



DEGRADAÇÃO E FALHA EM MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

Adnei Melges de Andrade

IEE 2023

INTRODUÇÃO - 1

Módulos fotovoltaicos não são dotados de partes móveis. As exceções são os sistemas que seguem o sol, em um ou em dois eixos.

A maioria dos problemas que surgem na operação dos sistemas fotovoltaicos é ligada à resistência à **corrosão** ou **estabilidade** dos materiais envolvidos na construção dos módulos.

Fabricantes garantem até **25 anos de vida** para módulos de silício cristalino produzidos com a tecnologia disponível no início da terceira década do terceiro milênio.

Há mecanismos que causam degradação e mesmo podem levar a falha dos módulos fotovoltaicos. São mecanismos relacionados à **penetração de água** e problemas decorrentes de **estresse térmico** na estrutura dos módulos e nas células solares.

No que segue, estamos considerando módulos fotovoltaicos de **silício cristalino**.

INTRODUÇÃO - 2

É importante considerar que quando um fornecedor de módulos fotovoltaicos dá uma **garantia, de 25 anos** por exemplo, ele está garantindo que tal módulo funcionará com, no mínimo, **80%** de sua capacidade inicial de geração de energia após o prazo considerado.

Tipicamente em um módulo pode ocorrer **perda** de cerca de **3%** de sua eficiência no primeiro ano de operação e no decorrer de sua vida útil pode perder até **0,7%** a cada ano adicional. Alguns fabricantes garantem **90%** do desempenho inicial até o **12º** ano de operação e **80%** do desempenho inicial após **25** anos de uso.

Considerando o sistema como um todo, é necessário lembrar que os equipamentos associados, como inversores, e baterias em sistemas não conectados à rede, têm seus ciclos de vida específicos. Quanto aos **inversores**, o tempo de vida útil é de **10 anos a 15 anos**, condicionado às condições de uso e qualidade da proteção contra incidência de descargas atmosféricas.

A degradação dos módulos depende também das **condições** em que estão instalados. Em regiões desérticas ou de clima moderado, degradam mais lentamente que em regiões quentes e úmidas.

INTRODUÇÃO - 3

A definição de *falha* dos sistemas fotovoltaicos é imprecisa, diferentemente do que ocorre, por exemplo com um equipamento eletrodoméstico. No caso de equipamentos como eletrodomésticos, a IEC60050-191 define falha como o término da capacidade do item em desempenhar uma determinada função. Para um módulo fotovoltaico essa não é uma definição clara (Ref. 1).

A Agencia Internacional de Energia define **falha** de um módulo quando este **degrada irreversivelmente em potência** ou cria um problema de segurança.

O Instituto Electric Power Research Institute, em seu estudo com o levantamento de uma década (1979-1989) de sistemas fotovoltaicos instalados, admite o declínio da potência máxima de 50% para definir que um módulo fotovoltaico não é mais adequado.

Na sequência vamos tratar dos “**Modos de Degradação**”, que levam a um processo gradual da deterioração das características do módulo, afetando a operação dentro de limites de critérios de aceitabilidade. **A degradação não tira do módulo a capacidade converter a energia solar em eletricidade, mas afasta-o do ponto ótimo de operação.**

Comparação de tecnologias FV

Maturidade, desempenho, presença no mercado e tempo de vida

Technology	Year surpassing 10% eff.	2020 Market share (%)	Record cell efficiency (%)	EPBT (y)	Best literature report of outdoor lifetime (y)
Monocrystalline Si	1957 [8]	66.6	26.7	1.4–7.3	>20
Polycrystalline Si	1984	28.4	24.4	0.8–4.2	>20
CdTe	1981	4.1	22.1	0.8–2.7	>20
CIGS	1981	0.8	23.4	1.3–2.8	>20
Amorphous Si:H	1992	0.1	14.0	1.1–3.2	>20
Dye-sensitized Solar Cells	1997	–	12.3	0.6–1.8	<2 [9]
Organic Photovoltaics	2012	–	17.5	0.1–1 [41]	–2 [12, 13]
Perovskite Solar Cells	2012	–	25.5	0.2–5.4	<0.5 [14]

5

Modos de Degradação

reduções reversíveis

A redução da produção de energia pode ser **reversível**. Sujidades na superfície dos módulos, ou sombreamento, por exemplo podem ser removidos.



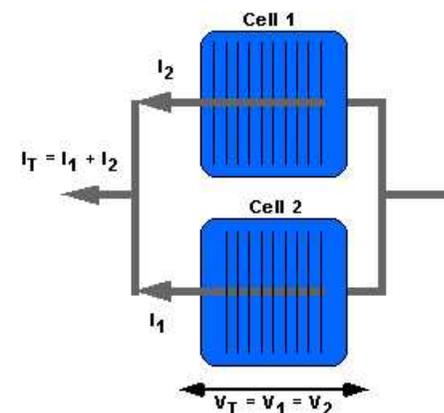
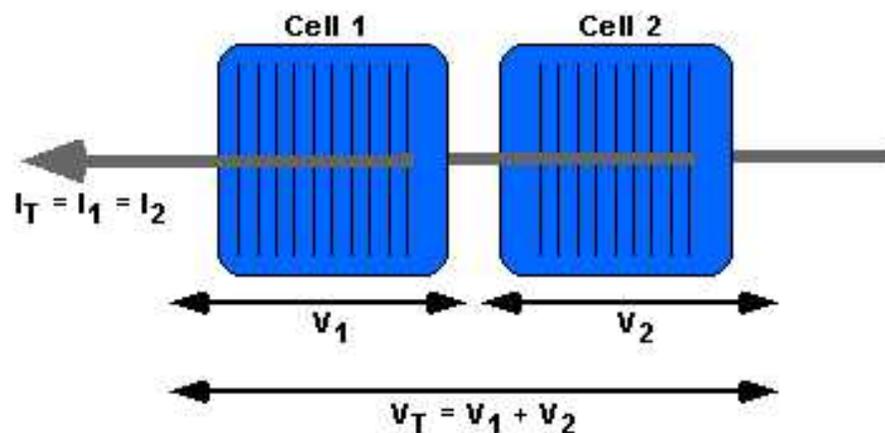
Ref.2

O acúmulo de **sujeira** trazida pelos ventos, ou produzidas por aves e insetos, pode gerar até cerca de **10% de perdas** na produção de energia.

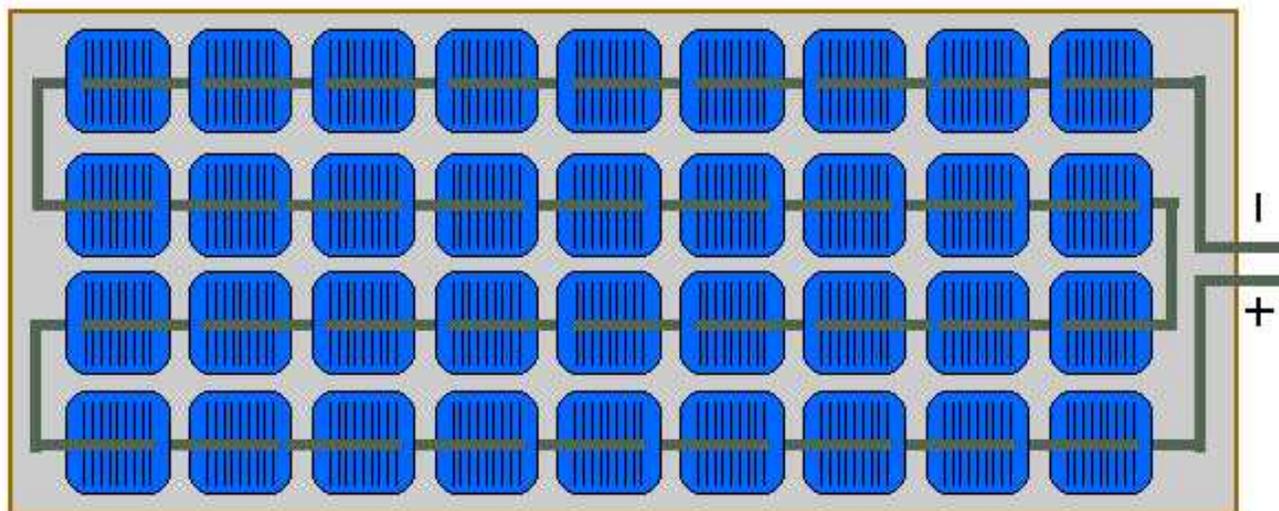
Problemas devidos à conexão entre módulos podem modificar o ponto de operação do sistema e **reduzir** a produção de energia.

Redução de desempenho dessa natureza **pode ser eliminada** após limpeza das superfícies dos módulos ou da remoção de elementos que causam sombra.

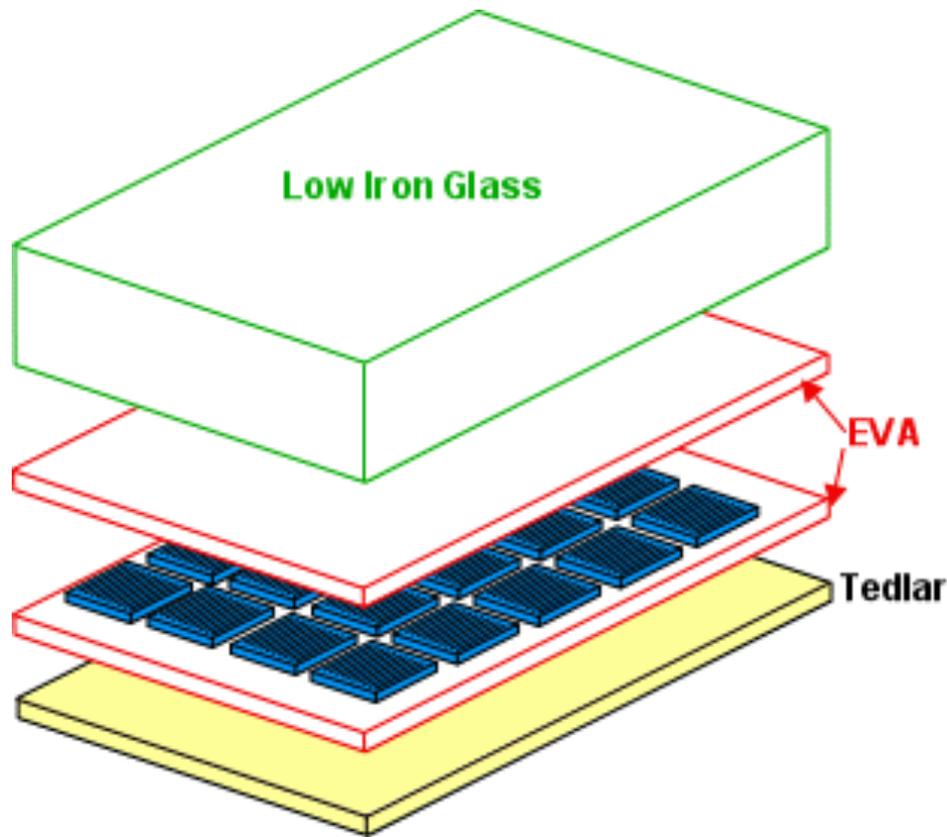
Conexão de módulos fotovoltaicos



A typical module has
36 cells in series



Partes constituintes de um módulo FV



- 1 - Cobertura frontal de vidro temperado e anti-reflexivo
- 2 – Encapsulante, em geral um polímero transparente e isolante (EVA: Etileno-Acetato de Vinila)
- 3 - Células solares conectadas em série/paralelo
- 4 - Contatos metálicos entre as C.S. para conduzir a corrente gerada para o circuito externo
- 5 - Chapa de Tedlar (fluoreto de polivinila) para suporte mecânico e garantir impermeabilidade
- 6 - Caixa de conexões, situada na parte posterior do módulo, fabricada com material isolante
- 7 - Estrutura de sustentação para dar rigidez mecânica ao conjunto, usualmente em Alumínio.

Há uma tendência atual de produzir módulos selados integralmente com vidro nas duas faces.

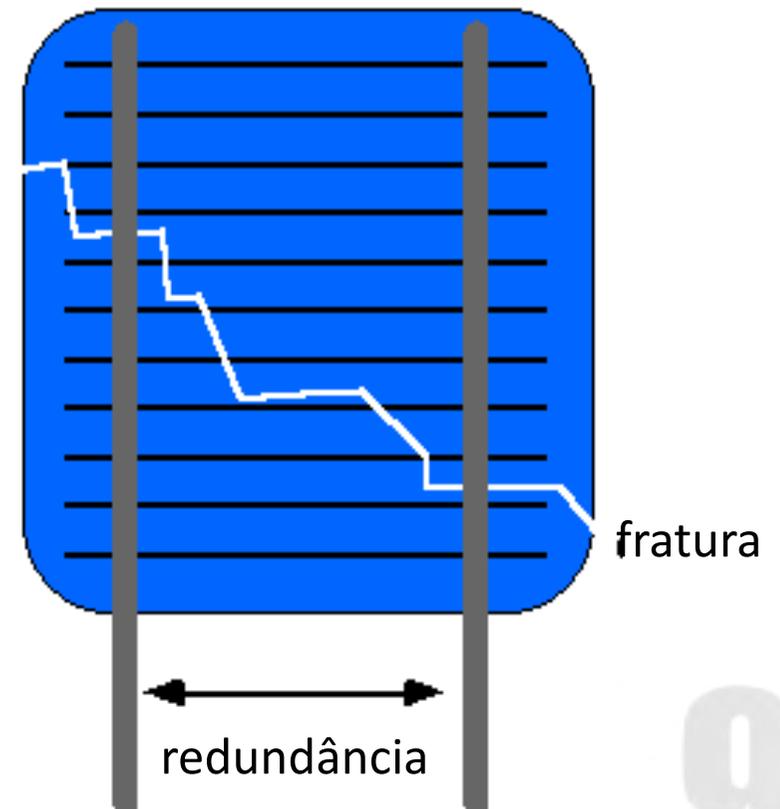
Degradação permanente - 1

Degradação das células solares nos módulos

As CS podem se degradar piorando o desempenho dos módulos principalmente devido:

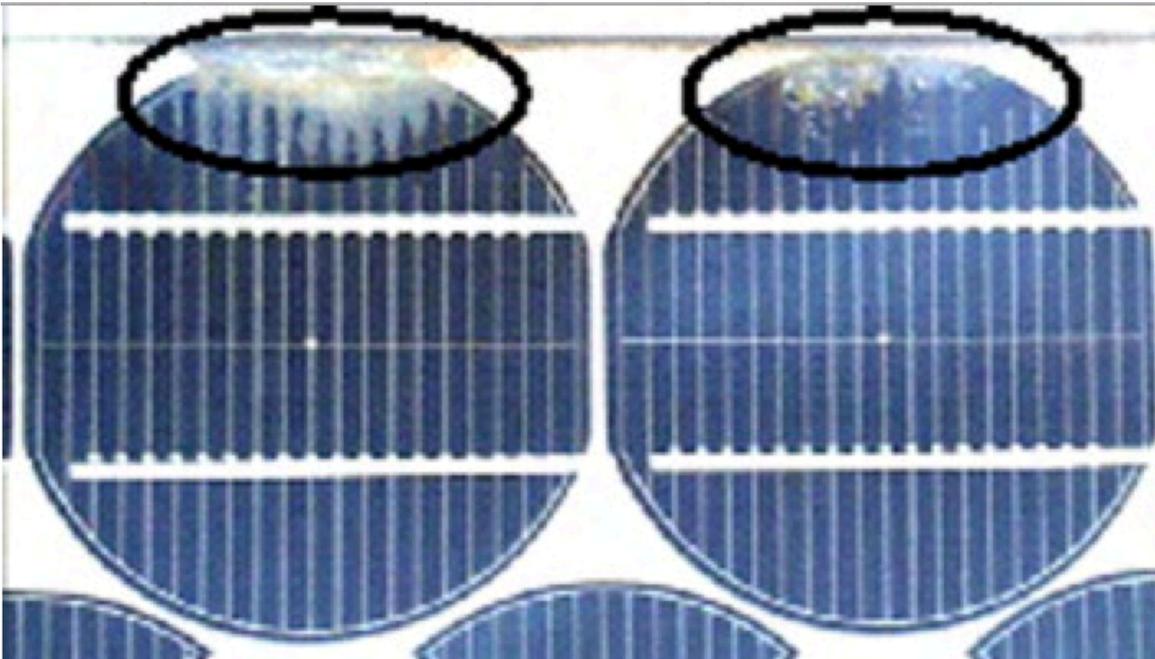
- Ao aumento de sua **Resistência em Série** devido à contatos que degradam pela entrada de água no módulo;
- À redução de sua **Resistência em Paralelo** decorrente da **migração** de metais através da junção p-n;
- À **deterioração** da camada antirrefletora.

As células solares podem sofrer **quebra** devido a **estresse térmico**, queda de **granizo**, **estresse mecânico** latente na fabricação ou na montagem do módulo e, que aparecem posteriormente.



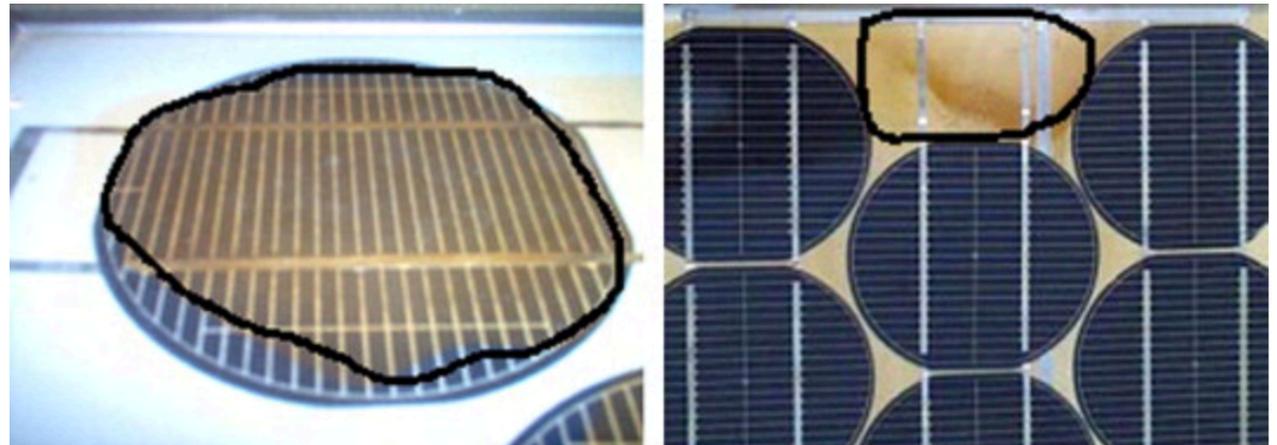
Degradação permanente – 2

- **Quebra do vidro frontal** devido a queda de granizo, estresse térmico, vandalismo, ventos fortes e manuseio descuidado.
- A degradação de módulos pode ocorrer no campo devido a **curtos-circuitos** originados da **degradação do isolamento elétrico** causado por **intemperismo**, que leva à delaminação, fratura ou corrosão **eletroquímica**. Menos comum nos módulos mais modernos, a **delaminação** tem como causa a redução da força de adesão entre as camadas de materiais que compõe o módulo. A **delaminação** possibilita a **penetração de água** no módulo, além de aumentar a perda devido ao **aumento da luz refletida** (Ref. 4). A penetração de umidade pode levar à oxidação e corrosão dos contatos.



Degradação permanente – 3

- **Descoloração** dos módulos. Os encapsulantes contêm **estabilizadores** (que permitem longa vida), mas que ao longo do tempo **podem se perder**. É o caso do EVA, que pode gradualmente perder transparência, tornando-se **amarelo**, ou **marron**, com liberação concomitante de **ácido acético**. Ocorre particularmente nos sistemas FV de concentração devido às temperaturas elevadas, mas afetam também módulos planos, reduzindo o desempenho dos sistemas. O maior problema é a perda de eficiência dos módulos devida à **redução na absorção da radiação** incidente. Decorrem de reações foto-oxidativas ligadas à combinação de temperaturas elevadas (**>50°C**) e radiação **UV na presença de umidade**, decorrente da **perda de absorvedores de UV** (Ref.5) na interface das CS com o EVA ou o material adesivo.
- **Corrosão** na caixa de junção
- **Estresse térmico** e “hot spots”.
- **Diodos “bypass”** podem falhar por aquecimento excessivo ou por subdimensionamento.

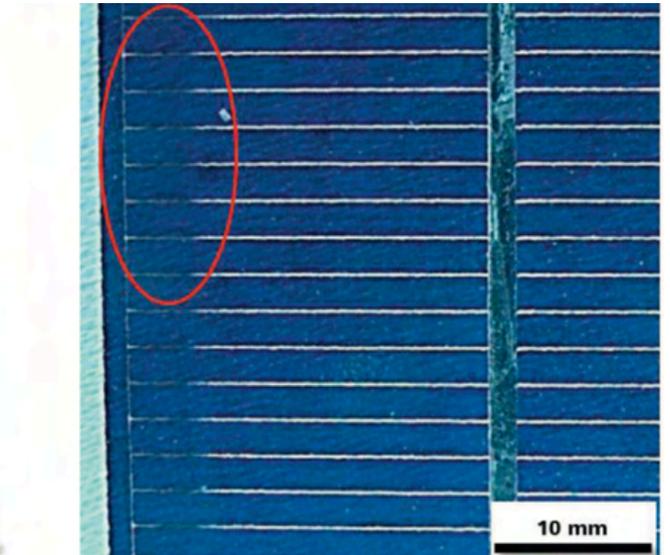
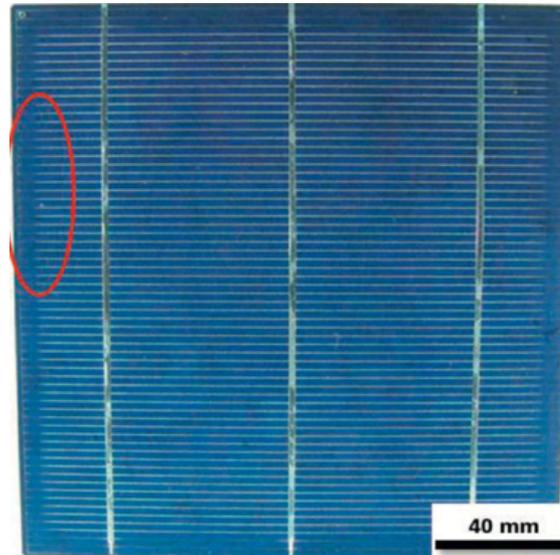


Baba de caracol (Snail track)

A *baba de caracol* está relacionada à presença de **micro rachaduras** nas bordas das células em microrachaduras na CS e aparece como descoloração dos contatos produzidos com a pasta usada na serigrafia nas C.S.. Usualmente ocorre devido à efeitos combinados de **temperatura elevada, umidade e radiação UV**. Normalmente aparece entre 3 e 12 meses após o início do uso do módulo.

Em muitos casos, após seu surgimento, a *baba de caracol* se **estabiliza** sem afetar significativamente a geração de energia FV. O problema é a ocorrência de rachaduras no vidro frontal, com a penetração de **umidade no EVA** e **reações químicas** que se dão com a liberação de **ácido acético, migração de íons de prata** dos contatos e formação de **Ag_2CO_3** , que confere uma coloração amarronzada.

12



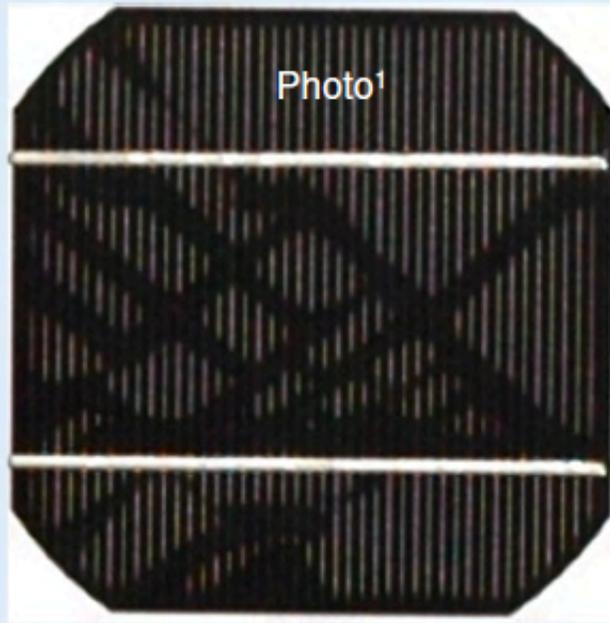
Tipos de *baba de caracol*

Tipos de *baba de caracol*



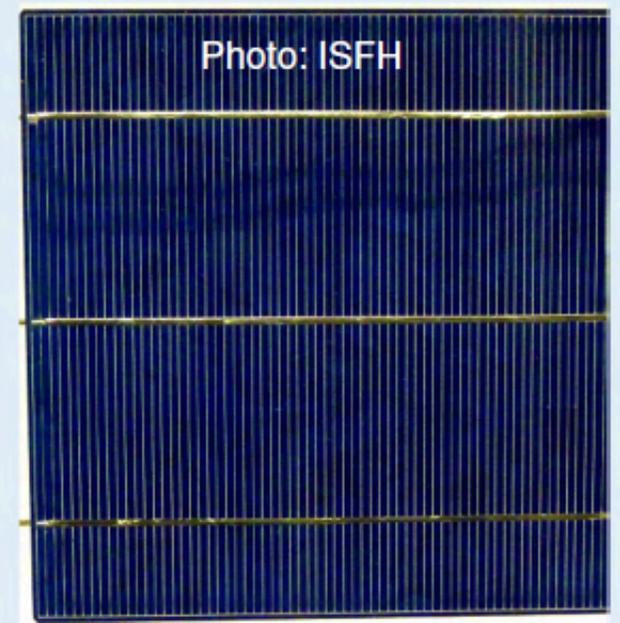
Type I

Tracks without cell
frame discoloring



Type II

Tracks with cell
frame discoloring

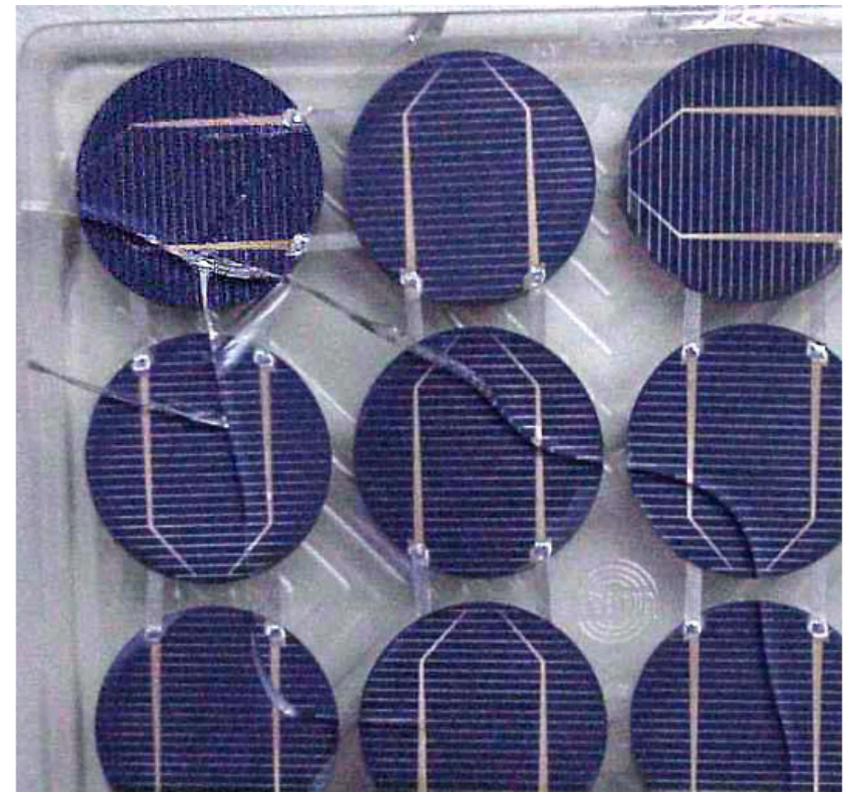
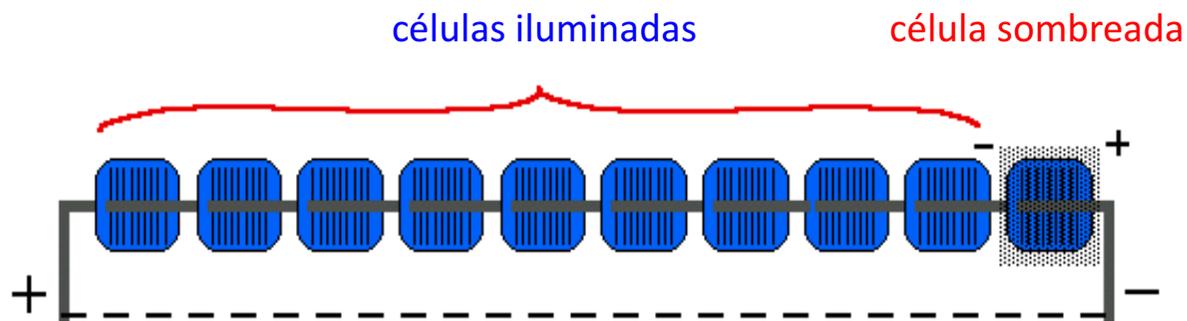


Type III

Tracks with space to
diffusion open area

Pontos quentes (hot spots) - Degradação de módulos

Em um “string” de CS sob iluminação com uma delas **sombreada**, ou com **características inferiores** às demais, quando a corrente gerada pelas **CS iluminadas** atinge a **corrente de curto-circuito** da CS sombreada, a corrente do “string” fica limitada pela corrente gerada pela CS “**má**”. A redução da corrente faz **subir a tensão** das **CS iluminadas**, frequentemente **polarizando inversamente** as CS sombreada. Nessa condição, a potência gerada pelas CS iluminadas é dissipada na **CS sombreada**. O resultado é **superaquecimento localizado**, um “**ponto quente**”, que pode **quebrar o vidro frontal**, pode ocasionar a **fusão das soldas** e, pode **degradar a célula solar**.

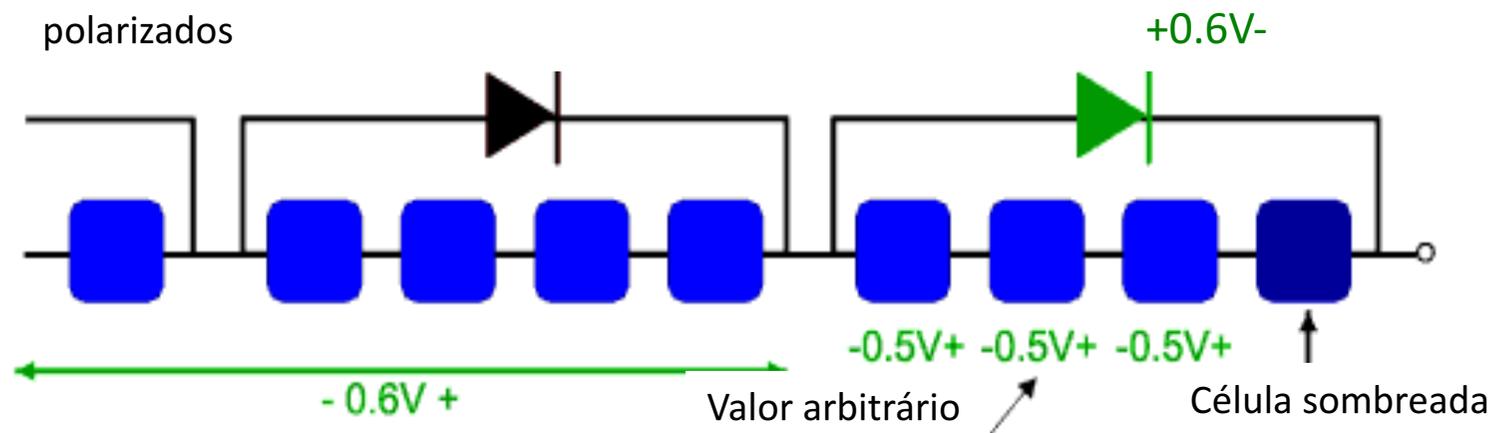


Pontos quentes – Diodos *Bypass*

Nos módulos atuais, para evitar possíveis “*hot spots*” e seus danos, são utilizados **diodos de desvio** conectados em paralelo com os “*strings*” de células solares, mas em polaridade oposta (ref 1).

Diodos de desvio não tem efeito sobre as CS iluminadas por estarem inversamente polarizados

Diodo sobre CS sombreada fica diretamente polarizado e conduz

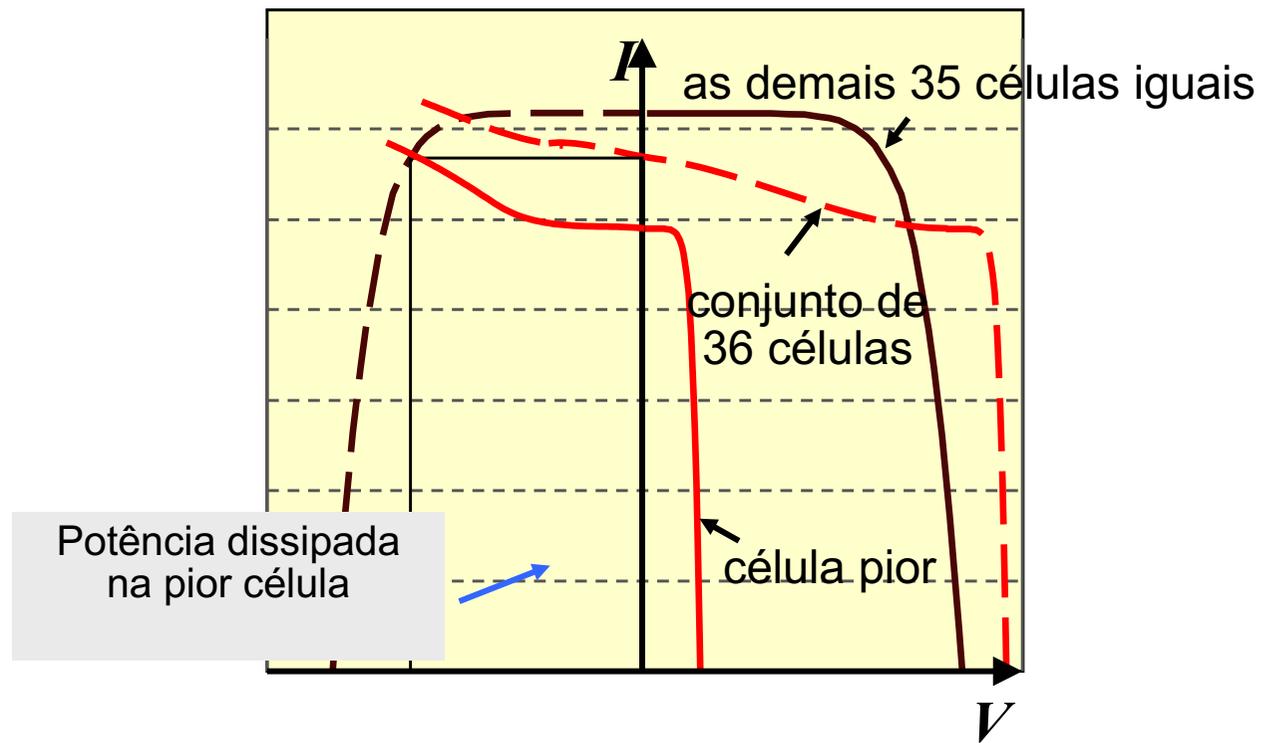


Os diodos são **utilizados por grupos de CS** nos módulos. A tensão sobre a CS sombreada é a **soma das tensões em polarização direta das CS** que compartilham o diodo *bypass* mais a tensão no diodo *bypass*. A **queda de tensão na CS sombreada** depende do **nível do sombreamento**. Completamente sombreada, a CS fica diretamente polarizada devido a sua corrente I_{sc} com cerca de 0,6V. Com sombreamento parcial, parte da corrente das CS iluminadas pode fluir no circuito e o restante polariza diretamente suas junções, diminuindo a queda de tensão direta nelas. **A máxima dissipação de potência na CS em sombreamento** é aproximadamente **igual à capacidade de geração do grupo de CS iluminadas**.

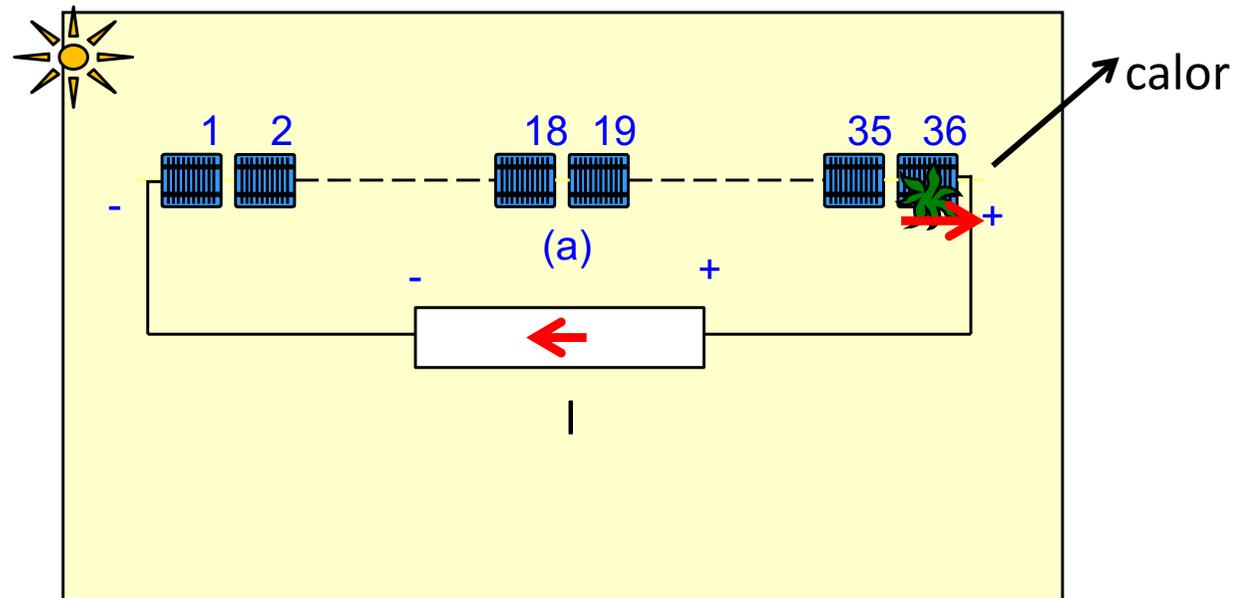
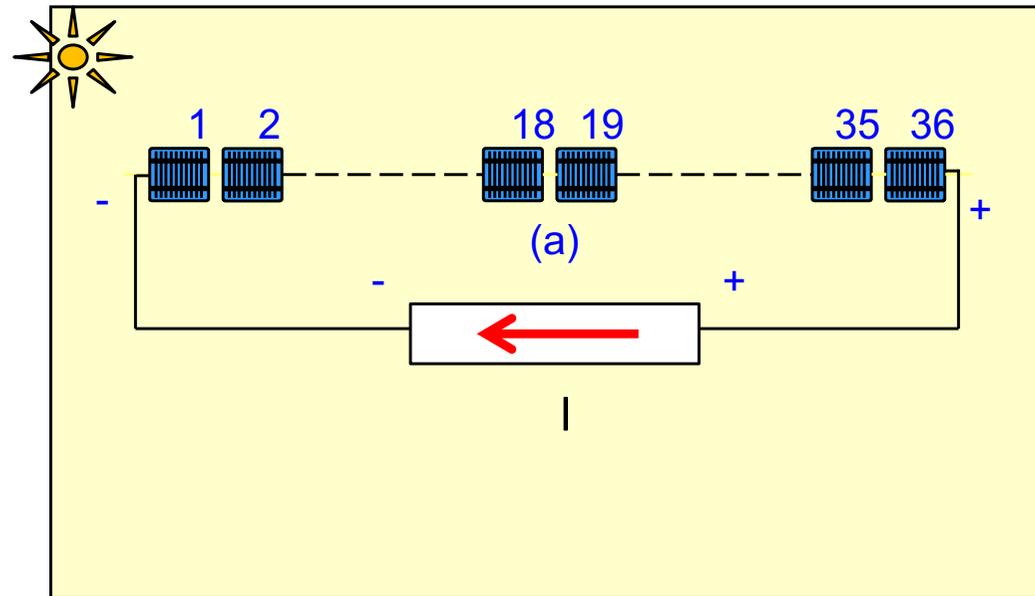
Alguns fabricantes colocam um diodo *bypass* a cada 18 ou 20 células, dando a mesma garantia de desempenho do módulo.

Pontos quentes em módulos

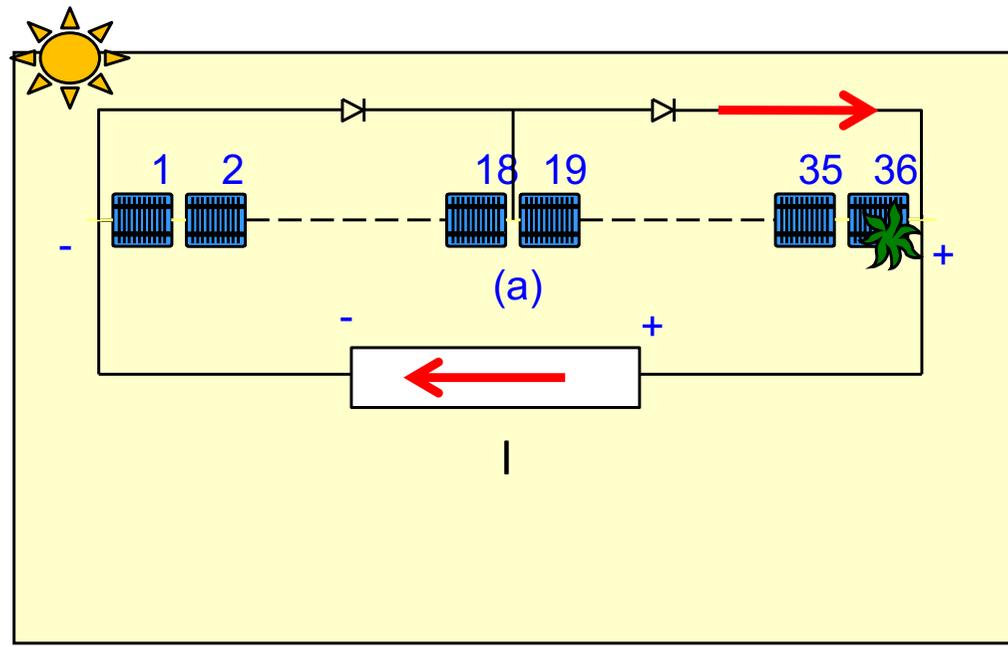
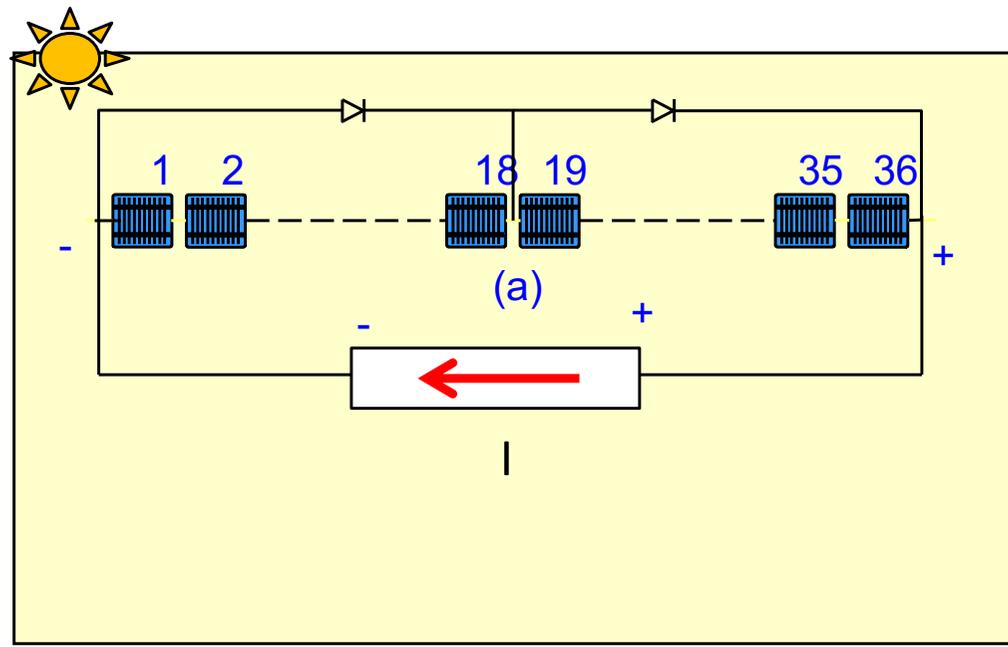
- Ocorrem quando uma C.S. dissipa a potência produzida pelas demais células do *string*
- É causado por células defeituosas ou parcialmente sombreadas
- Pode danificar de forma irreversível o encapsulamento



Ponto quente (Hot Spot)

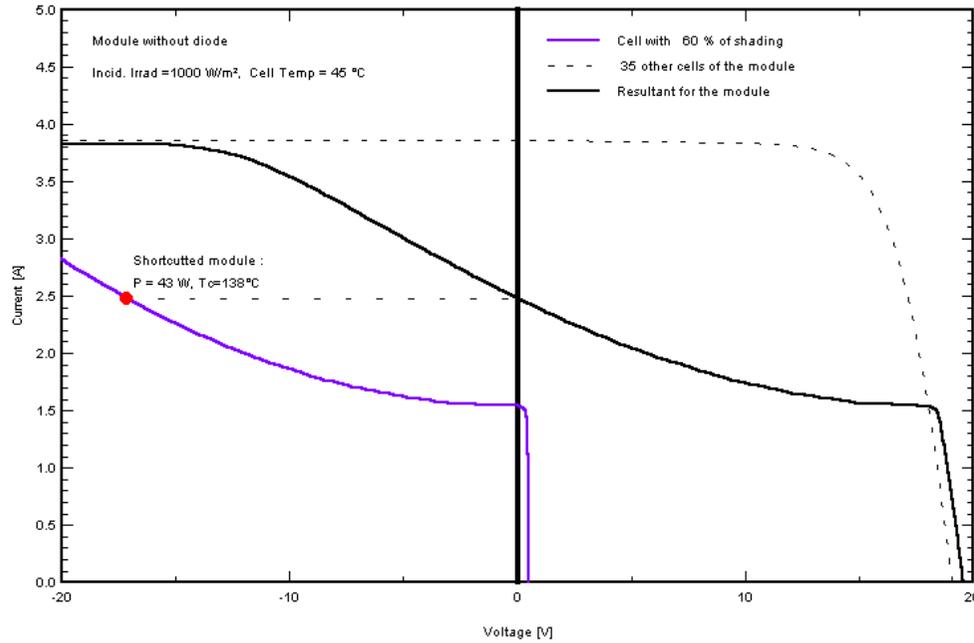


Os diodos limitam o valor máximo V_{PI}

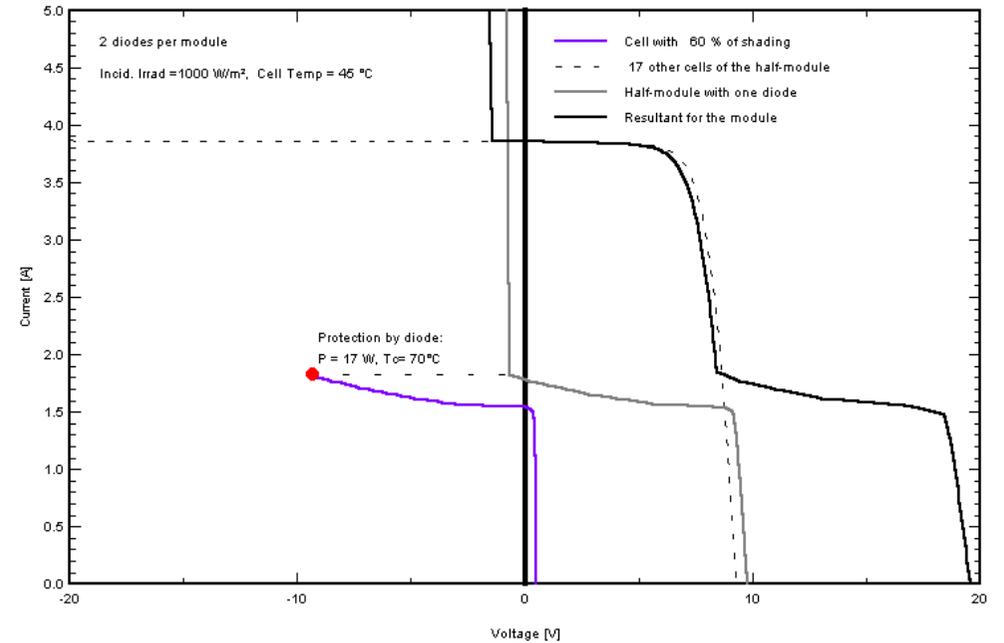


Potência dissipada com e sem diodos bypass

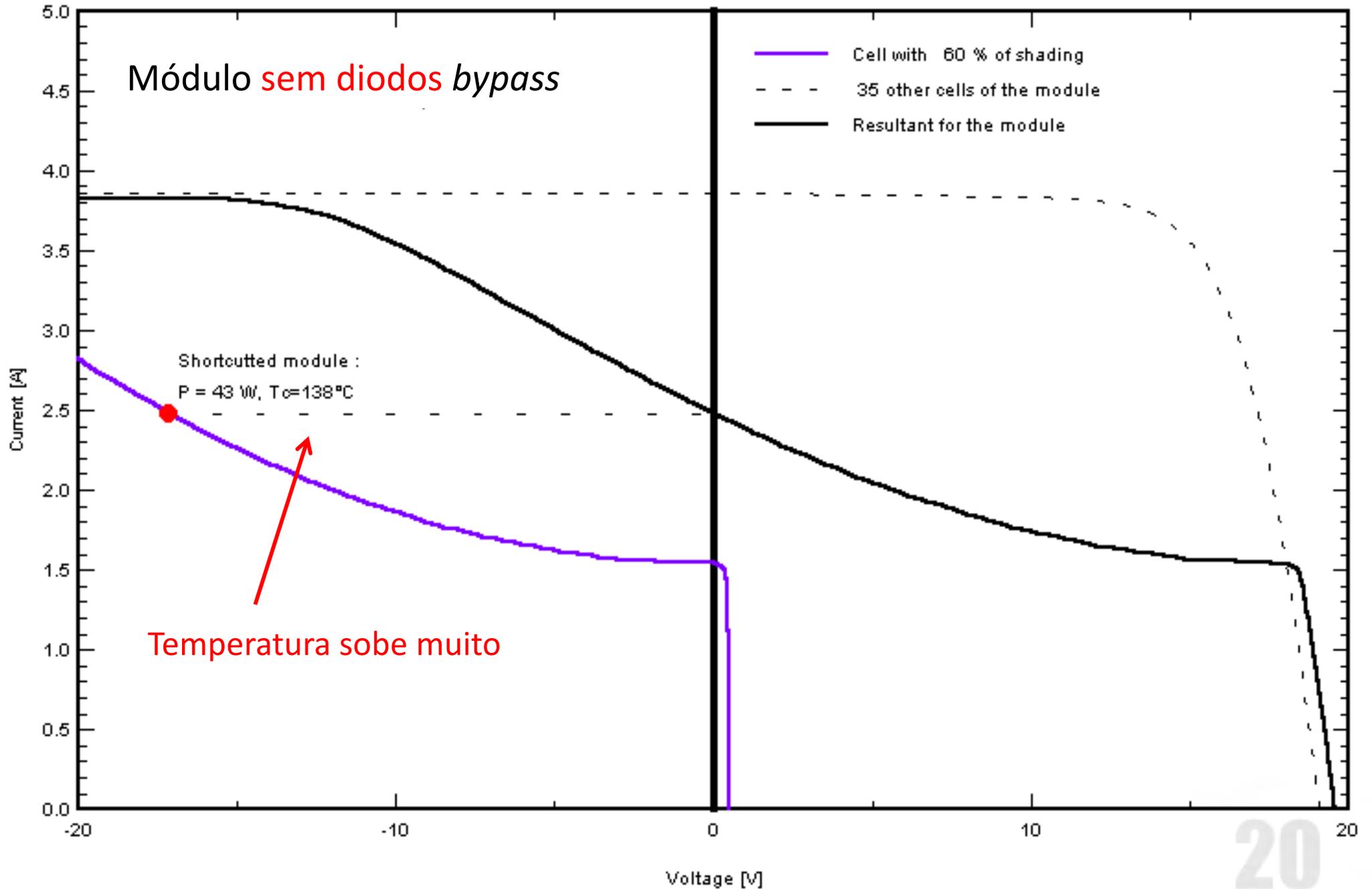
PV module SOLAREX, MSX-60, Manufacturer



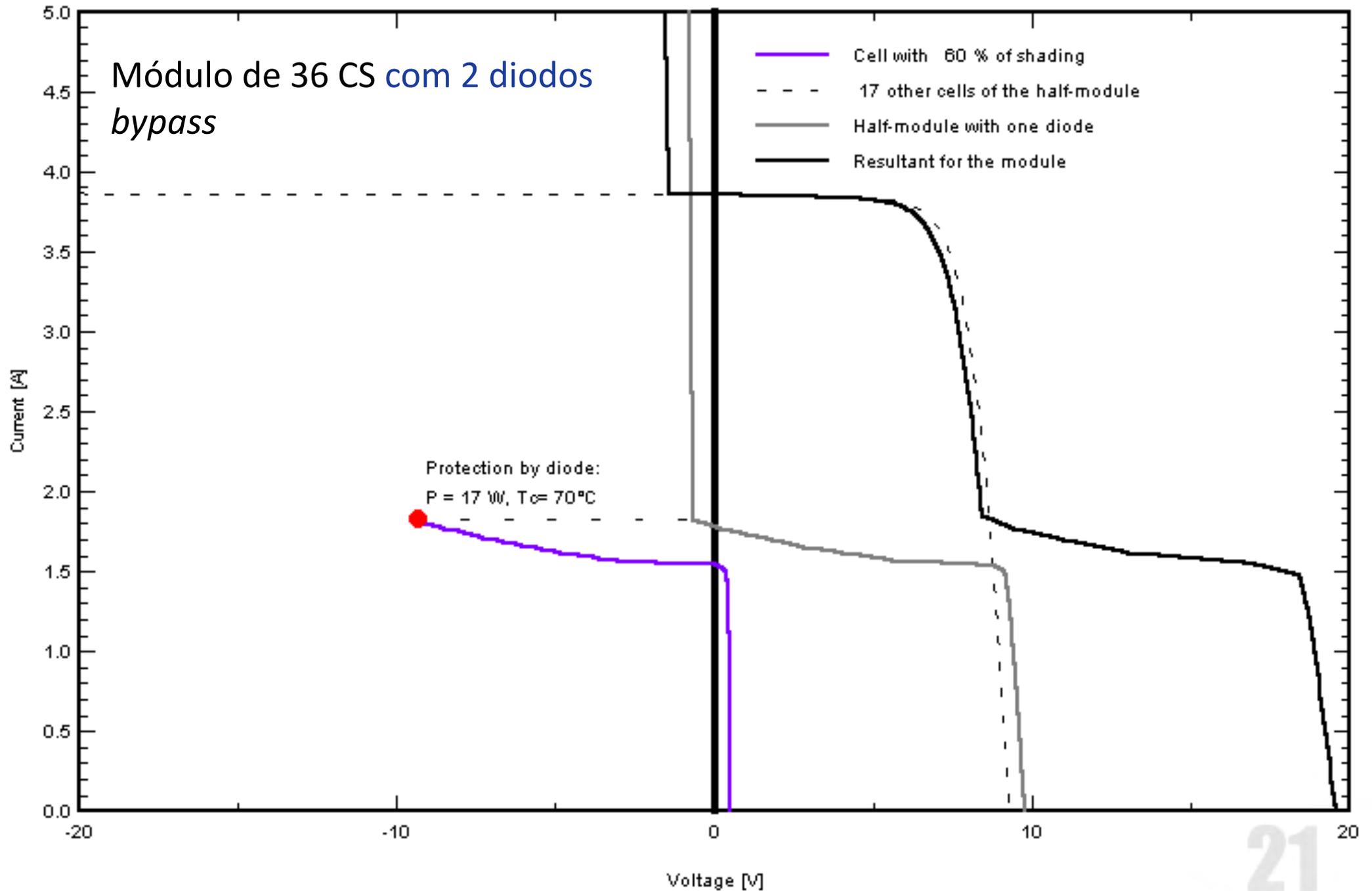
PV module SOLAREX, MSX-60, Manufacturer



PV module SOLAREX, MSX-60, Manufacturer



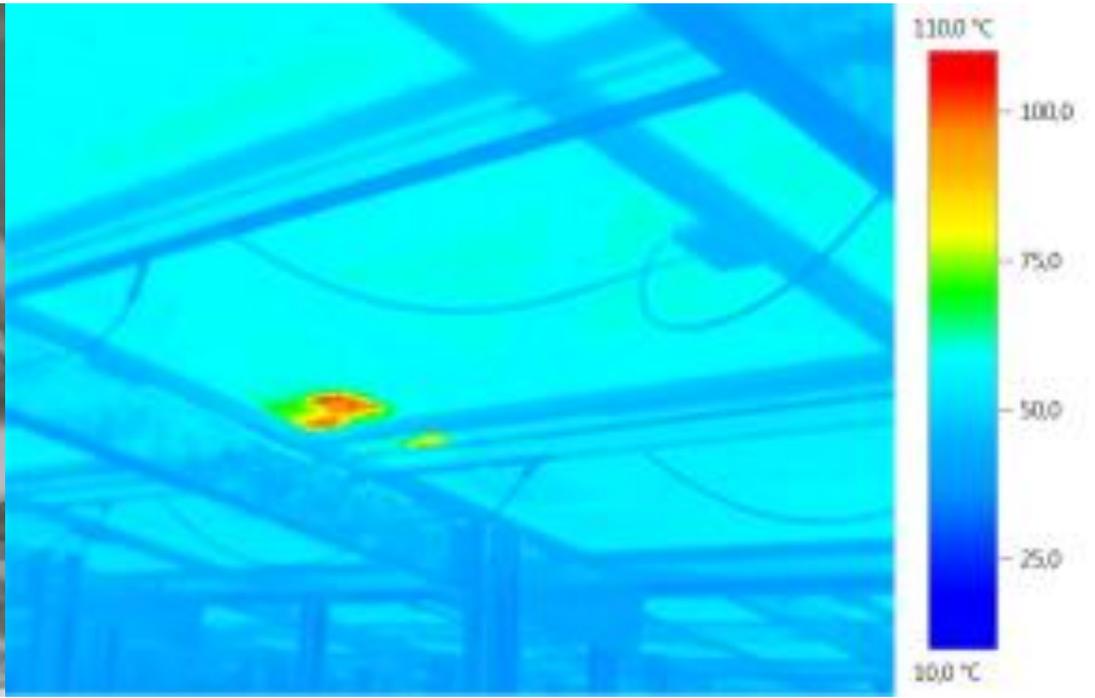
PV module SOLAREX, MSX-60, Manufacturer



Identificação de ponto quente-Termografia

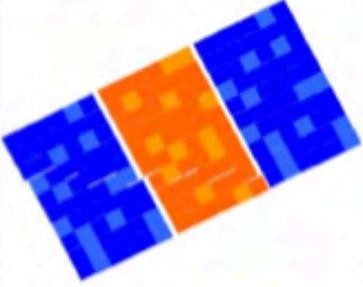
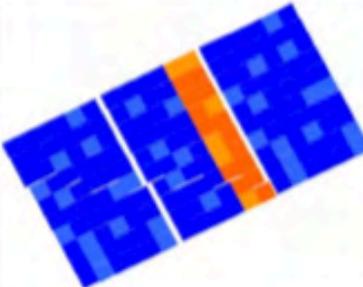
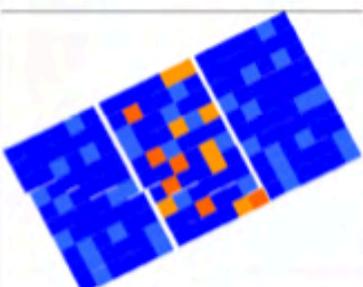
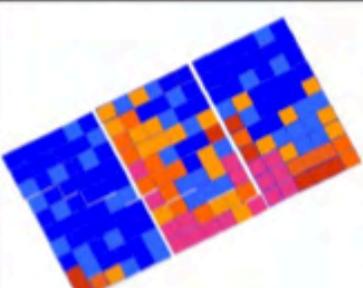


observação normal

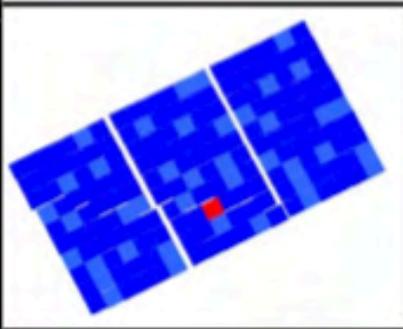
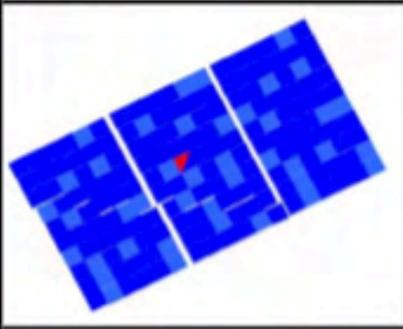
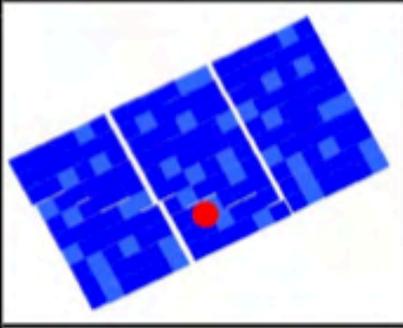
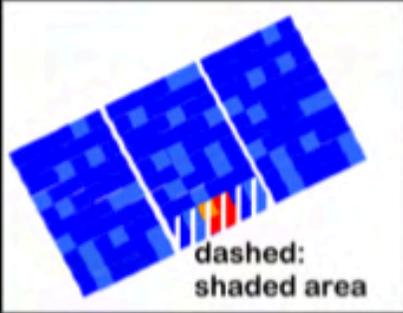


termografia

Sumario de padrões de imagens IR por termografia-1

Pattern	Description	Possible failure reason	Electrical measurements	Remarks, Chapter	Safety	Power
	One module warmer than others	Module is open circuited - not connected to the system	Module normally fully functional	Check wiring	A	System failure
	One row (sub-string) is warmer than other rows in the module	Short circuited (SC) or open sub-string - Bypass diode SC, or - Internal SC	Sub-strings power lost, reduction of V_{oc}	May have burned spot at the module 6.2.7 One diode shunted	B(f)	const. or <u>E</u>
	Single cells are warmer, not any pattern (patchwork pattern) is recognized	Whole module is short circuited - All bypass diodes SC or - Wrong connection	Module power drastically reduced, (almost zero) strong reduction of V_{oc}	Check wiring 6.2.7 all diodes shunted	A when ext. SC, B(f) when Diodes SC	const. or <u>E</u>
	Single cells are warmer, lower parts and close to frame hotter than upper and middle parts.	Massive shunts caused by potential induced degradation (PID) and/or polarization	Module power and FF reduced. Low light performance more affected than at STC	- Change array grounding conditions - recovery by reverse voltage 6.2.5 (PID)	A	<u>C</u> (v,h,t)

Sumario de padrões de imagens IR por termografia-2

	<p>One cell clearly warmer than the others</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Shadowing effects - Defect cell - Delaminated cell 	<p>Power decrease not necessarily permanent, e.g. shadowing leaf or lichen</p>	<p>Visual inspection needed, cleaning (cell mismatch) or shunted cell 6.1.1 (delam.)</p>	<p>A B(f)</p>	<p><u>A</u>, <u>B</u>, or <u>C</u>(m, tc, h)</p>
	<p>Part of a cell is warmer</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Broken cell - Disconnected string interconnect 	<p>Drastic power reduction, <i>FF</i> reduction</p>	<p>6.2.2 (cell cracks) 6.2.4 (burn marks) 6.2.6 (interconnects)</p>	<p>B(f)</p>	<p><u>C</u>(m, tc)</p>
	<p>Pointed heating</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Artifact - Partly shadowed, e.g. bird dropping, lightning protection rod 	<p>Power reduction, dependent on form and size of the cracked part</p>	<p>Crack detection after detailed visual inspection of the cell possible 6.2.2 (cell cracks)</p>	<p>B(f)</p>	<p><u>C</u>(m, tc)</p>
 <p>dashed: shaded area</p>	<p>Sub-string part remarkably hotter than others when equally shaded</p>	<p>Sub-string with missing or open-circuit bypass diode</p>	<p>Massive <i>I</i>_{sc} and power reduction when part of this sub-string is shaded</p>	<p>May cause severe fire hazard when hot spot is in this sub-string</p>	<p>A, B(f)</p>	<p><u>A</u>, <u>C</u></p>

LID – Light Induced Degradation

O efeito da LID ocorre no início da instalação e é levado em conta pelos fabricantes ajustando a potência nominal do módulo para a referida perda.

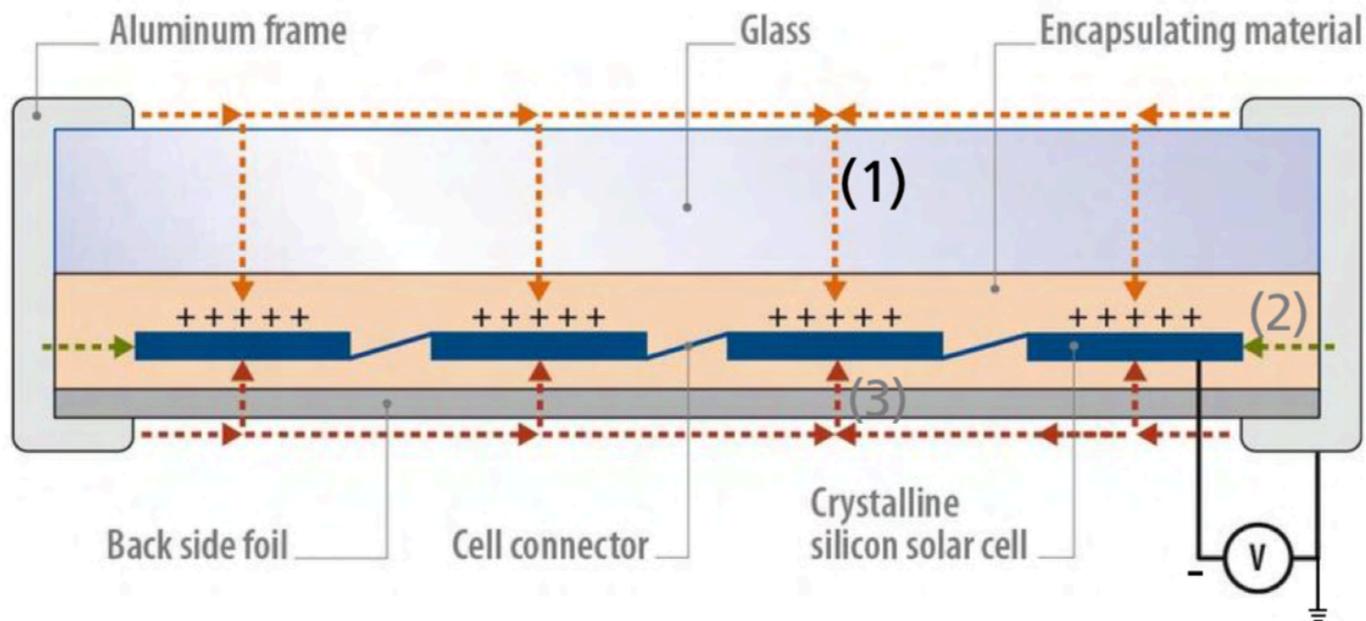
A origem do LID, degradação da eficiência de conversão, que ocorre após as primeiras horas de uso (após ~ 12h de iluminação) de módulos de Si-cristalino CZ, (Czochraslki), dopado com boro, está ligada aos sítios de defeito de complexos B-O, boro-oxigênio, que levam à redução do comprimento de difusão dos portadores minoritários gerados. No processo CZ, ocorre dissolução do oxigênio do cadinho (de quartzo, SiO_2), que se liga com o boro dopante, originando os defeitos B-O.

A **incidência de radiação solar** tem o efeito de ativar os defeitos criados durante o crescimento do cristal. Uma vez ativados os defeitos, ocorre a limitação da perda inicial de 3% a 5%_{rel} na eficiência de conversão.

O **descoloramento** de módulos é caso típico de **degradação induzida pela luz**, provocando perda na conversão de energia devido à **redução da transmitância** da radiação na camada de EVA.

PID – Potential Induced Degradation-1

Relatada pela primeira vez em 1978⁶, a PID tem sido estudada recentemente (>2005) em sistemas FV que trabalham com **tensões elevadas no lado C.C.** Atualmente os módulos FV são disponíveis para operar em polarização de **até 1.500V** entre seus terminais, caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Maior a diferença de potencial entre os terminais do módulo, maior é o campo elétrico entre sua moldura e a célula. O **campo elétrico** entre o terminal negativo do módulo e a moldura metálica atua sobre o **sódio** do vidro de cobertura provocando sua **movimentação** em condições específicas de **umidade e temperatura**, do **tipo** das CS do módulo e dos **materiais** utilizados no encapsulamento. Vidros podem ter 13% a 14% de sódio. A PID está ligada a uma **corrente de fuga do módulo fotovoltaico para a terra.**



26

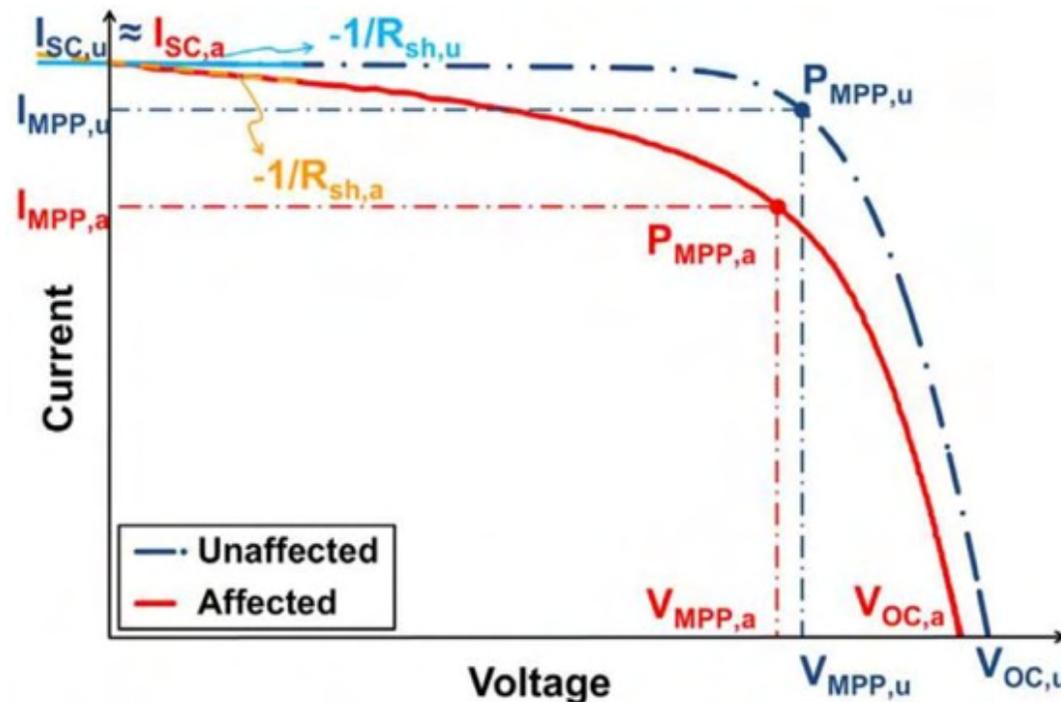
Leakage current path
(1) *through glass/polymer (predominant)*
(2) *lateral through polymer foil (minor contributions)*
(3) *through backsheet (extraneous to PID-s)*

Source:
UL International Germany

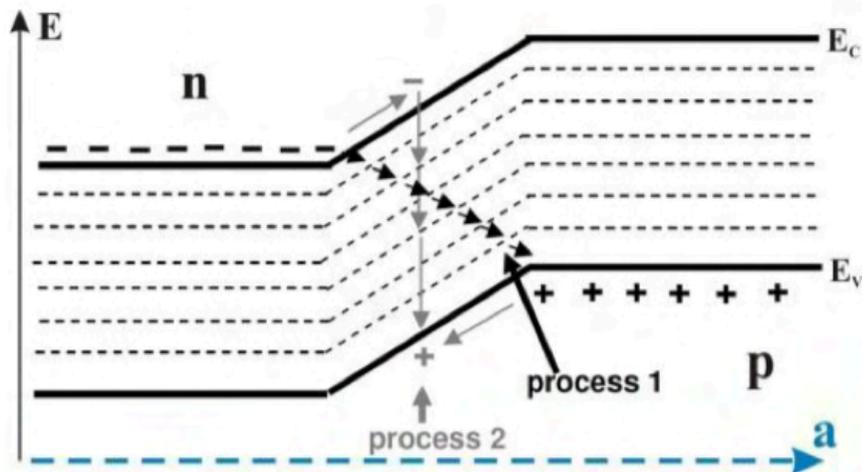
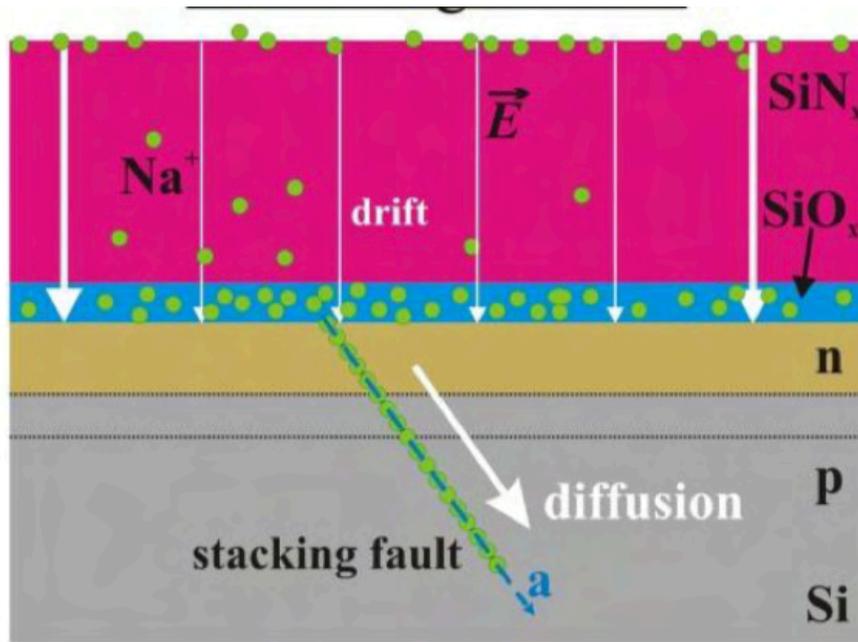
PID – Potential Induced Degradation-2

Exemplificando, em módulos FV de CS tipo-p os **íons Na^+** atravessam a camada de encapsulante e podem chegar e mesmo atravessar a camada antirrefletora da CS, **armadilhando elétrons** do emissor da CS, que fariam parte da corrente do módulo, mas são **desviados para a moldura**, indo à terra como corrente de fuga. **Íons Na^+** que atravessam a camada antirrefletora de nitreto de silício podem se **difundir** para a **rede cristalina do silício**, através de defeitos no cristal, causando perda da qualidade da CS, que se manifesta principalmente na **diminuição da resistência R_p** e da V_{oc} .

A PID reduz tanto o ponto de operação em máxima potência como a tensão V_{oc}

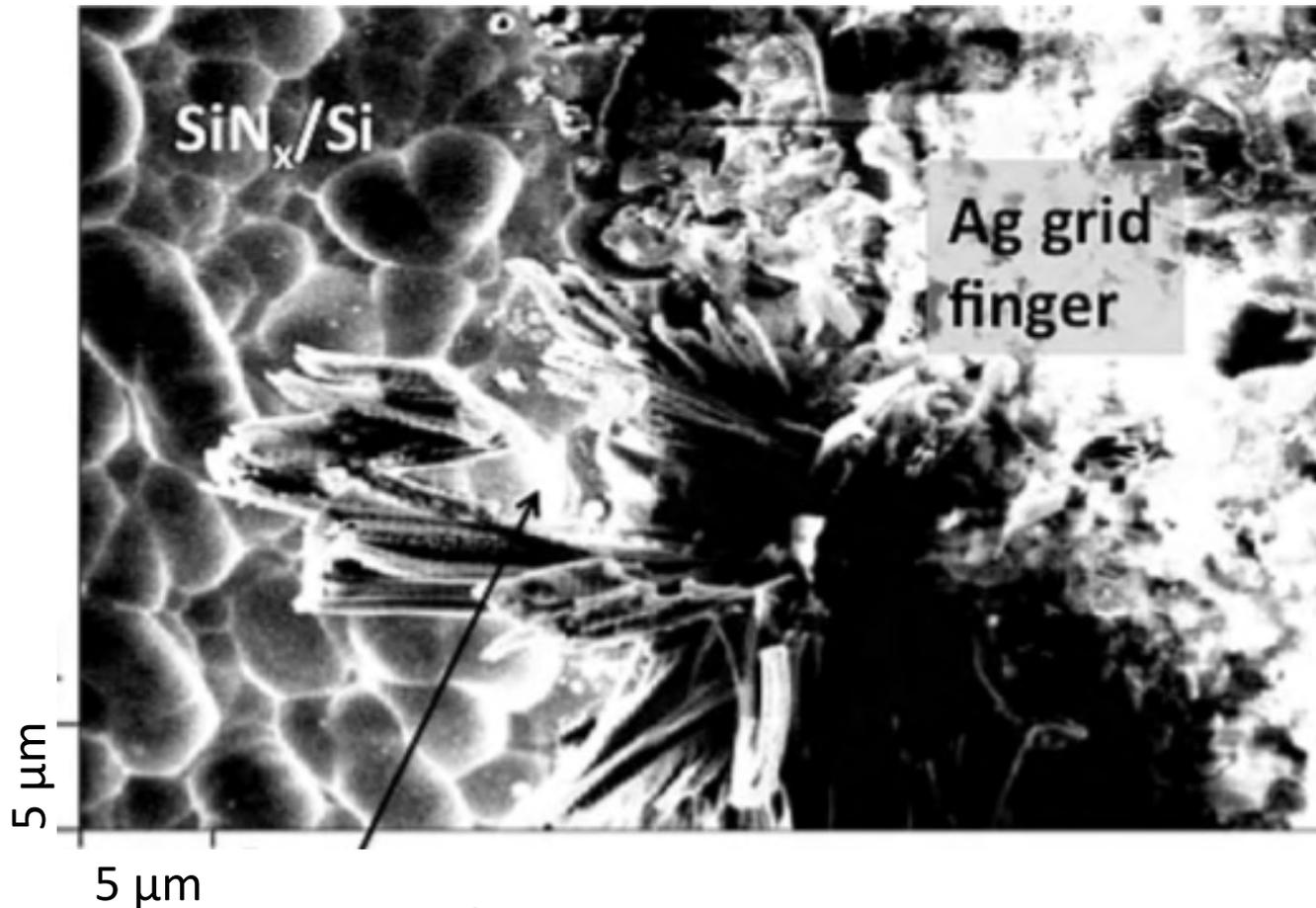


PID – Potential Induced Degradation- 3



A **movimentação dos íons de sódio** pela ação do campo elétrico ocorre ao longo dos defeitos cristalinos do tipo “**stacking fault**” (SF=falha de empilhamento) Ref. 8. O **Na⁺** que penetra nos SF age como armadilha para elétrons porque atua como aceitador, **neutralizando** parte da dopagem “n” do emissor. Daí ocorre a **redução** da camada de depleção e **redução** do campo elétrico. A capacidade do campo elétrico de células solares afetadas pela PID, de separar os portadores gerados pela absorção dos fótons, fica reduzida.

PID – Potential Induced Degradation- 4

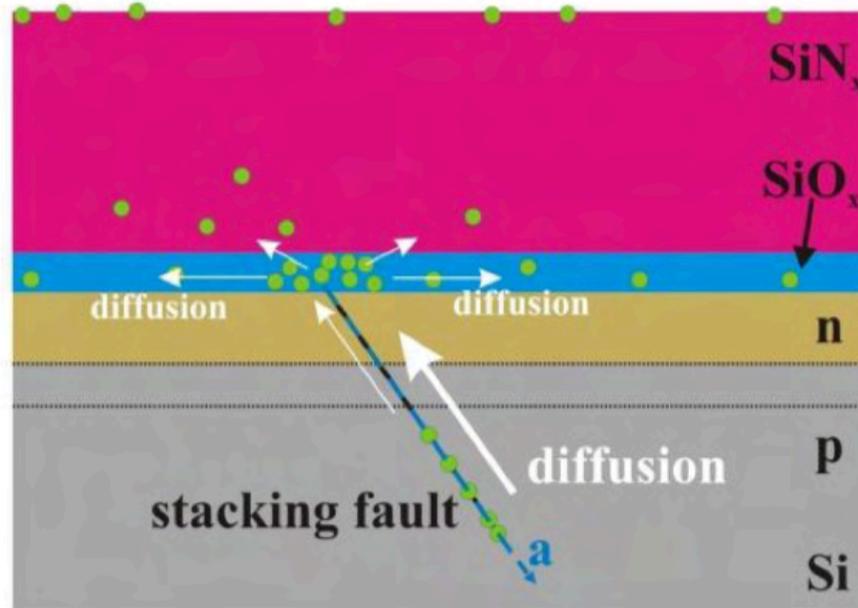


Precipitado
rico em Na

Confirmação de precipitados de sódio na interface SiN_x/Si
por Espectroscopia de elétrons de Auger (Ref.11)

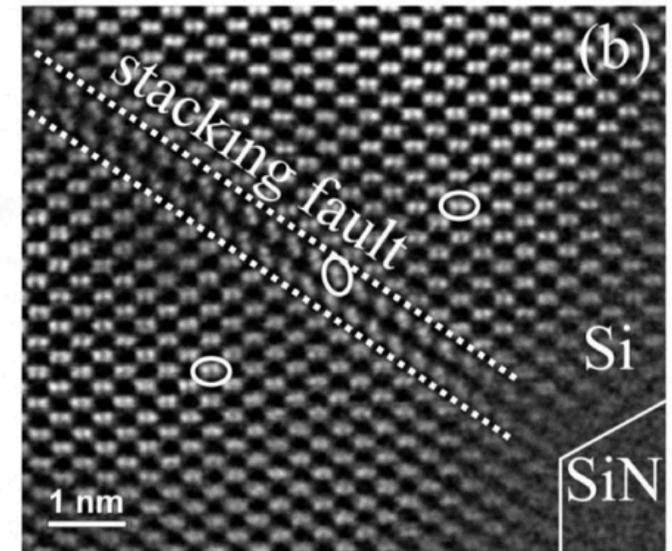
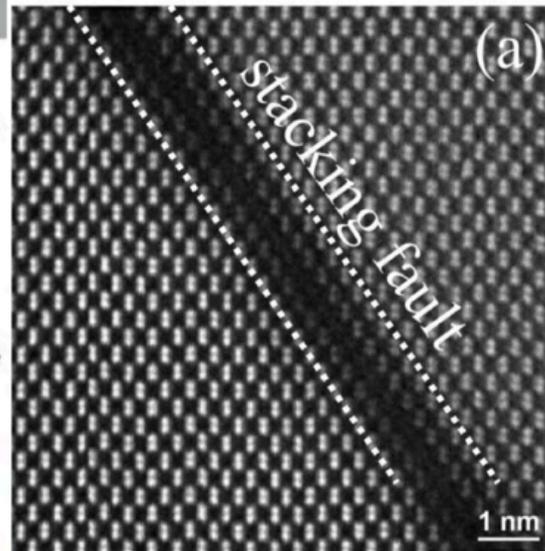
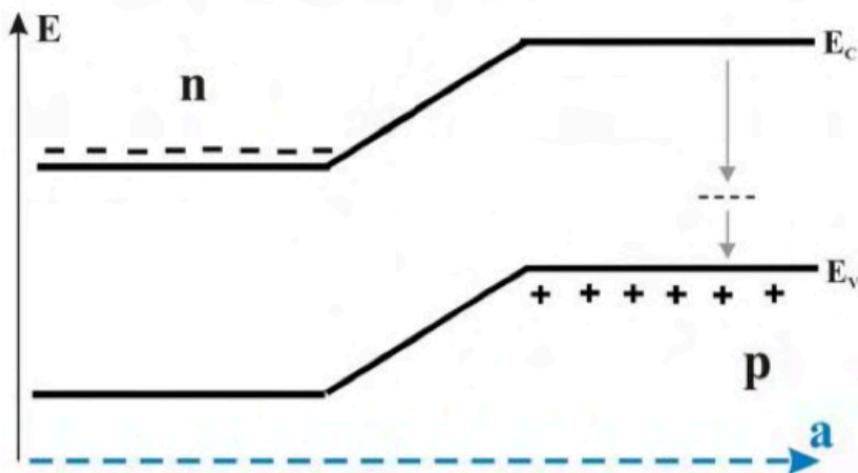
Reversão da PID

Os **efeitos** da PID podem ser **revertidos** por processos térmicos ou pela **aplicação de um campo elétrico**, que provoca a **exodifusão** dos íons Na^+ . O recozimento das CS a 250°C por 2 h leva praticamente à recuperação



muito próxima das suas características pré-PID Ref. 8. Com técnicas de STEM é possível ver **perturbação na rede cristalina do silício** próximo ao SF **antes** do recozimento e seu efeito **após** o tratamento, **sem a perturbação**.

30



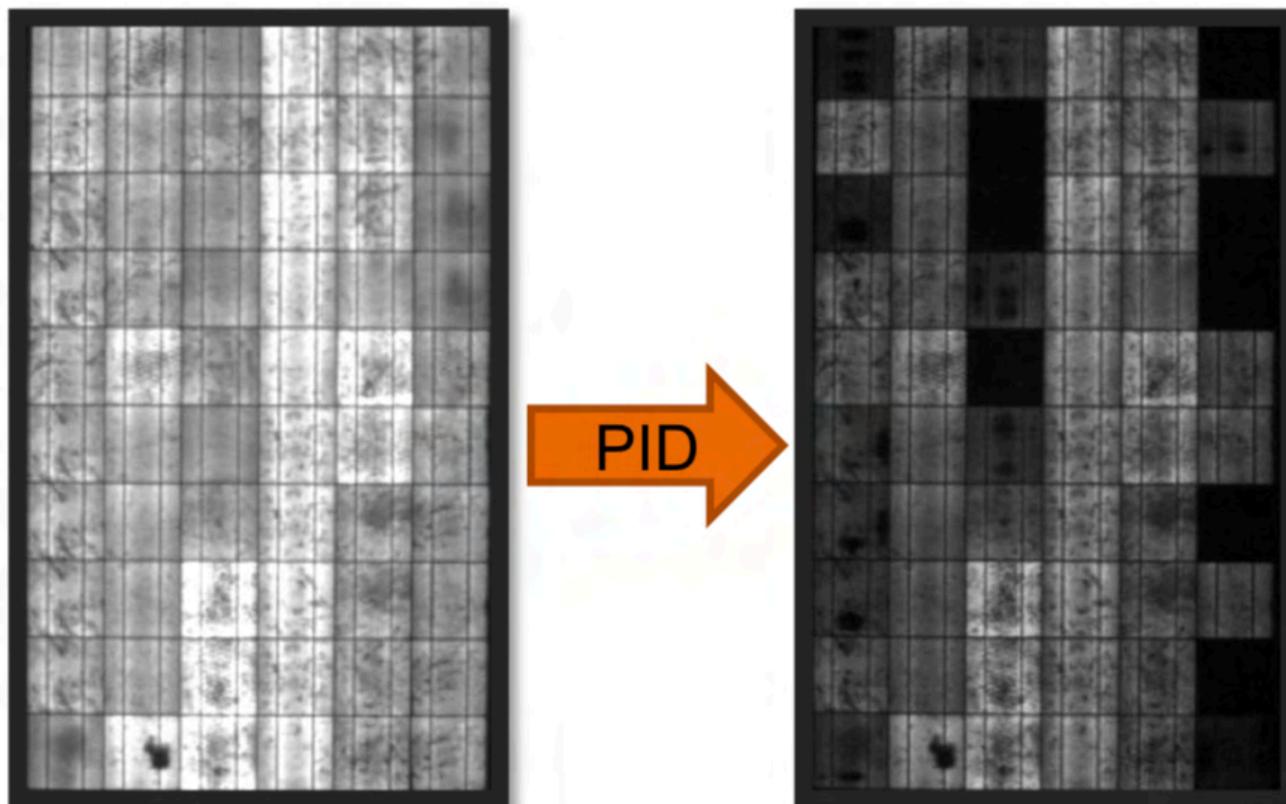
PID – Detecção por eletroluminescência

A **detecção dos efeitos da PID** em um módulo pode ser feita com uso de imagens de **eletroluminescência** de módulos. Ao se injetar corrente no sentido inverso em CS de silício, estas **emitem fótons** na faixa do infravermelho (λ entre 900nm e 1300nm). A intensidade da **emissão** é relacionada com a densidade de portadores minoritários da base da CS, que **diminui** quando a rede cristalina apresenta **muitos defeitos**. É o resultado da **diminuição do tempo de vida** devido ao aumento da **recombinação**. Com o traçado de curva IxV é fácil identificar o efeito da PID. **A eletroluminescência em campo** dá informação expedita.

Com uma **câmera digital modificada**, sem o **filtro de IR**, é possível obter imagens que mostram as **áreas afetadas** do módulo.

PID – Detecção por EL

As CS de silício, quando recebem estimulação radiativa **emitem no infravermelho** (1150nm). A **detecção** é feita no escuro pois o **nível da emissão de IR é pequeno** quando comparado à emissão de fundo em **ambiente diurno**. Pode-se usar um filtro de 850nm para **eliminar interferência de IR** de fontes espúrias. Partes do módulo **danificadas** pela PID emitem **menos radiação** do que partes **sadias** dado o **aumento da recombinação**.



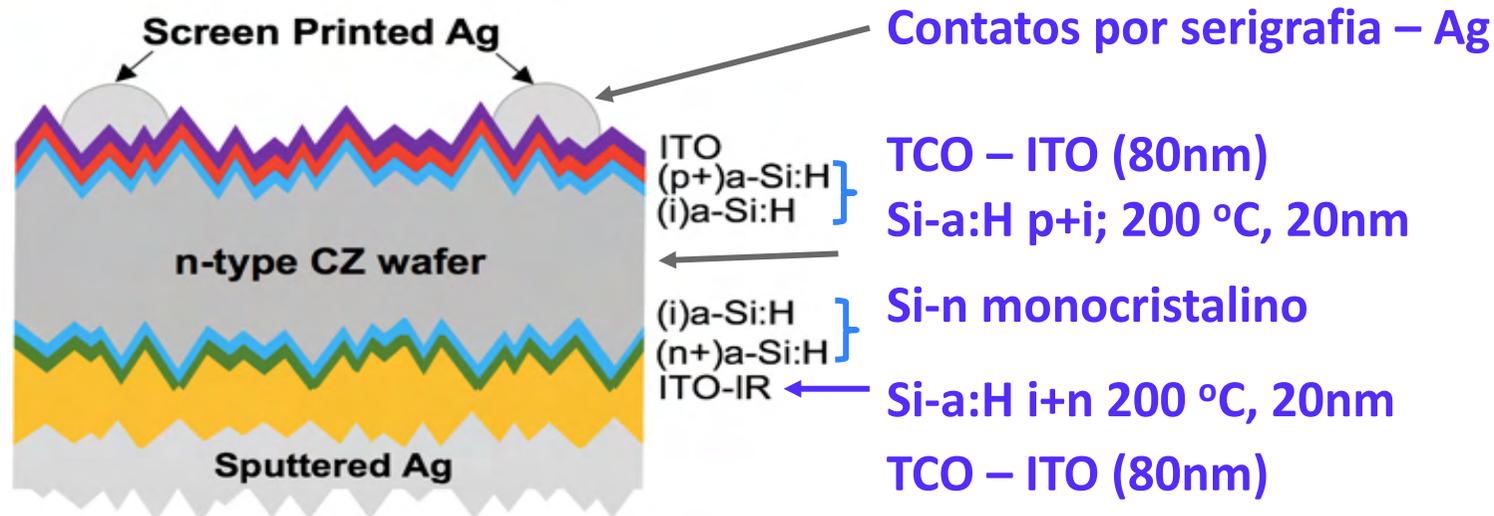
Análise por imagens de EL

A técnica de análise por imagens de EL permite detectar

- **fraturas** nas CS
- **defeitos cristalinos no silício** (deslocações de planos)
- **falhas** nos "dedos" da metalização
- **corrosão devido** à umidade
- **falhas** na formação dos contatos das CS
- **PID** – degradação induzida por potencial

PID – prevenção-mitigação

- Ao nível da CS, uma forma de reduzir os efeitos da PID é utilizar camadas antirefletoras de SiN_x , nitreto de silício, que são bastante densas e dificultam a migração dos íons de sódio.
- No nível do módulo, a utilização de vidros de aluminossilicato, com menos de 3% de NaO, aumenta significativamente o desempenho em relação ao PID. Atualmente o EVA utilizado como camada suporte posterior também apresenta resistividade maior, mostrando melhores propriedades anti-PID.
- Módulos com tecnologia HIT (Si-aH/Si-mono/Si-aH) são resistentes ao PID



Falhas nas caixas de junção

a) Caixa aberta, b) caixa mal fixada, c) cabeamento inadequado

Consequências: entrada de umidade, corrosão dos contatos, possibilidade de arcos elétricos e início de fogo. Soldas mal feitas aumentam resistência de contato, aquecimento aumentado e aumento da da possibilidade de falha grave.



a)



b)



c)

Falhas/degradação por causas externas

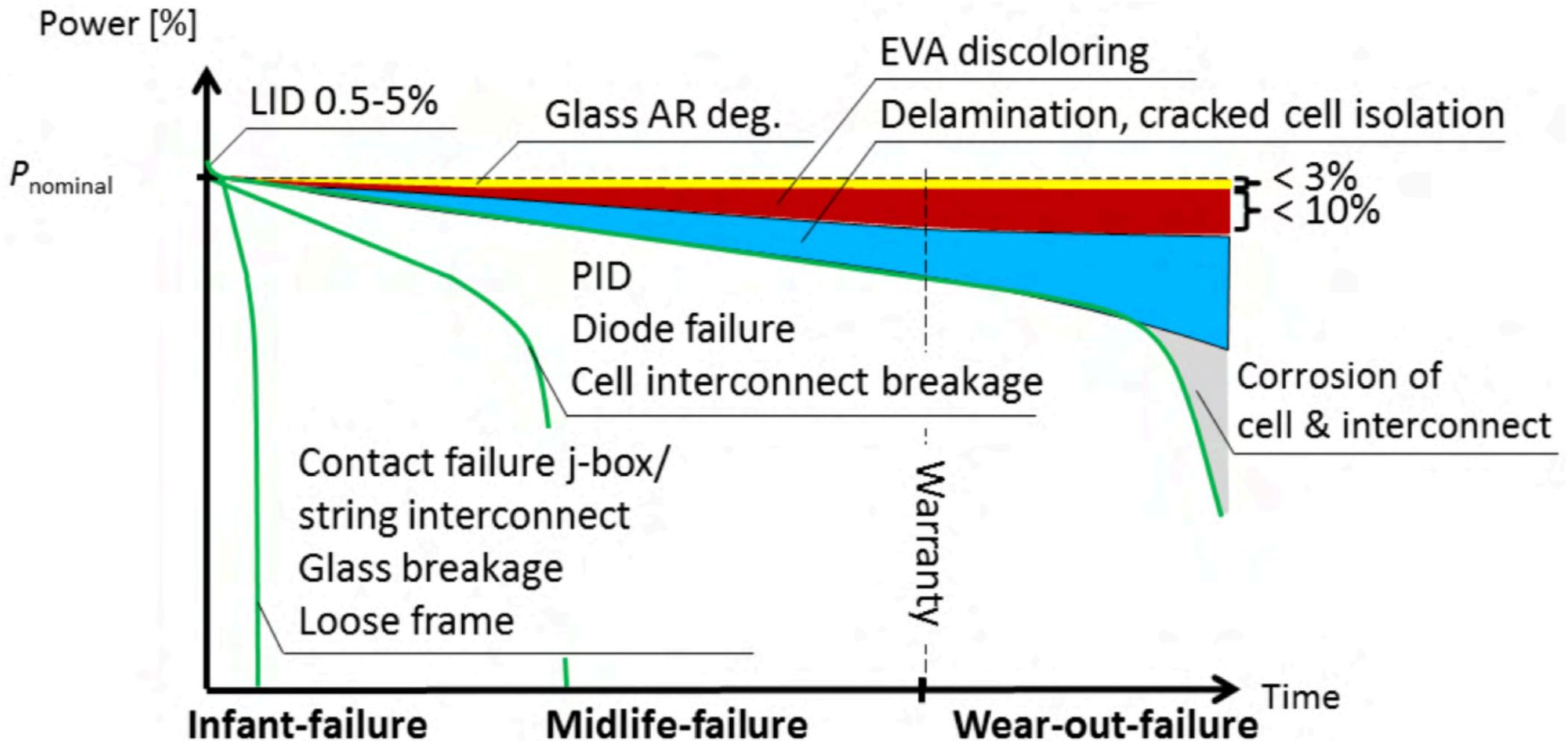
Fixação não cuidadosa

Descargas atmosféricas

Transporte, manuseio e instalação



Cenários típicos de degradação/falhas de módulos FV de silício



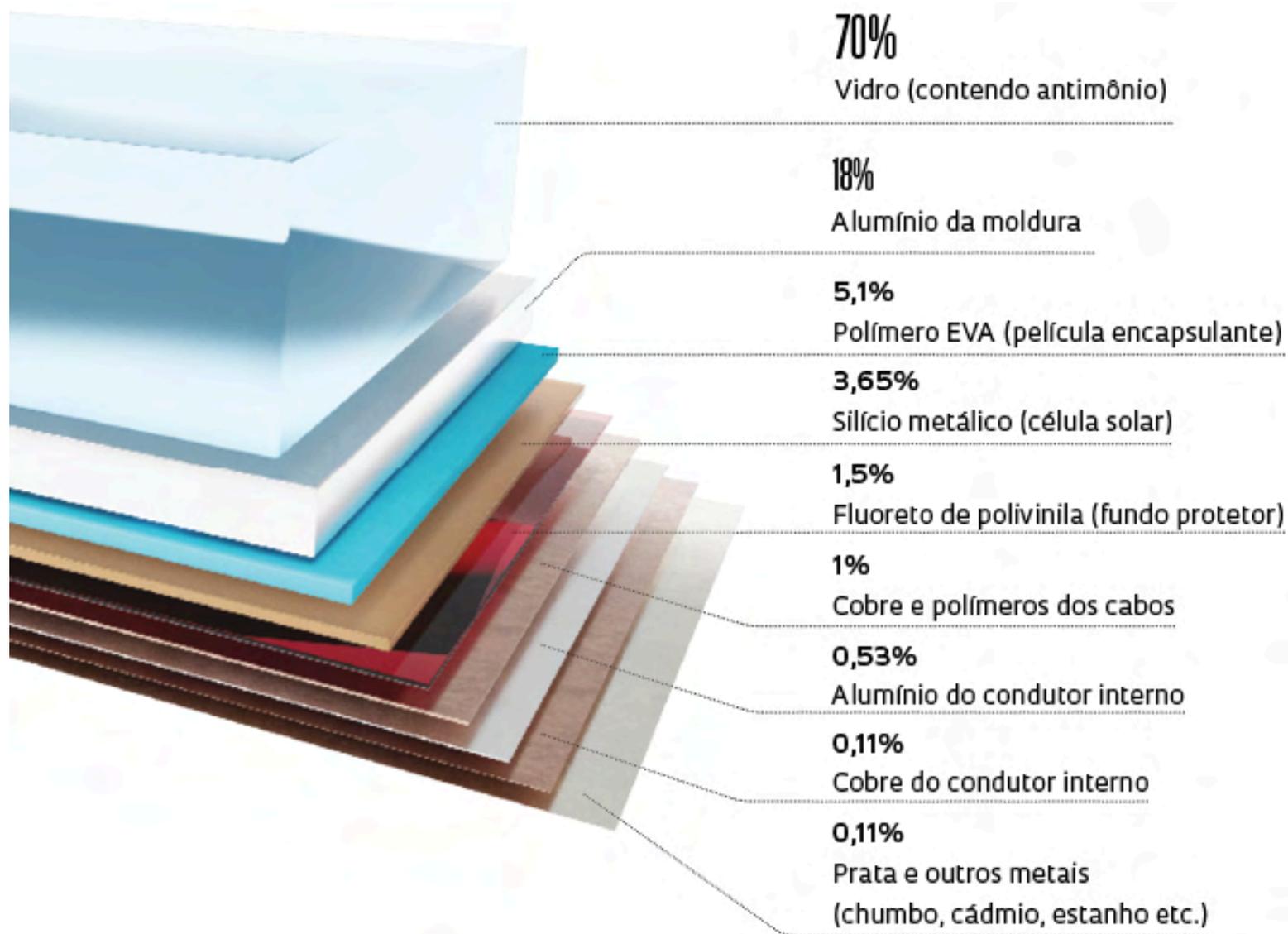
“Review of Failures of Photovoltaic Modules”, Köntges et alii, International Energy Agency
Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13-01-2014

FIM DA VIDA ÚTIL DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



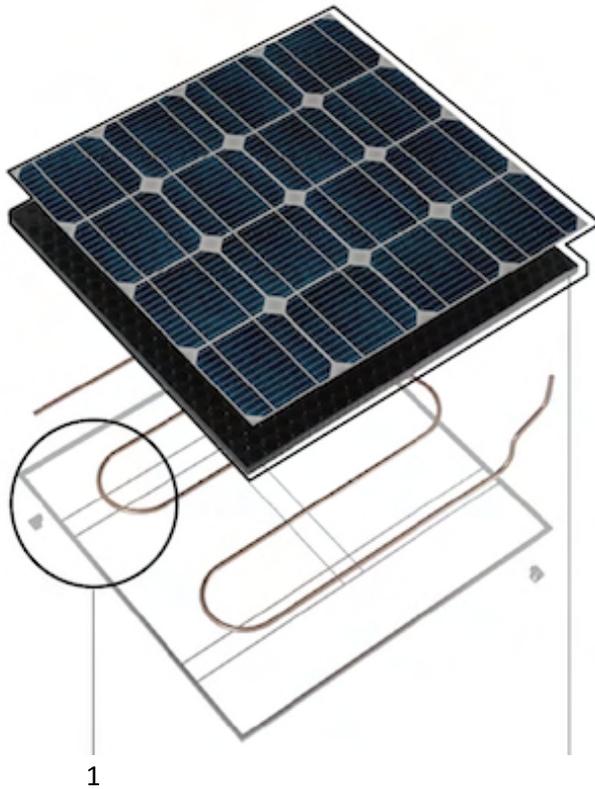
Relatório (2016) da IRENA – Agencia Internacional de Energia Renovável: estimativa para 2030 de se ocorrer entre 1,7 e 8 milhões de toneladas de "lixo" fotovoltaico .Em 2050 serão 78 milhões de toneladas

RECICLAGEM DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS



Fontes: De Souza N.M. et al -Social Sciences & Humanities Open, Vol. 7, issue 1, 20, na Revista Fapesp, agosto 2023, "O destino dos painéis solares ao fim da vida útil" – ONG PV Cycle, Bélgica

ETAPAS DA RECICLAGEM DE MÓDULOS FV



1. Aproveitamento inicial de cabos de cobre, moldura de alumínio
2. Módulos são tratados termicamente (500°C a 600°C) visando o material de encapsulamento
3. Em seguida são triturados e se separa o vidro
4. O restante (silício, prata, chumbo e estanho) passa por tratamentos químicos para separá-los
5. O silício pode ser reaproveitado após re-purificação

Em valores a IRENA estima que em 2030 o valor acumulado de material reaproveitado atinja 450 milhões de dólares e em 2050 a reciclagem atinja cifra de 15 bilhões de dólares.

A empresa SunR, de Valinhos, S.P., atua há mais de três anos unicamente com processos mecânicos para recuperar o alumínio, conectores, cobre e componentes eletrônicos, plásticos e vidro dos painéis. Tendo reciclado cerca de 25 mil painéis, totalizando cerca de 730 toneladas e vendendo a mistura dos metais para indústrias que se interessam pela separação químicas.

Revista Fapesp, agosto 2023, "O destino dos painéis solares ao fim da vida útil"

"Photovoltaic electronic waste in Brazil: Circular economy challenges, potential and obstacles"

Monteiro, D. Sousa, Oliveira, C.B., Cunha, D. Social Sciences & Humanities Open, Vol. 7, issue 1, 2023

Referências

- 1 – “Photovoltaic failure and degradation modes”, D.D. Jordan, T.J. Silverman, J.N.Wohlgemuth, S. R. Kurz and K. Y. VanSant, Progress in Photovoltaics, 254, No.4, April 2017, 318-236.
- 2- <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/degradation-and-failure-modes>
- 3 – “Degradation of silicon photovoltaic modules: A literature review”, A. Ndiaye, A. Charki, A. Kobi, C. M.F. Kébé, PA. Ndiaye and V. Sambou, Solar Energy, 96, 140-131, 2013.
- 4 – “Early degradation of silicon PV modules and guaranty conditions” Solar Energy, 85, 2264-2274, 2011.
- 5 – “The evaluation of accelerated test for encapsulants of photovoltaic modules”, KT. Kojima, T. Yanagisawa, Energy Materials & Solar Cells, 94, 246-253, 2010.
- 6 – “Environmental qualification testing of terrestrial solar cell modules”, A.R. Hoffmann &R.G. Ross, Jr.
https://www2.jpl.nasa.gov/advtech/photovol/ppr_75-80/Envr%20Qual%20Testing%20of%20Terr%20Modules-PVSC1978.pdf
- 7 – “Degradação induzida pelo potencial em módulos e instalações fotovoltaicas de c-Si” tese de doutorado de Gilberto Figueiredo Pinto Filho, IEE, Univ. de Sao Paulo, 2017.
- 8 – “Sodium outdiffusion from stacking faults as root cause for the recovery process of potential-induced degradation (PID)”, Lausch, D., Naumann V., Graff A., Hähnel A., Breitensteind O., Christian Hagendorf C., and Jörg Bagdahn J., Energy Procedia 55 486 – 493, 2014.
- 9 – “Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules”, M.Aghaei et alii, Renewable and sustainable energy reviews, 159 (2022) 112160.
- 10 – “Review of Failures of Photovoltaic Modules”, Köntges et alii, International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme: IEA PVPS Task 13-01-2014.
- 11 – “System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test”, P. Hacke et alii, *37th IEEE PVSC 37, Seattle, Washington, June 19-24, 2011.*
- 12 – “O destino dos painéis solares ao fim da vida útil” Revista Fapesp, agosto 2023
- 13 – “Photovoltaic electronic waste in Brazil: circular economy challenges, potential and obstacles”, Souza N.M. et al -Social Sciences & Humanities Open, Vol. 7, issue 1, 2023.
- 14 – “High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment”, P.R. Dias et al. Renewable and sustainable energy systems, Vol.169, November 2022.