

Aula 1 - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva
Email: ProfJL@unicamp.br
Disciplina IT306-I



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA E SISTEMAS
FOTOVOLTAICOS - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

1

Agenda



- Apresentação da Disciplina e Professores
- Avaliação
- Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos
- Cenário da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil
- Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR)
- Componentes de um SFCR
- Projeto/Dimensionamento de SFCR
- Dimensionamento em Python

Apresentação da Disciplina



- **Prof. Dr. Tércio André dos Santos Barros:** Eletrônica de Potência Aplicada
- **Prof. Dr. Gustavo Fraidenraich:** Modelagem Matemática de Sistemas Fotovoltaicos
- **Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva:** Projeto/Simulação/Avaliação de Sistemas Fotovoltaicos
- **Prof. Dr. Marcelo Villalva:** Idealizador do LESF-MV e criador da disciplina na Unicamp

Apresentação da Disciplina



- **Objetivo:** Apresentar uma visão geral da energia solar fotovoltaica, destacando os principais tópicos em discussão atualmente.
- Ao final da disciplina, os alunos deverão ser capazes de projetar um sistema fotovoltaico e explicar os fenômenos físicos envolvidos, desde a captação da luz solar até a injeção de energia na rede elétrica ou o armazenamento em baterias.

Avaliação

- **P1:** Prova de Nivelamento com os temas Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede Elétrica, e Sistemas Off-Grid. (Data: 27/03)
- **P2:** Prova ou Trabalho em Dupla com os temas Radiação Solar, Modelagem Fotovoltaica, e Curva I-V.
- **T1:** Projeto Final de Disciplina em equipe de até 3 pessoas, com tema livre em Energia Solar Fotovoltaica. É obrigatória a realização de uma simulação (PVsyst, PSIM, Matlab, Python, etc.) e a entrega do trabalho no formato de artigo IEEE, em coluna dupla, com 5 a 8 páginas.

Avaliação

$$NF = \frac{(2 * P1) + P2 + (3 * T1)}{6}$$

Conceitos:

A – NF > 8.5

B – NF > 7

C – NF > 5

Reprovado – NF < 5

Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos

- **Energia Solar Fotovoltaica:** É a energia elétrica obtida com a utilização das chamadas células fotovoltaicas;
- As células fotovoltaicas trabalham com o efeito FV perante elementos semicondutores (silício, principalmente) que quando expostos à incidência de uma radiação luminosa possuem a propensão em absorver energia dos fótons e converter em eletricidade;
- As **células fotovoltaicas** compõe os chamados **módulos fotovoltaicos**.

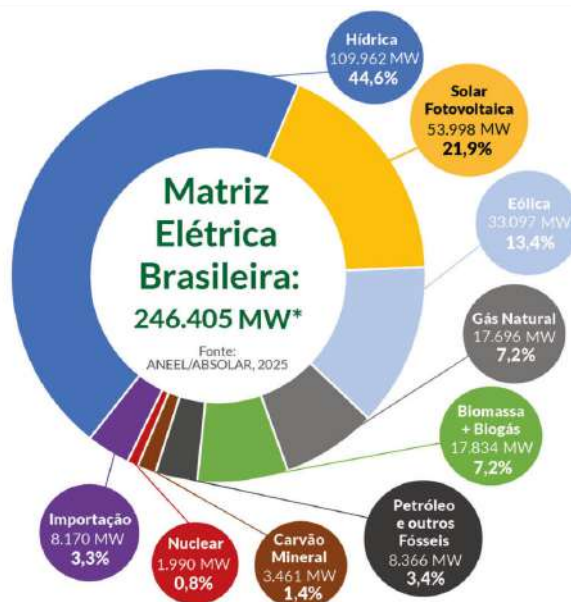


Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - www.lesfmv.com - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

7

Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos

Evolução da Fonte Solar Fotovoltaica no Brasil



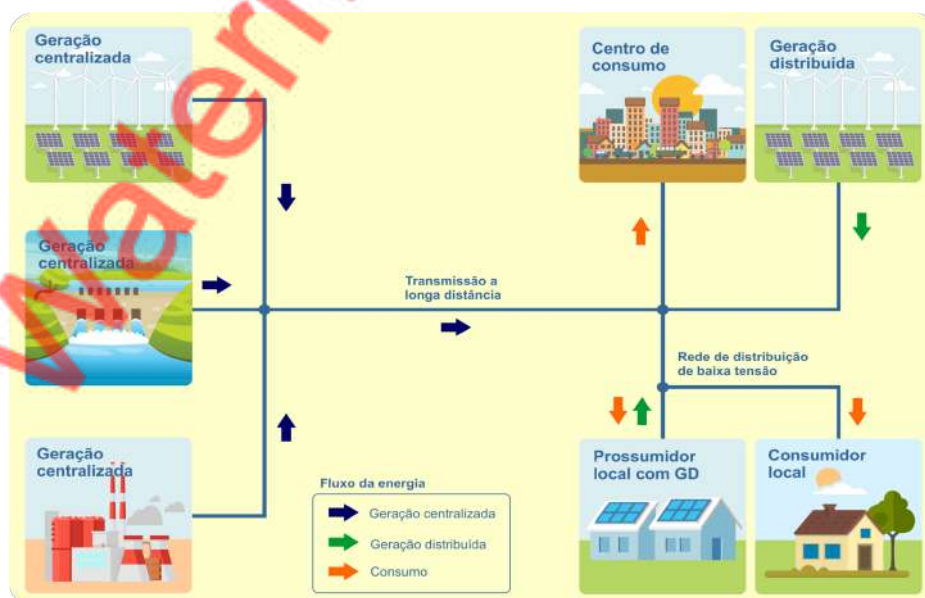
Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - www.lesfmv.com - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

8

Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos

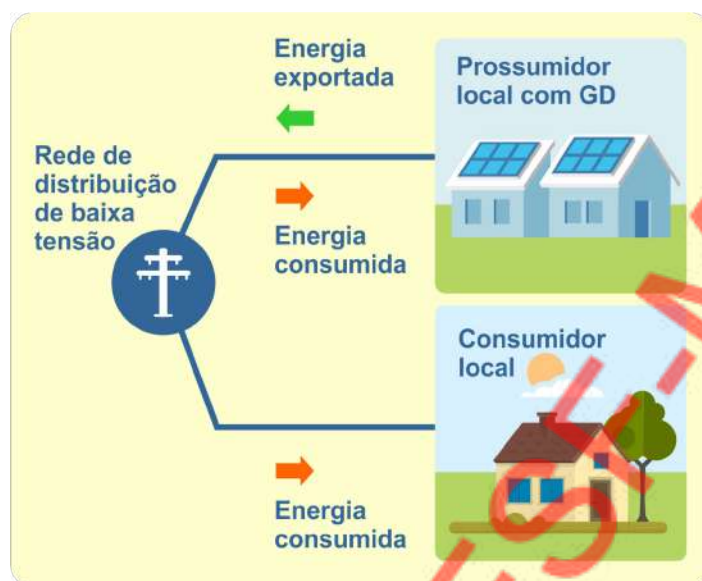
- **Geração Distribuída:** É quando a geração de energia elétrica fica localizada próxima ao local de consumo, eliminando a necessidade de longas linhas de transmissão. Ela pode ser solar, eólica, mini central hidrelétrica, entre outras;
- A geração distribuída tinha como resolução normativa a RN482 e RN687, atualmente tem a RN 1.059 (*Recomendamos a leitura como tarefa de casa*).
- As resoluções dividem os sistemas em dois grupos:
 - - Microgeração: até 75 kW (limitado pelo inversor do sistema);
 - - Minigeração: Maior que 75 kW até 3 MW (limitado pelo inversor do sistema);
- Maior que 3 MW as usinas serão as Usinas Centralizadas.

Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos



Fonte: Curso Unicamp

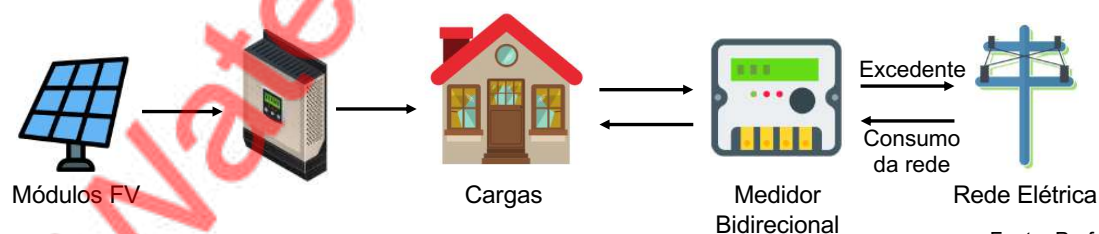
Introdução aos Sistemas Fotovoltaicos



Fonte: Curso Unicamp

Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

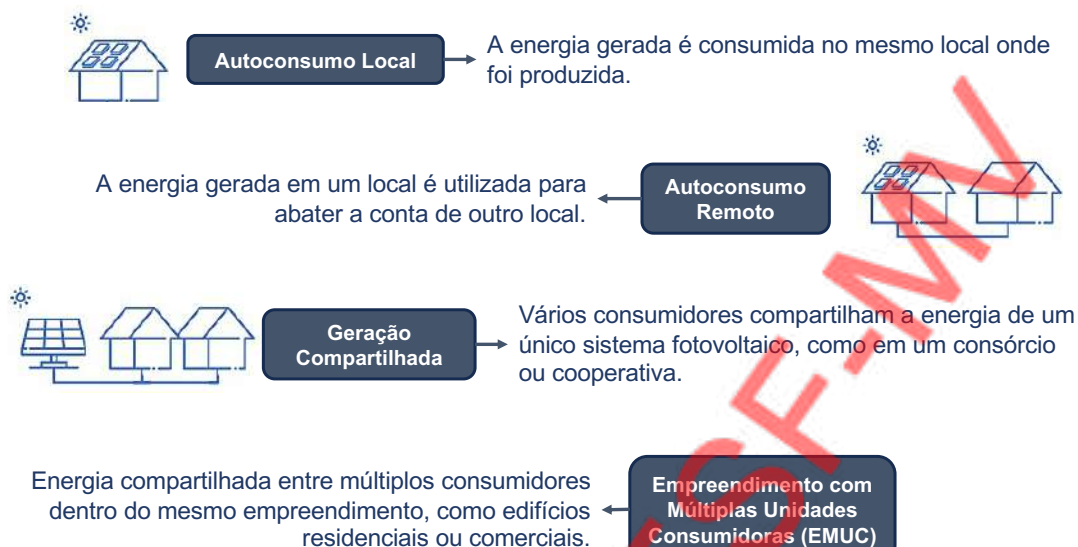
- **Conectado à rede (On-Grid);**



Fonte: ProfJL.com

- Medidor bidirecional: Mede a energia injetada e consumida;
- De manhã você utiliza energia do FV quando disponível, se produzir mais que o consumo, o excedente é exportado para seus vizinhos, e transformado em créditos;
- A noite você usa energia da rede elétrica, entretanto, como você tem excedente em créditos o valor é abatido;
- Se faltar energia da rede elétrica, o sistema fotovoltaico é desligado (anti-ilhamento), e não tem referência da rede para funcionar.

Tipos de Sistemas Fotovoltaicos



Fonte: Curso Unicamp

Tipos de Sistemas Fotovoltaicos



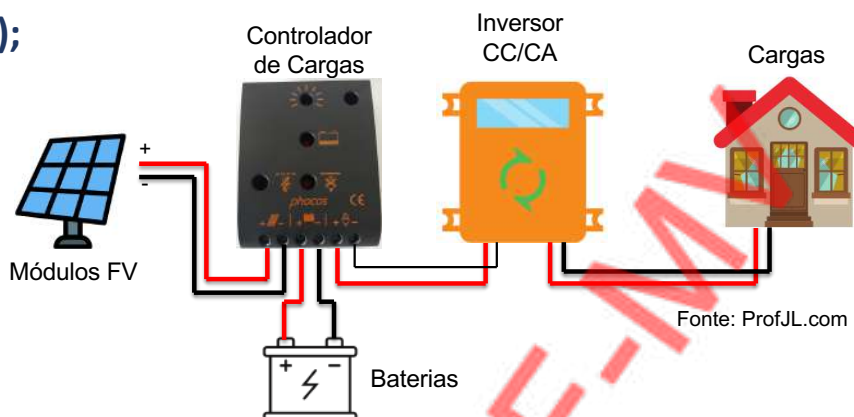
Fonte: Greener

Tarifa do uso do Sistema de Distribuição	TUSD	Transporte – Fio A
		Transporte Fio B
		Perdas
		Encargos
		Outros
Tarifa de Energia	TE	Energia
		Transporte – Itaipu
		Perdas
		Encargos
		Outros

- Para GII: Cobrança gradual de uma **porcentagem da TUSD Fio B**, iniciando-se com **15% em 2023** e chegando a **90% em 2028**;

Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

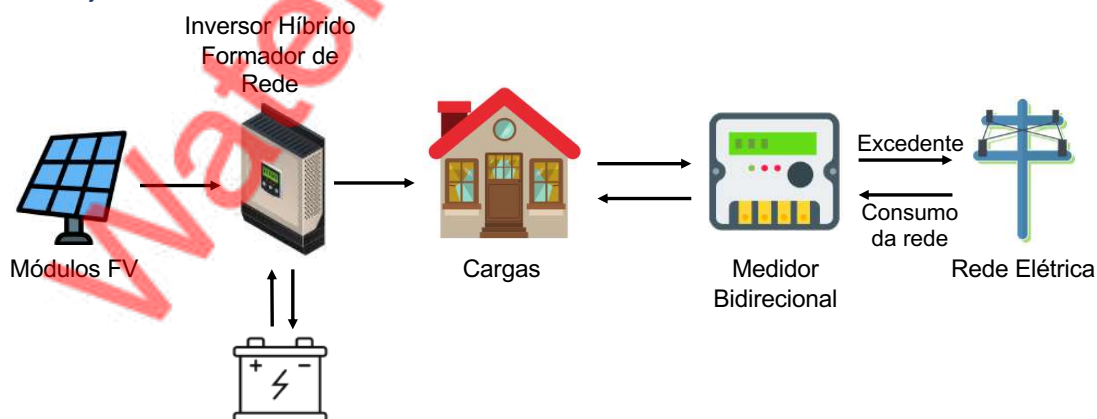
- **Isolado (Off-Grid);**



- O sistema funciona sem a rede da concessionária;
- Indicado para locais isolados, pois não compensa financeiramente (se 100% isolado) quando comparado a um sistema conectado à rede que tem a resolução como uma aliada, sem necessidade de uma bateria física;
- O inversor não é necessário quando cargas CC.

Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

- **Híbrido;**



- Pode funcionar com e sem a rede elétrica.

Componentes do Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede



Módulos Fotovoltaicos



Inversor para conexão à Rede



Cabos e Dispositivos de Proteção

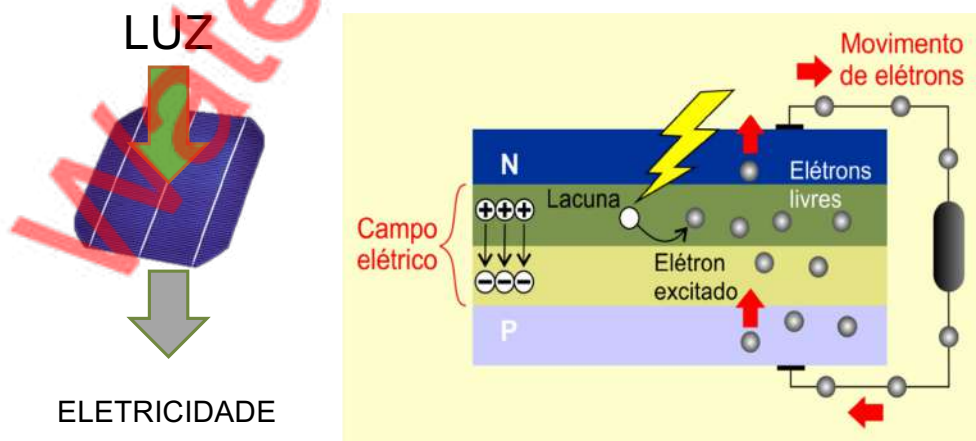


Estrutura de Fixação

Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico

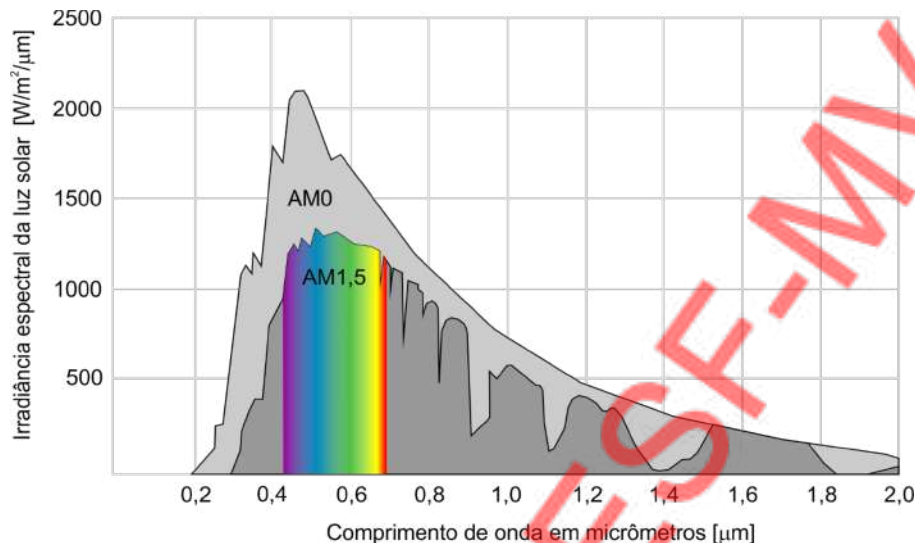
- **Efeito fotovoltaico:** Conversão direta da energia da luz em eletricidade através de um dispositivo semiconductor.



Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico

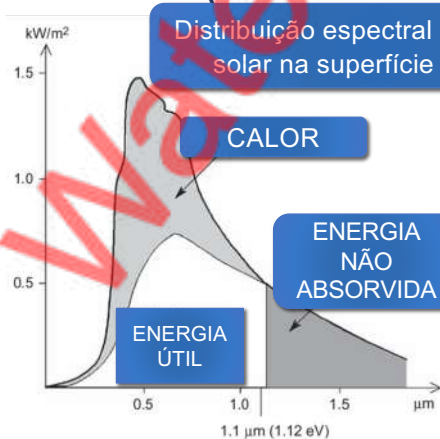
- **Efeito fotovoltaico:** Conversão direta da energia da luz em eletricidade através de um dispositivo semiconductor.



Fonte: Curso Unicamp

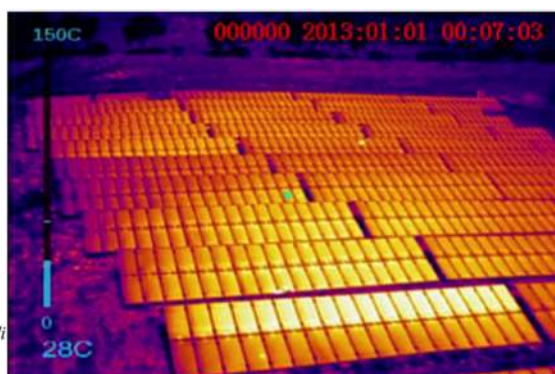
Módulo Fotovoltaico

- Cerca de 55% da energia da luz solar não pode ser aproveitada pela maior parte das células fotovoltaicas (de silício e de outros materiais)



Dica: obtenha esta foto em cores no material complementar do curso

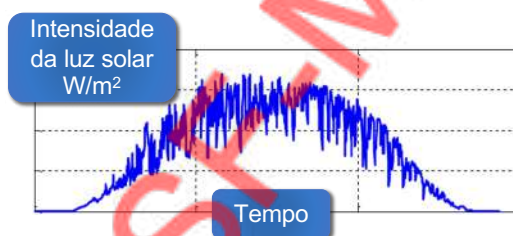
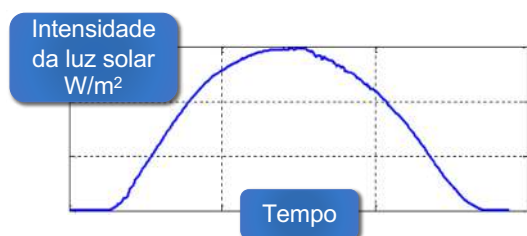
Termografia de uma planta fotovoltaica:



2.21 AM 0 solar spectrum and parts usable by crystalline sili

Fonte: Curso Unicamp

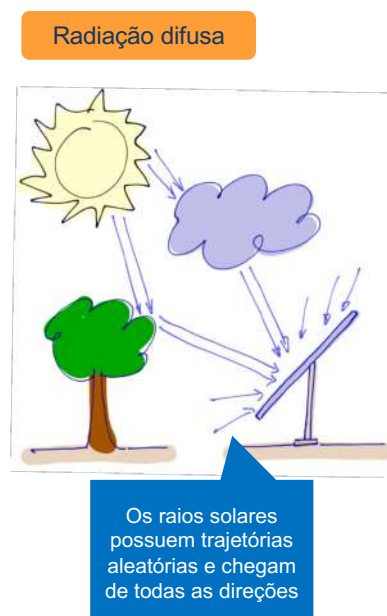
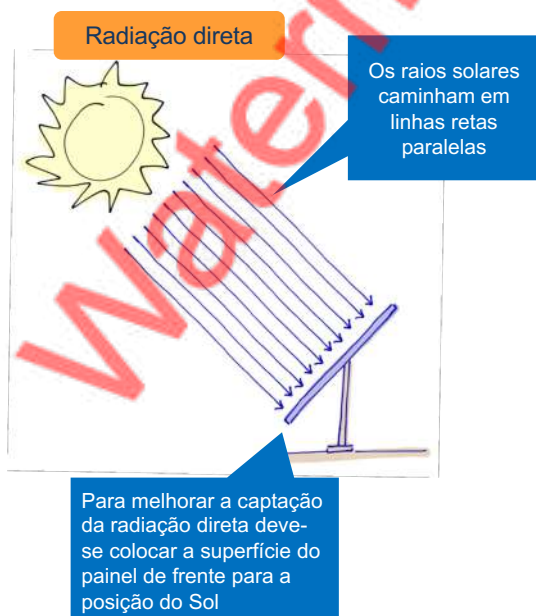
Módulo Fotovoltaico



Observamos neste caso o comportamento intermitente e aleatório da radiação solar

Fonte: Curso Unicamp

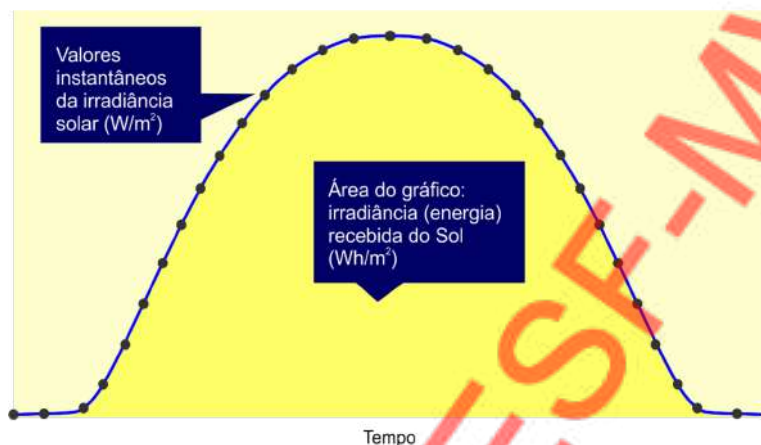
Módulo Fotovoltaico



Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico

- Irradiância = potência [W/m^2]
- Irradiação = energia [Wh/m^2]

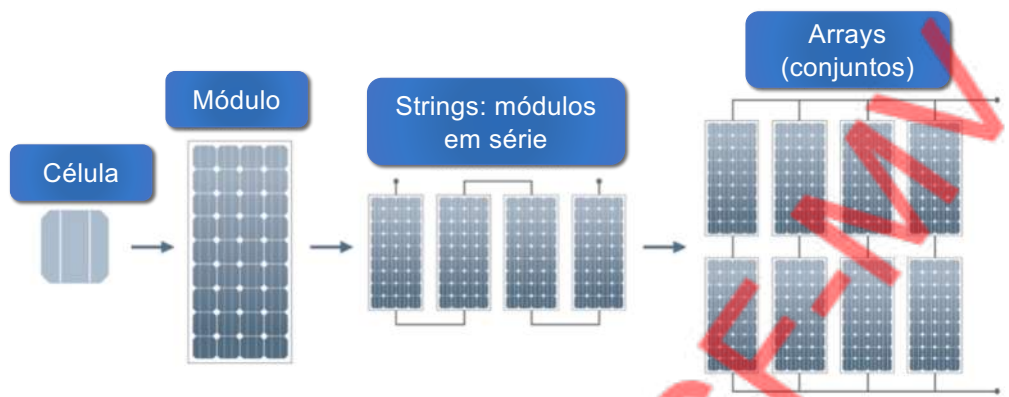


Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico

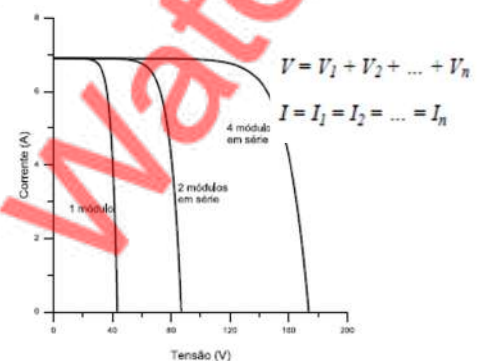


Fonte: Curso Unicamp

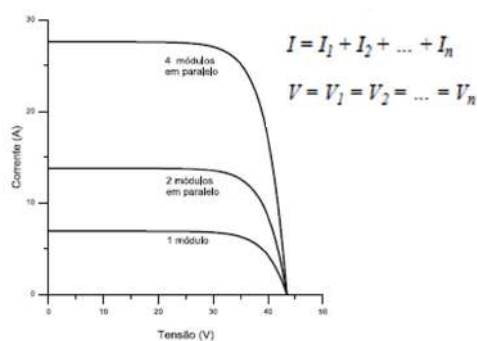


Fonte: Curso Unicamp

- Ligação em Série (String)



- Ligação em Paralelo (Array)



Fonte: Curso Unicamp

Exercício

Uma instalação solar fotovoltaica é composta por **12 módulos** de mesma especificação elétrica, cada um apresentando as seguintes características em condições padrão de teste (STC):

Tensão de circuito aberto (V_{oc}) = 40V

Tensão de operação nominal (V_{mp}) = 32V

Corrente de curto-circuito (I_{sc}) = 10A

Corrente de operação nominal (I_{mp}) = 8A

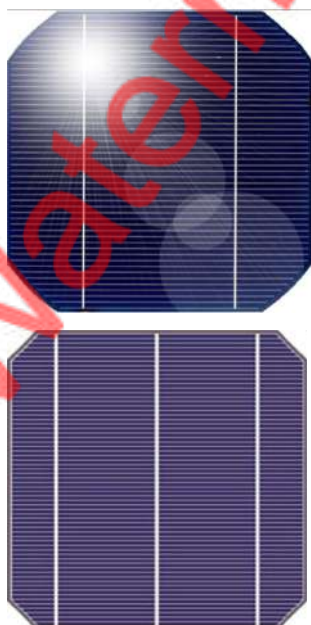
O objetivo do projeto é conectar esses módulos para alimentar um **inversor** que opera em uma faixa de tensão de funcionamento do MPPT entre **200V e 400V** e suporta uma corrente máxima de **24A**.

Dimensionamento da conexão: Suponha que os módulos são conectados em um arranjo **série-paralelo**, onde há **3 strings de (4 módulos em série cada uma string)**. Determine:

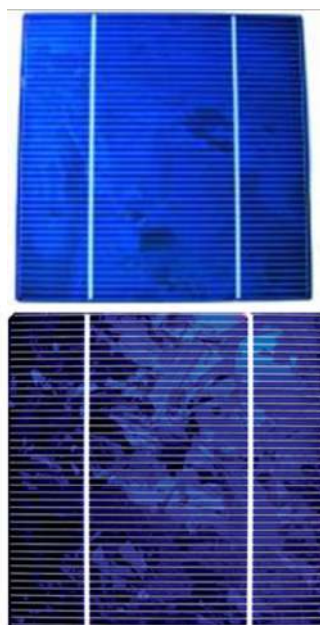
- A tensão total do arranjo na condição de máxima potência (V_{mp}).
- A corrente total fornecida pelo arranjo na condição de máxima potência (I_{mp}).
- Verifique se o arranjo atende aos requisitos do inversor.

Módulo Fotovoltaico

CÉLULAS
MONOCRISTALINAS

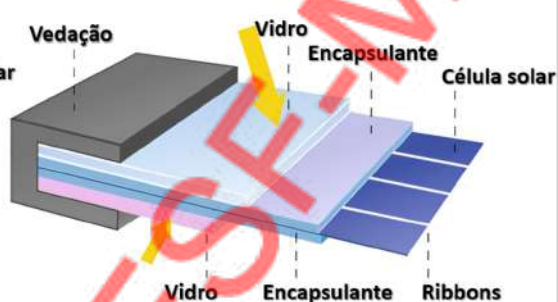
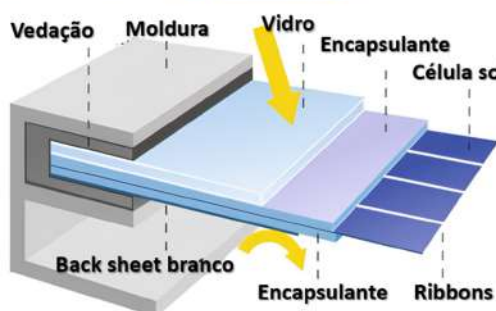


CÉLULAS
POLICRISTALINAS



Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico



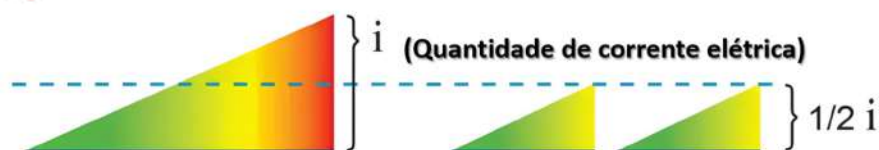
Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico

FULL CELL



HALF CELL

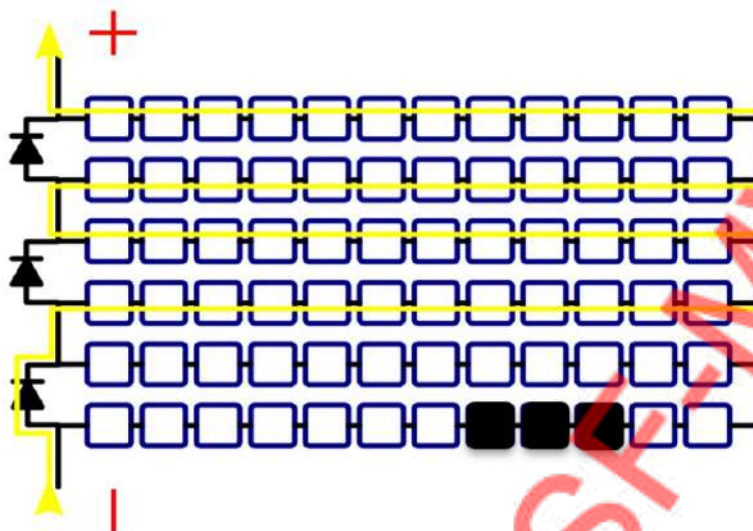


Perdas elétricas = corrente² x resistência

Fonte: <https://www.vokek.com/half-cut-solar-panel/>

Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico



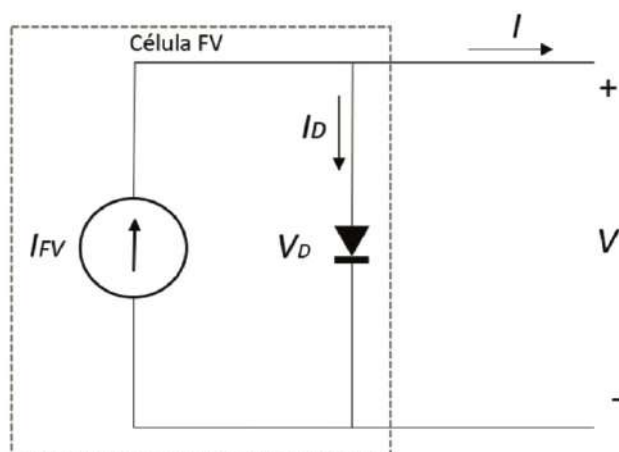
Fonte: <https://canalsolar.com.br/diodos-de-bypass-bloqueio-sistemas-energia-solar/>

Módulo Fotovoltaico

Tecnologia	Eficiência comercial	Referência
Silício policristalino	17-18%	BYD double-glass
Silício monocristalino	18-21%	Canadian Mono-PERC
Filme fino a-Si	5-6%	ENF Solar
Filme fino a-Si/mc-Si Tandem	8-9%	Kaneka U-EA
Filme fino CdTe	17%	First Solar
CIS, CIGS	12-15%	Avancis PowerMax, Nice Solar Energy
Semicondutor III-IV Multijunction	30-40%	
Células orgânicas (OPV)	2-5%	

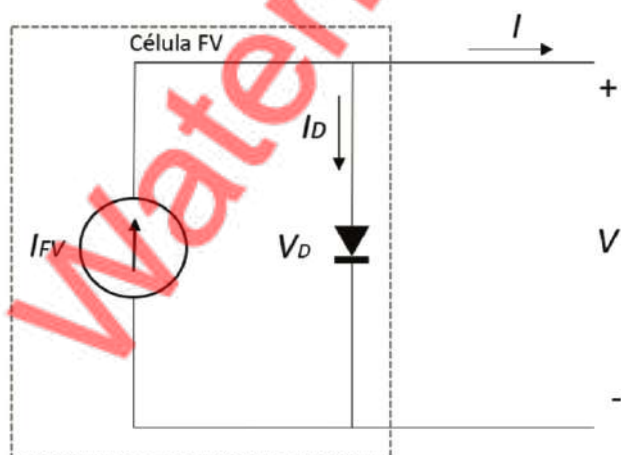
Fonte: Curso Unicamp

Módulo Fotovoltaico: Modelagem



- IFV é a conversão de corrente elétrica pela luz solar.
- O diodo representa o comportamento da junção PN, mostrando que parte da corrente circula na célula.
- A tensão V é a diferença de potencial nos terminais da célula.

Módulo Fotovoltaico: Modelagem



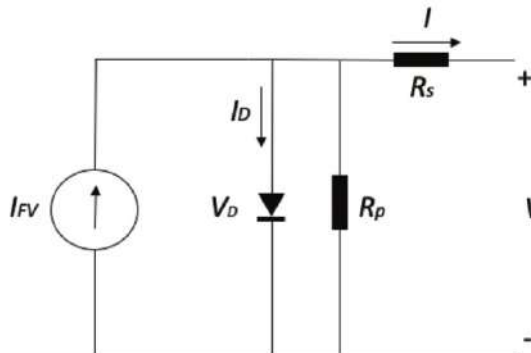
$$I = I_{FV} - I_D$$

$$I_D = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{nkT}\right) - 1 \right]$$

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

q é a carga do elétron e com valor de $1,60217646 \cdot 10^{-19}$ C, k é a constante de Boltzmann com valor de $1,3806503 \cdot 10^{-23}$ J/K, T é a temperatura em Kelvin, I_0 é a corrente de saturação reversa do diodo

Módulo Fotovoltaico: Modelagem



$$I = I_{FV} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p}$$

$$I_{FV} = \left(\frac{G}{G_{(STC)}} \right) (I_{FV(STC)} + K_I \Delta T)$$

$$I_{FV(STC)} = I_{SC(STC)} \frac{R_s + R_p}{R_p}$$

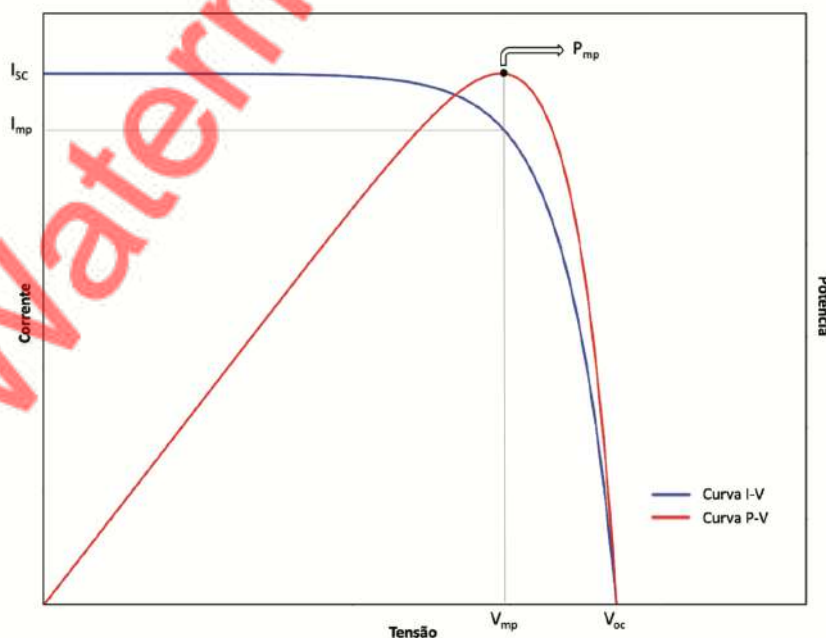
$$I_0 = \frac{I_{SC(STC)} + K_I \Delta T}{\exp \left(\frac{V_{OC(STC)} + K_V \Delta T}{nV_T} \right) - 1}$$

$$V_T = \frac{N_C k T}{q}$$

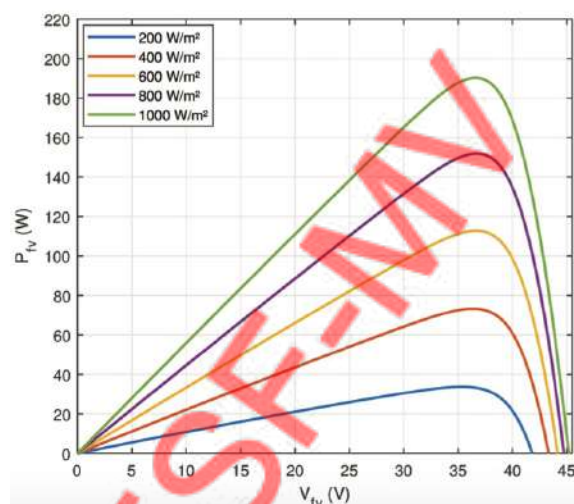
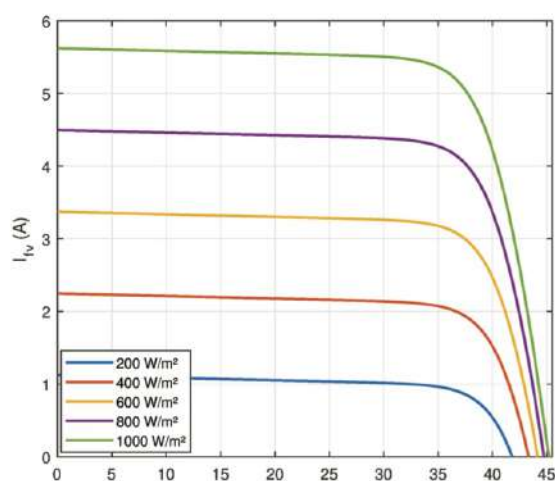
R_s é a resistência equivalente que representa as resistências da estrutura interna de uma célula, e R_p serve para ter a corrente de fuga da junção P-N. N_c é o número de células, K_I é o coeficiente da temperatura da corrente de curto-circuito, K_V é o coeficiente da temperatura da tensão de circuito-aberto.

Vamos entender detalhes da modelagem nas próximas aulas!

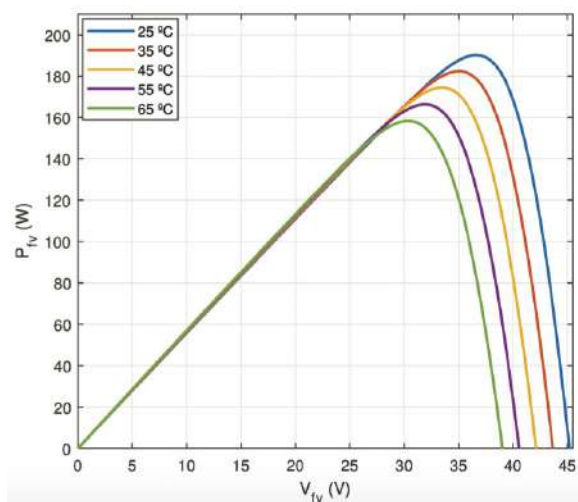
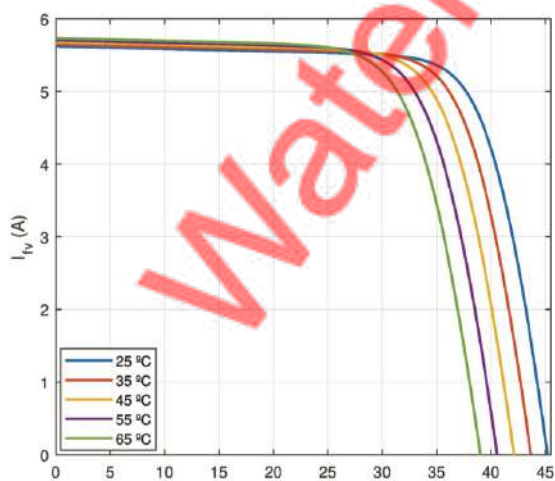
Módulo Fotovoltaico: Curva I-V



Módulo Fotovoltaico: Curva I-V

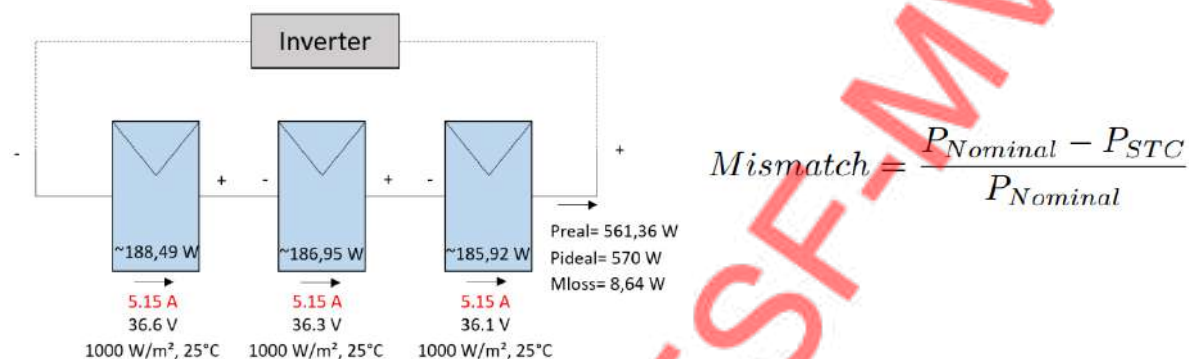


Módulo Fotovoltaico: Curva I-V



Módulo Fotovoltaico: Mismatch

- Perdas por mismatch pode ser definida como um descompasso existente entre módulos conectados em série e/ou paralelo, em virtudes de fatores extrínseco e/ou intrínseco ao sistema FV;



Fonte [1]

Módulo Fotovoltaico: Mismatch

Mismatch de Fabricação

Diferentes características entre módulos de mesmo modelo e/ou lote de fabricação.

Mismatch de Operação

Sombreamento total e parcial; sujeira; degradação; temperatura; *hotspot*; e entre outras infinidades de causa.

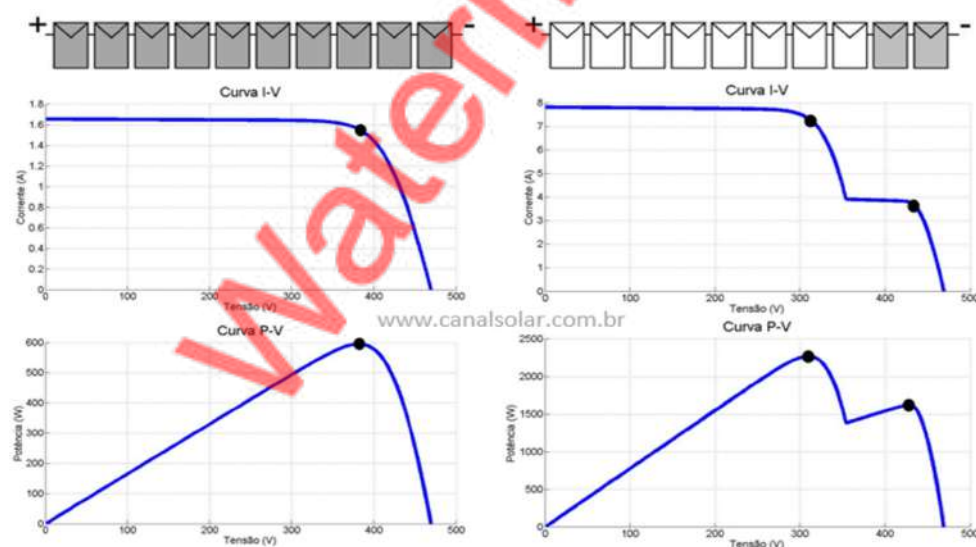
Fonte [1]

Exercício

Agora, considere a questão anterior, um dos módulos da instalação está parcialmente sujo, reduzindo sua corrente de operação nominal em **20%**.

- d) Como a corrente total do arranjo será afetada considerando que a sujeira afeta um módulo de uma das strings?
- e) A tensão total do sistema será alterada? Justifique sua resposta (condições ideais).
- f) Calcular a porcentagem do mismatch somente do módulo com sujeira.

Módulo Fotovoltaico: Sombreamento



→ Seria os dois módulos limitando a corrente, ou sendo bypassados, reduzindo a tensão!

Módulo Fotovoltaico: Datasheet

Dados elétricos (em condições de teste padrão (STC) irradiância 1.000 W/m² com espectro AM 1,5 e temperatura da célula de 25°C)

Tipo	Potência nominal P _{mp}	Tensão nominal U _{mp}	Corrente nominal I _{mp}	Corrente de curto-circuito I _{sc}	Tensão de circuito aberto U _{oc}	Eficiência de módulo
AC-240P/156-60S	240 Wp	30,25 V	7,98 A	8,50 A	37,20 V	14,75 %
AC-245P/156-60S	245 Wp	30,36 V	8,13 A	8,67 A	37,50 V	15,06 %
AC-250P/156-60S	250 Wp	30,70 V	8,18 A	8,71 A	37,80 V	15,37 %
AC-255P/156-60S	255 Wp	30,80 V	8,30 A	8,84 A	37,92 V	15,67 %

Coefficiente de temperatura

Tensão U _{oc}	-0,33 %/K
Corrente I _{sc}	0,06 %/K
Potência P _{mp}	-0,44 %/K

Valor limite

Tensão do sistema	1000 VDC
NOCT (nominal operating cell temperature)*	45°C +/-2K
Máxima de carga	5400 N/m ²
Corrente reversa	16,0 A

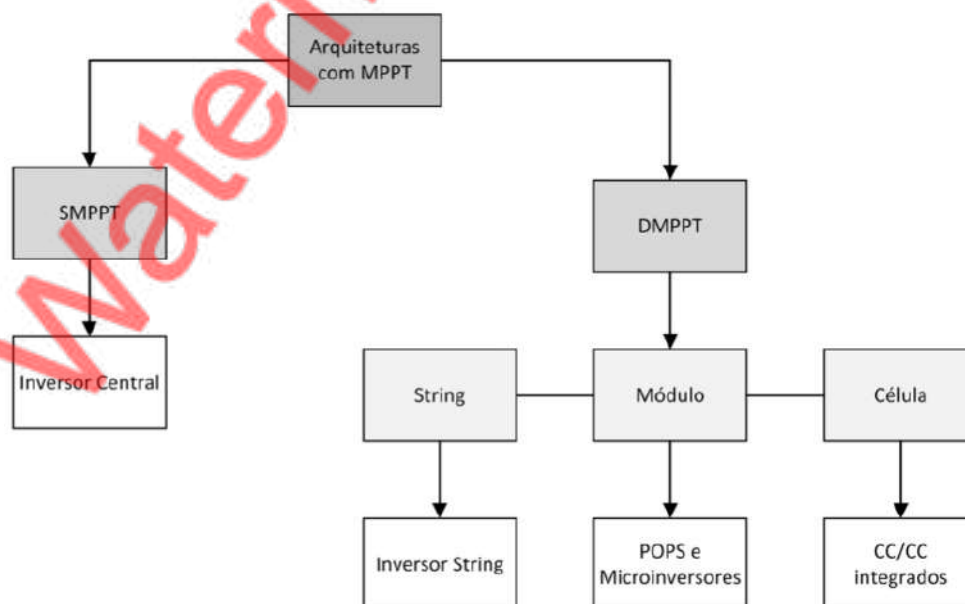
Atentar para:

Tolerância de Potência (Mismatch)
Garantias de eficiência

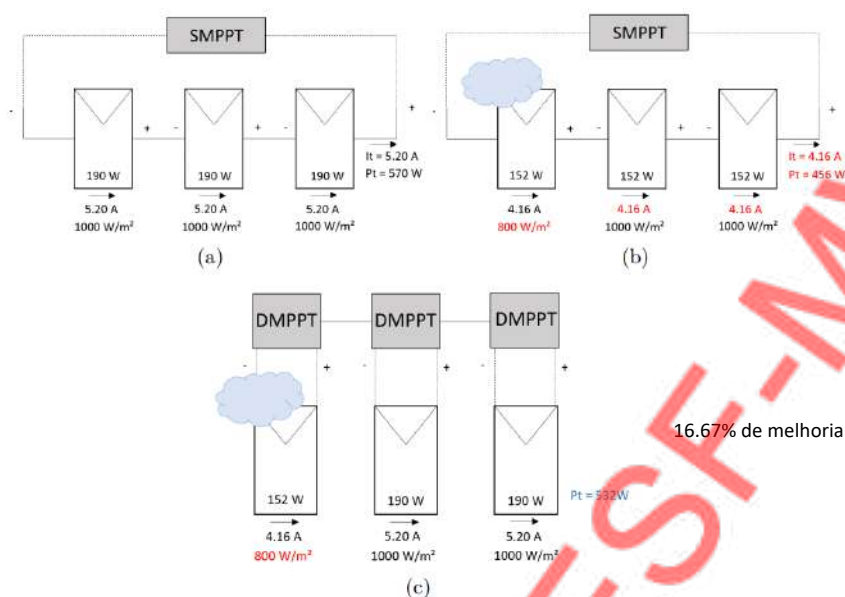
+
wp Tolerância de potência positiva
garantida de -0/+5 Wp



Arquiteturas Fotovoltaicas: On-Grid



Arquiteturas Fotovoltaicas: On-Grid

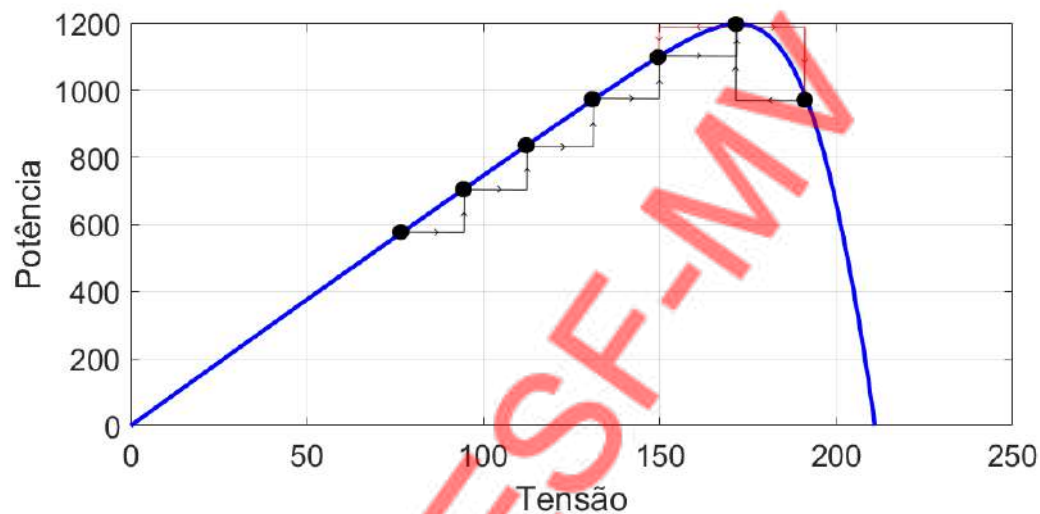


Arquiteturas Fotovoltaicas: MPPT

- **MPPT:** Técnica ou código que faz o sistema fotovoltaico gerar o seu máximo - Rastreamento do Ponto de Máxima Potência (MPPT – *Maximum Power Point Tracking*);
- **Conversor:** Elemento responsável por carregar, junto com seu controle, o MPPT, permitindo a busca pelo ponto de máxima potência e o processamento da energia proveniente dos módulos fotovoltaicos.

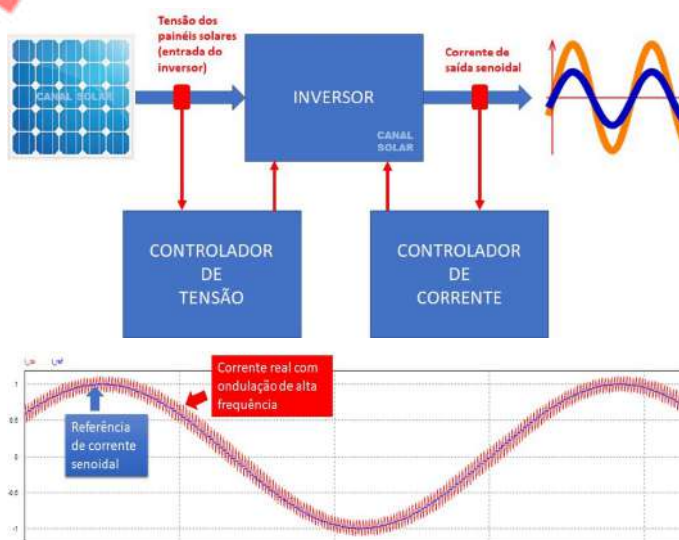
Arquiteturas Fotovoltaicas: MPPT

- Perturba a Tensão
- Observa a Potência



Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores

- É o equipamento mais importante de um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede;
- É o responsável por transformar energia de CC para CA, com as mesmas características da rede elétrica;
- Garante que a energia convertida esteja em fase e frequência adequadas para ser injetada na rede elétrica.



Fonte: Curso Unicamp

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores

- Na entrada (input) é importante saber:
- Quantidade de MPPT;
- Quantidade de entradas;
- Máxima tensão e corrente permitida em cada entrada;
- Mínima tensão para operação.

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores

Technical data and types

Type code	PVI-3.0-TL-OUTD	PVI-3.6-TL-OUTD	PVI-4.2-TL-OUTD
Input side			
Absolute maximum DC input voltage ($V_{max,abs}$)	600 V		
Start-up DC input voltage (V_{start})	200 V (adj. 120...350 V)		
Operating DC input voltage range ($V_{dorm,1}...V_{dorm,2}$)	0.7 x $V_{start}...580$ V (min 90 V)		
Rated DC input voltage (V_{dc})	380 V		
Rated DC input power (P_{dc})	3120 W	3750 W	4375 W
Number of independent MPPT	2		
Maximum DC input power for each MPPT ($P_{MPPTmax}$)	2000 W	3000 W	3000 W
DC input voltage range with parallel configuration of MPPT at P_{dc}	160...530 V	120...530 V	140...530 V
DC power limitation with parallel configuration of MPPT	Linear derating from max to null [530 V≤ V_{MPPT} ≤580 V]		
DC power limitation for each MPPT with independent configuration of MPPT at P_{dc} , max unbalance example	2000 W [200 V≤ V_{MPPT} ≤530 V] the other channel: P_{dc} -2000 W [112 V≤ V_{MPPT} ≤530 V]	3000 W [190 V≤ V_{MPPT} ≤530 V] the other channel: P_{dc} -3000 W [90 V≤ V_{MPPT} ≤530 V]	
Maximum DC input current ($I_{dc,max}$) / for each MPPT ($I_{MPPTmax}$)	20.0 A / 10.0 A	32.0 A / 16.0 A	
Maximum input short circuit current for each MPPT	12.5 A	20.0 A	
Number of DC inputs pairs for each MPPT	1	1	2 for MPPT1 and 1 for MPPT2
DC connection type	Tool Free PV connector WM / MC4		
Input protection			
Reverse polarity protection	Yes, from limited current source		
Input over voltage protection for each MPPT - varistor	Yes		
Photovoltaic array isolation control	According to local standard		
DC switch rating for each MPPT (version with DC switch)	25 A / 600 V		

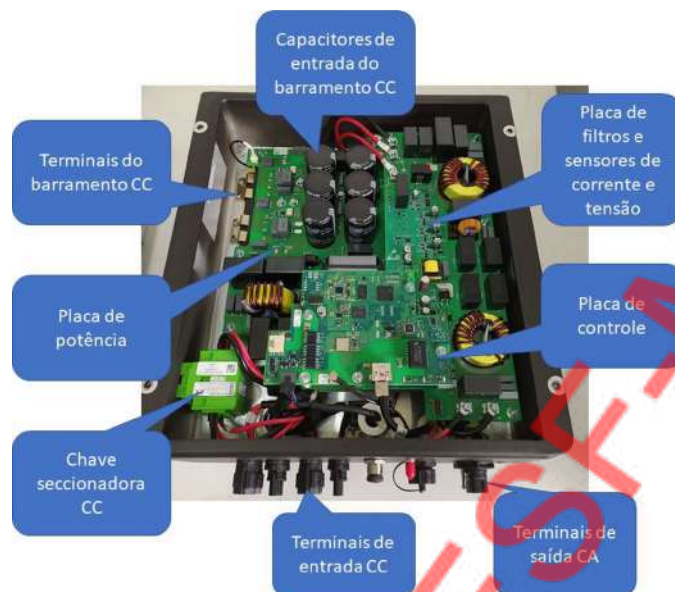
Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores

- Na saída (output) é importante saber:
- Potência máxima;
- Corrente e tensão máxima de saída (visando dimensionar a proteção CA);
- Frequência;
- Tipo de conexão (fases na saída).

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores

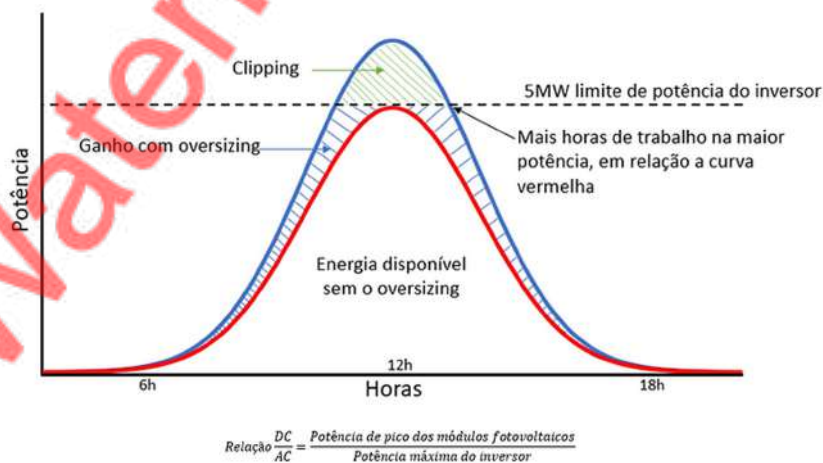
Output side			
AC grid connection type	Single-phase		
Rated AC power ($P_{acr} @ \cos\phi=1$)	3000 W	3600 W	4200 W
Maximum AC output power ($P_{acmax} @ \cos\phi=1$)	3300 W ⁴⁾	4000 W ⁴⁾	4600 W ⁴⁾
Maximum apparent power (S_{max})	3330 VA	4000 VA	4670 VA
Rated AC grid voltage (V_{acr})	230 V		
AC voltage range	180...264 V ¹⁾		
Maximum AC output current ($I_{ac,max}$)	14.5 A	17.2 A ²⁾	20.0 A
Contributory fault current	16.0 A	19.0 A	22.0 A
Rated output frequency (f_r)	50 Hz / 60 Hz		
Output frequency range ($f_{min}...f_{max}$)	47...53 Hz / 57...63 Hz ³⁾		
Nominal power factor and adjustable range	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{acr}=3.0$ kW	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{acr}=3.6$ kW	> 0.995, adj. ± 0.9 with $P_{acr}=4.2$ kW
Total current harmonic distortion	< 3.5%		
AC connection type	Screw terminal block, cable gland M25		
Output protection			
Anti-islanding protection	According to local standard		
Maximum external AC overcurrent protection	20.0 A	25.0 A	25.0 A
Output overvoltage protection - varistor	2 (L - N / L - PE)		

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores



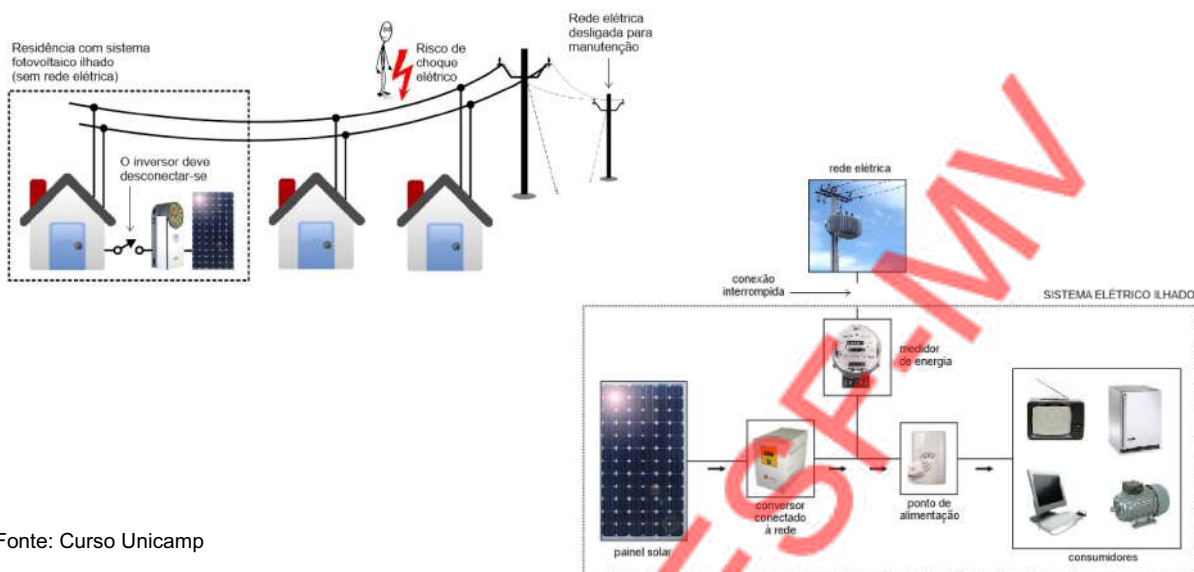
Fonte: Curso Unicamp

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores Over...



Ler: <https://www.profil.com/post/por-que-sobredimensionar-inversor-solar-fotovoltaico-veja-os-motivos-e-como-fazer>

Arquiteturas Fotovoltaicas: Inversores Ilha...



Fonte: Curso Unicamp

Arquiteturas Fotovoltaicas: Microinversor

- Microinversor: **Inversor** onde cada entrada de corrente contínua é associada a um único MPPT com tensão máxima por entrada de 120V;
- Ou seja, é um inversor pequeno!
- Entretanto, consegue evitar a conexão direta entre módulos, sendo altamente eficiente para eliminar as perdas por mismatch;
- Cada microinversor ou entrada do microinversor pode ter diferentes módulos FV, orientações e inclinações (obs. cada entrada, no mesmo MPPT não se pode colocar em série módulos FV de diferentes especificações e/ou orientação e/ou inclinação).

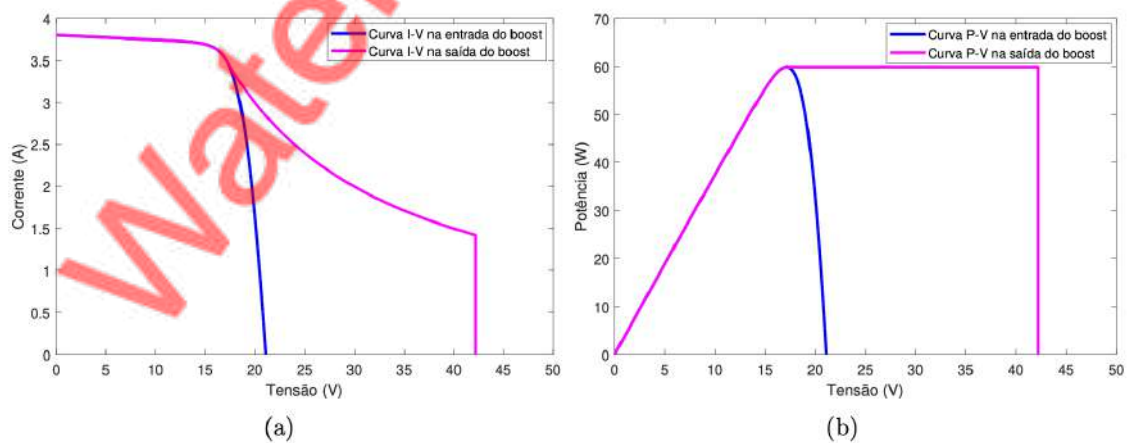


Arquiteturas Fotovoltaicas: Otimizador

- Otimizador de Potência Fotovoltaico: No inglês, *Power Optimizer for Photovoltaic Systems* (POPS), são conversores CC/CC alocados a cada um ou poucos módulos com finalidade principal de mitigar perdas por mismatch, possibilitando cada módulo FV trabalhar próximo da maior potência possível;
- Com otimizadores tem-se conexão entre otimizadores. Secundariamente, os otimizadores podem ter capacidade de monitorar individualmente os módulos FV; aumentar a segurança das instalações (principalmente, devido *rapid shutdown*); desligar individualmente os módulos FV para manutenção; prever e identificar falhas à nível modular automaticamente ou manualmente.
- **MLPE: Module-Level Power Electronics**, é o grupo de tecnologias que os otimizadores e microinversores pertencem. São dispositivos com eletrônica de potência a nível de módulo.



Arquiteturas Fotovoltaicas: Otimizador



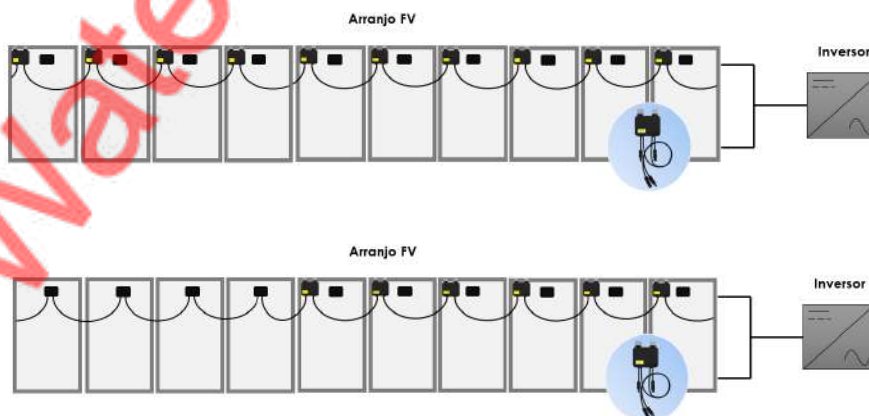
Arquiteturas Fotovoltaicas: Otimizador/SolarEdge

- A escolha do otimizador é feita na seguinte ordem:
- **1º Passo:** Escolhe-se o módulo FV e potência do sistema;
- **2º Passo:** Escolhe-se o inversor FV pela potência do mesmo, sendo este da própria SolarEdge
- **3º Passo:** Escolhe-se o otimizador SolarEdge;
- **4º Passo:** Verificar a quantidade mínima de otimizadores necessários para funcionamento;

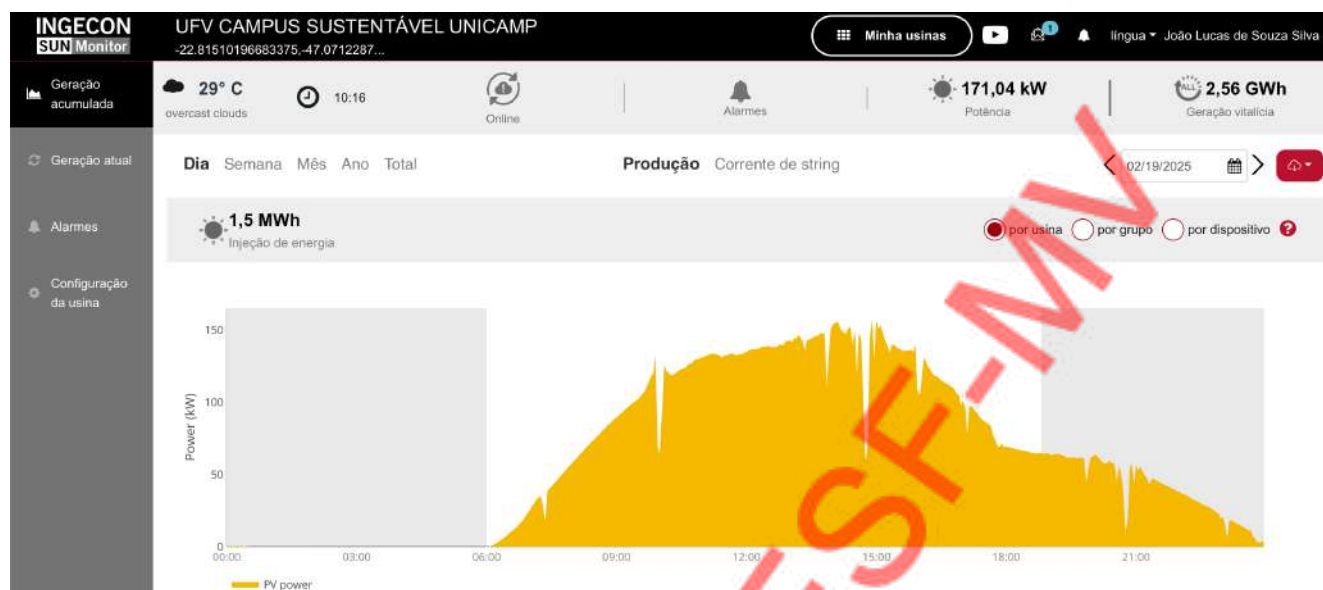


Arquiteturas Fotovoltaicas: Otimizador

Exemplo da Tigo



Monitoramento



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - www.lesfmv.com - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

61

Cabos e Proteções



Lado CC

- Entre os painéis fotovoltaicos e o inversor;
- Deve ser sempre utilizado componentes próprios para operação em CC;
- Tensão CC pode chegar à 1.500V;
- Devem ser utilizados cabos com proteção UV e dupla isolamento e capacidade de condução de corrente para atender 1,25xIsc;
- Deve possuir chave e proteção contra sobretensão;
- Proteção contra sobrecorrente apenas no caso de três ou mais strings ligadas em paralelo;
- Essas proteções podem estar incorporadas ao Inversor;
- Devem ser utilizados conectores próprios e de qualidade;
- Tomar cuidado! Não é possível “desligar” o Sol.

Lado CA

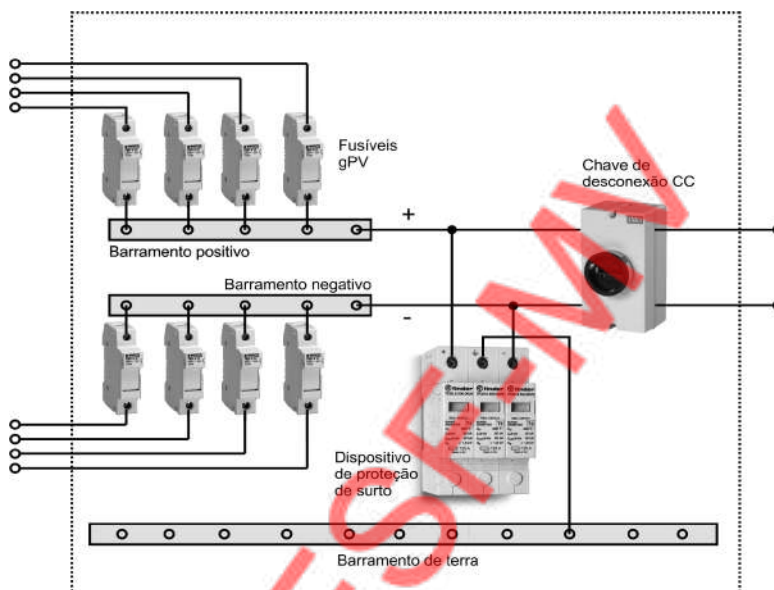
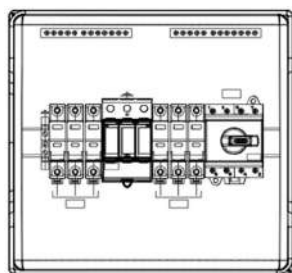
- Entre o inversor e a rede elétrica;
- Deve possuir disjuntor, DPS;
- Cabeamento deve ser projetado de acordo com a corrente nominal do inversor.

Fonte: Curso Unicamp

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - www.lesfmv.com - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

62

Stringbox

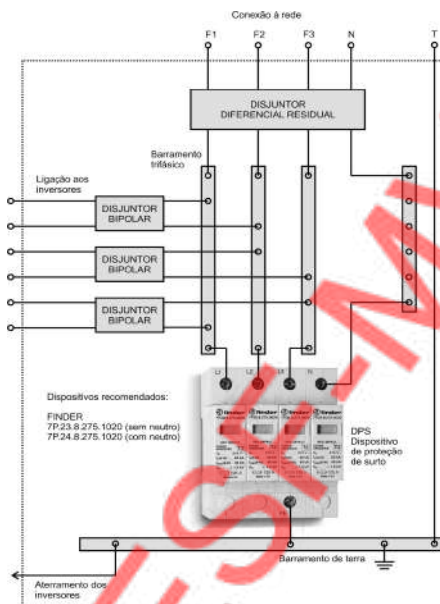
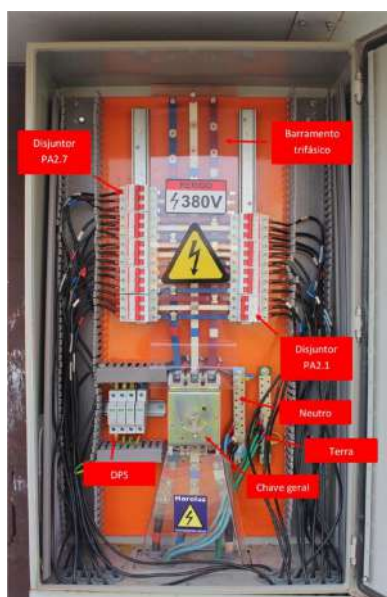


Fonte: Curso Unicamp

Stringbox

- **Alguns casos não precisa de stringbox como:**
- Inversores que já possuem internamente;
- Otimizadores;
- Microinversores.
- De toda forma, consultar o datasheet de tudo!

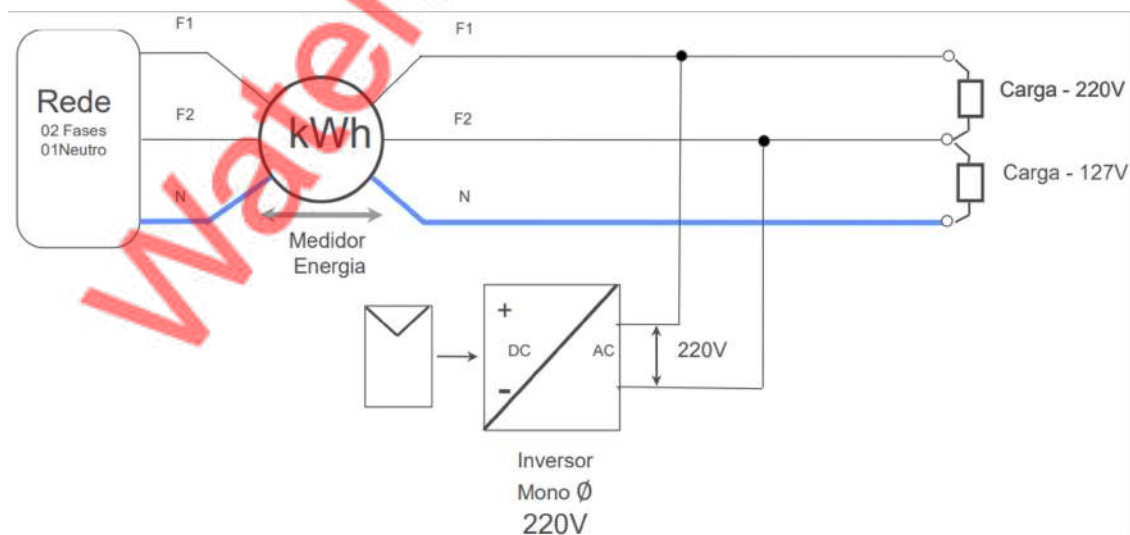
Quadro CA



Fonte: Curso Unicamp

Conexão Com Rede

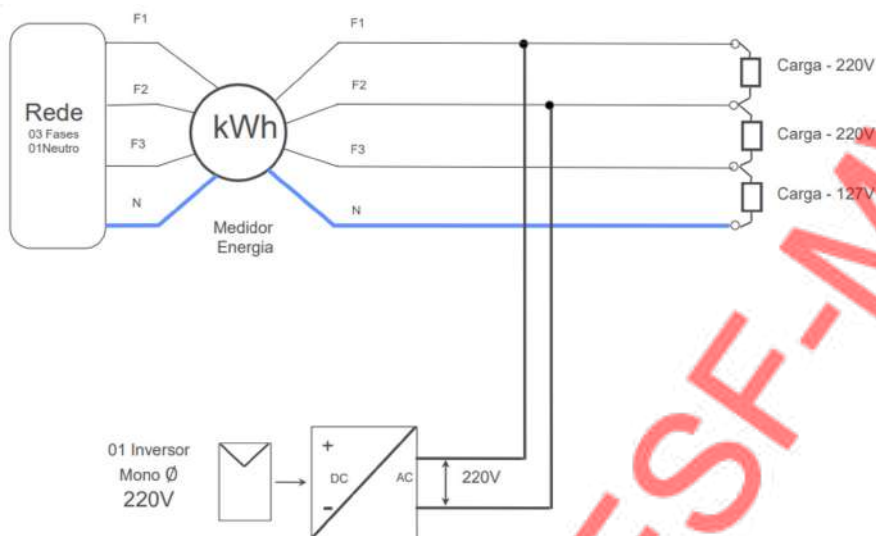
- Rede Bifásica 127/220V: Inversor Monofásico 220V



Fonte: Fronius e Enova Solar.

Conexão Com Rede

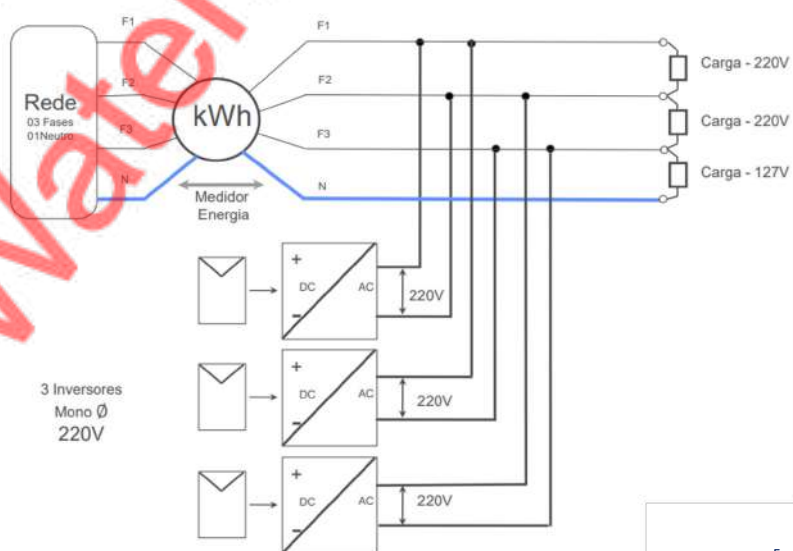
- Rede Trifásica 127/220V: Inversor Monofásico 220V



Fonte: Fronius e Enova Solar.

Conexão Com Rede

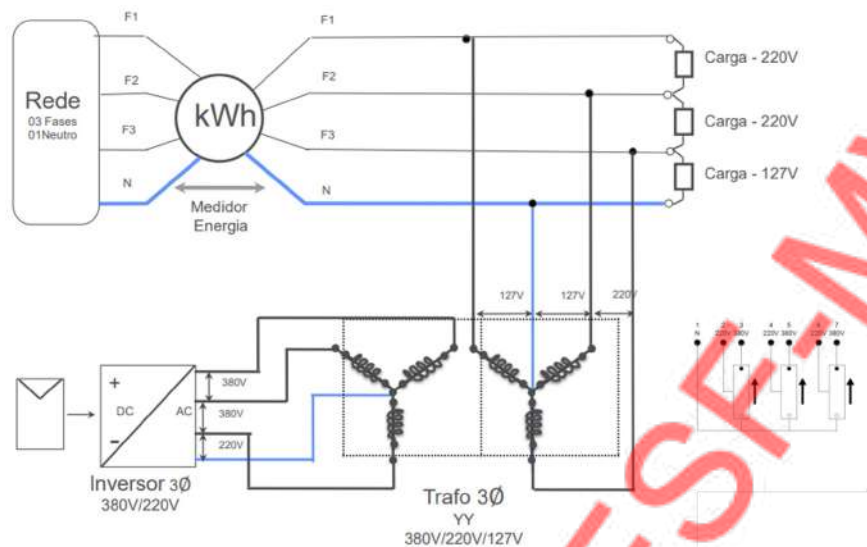
- Rede Trifásica 127/220V: Inversores Monofásicos 220V.



Fonte: Fronius e Enova Solar.

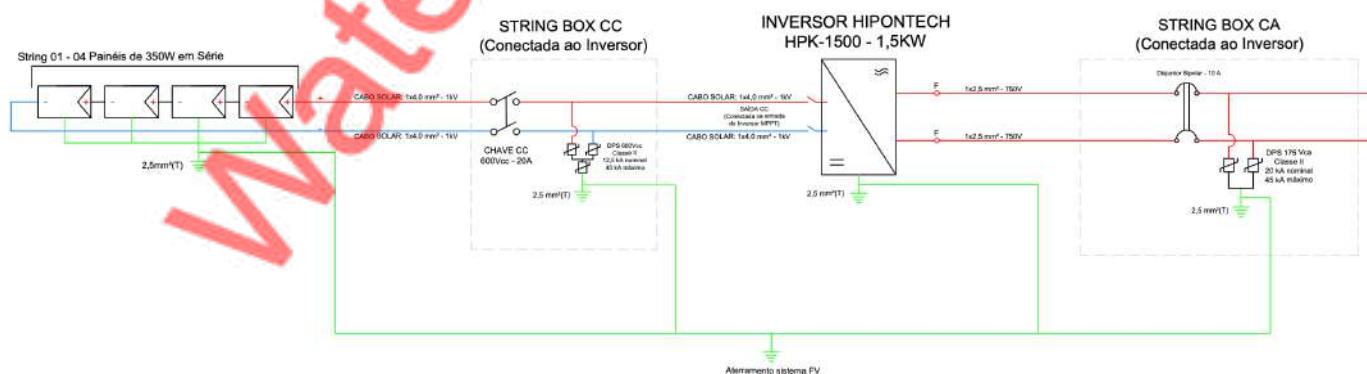
Conexão Com Rede

- Rede Trifásica 127/220V: Inversor Trifásico 380V + Trafo YY 127/220V.

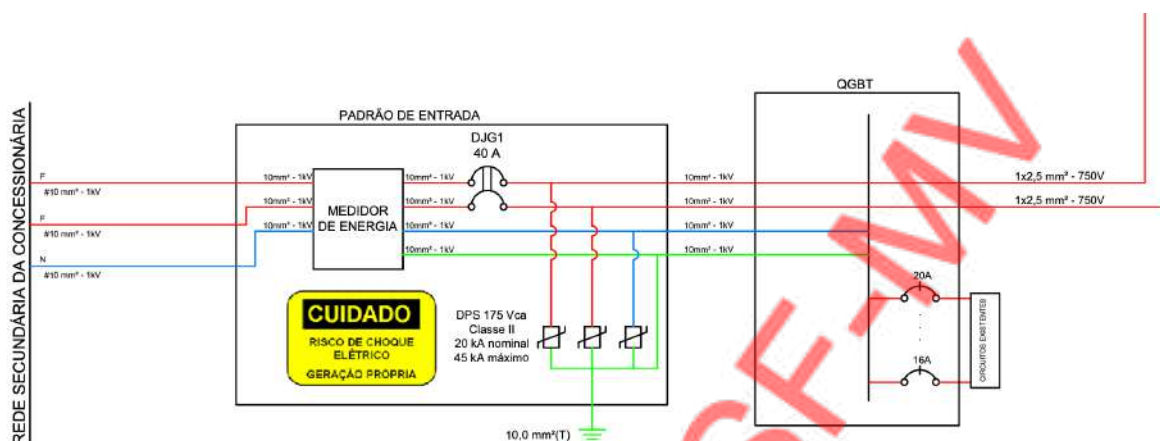


Fonte: Fronius e Enova Solar.

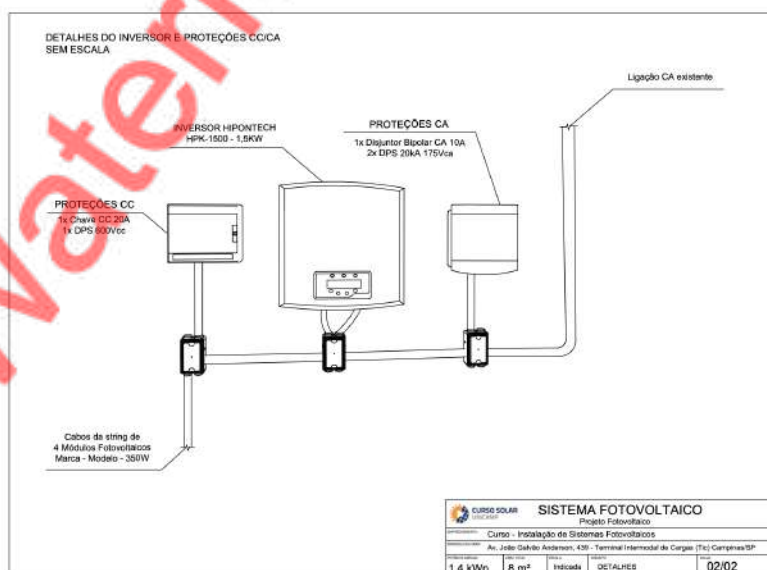
Projeto FV



Projeto FV



Projeto FV



Normas

- **ABNT NBR 16690:2019** - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto
- **ABNT NBR 16274:2014** - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho
- **ABNT NBR 16150:2013** - Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade
- **ABNT NBR IEC 62116:2012** - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica
- **ABNT NBR 16612:2020** - Cabos de potência para sistemas fotovoltaicos, não halogenados, isolados, com cobertura, para tensão de até 1,8 kV C.C. entre condutores - Requisitos de desempenho
- **ABNT NBR 5410:2008** - Instalações elétricas de baixa tensão
- **ABNT NBR 5419-1:2015** - Proteção contra descargas atmosféricas Parte 1: Princípios gerais

Fotos de Instalações



Fonte: Curso Unicamp

Fotos de Instalações



Fonte: Curso Unicamp

Fotos de Instalações



Fonte: Curso Unicamp

Fotos de Instalações



Fonte: Curso Unicamp

Fotos de Instalações

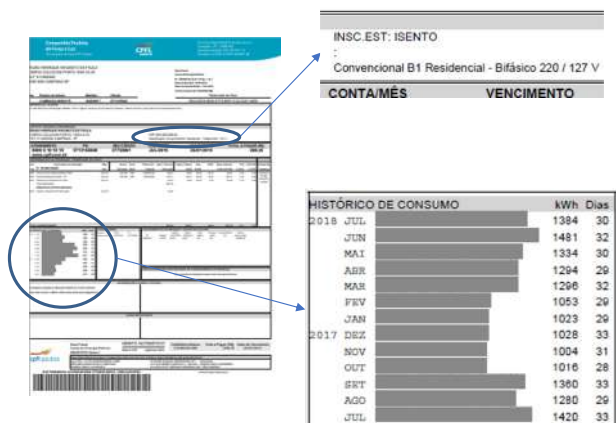


Fonte: Unicamp.br

Dimensionamento com Conta de Energia

1º Passo: Definição da Potência Teórica.

- Consumo e geração de energia médios:



Consumo médio mensal: 1.213 kWh

Geração mensal necessária: 1.213 kWh

Fonte: Curso Unicamp

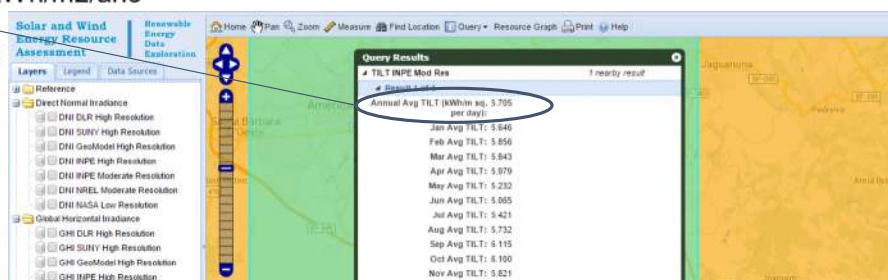
Dimensionamento com Conta de Energia

1º Passo: Definição da Potência Teórica.

- Definição da Potência do Sistema:

$$P_{FV} = \frac{C / Irr}{F}$$

- $C = 1.213 * 12 = 14.556$ kWh/ano
- $Irr = 365 * 5.705 = 2.082$ kWh/m²/ano
- $F = 0,85$
- $P_{FV} = (14.556 / 2.082) / 0,85$
- $P_{FV} = 8,22$ kWp

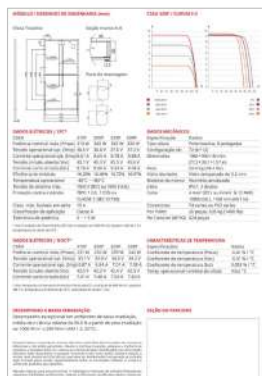


Fonte: Curso Unicamp

Dimensionamento com Conta de Energia

2º Passo: Definição da quantidade dos módulos.

- Escolha dos módulos:



DADOS ELÉTRICOS | STC*

CS6U	315P	320P	325P	330P
Potência nominal máx. (Pmax)	315 W	320 W	325 W	330 W
Tensão operacional opt. (Vmp)	36.6 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V
Corrente operacional opt. (Imp)	8.61 A	8.69 A	8.78 A	8.88 A
Tensão circuito aberto (Voc)	45.1 V	45.3 V	45.5 V	45.6 V
Corrente curto-circuito (Isc)	9.18 A	9.26 A	9.34 A	9.45 A
Eficiência do módulo	16.20%	16.46%	16.72%	16.97%
Temperatura operacional	-40°C ~ +85°C			
Tensão do sistema máx.	1000 V (IEC) ou 1000 V (UL)			
Proteção contra incêndio	TIPO 1 (UL 1703) ou CLASSE C (IEC 61730)			
Class. máx. fusíveis em série	15 A			
Classificação da aplicação	Classe A			
Tolerância de potência	0 ~ + 5 W			

CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Especificações	Dados
Coefficiente de temperatura (Pmax)	-0.41 % / °C
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0.31 % / °C
Coefficiente de temperatura (Isc)	0.053 % / °C
Temp. operacional nominal da célula	43±2 °C

$$Qtd_{painéis} = P_{fv} / P_{painel} = 8,22 / 0,330 = 24,91 = 25 \text{ módulos FV}$$
$$Potência \text{ CC do Sistema} = 25 \times 330 = 8,25 \text{ kWp}$$

Fonte: Curso Unicamp

Dimensionamento com Conta de Energia

3º Passo: Escolha do Inversor.

- Inversor pode ser até 75% menor que a potência dos arranjo FV.

Potência CC = 8,25 kWp

Potência AC = 0,75 x 8,25

Potência AC = 6,18 kW

DADOS DE ENTRADA	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1
Max. corrente de entrada (Idc max1 / Idc max2)	12.0 A / 12.0 A		18.0 A / 18.0 A
Max. conjunto corrente curto-circuito (MPP1 / MPP2)	18.0 A / 18.0 A		27.0 A / 27.0 A
Min. tensão de entrada (Udc min)			80 V
Feed-in tensão de entrada (Udc start)			80 V
Tensão nominal de entrada (Udc,r)			710 V
Max. tensão de entrada (Udc max)			1,000 V
Faixa de tensão MPP (Umpp min - Umpp max)		240 - 800 V	
Numero de rastreadores MPP		2	
Numero de conexões CC		2 + 2	
DADOS DE SAÍDA	PRIMO 5.0-1	PRIMO 5.0-1 AUS	PRIMO 6.0-1
Tensão nominal de saída (Pac,r)	5,000 W	4,600 W	6,000 W
Max.potência de saída	5,000 VA	5,000 VA	6,000 VA
Max. corrente de saída (Iac max)	21.7 A	21.7 A	26.1 A
Conexão a rede (faixa de tensão)		1 - NPE 220 V / 230 V (180 V - 270 V)	
Frequência		50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Distorção harmônica total		< 5 %	
Fator de potência (cos φac,r)		0.85 - 1 ind. / cap.	

Fonte: Curso Unicamp

Dimensionamento com Conta de Energia

4º Passo: Definição do Arranjo dos Módulos

CS6U	315P	320P	325P	330P
Potência nominal máx. (Pmax)	315 W	320 W	325 W	330 W
Tensão operacional opt. (Vmp)	36.6 V	36.8 V	37.0 V	37.2 V
Corrente operacional opt. (Imp)	8.61 A	8.69 A	8.78 A	8.88 A
Tensão circuito aberto (Voc)	45.1 V	45.3 V	45.5 V	45.6 V
Corrente curto-circuito (Isc)	9.18 A	9.26 A	9.34 A	9.45 A

Tensão de Circuito Aberto:

25 módulos em série $V_{oc} = 25 \times 45,6V = 1.140V > 1.000V$ ❌

12 módulos em série $V_{oc} = 12 \times 45,6V = 547,2V < 1.000V$ ☀️

13 módulos em série $V_{oc} = 13 \times 45,6V = 592,8V < 1.000V$ ☀️

Tensão de Operação:

12 painéis em série $V_{mpp} = 12 \times 37,2 = 446,4V > 240V$ e $< 800V$ ☀️

13 painéis em série $V_{mpp} = 13 \times 37,2 = 483,6V > 240V$ e $< 800V$ ☀️

Corrente de Curto Circuito (1 string em cada entrada):

String 1 (MPPT1) $I_{sc} = 9,45A < 18A$ ☀️

String 2 (MPPT2) $I_{sc} = 9,45A < 18A$

Fonte: Curso Unicamp

O Arranjo será de 1 string de 12 módulos e 1 string de 13 módulos

Dimensionamento com Conta de Energia

- As tensões dos módulos ligados em série são somadas;
- Deve-se tomar cuidado para que a tensão do string não ultrapasse a tensão máxima permitida (em função dos outros componentes do sistema);
- Exemplo: $V_{oc} = 45,6V$ em STC (25°C) (circuito aberto do módulo);
- Temperatura mínima do ambiente: 5°C;
- Variação de temperatura = $25^{\circ}C - 5^{\circ}C = 20^{\circ}C$;
- Coeficiente de tensão V_{oc} /temperatura = -0,31%;
- Variação de tensão: $= 0,31\% \times 20 \times 45,6 = 2,83V$ (aumento por módulo);
- Sistema com 12 módulos e 13 módulos em série:
 $V_{oc} = 12 \times (45,6 + 2,83) = 581,16$ (tensão de circuito aberto do string)
 $V_{oc} = 13 \times (45,6 + 2,83) = 629,59$ (tensão de circuito aberto do string)

Fonte: Curso Unicamp

Dimensionamento com Conta de Energia

5º Passo: Proteções e Cabeamento.

Lado CC:

Tensão do Sistema:

13 módulos em série Voc = $13 \times (45,6 + 2,83) = 629,59$

Corrente de Curto Circuito:

1 string em cada entrada Isc = $9,45A \times 1,25 = 11,81 A$;

Condutores de 2,5 mm² com dupla isolação e proteção UV;

DPS CC Classe II, Uc=1000V, Up=<3.8kV, Imax=> 40 kA.

Lado CA:

Tensão do Inversor: 220V;

Saída do Inversor: 26,1A;

Condutores de 6 mm²;

Disjuntor de 30A;

DPS CA Classe II, Uc=275V, Up=<1.3kV, Imax=>40kA.

Fonte: Curso Unicamp

Exercício

Dimensionar o sistema fotovoltaico para essa conta:

DESCRIÇÃO	QUANTIDADE	PREÇO	VALOR (R\$)
Consumo Ativo(kWh)-TUSD	405,00	0,51397283	208,15
Consumo Ativo(kWh)-TE	405,00	0,34053887	137,91
Acréscimo Bandeira VERMELHA			19,98
Contrib. Ilum. Pública Municipal			37,04
Seguro Proteção Familiar - 0800-200-9032			3,82
Compensação DMIC 10/20			1,47
TOTAL DA FATURA			405,43
INFORMAÇÕES DE TRIBUTOS			
ICMS		PIS	
BASE DE CÁLCULO	%	VALOR DO IMPOSTO	%
366,04	27,00	98,83	1,35
COFINS		VALOR DO IMPOSTO	
BASE DE CÁLCULO	%	VALOR DO IMPOSTO	%
267,20	3,60	8,23	16,84

Tarifas Aplicadas		HISTÓRICO DO CONSUMO	
Consumo Ativo(kWh)-TUSD	0,34676900	DEZ 20	405
Consumo Ativo(kWh)-TE	0,22976900	NOV 20	420
		OUT 20	260
		SET 20	170
		AGO 20	137
		JUL 20	223
		JUN 20	274
		MAI 20	323
		ABR 20	339
		MAR 20	321
		FEV 20	304
		JAN 20	350
		DEZ 19	369

COMPOSIÇÃO DO CONSUMO	
RS	%
Geração de Energia	169,86 30,00
Transmissão	13,61 3,72
Distribuição (Coelba)	87,92 24,02
Encargos Setoriais	14,30 3,91
Tributos	119,07 32,52
Perdas de Energia	21,34 5,93
TOTAL	366,04 100

Casa, com inclinação de telhado de 25°, orientação norte, Cidade: Paulo Afonso – BA, 5,54kWh/m²/dia

Dimensionamento sem Conta de Energia

- Quando não se tem acesso à conta de energia, é necessário realizar um levantamento de carga.
- Esse levantamento pode ser com base nas cargas que o consumidor irá utilizar ou pode-se utilizar um analisador de energia, caso já tenha instalação no local.

Dimensionamento sem Conta de Energia

	Equipamento	Potência (W)	Quantidade	Horas de Uso	Turno de Uso	\
0	Lâmpada	15	10	5.0	Noite	
1	Geladeira	150	1	10.0	Dia e Noite	
2	Televisão	100	3	4.0	Noite	
3	Ventilador	50	3	8.0	Noite	
4	Chuveiro	4000	1	0.5	Dia	
5	Máquina de Lavar	500	1	2.0	Dia	
6	Computador	200	1	4.0	Dia e Noite	
7	Micro-ondas	1200	1	0.5	Dia	
8	Energia Total					
	Energia (Wh/dia)					
0		750.0				
1		1500.0				
2		1200.0				
3		1200.0				
4		2000.0				
5		1000.0				
6		800.0				
7		600.0				
8		9050.0				

Dimensionamento sem Conta de Energia

Energia Anual: 3303.25 kWh
Potência necessária do sistema FV: 2.68 kWp

Dimensionamento sem Conta de Energia

```
import pandas as pd

# Equipamentos utilizados, para alterar é só olhar a respectiva
# coluna
equipamentos = {
    'Equipamento': ['Lâmpada', 'Geladeira', 'Televisão',
                     'Ventilador', 'Chuveiro', 'Máquina de Lavar', 'Computador', 'Micro-ondas'],
    'Potência (W)': [15, 150, 100, 50, 4000, 500, 200, 1200],
    'Quantidade': [10, 1, 3, 3, 1, 1, 1, 1],
    'Horas de Uso': [5, 10, 4, 8, 0.5, 2, 4, 0.5],
    'Turno de Uso': ['Noite', 'Dia e Noite', 'Noite', 'Noite',
                    'Dia', 'Dia', 'Dia e Noite', 'Dia']
}

df = pd.DataFrame(equipamentos)
# Energia consumida por equipamento (Potência * Quantidade * Horas de Uso)
df['Energia (Wh/dia)'] = df['Potência (W)'] * df['Quantidade'] * df['Horas de Uso']

# Calculando a energia total
energia_total = df['Energia (Wh/dia)'].sum()
```

Dimensionamento sem Conta de Energia

```
# Calculando a energia total
energia_total = df['Energia (Wh/dia)'].sum()

# Adicionando uma linha com o total da energia consumida
df_total = pd.DataFrame({
    'Equipamento': ['Energia Total'],
    'Potência (W)': [''],
    'Quantidade': [''],
    'Horas de Uso': [''],
    'Turno de Uso': [''],
    'Energia (Wh/dia)': [energia_total]
})

# Criando e Exibindo Tabela
df = pd.concat([df, df_total], ignore_index=True)
print(df)

irradiancia_diaria = 4.5 # kWh/m²/dia
fp = 0.75 # Fator de performance (Perdas)
```

Dimensionamento sem Conta de Energia

```
# Calculando a energia anual (em Wh)
energia_anual = energia_total * 365 # Wh/ano

# Convertendo energia anual para kWh
energia_anual_kWh = energia_anual / 1000 # kWh/ano

# Calculando a potência necessária do sistema fotovoltaico
potencia_fv = (energia_anual_kWh / (irradiancia_diaria * 365)) / fp
# kWp

# O kit fotovoltaico deve ser:
print(f"Energia Anual: {energia_anual_kWh:.2f} kWh")
print(f"Potência necessária do sistema FV: {potencia_fv:.2f} kWp")
```

Dimensionamento sem Conta de Energia

```
# Fator de Simultaneidade

# Separando o consumo diurno e noturno
df['Consumo Noturno (Wh/dia)'] = df.apply(
    lambda row: row['Energia (Wh/dia)'] if row['Turno de Uso'] ==
    'Noite'
    else row['Energia (Wh/dia)'] / 2 if row['Turno de Uso'] == 'Dia
    e Noite'
    else 0, axis=1)

df['Consumo Diurno (Wh/dia)'] = df.apply(
    lambda row: row['Energia (Wh/dia)'] if row['Turno de Uso'] ==
    'Dia'
    else row['Energia (Wh/dia)'] / 2 if row['Turno de Uso'] == 'Dia
    e Noite'
    else 0, axis=1)
```

Dimensionamento sem Conta de Energia

```
# Calculando o consumo total noturno e diurno
consumo_noturno_total = df['Consumo Noturno (Wh/dia)'].sum()
consumo_diurno_total = df['Consumo Diurno (Wh/dia)'].sum()

# Calculando o percentual de consumo noturno em relação ao total
percentual_noturno = (consumo_noturno_total / energia_total) * 100
percentual_diurno = (consumo_diurno_total / energia_total) * 100

print(f"Consumo Noturno Total: {consumo_noturno_total:.2f} Wh/dia")
print(f"Consumo Diurno Total: {consumo_diurno_total:.2f} Wh/dia")
print(f"Percentual de Consumo Noturno: {percentual_noturno:.2f}%")
print(f"Percentual de Consumo Diurno: {percentual_diurno:.2f}%")
```

```
Consumo Noturno Total: 4300.00 Wh/dia  
Consumo Diurno Total: 4750.00 Wh/dia  
Percentual de Consumo Noturno: 47.51%  
Percentual de Consumo Diurno: 52.49%
```

Referências

- [1] Curso Unicamp. <https://www.cursosolarunicamp.com>
- [2] ProfJL. <https://www.profjl.com>
- [3] SILVA, J. L. de S. Analysis of Photovoltaic Systems with Emphasis on Anomaly Classification under a Supervised Approach. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2024.
- [4] SILVA, J. L. de S. Estudo e Desenvolvimento Experimental de Otimizadores de Potência para Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2020.
- [5] VILLALVA, Marcelo Gradella. Energia solar fotovoltaica: conceitos e aplicações. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012.



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso



Divisão de testes de inversores fotovoltaicos
Laboratório designado pelo INMETRO, portaria
521/2019, Programa Brasileiro de Etiquetagem



Fonte AC programável regenerativa de 30 kW – usada em testes de conexão dos inversores

Carga passiva RLC programável de 30 kW/30KVA – teste de anti-ilhamento

Fontes CC simuladoras de painéis solares - 30 kW / 480 W

Medidor de energia Zimmet de precisão

Osciloscópio com pontas ativas



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de testes de módulos fotovoltaicos Laboratório designado pelo INMETRO, portaria 521/2019, Programa Brasileiro de Etiquetagem



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de serviços técnicos

Serviços técnicos

- Dimensionamento, simulação e projeto de usinas fotovoltaicas
- Inspeção, diagnóstico e laudo técnico ou pericial de usinas fotovoltaicas, componentes e equipamentos
- Comissionamento de usinas fotovoltaicas
- Testes de módulos e inversores fotovoltaicos em laboratório e em campo
- Teste de eletroluminescência (EL) com corrente reversa em campo
- Termografia infravermelha em campo de módulos fotovoltaicos e instalações elétricas
- Testes de degradação UV, teste de degradação PID de módulos fotovoltaicos
- Outros testes e serviços sob consulta

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso





LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de serviços técnicos



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de treinamentos

O LESF-MV, através da Escola de Extensão da UNICAMP, é um dos maiores provedores brasileiros de educação e capacitação em energia solar fotovoltaica, com mais de 14000 profissionais treinados desde 2015.

Informações: www.cursosolarunicamp.com





LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de treinamentos



Fotos: curso prático de instalação e comissionamento de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de Pesquisa & Desenvolvimento



Foto: placa-mãe para prototipagem de inversores fotovoltaicos

Principais linhas de investigação:

- Desenvolvimento de hardware
- Sistemas de controle
- Inversores grid-tie e híbridos
- Otimizadores de potência
- Filtros ativos de potência



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALBA
UNICAMP

Divisão de Pesquisa & Desenvolvimento

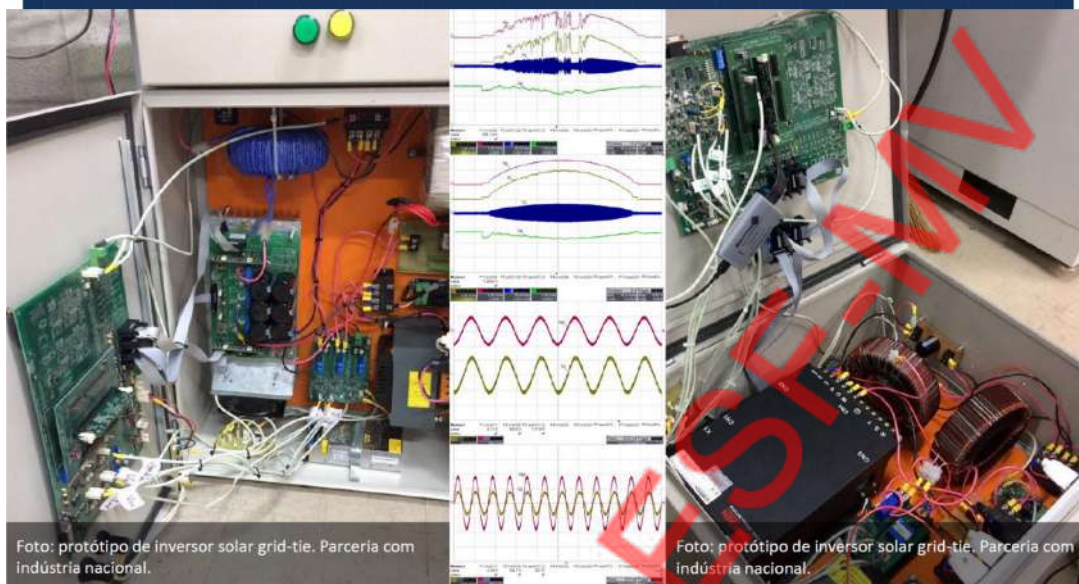


Foto: protótipo de inversor solar grid-tie. Parceria com indústria nacional.

Foto: protótipo de inversor solar grid-tie. Parceria com indústria nacional.



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALBA
UNICAMP

Divisão de Pesquisa & Desenvolvimento



Foto: módulos de hardware de um inversor solar híbrido em desenvolvimento

Foto: Bancada de testes de inversores eletrônicos

Foto: protótipos de otimizadores de potência para módulos fotovoltaicos

Foto: projeto em CAD de placa de aquisição de dados para medições elétricas



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de Pesquisa & Desenvolvimento



LESF-MV
LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA - MARCELO VILLALVA
UNICAMP

Divisão de Pesquisa & Desenvolvimento



Curso Prático: Instalação e Integração de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede

109



Montagem mecânica dos módulos, instalação elétrica passo a passo, construção da *stringbox*, instalação e configuração do inversor, testes de funcionamento e comissionamento do sistema, uso do sistema de monitoramento – Mostramos a implantação de um sistema fotovoltaico do início ao fim, nos mínimos detalhes – Todos os alunos participam e executam a instalação – Instrutores são engenheiros

110



Curso avançado: Dimensionamento de sistemas e cálculo da energia produzida com apoio do software

Curso Avançado – Projeto e Dimensionamento de Usinas Solares e Sistemas

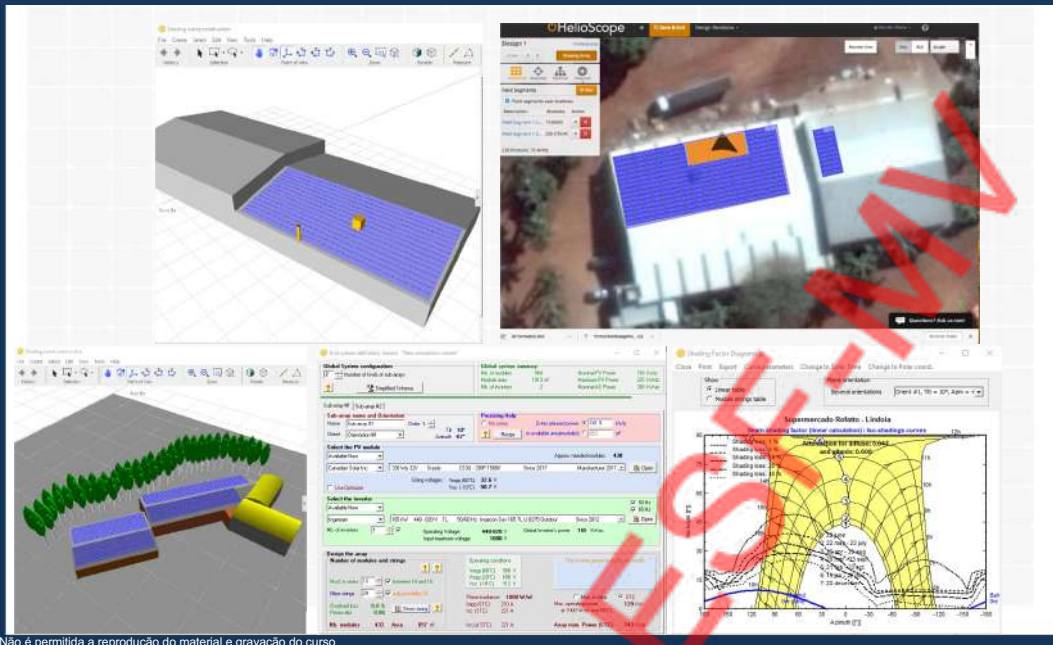
Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso

Curso avançado: Dimensionamento de sistemas e cálculo da energia produzida com apoio do software

Curso Avançado – Projeto e Dimensionamento de Usinas Solares e Sistemas

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso

Curso avançado: Dimensionamento de sistemas e cálculo da energia produzida com apoio do software



Meu Obrigado!



Mais informações:
www.lesfmv.com
www.cursosolarunicamp.com