon, has higher saturated electron velocity and high electron mobility which assists transistors of GaAs to work at higher frequencies and with less noise in the circuits. The relatively larger bandgap (1.4 vs 1.1 eV of silicon) leads to insensitivity to overheating of GaAs solar cells. GaAs has therefore been used to make one of the highest-efficiency single-junction solar cells **at 28.8% efficiency**.
- GaAs high operating speed and an ability to operate at low temperatures and under irradiation
- Unlike silicon which is a poor emitter of light due to an indirect bandgap (1.1eV), GaAs has a direct and wider band gap (1.4 eV), which translates to absorbing and emitting light efficiently. The wider bandgap also provides **resistance to radiation damage** and therefore GaAs is an excellent material for outer space electronics and used in high power applications. Unlike silicon, GaAs solar cells have **no performance loss when temperature is increased**
- GaAs is an infrared emitter finding applications in remote controller units.



GaAs's advantages over silicon
in semiconductor use

- High electron mobility (~8x Silicon)
- Significant reduction in signal noise
- High power transmission
- High breakdown voltages
- Direct bandgap

Smaller applied voltages means smaller power supplies (physically) as well as less heat, in a semiconductor.

Larger currents can allow for more current to be easily carried (amplification).

Can be operated at much higher frequencies than silicon equivalents.

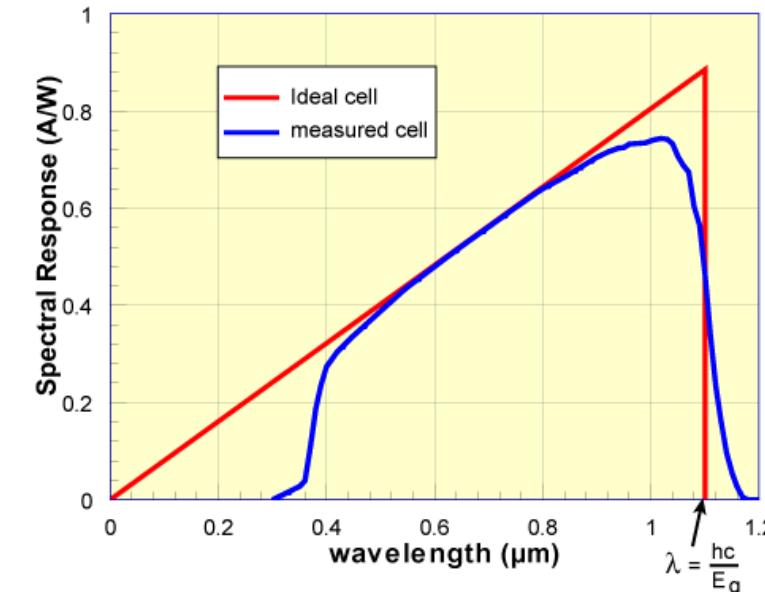
A NASA está constantemente a investigar diferentes materiais semicondutores para produzir melhores células solares para o espaço.
O GaAs é um exemplo disso!

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

- Quando o eletrão é libertado, outros eletrões na rede cristalina podem preencher o buraco, movendo assim a localização da carga positiva.
- Energia de bandgap (energia mínima): $E_g (J) = h\nu = hc/\lambda_g$
- $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$; c =speed of light $3 \times 10^8 \text{ m/s}$; ν =frequência, Hz; λ_g =bandgap wavelength, m
- $\rightarrow \lambda_g = hc/E_g = 1.11 \mu\text{m}$ when $E_g = 1.12 \text{ eV}$

$$h = 4.136 \times 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{Hz}^{-1}$$



Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

- Apenas comprimentos de onda inferiores a 1,11 µm resultam na produção de eletricidade a partir de células de Si puro
- **Outros intervalos de banda (eV) e comprimentos de onda de intervalo de banda (µm):**

Si	1,12	1,11
a-Si	1,7	0,73
CdTe	1,49	0,83
CuInSe ₂	1,04	1,19
CuGaSe ₂	1,67	0,74
GaAs	1,43	0,87

Comprimento de onda de bandgap mais curto: maior energia de banda proibida

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoeletrica, termoelétrica

- **Exercícios**
0. Se as especificações de um fabricante de painéis disserem que um painel tem área igual a 1m² e potência de pico 100W_p qual a eficiência de conversão do painel?
 1. Uma célula solar de 10x10 cm produz uma tensão de 0.5V e uma corrente até 2.5 A. Se a célula estiver a ser irradiada por 800 W/m², qual a eficiência da célula.
 2. Considere uma célula a ser irradiada por 800W/m² produzindo uma tensão de 0.5V e uma corrente de 2 A. A eficiência solar é de 12.5%. Qual a área da célula?
 3. A irradiação solar num módulo retangular (1.5m x 2.0m) de células fotovoltaicas é 550W/m². Se a eficiência das células for 12%, qual é a potência de saída do módulo?

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

- **Exercícios**
4. Dado que uma célula solar tem uma $V_{oc} = 4,2\text{ V}$ e uma $I_{sc} = 45\text{ mA}$, FF de 60%, qual é a sua eficiência? Considere que a luz usada durante a medida foi AM1.5, 1000W/m² e uma densidade de corrente de curto-círcuito de 0,9 mA/cm².
 5. A energia de bandgap de GaAs é 1,52 eV a 0 kelvin (-273.15 °C – zero absoluto) e 1,42 eV a 300 kelvin.
 - a) Calcula o comprimento de onda de corte a cada temperatura.
 - b) A QE interna da célula é 96% a 600 nm e 89% a 800 nm. O seguinte também se aplica: reflectividade de 5% (600 nm) e 3% (800nm). Calcula a eficiência quântica externa para ambos os comprimentos de onda.
 - c) Calcula a sensibilidade espectral para 600, 800 e 900 nm assumindo T = 0 kelvin.

Produção de Energia

Conversão mecânica (dínamo), fotovoltaica, piezoelétrica, termoelétrica

- **Exercícios**
6. Considere uma célula solar de GaAs ideal. Calcule a tensão de circuito aberto nas seguintes condições: densidade de fotocorrente igual a 26 mA/cm^2 , densidade de corrente de saturação de $2 \times 10^{-16} \text{ mA/cm}^2$ e tensão térmica de 25.9 mV a 300K . Considere mecanismo de recombinação simples. Calcule a eficiência da célula sabendo que célula quadrada tem 4 cm de lado o fator de preenchimento é de 70% (considera uma densidade de energia solar de 900 W/m^2).
 7. Sob específicas condições solares, uma célula fotovoltaica ideal produz 3 W e sua tensão de saída é de 0.5 V . Qual é a potência de saída, corrente e tensão do sistema se houver 10 células conectadas em série e três dessas unidades de 10 células são conectadas em paralelo.
 8. A área de superfície duma célula solar é de 80 cm^2 , a resistência em série é 10 mOhm , a resistência em paralelo 500 Ohm e a tensão de carga é 0.5 V e uma corrente de 1.1 A . Considere que a célula opera a uma temperatura de 35°C (308.15K) e uma corrente de saturação de 1nA . Num específico ponto, a densidade de energia solar é 300 W/m^2 . Calcule a eficiência.
 9. Uma célula solar típica tem R em série = $1.5 \Omega \text{ cm}^2$, com uma tensão de circuito aberto é de 0.5V . A densidade de corrente de curto circuito é 22 mA/cm^2 . Qual perda de potência fracionária?

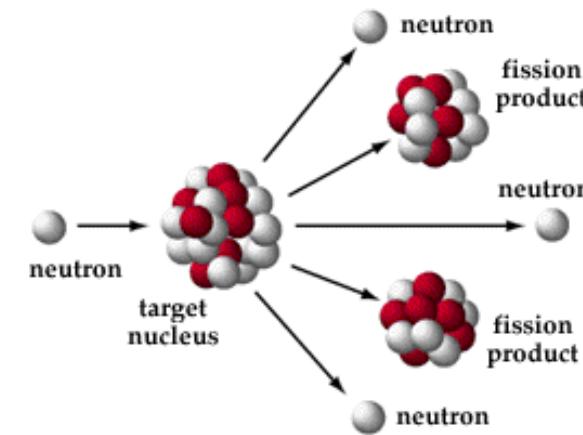
Produção de Energia

Energia Nuclear

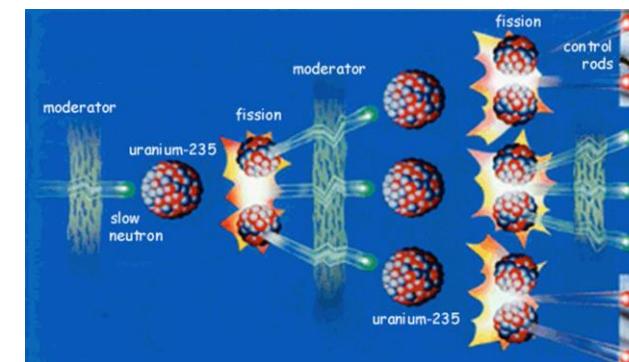
Fissão e fusão

Fissão - Divisão de um núcleo pesado em dois núcleos com números de massa menores.

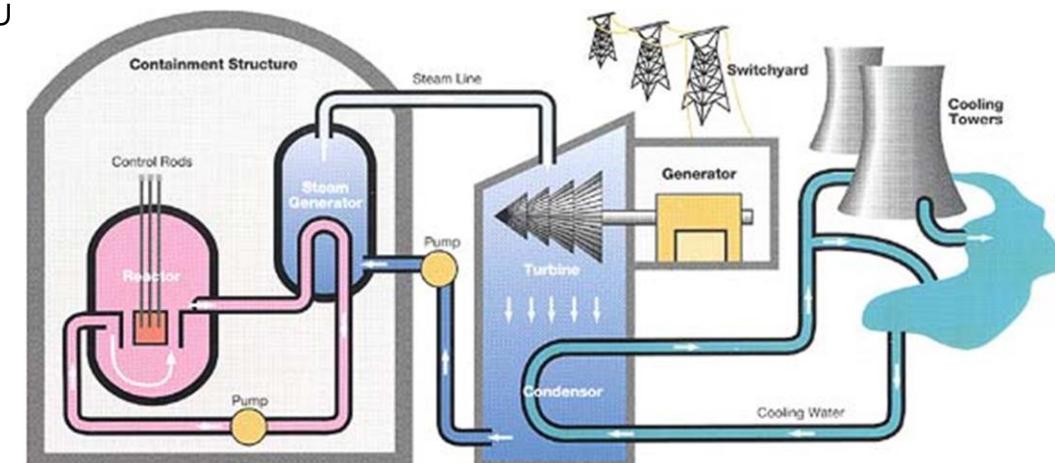
A fissão é a libertação de energia pela divisão de núcleos pesados (U235 e Plutónio239)



Cada fissão liberta 2 a 3 neutrões. Esses neutrões são desacelerados por um moderador (água ou grafite para baixar a velocidade dos neutrões para aumentar a probabilidade de fissão). Hastes de controle podem ser inseridas no núcleo do reator para reduzir a taxa de reação ou retiradas para aumentá-la.



A energia de reação criada pela fissão transforma a água em vapor, que gira uma turbina para produzir eletricidade sem carbono



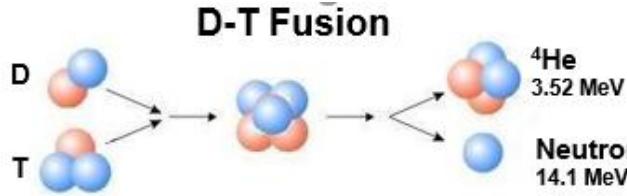
Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

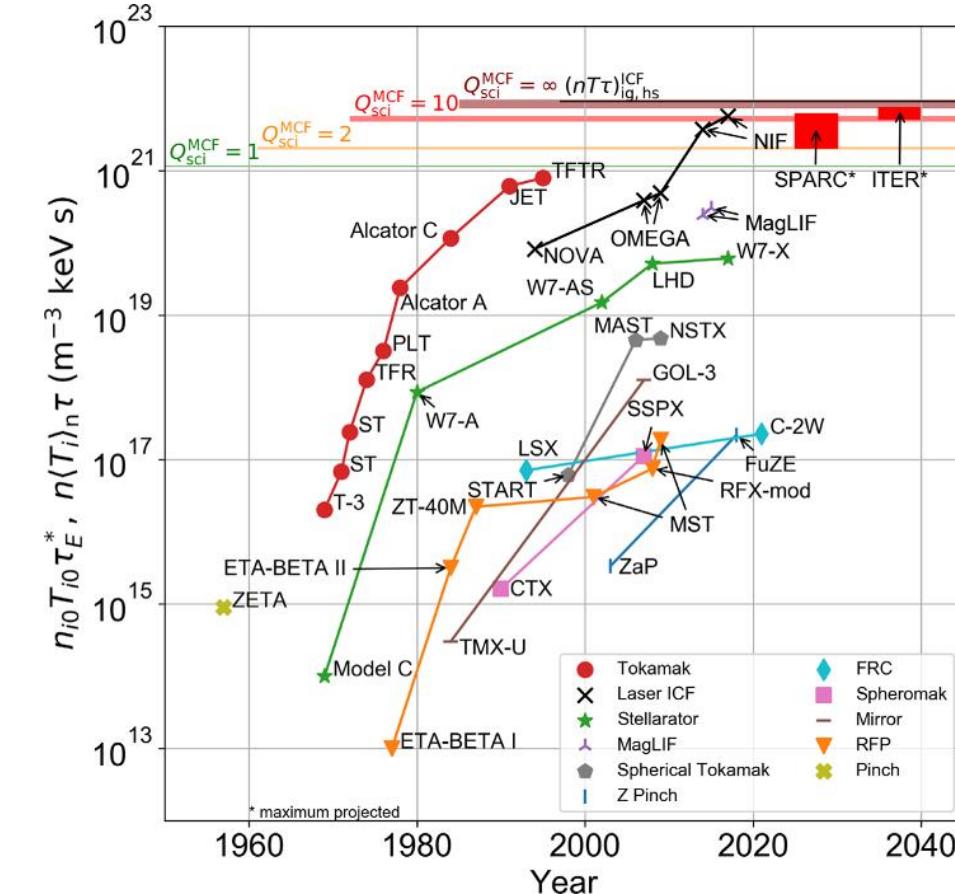
Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.

Dois núcleos leves como o deutério e o trítio para a fusão (libertação de energia por combinação de dois núcleos leves)



O objetivo das pesquisas é confinar os iões de fusão a temperaturas e pressões suficientemente altas e por tempo suficiente longo para fundir.

Gráfico ao lado mostra os progressos ao longo das décadas:



Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



O confinamento pode usar lasers poderosos ou feixes de iões para comprimir um pellet de combustível de fusão a temperaturas e pressão corretas.

Experiência do Lab nacional Lawrence Livermore:

Cientistas dos EUA anunciam avanço histórico em fusão nuclear

A experiência do Laboratório Nacional Lawrence Livermore produz "mais energia de fusão do que a energia laser". Esta descoberta pode levar a "progressos na defesa nacional e ao futuro da energia limpa".

DN/ AFP
13 Dezembro 2022 — 16:36



Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão



Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.

International Thermonuclear Experimental Reactor - (ITER, 2007 - presente) é um projeto de reator experimental a fusão nuclear baseado na tecnologia do Tokamak.
O projeto ITER é uma experiência destinada a atingir a próxima fase na evolução da energia nuclear, como meio de gerar eletricidade isenta de emissões



<https://www.youtube.com/watch?v=Hy8fB32GZoc>

<https://www.youtube.com/watch?v=BzK0ydOF0oU>

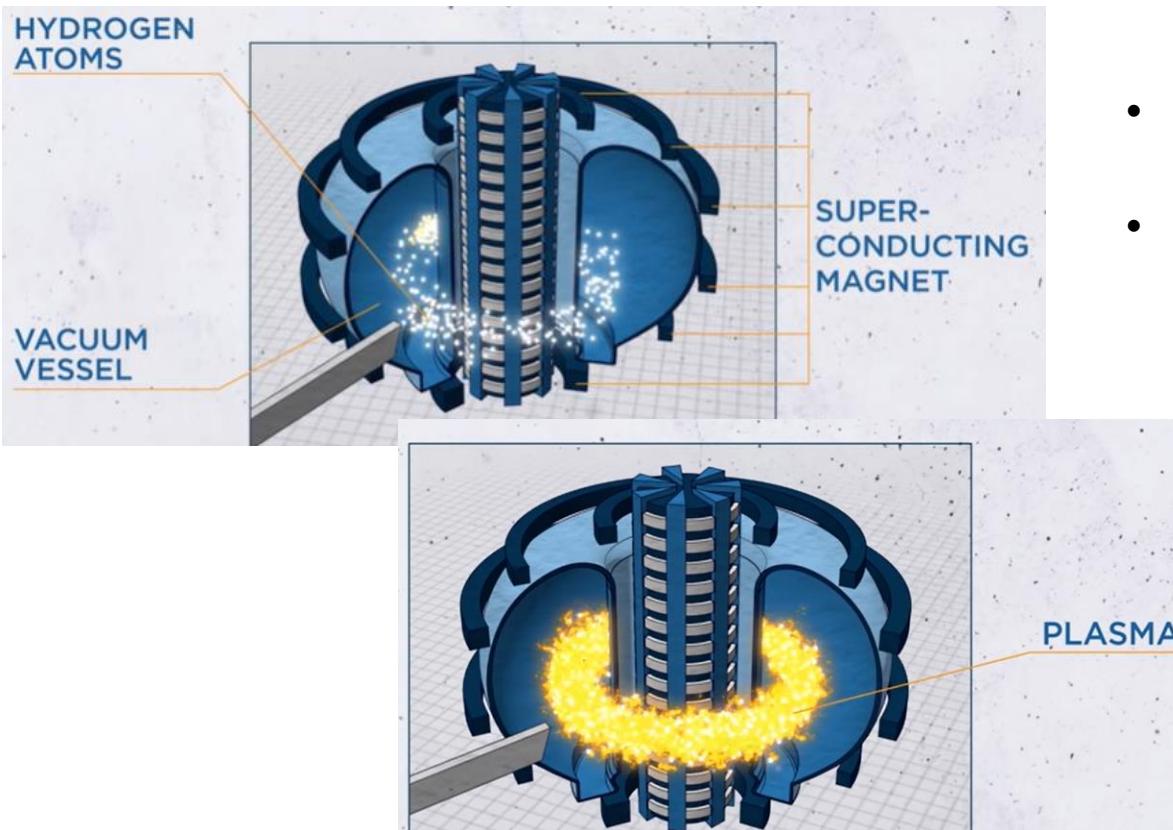
Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão



Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



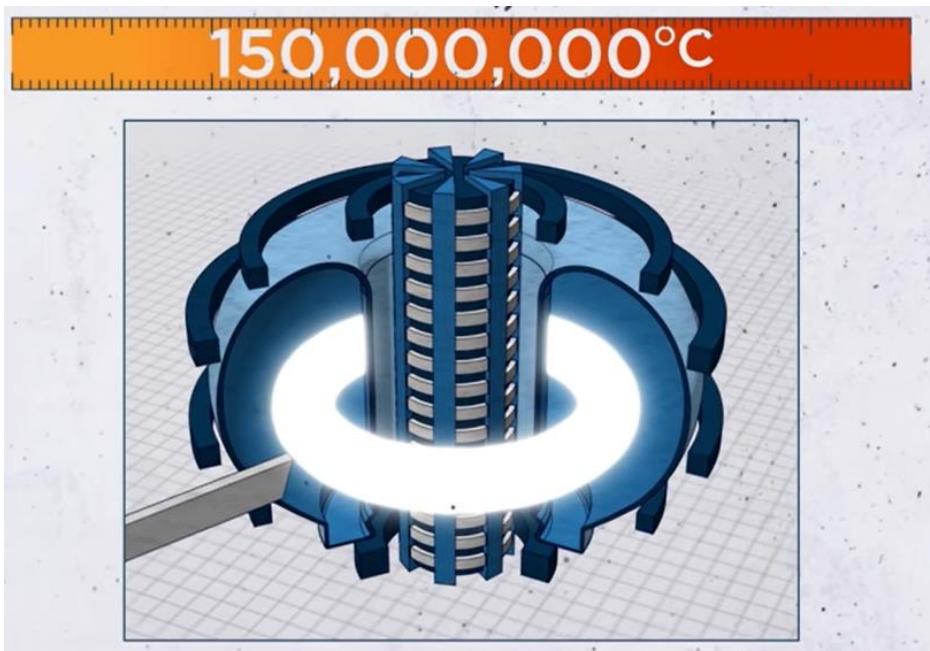
- Átomos de hidrogénio são injetados neste “recipiente” a vácuo.
- Um íman supercondutor gigante ao redor do “recipiente” é ligado e a tensão que “remove” os eletrões dos seus átomos formam algo chamado de plasma.
 - É um estado da matéria semelhante ao gás.

Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



- Esse plasma é então aquecido a temperaturas extremas até 150 milhões de graus Celsius. Como resiste?

Às vezes toca nas paredes: que material poderia suportar essa temperatura? A chave aqui é que há apenas uma pequena quantidade de plasma ($\sim 0,1$ g). Portanto, embora esteja excepcionalmente quente, isso é contrabalançado pela quantidade muito pequena, em comparação com a parede

- que tem muitas centenas de toneladas de massa: a parede pode resistir ao impacto sem ficar seriamente danificada.

Anteriormente, as paredes internas eram de carbono devido à sua resistência ao calor.

No entanto, agora foram instaladas estruturas de berílio e tungsténio dentro

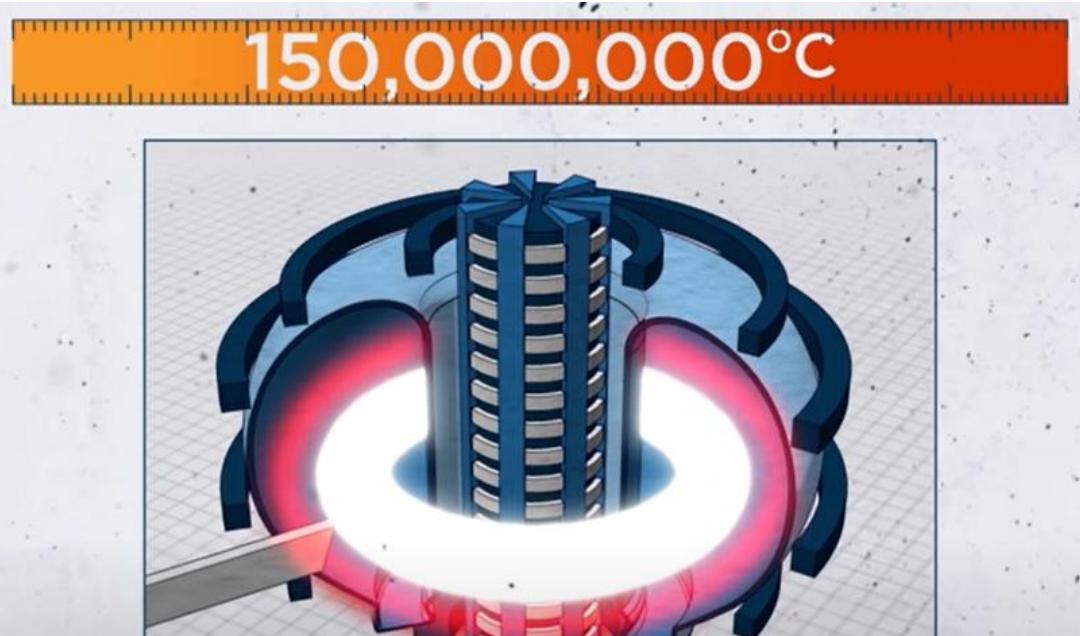
- não contaminam tanto o plasma quanto o carbono.

Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



- Esse plasma é então aquecido a temperaturas extremas até 150 milhões de graus Celsius.
- Os átomos fundem-se e libertam uma grande explosão de energia térmica no processo.
- Essa reação nuclear produz quatro vezes mais energia que a fissão nuclear e 4 milhões de vezes mais energia que o petróleo ou o gás.

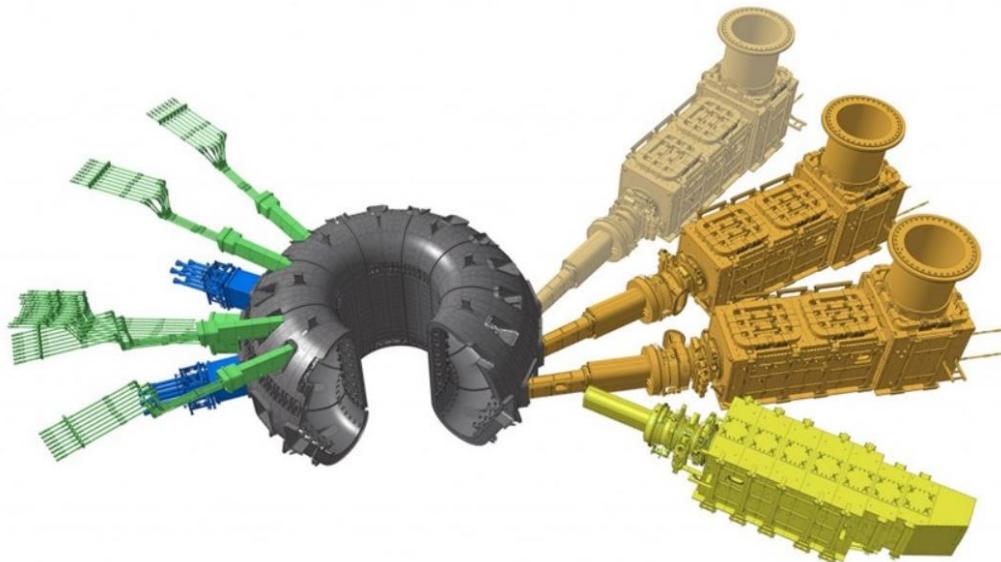
[Major breakthrough on nuclear fusion energy - BBC News - YouTube](#)

Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



O ITER Tokamak contará com três fontes de aquecimento externo para levar o plasma à temperatura necessária para a fusão:

- injeção de feixe neutro (direita)
- duas fontes de ondas eletromagnéticas de alta frequência - aquecimento de ciclotrão de iões e eletrões (lançadores esquerdo, azul e verde).

Ciclotrão: acelerador de partículas, no qual as partículas carregadas descrevem uma espiral de muitas voltas, perpendicularmente a um campo magnético, e recebem uma aceleração, sempre no mesmo sentido, de um campo elétrico alternado, no começo e no fim de cada meia volta da espiral.

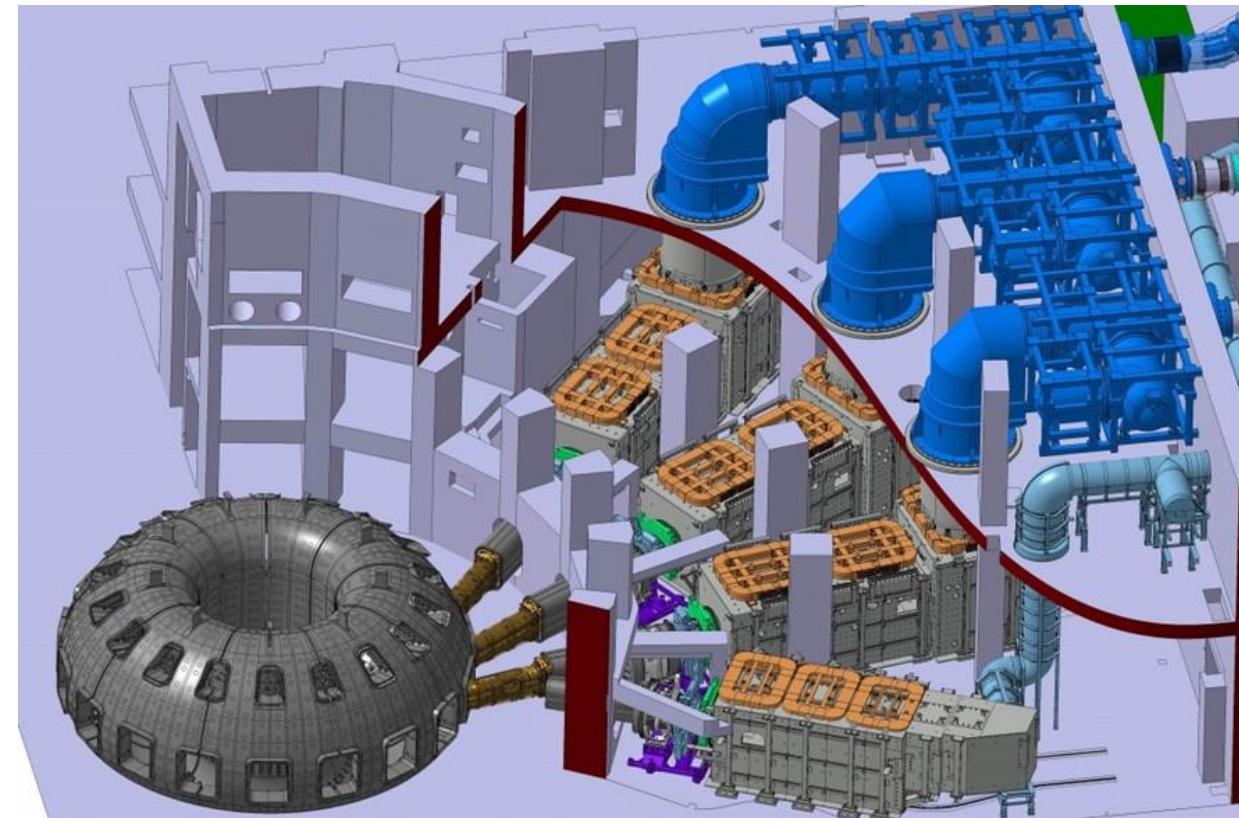
Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão



Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.

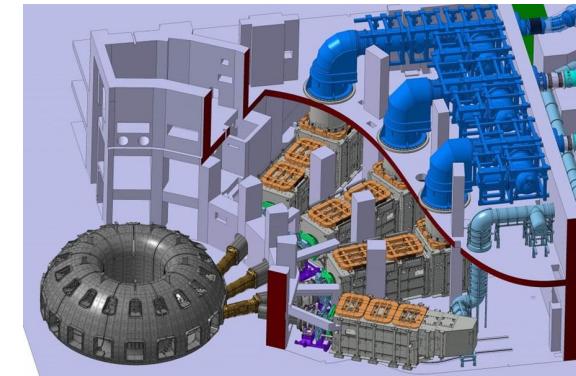


Produção de Energia

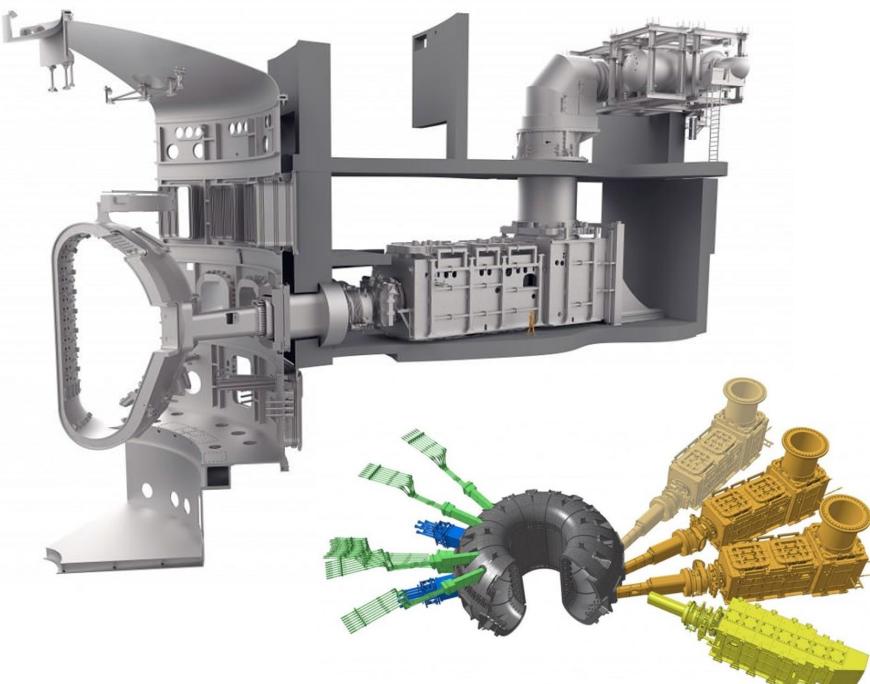
Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.



NEUTRAL BEAM INJECTION



Injetores de feixe neutro são usados para disparar partículas descarregadas de alta energia no plasma onde, por meio de colisão, transferem sua energia para as partículas de plasma.

Antes da injeção, os átomos de deutério devem ser acelerados fora do tokamak até uma energia cinética de 1 MeV.

Dois injetores de feixe neutro – cada um fornece um feixe de deutério de 16,5 MW com energias de partículas de 1 MeV – estão atualmente previstos para o ITER. Um terceiro feixe neutro será utilizado para fins de diagnóstico.

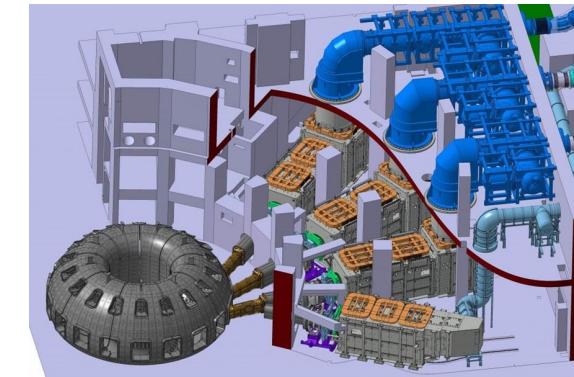
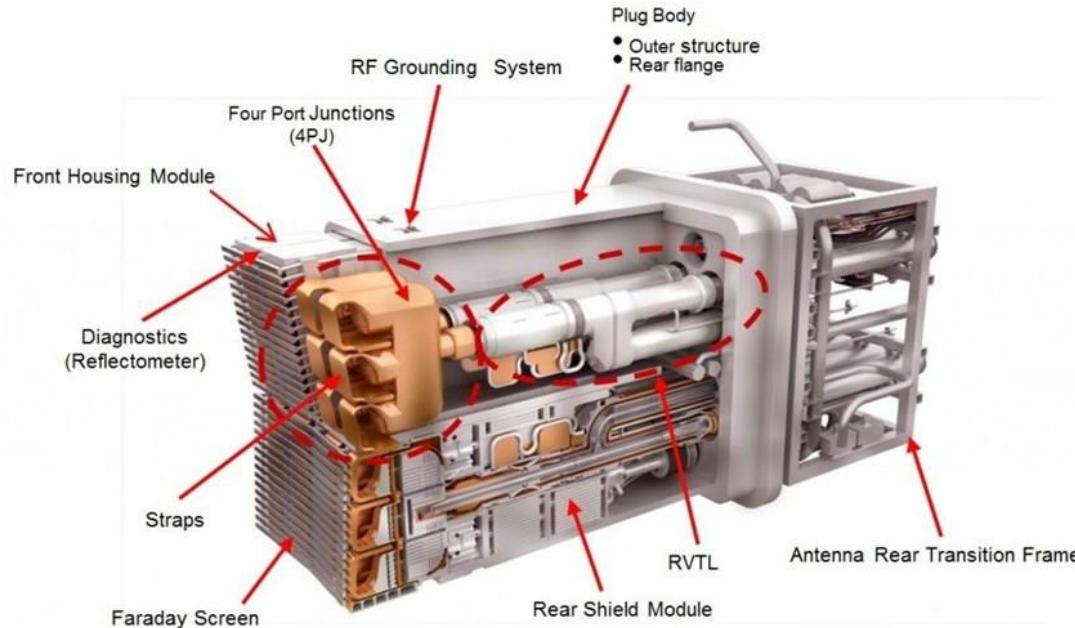
Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.

ION CYCLOTRON HEATING



Antenas de aquecimento por ressonância ciclotrônico iônica (ARCI) de 45 toneladas fornecerão 10 MW de potência de aquecimento cada uma para o equipamento do ITER.

- Ondas de rádio em frequências diferentes para trazer energia térmica adicional ao plasma,
 - da mesma forma que um forno de micro-ondas transfere calor para os alimentos por meio de micro-ondas.
- No aquecimento por RCI, a energia é transferida para os íões no plasma por um feixe de radiação eletromagnética de alta intensidade com uma frequência de 40 a 55 MHz.

Um gerador, linhas de transmissão e uma antena são necessários para o aquecimento do ciclotrônico iônico.

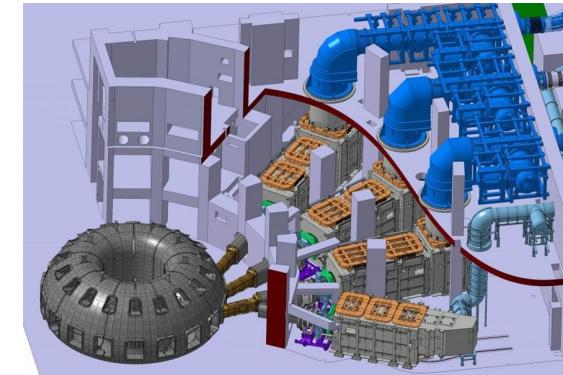
- Um gerador produz ondas de RF de alta potência que são transportadas ao longo de uma linha de transmissão até uma antena localizada no recipiente a vácuo, enviando as ondas para o plasma.

Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

**Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.**



ELECTRON CYCLOTRON HEATING



Cada um dos 24 gyrotrons do ITER gerará um feixe de micro-ondas mil vezes mais potente que um forno de micro-ondas tradicional. Em desenvolvimento na Europa, Índia, Japão e Rússia.

O Aquecimento por Ressonância Ciclotrônico de Eletrões (ARCE) aquece os eletrões no plasma com um feixe de radiação EM de alta intensidade a uma frequência de 170 GHz (a frequência de ressonância dos eletrões).

- Os eletrões, por sua vez, transferem a energia absorvida para os iões por colisão.

O sistema de aquecimento ciclotrônico eletrônico também é utilizado para depositar calor em locais muito específicos do plasma, como mecanismo para minimizar o acúmulo de certas instabilidades que levam ao resfriamento do plasma.

A energia será fornecida por gyrotrons poderosos e de alta frequência como fontes de energia. O projeto do ITER inclui o desenvolvimento de gyrotron de 1 MW operando a 170 GHz com duração de pulso superior a 500 s.

Produção de Energia

Energia Nuclear

Fissão e fusão

Fusão - Combinando dois núcleos leves para formar um núcleo mais pesado e mais estável.
O sol produz a sua energia por fusão.

ITER:

We Went Inside the Largest
Nuclear Fusion Reactor - YouTube