

Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica



KSA
ENERGIA SOLAR

PROFESSOR: KLEBER SANTANA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Módulo III

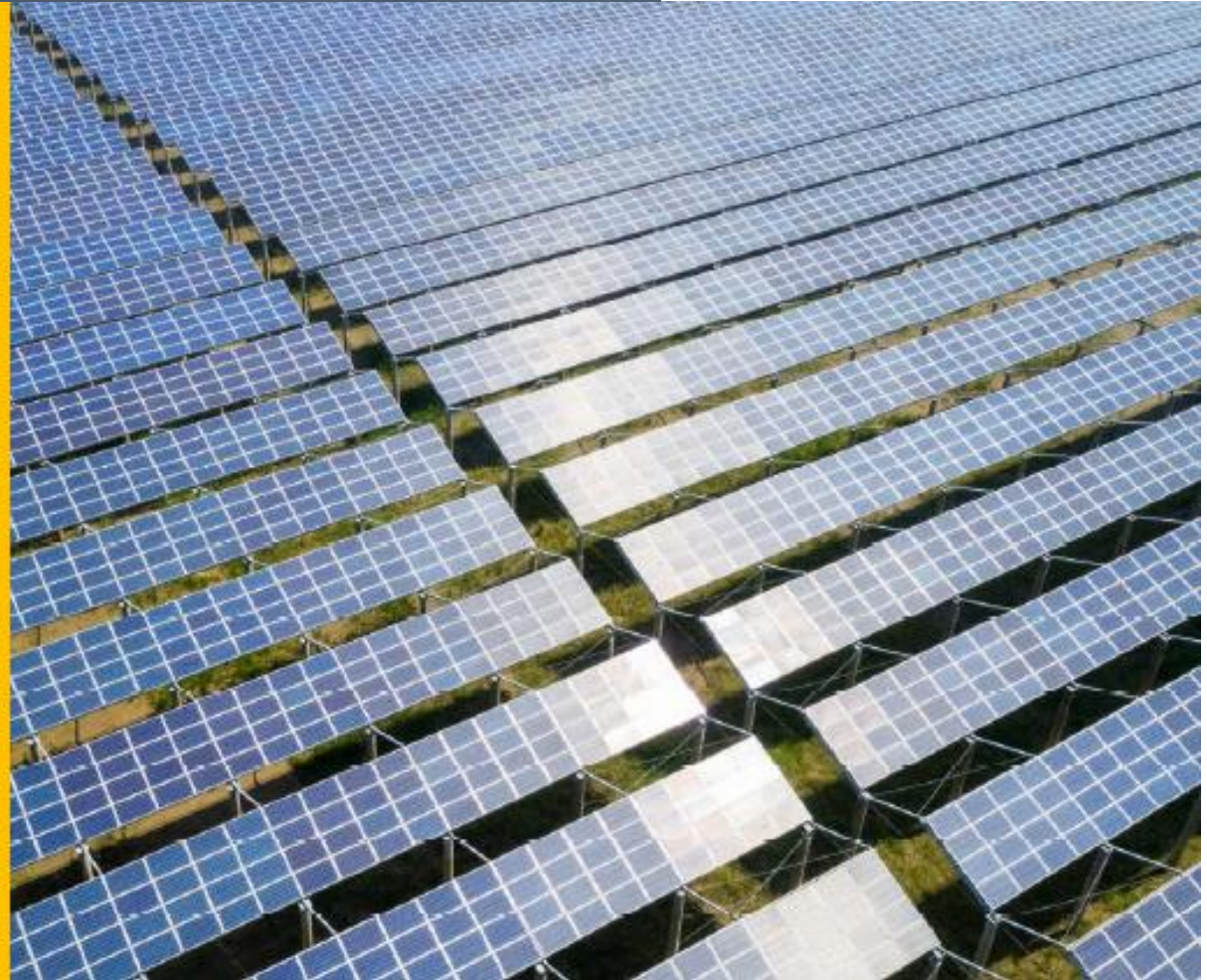
Sistemas fotovoltaicos
conectados à rede
elétrica





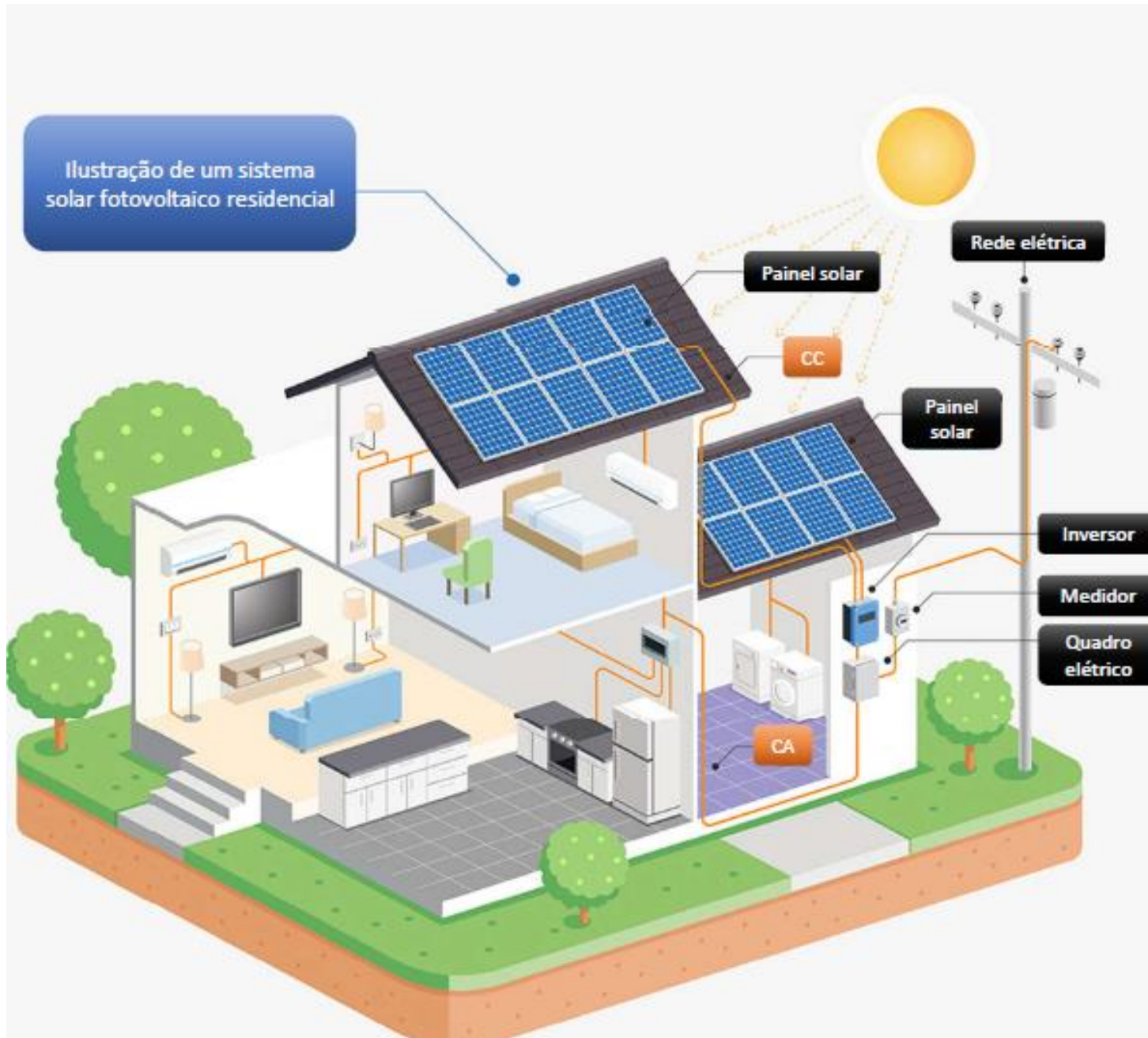
Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Conceitos
básicos



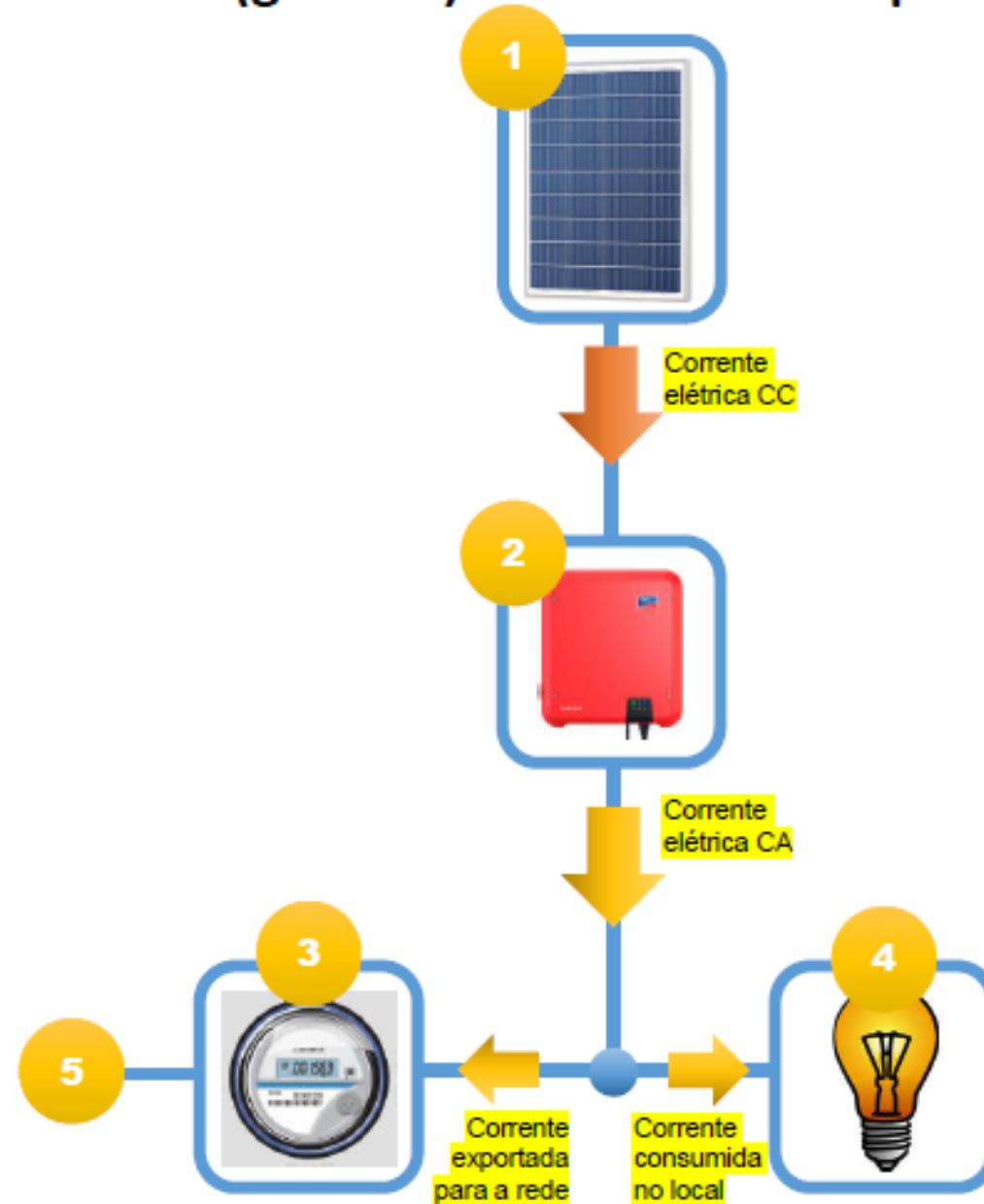


Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (grid-tie)





Sistema conectado à rede (grid-tie) - conceito de exportação de energia





Medidor bidirecional

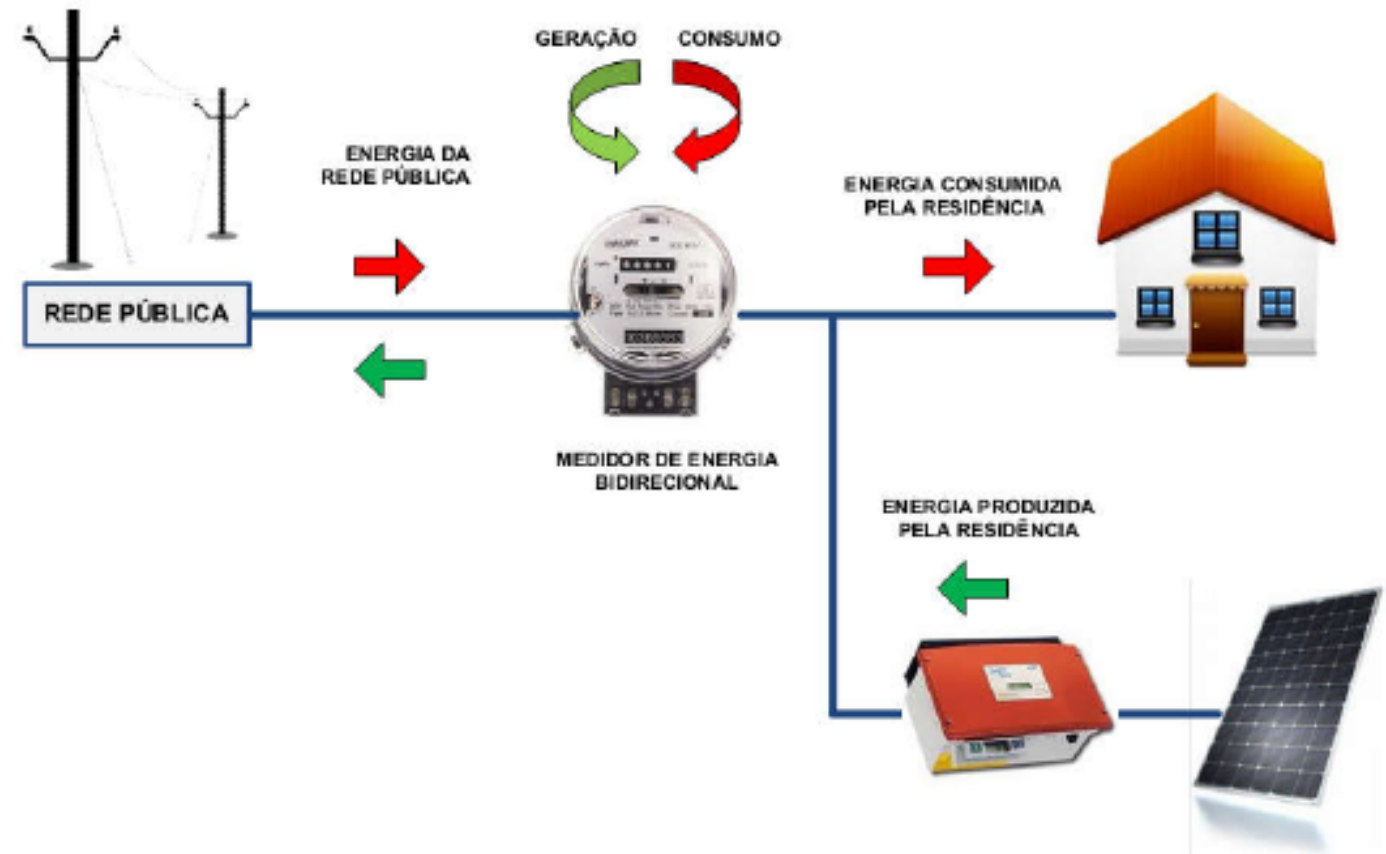
Registra o fluxo bidirecional de energia (consumida e exportada pela residência)





Sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (grid-tie): resumo

- Consumidores são alimentados **simultaneamente** pela rede elétrica e pelo sistema fotovoltaico
- O **excedente** de energia é exportado para a rede gerando créditos de energia
- Não há armazenamento (baterias), a energia gerada é consumida instantaneamente
- Fisicamente as usinas solares funcionam também como sistemas *grid-tie*. **O que muda é a escala**. O princípio de funcionamento é o mesmo





Resolução Normativa 482 da ANEEL

- A **ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica)** publicou em 2012 a resolução No. 482, responsável pela criação da modalidade de geração distribuída (GD) de energia elétrica.
- A **resolução No. 482** foi um marco da geração de energia no Brasil, permitindo que pessoas comuns e empresas possam produzir sua própria energia elétrica.
- A **resolução No. 687**, publicada em 2015, alterou alguns itens da resolução anterior e ampliou para 5 MW o limite de potência das usinas enquadradas dentro da geração distribuída (GD).
- A **resolução No. 482** encontra-se atualmente em processo de revisão com participação efetiva dos profissionais do setor e de toda a sociedade.





Resolução ANEEL No. 482: GD e compensação de créditos

- Microgeração (sistemas com potência até 75 kW);
- Minigeração (sistemas com potências entre 75 kW a 5.000 kW);
- Sistema de compensação de energia
 - A energia ativa injetada na rede é cedida como empréstimo à distribuidora para posteriormente ser compensada com o consumo;
- Validade dos créditos: 60 meses;
- Cobrança das bandeiras tarifárias sobre o consumo líquido de energia elétrica ativa.
- Uma unidade consumidora (UC) como micro ou minigeração pode ceder créditos de energia a outras UCs desde que situadas em na mesma área de concessão nas seguintes modalidades:
 - Autoconsumo remoto (UCs com mesma titularidade, mesmo CPF ou mesmo CNPJ);
 - Geração compartilhada (Cooperativa ou consórcio);
 - Empreendimento com várias unidades consumidoras (Condomínio).
- Os custos de adequação com a medição ficam a cargo da concessionária no caso de microgeração, e a cargo do acessante no caso de minigeração;
- Participação do sistema de compensação de energia é concedido somente aos consumidores cativos, excluindo-se os consumidores livres.



Impostos sobre a energia

A energia gerada e consumida instantaneamente na UC geradora não é tributada.

CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015 – Conselho Nacional de Política Fazendária

Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL

CONVÊNIO ICMS 16, DE 22 DE ABRIL DE 2015

Publicado no DOU de 27.04.15, pelo Despacho [79/15](#).
Ratificação nacional no DOU de 14.05.15, pelo Ato Declaratório [10/15](#).
Vide Ajuste SINIEF [2/15](#), que dispõe sobre os procedimentos fiscais.
Adesão do RN, a partir de 23.06.15, pelo Conv. ICMS [44/15](#).
Adesão de CE e TO, a partir de 21.07.15, pelo Conv. ICMS [52/15](#).
Adesão da BA, MA, MT e DF, a partir de 26.11.15, pelo Conv. ICMS [130/15](#).
Alterado pelos Convs. ICMS [130/15](#), [59/16](#), [75/16](#), [18/18](#).
Adesão de AC, AL, MG, RJ e RS, a partir de 30.12.15, pelo Conv. ICMS [157/15](#).
Adesão de RR, a partir de 24.05.16, pelo Conv. ICMS [39/16](#).
Adesão de PA, a partir de 13.09.16, pelo Conv. ICMS [81/16](#).
Adesão de MS, a partir de 10.11.16, pelo Conv. ICMS [113/16](#).
Adesão do AP, a partir de 03.05.17, pelo Conv. ICMS [39/17](#).
Adesão do ES, a partir de 05.01.18, pelo Conv. ICMS [215/17](#).
Adesão do AM, PR e SC, a partir de 01.07.18, pelo Conv. ICMS [42/18](#).

Autoriza a conceder isenção nas operações internas relativas à circulação de energia elétrica, sujeitas a faturamento sob o Sistema de Compensação de Energia Elétrica de que trata a Resolução Normativa nº 482, de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL.

O Conselho Nacional de Política Fazendária - CONFAZ, na sua 238ª reunião extraordinária, realizada em Brasília, DF, no dia 22 de abril de 2015, tendo em vista o disposto na Lei Complementar nº 24, de 7 de janeiro de 1975 e na Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, resolve celebrar o seguinte

CONVÊNIO

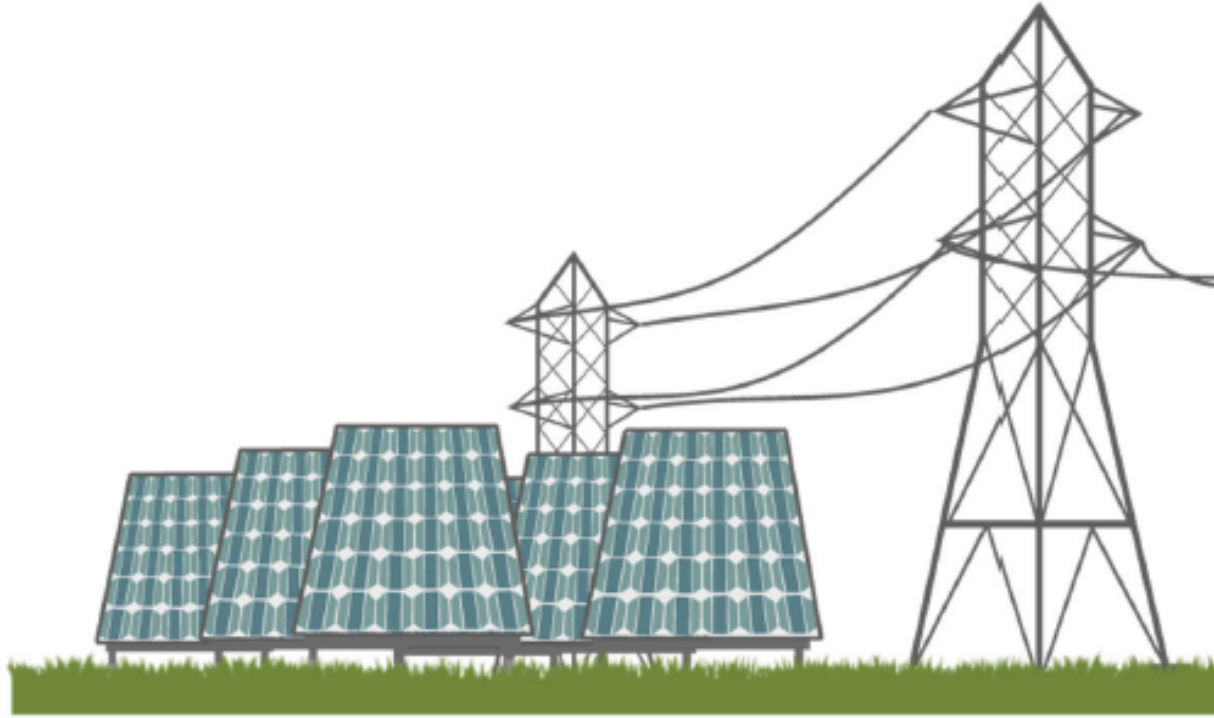
Nova redação dada ao caput da cláusula primeira pelo Conv. ICMS 42/18, efetos a partir de 01.07.18.

Cláusula primeira Ficam os Estados do Acre, Alagoas, Amapá, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Pará, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Rondônia, Roraima, Santa Catarina, São Paulo, Sergipe, Tocantins e o Distrito Federal autorizados a conceder isenção do ICMS incidente sobre a energia elétrica fornecida pela distribuidora à unidade consumidora, na quantidade correspondente à soma da energia elétrica injetada na rede de distribuição pela mesma unidade consumidora



Impostos sobre a energia injetada na rede pública

- **CONVÊNIO ICMS 16, de 22/04/2015 – Conselho Nacional de Política Fazendária**
 - Adesão de todos os estados da União;
 - Isenção de ICMS da energia injetada para sistemas com potência de até 1 MW;
 - Isenção para Auto Consumo Local e Auto Consumo Remoto (mesma titularidade);
 - Geração Compartilhada (cooperativas e consórcios) e EMUCs (condomínios) não possuem isenção;
 - não se aplica ao custo de disponibilidade, à energia reativa, à demanda de potência, aos encargos de conexão ou uso do sistema de distribuição, e a quaisquer outros valores cobrados pela distribuidora.
- **ESTADO DE MG LEI 22.549/2017**
 - Isenção de ICMS de Micro e mini geradores de energia solar fotovoltaica de até 5MW;
 - Estende a isenção de ICMS da Geração Compartilhada (cooperativas e consórcios) e EMUCs (condomínios) para geradores fotovoltaicos;
- **LEI nº 13.169/2015, de 6/10/2015**
 - Isenção de PIS/Cofins da energia injetada em nível federal;
 - Não se aplica para a Geração Compartilhada (cooperativas e consórcios) e para EMUCs (condomínios).



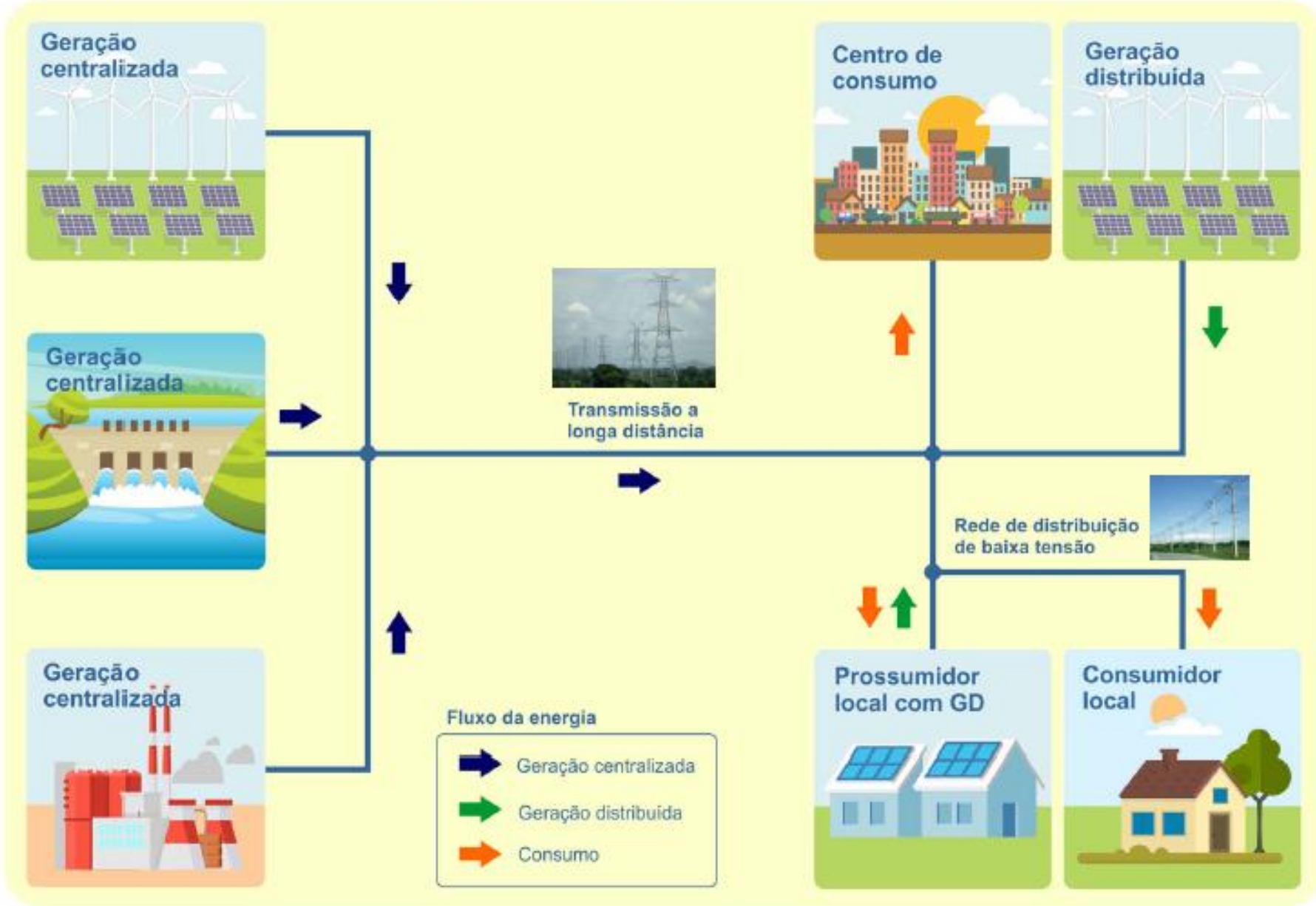
Usinas solares de geração centralizada conceitualmente são também sistemas conectados à rede, pois toda a energia produzida é injetada no sistema elétrico nacional.

Entretanto, quando falamos de **sistemas fotovoltaicos conectados à rede**, em geral estamos nos referindo a sistemas enquadrados como **geradores distribuídos (GD)**.

Legalmente os sistemas de GD podem ser de **microgeração (até 75 kW)** ou de **minigeração (acima de 75 kW e até 5 MW)**.



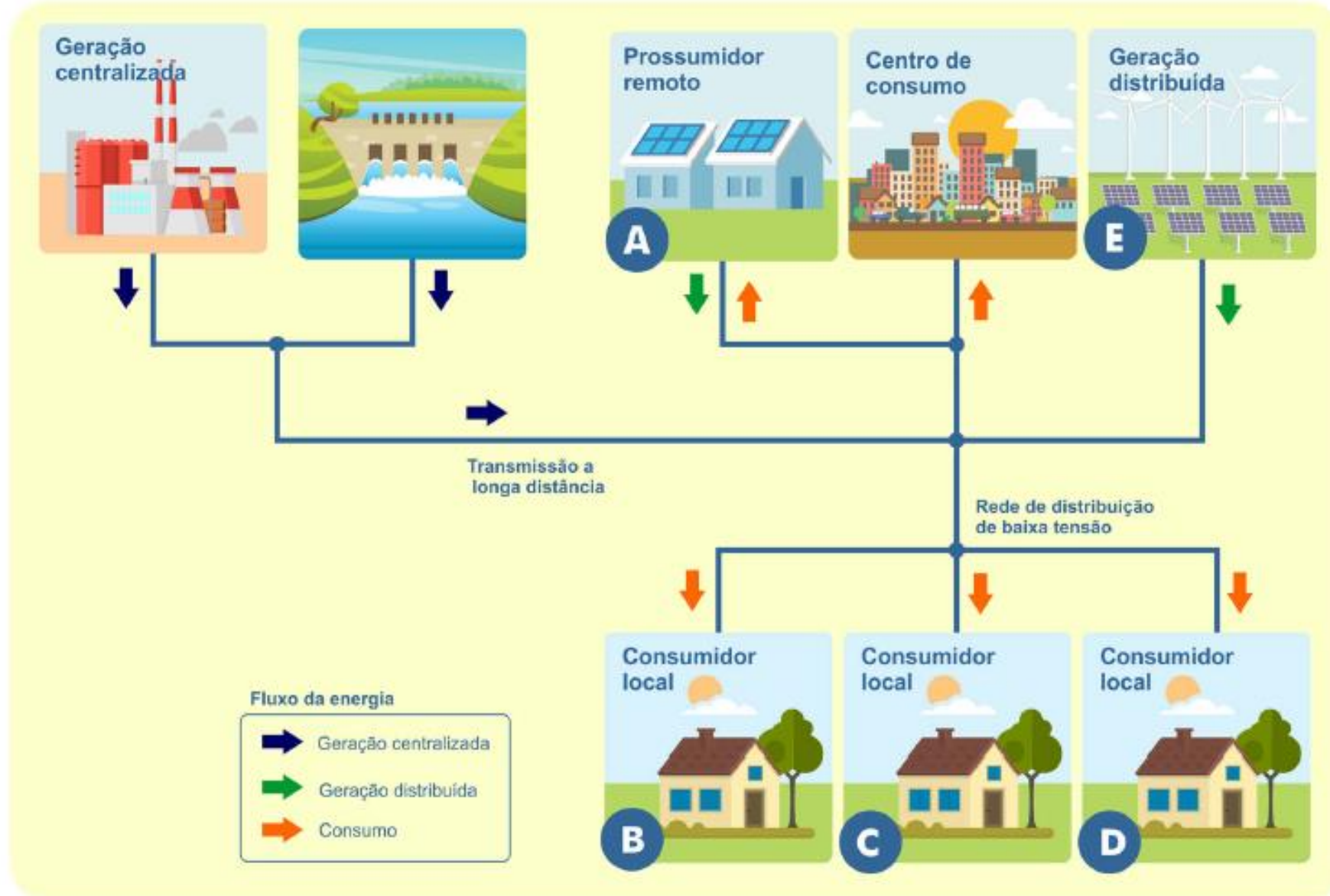
Geração centralizada (GC) x geração distribuída (GD)



Crédito da imagem:
Energia Solar Fotovoltaica –
Conceitos e Aplicações
Ed. Érica-Saraiva



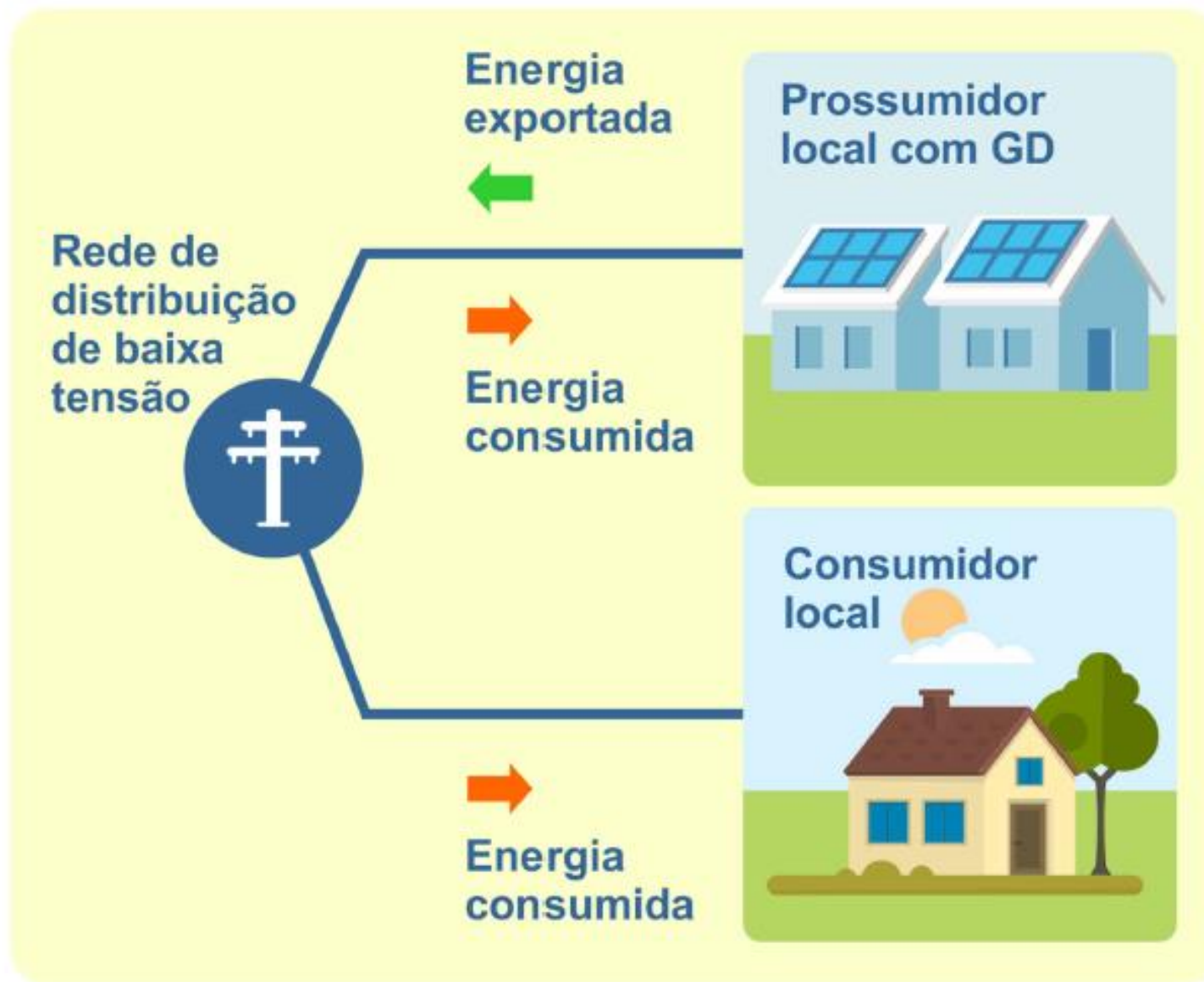
Auto-consumo remoto e geração compartilhada (modalidades da GD)



Crédito da imagem:
Energia Solar Fotovoltaica –
Conceitos e Aplicações
Ed. Érica-Saraiva



Prossumidor: produtor + consumidor (conceito criado na GD)





Fazendas solares

- São usinas solares de **geração distribuída (GD)**, cuja potência não pode exceder 5 MW
- Diferem das usinas solares de **geração centralizada** pelo tamanho (principalmente) e pelo fato de injetarem sua energia na modalidade de **geração distribuída**
- Estão amparadas nas resoluções No. 482 e No. 687 da ANEEL
- Aluguel de usinas solares





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Componentes
dos sistemas
conectados à
rede elétrica





Sistemas grid-tie ou on-grid: principais componentes (revisão do módulo I)



Módulos ou painéis fotovoltaicos:
Convertem a energia da luz em eletricidade



Inversor CC-CA:
Converte a energia de corrente contínua para alternada



String-box:
Quadro elétrico que conecta os módulos fotovoltaicos ao inversor



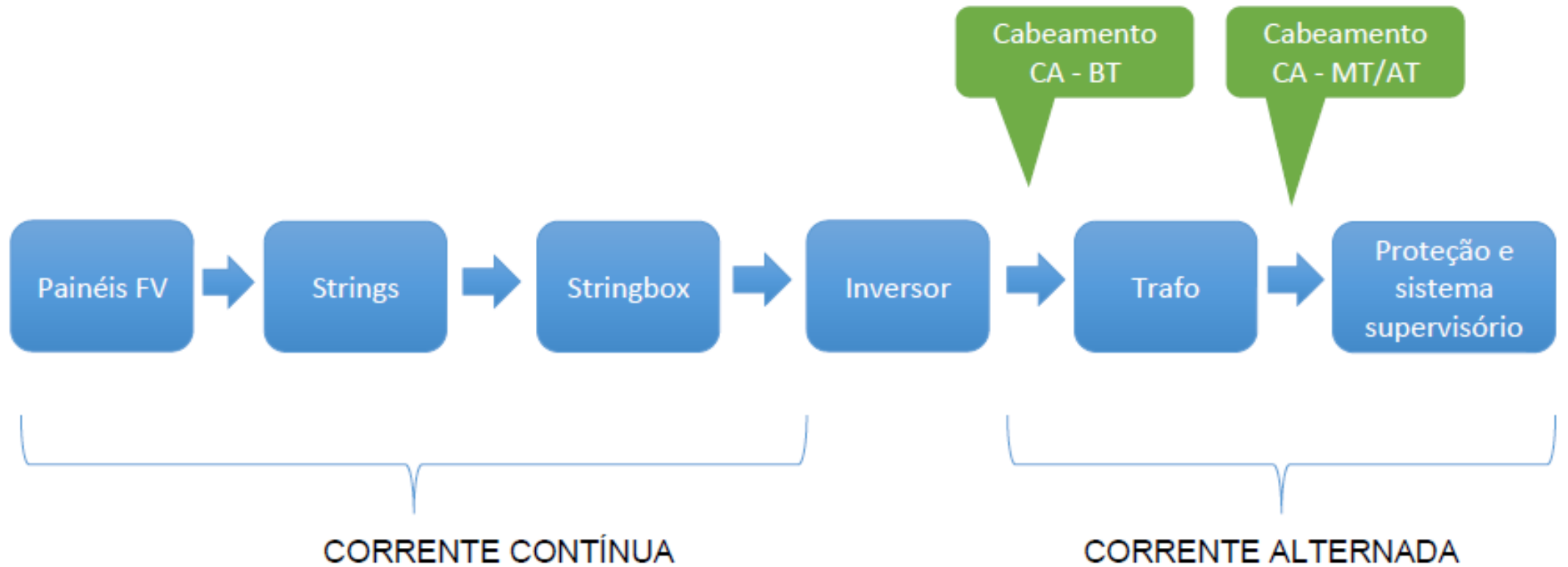
Cabos e conectores:
Conectam os módulos fotovoltaicos à string-box e ao inversor.



Sistemas de fixação: Usados para fixar os módulos fotovoltaicos ao telhado ou ao solo. Um tipo de sistema deve ser usado para cada tipo de telhado ou superfície (laje, solo), conforme a necessidade.

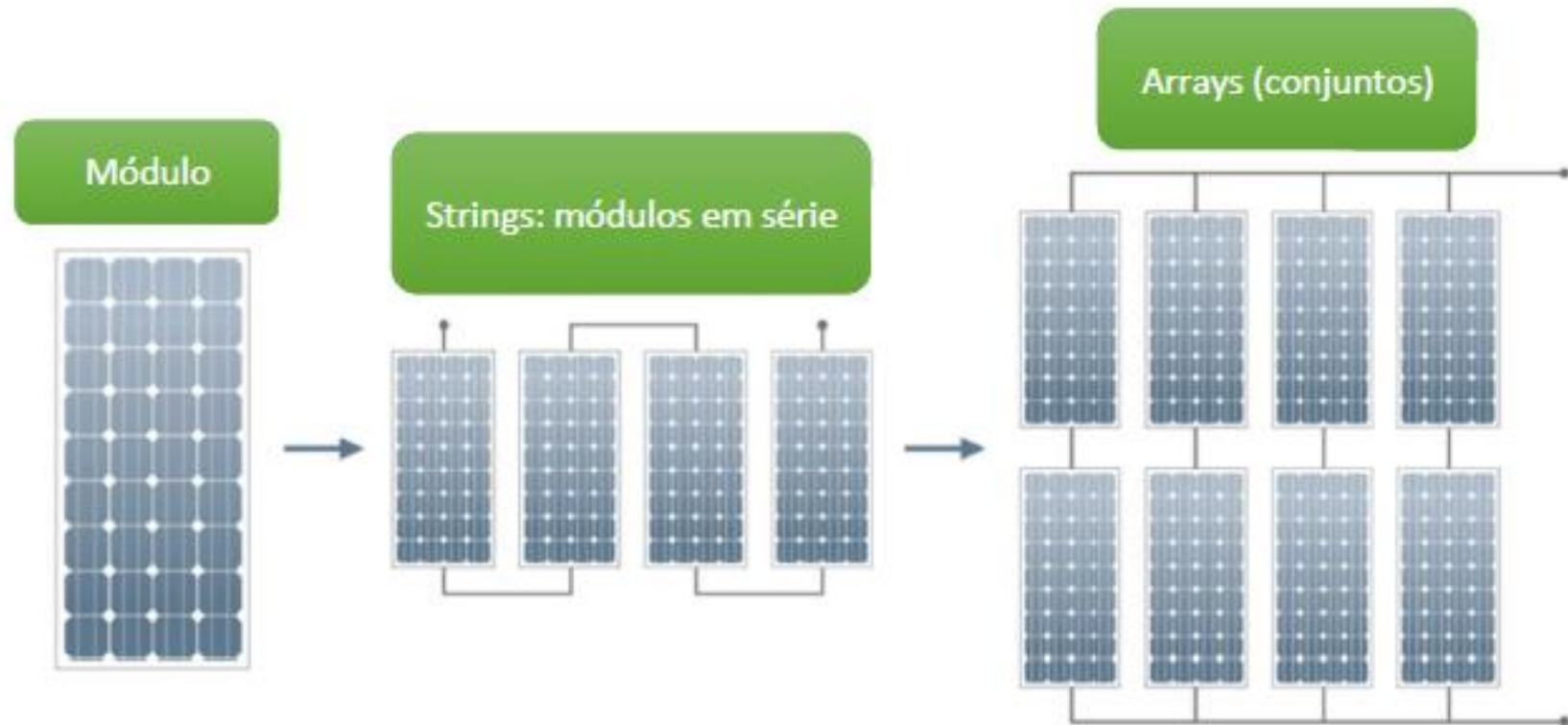


Componentes de uma usina solar fotovoltaica



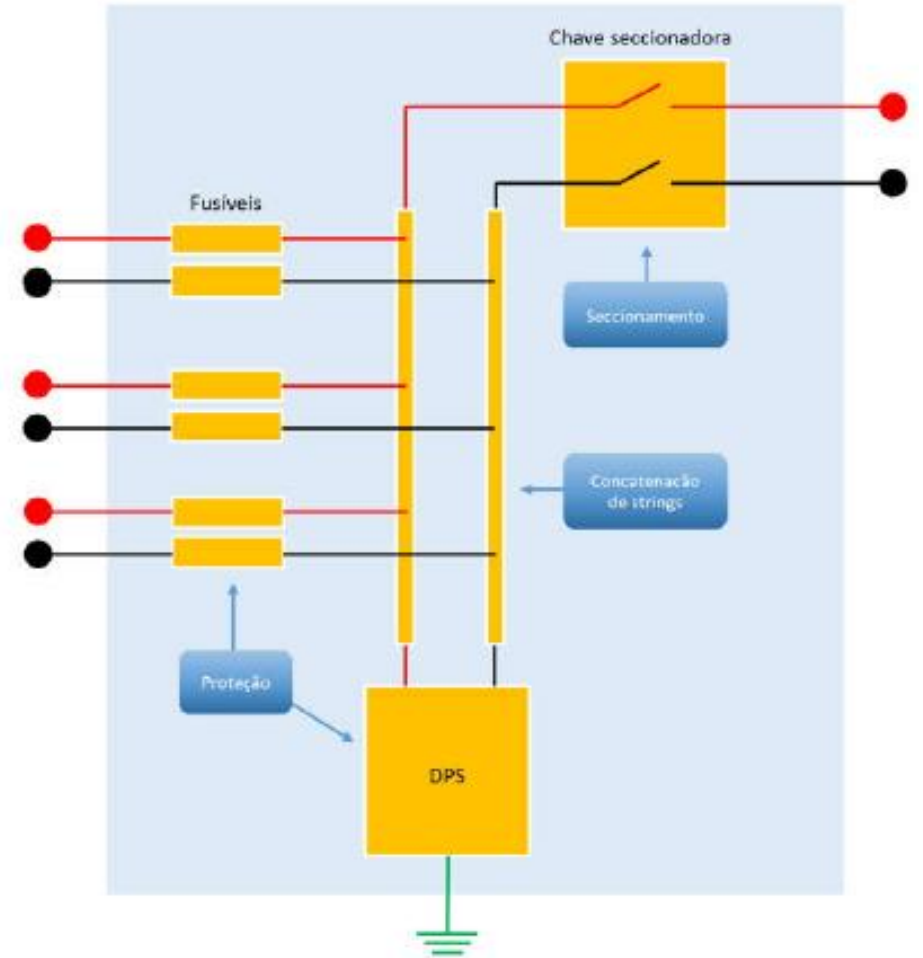


Strings e arrays (conjuntos) de módulos fotovoltaicos (revisão do módulo I)





Porta-fusíveis e fusíveis do tipo gPV (específicos para sistemas fotovoltaicos)





String-box

- String-box para 1500 V (usinas)



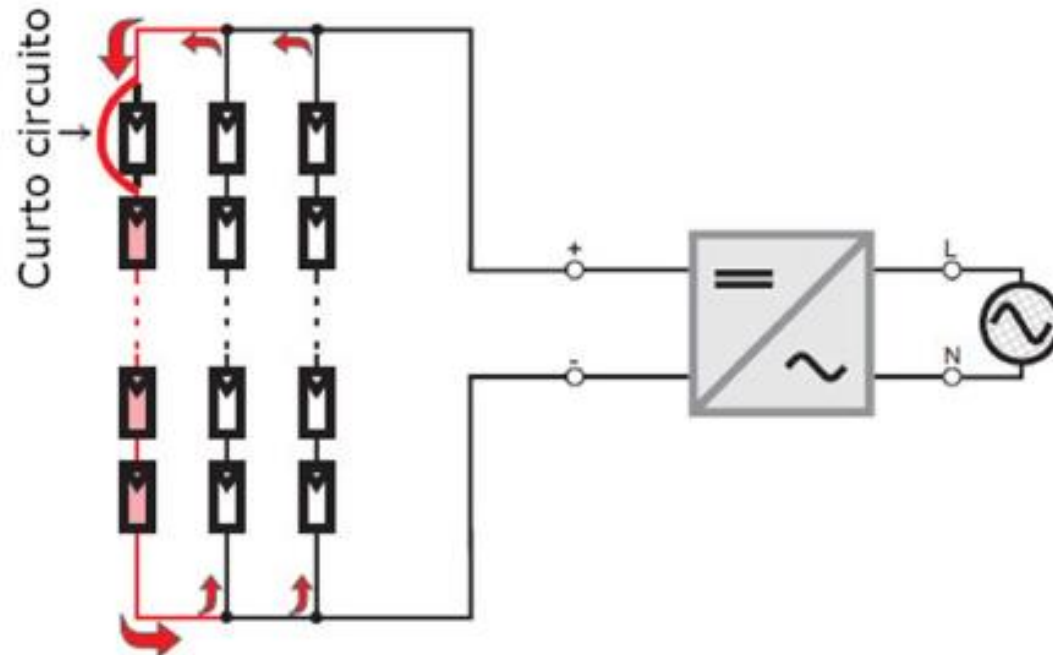
- String-box para até 1000 V (microgeração)





Proteção contra sobrecorrente CC – Corrente reversa

- A proteção contra sobrecorrente num sistema FV tem como objetivo impedir o fluxo de corrente reversa.
- A corrente reversa surge quando há uma diferença da tensão (V_{oc}) entre as séries de um sub-arranjo em paralelo.
- A string com menor tensão se comporta como uma carga do sistema.
- A proteção contra sobrecorrente é obrigatória quando há mais de 2 strings paralelizadas e quando a corrente I_{sc} das séries de módulos em paralelo é maior do que a máxima corrente reversa admitida pela série afetada.



Causas e efeitos da
corrente reversa nos
módulos fotovoltaicos



DPS – dispositivo de proteção de surto

DPS CC para sistema fotovoltaico:

Janela de sinalização de estado

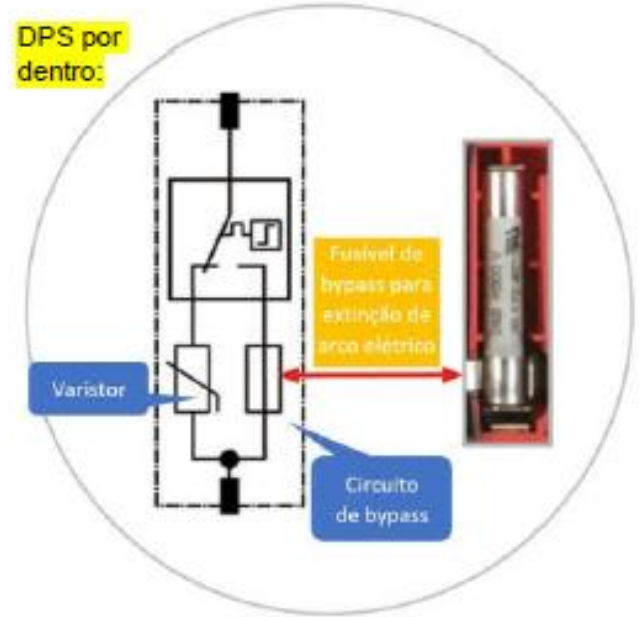


Módulo com varistor removível

DPS por dentro:



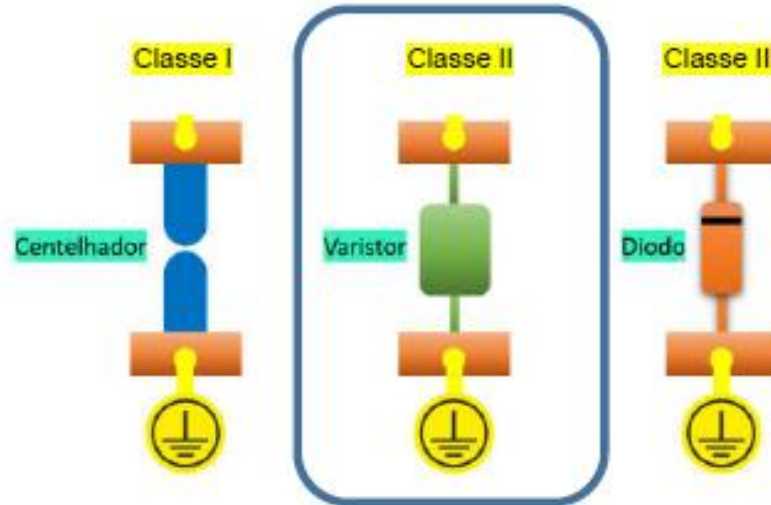
DPS por dentro:



Tipos de DPS:

O DPS com varistor (classe II) é o tipo empregado na string-box.

Oferece um nível de proteção médio e é adequado para uso em instalações elétricas internas, em locais de baixa exposição a surtos.





Exemplo de *stringbox* de usina solar com monitoramento por *string*



DPS para
corrente
contínua



Chave
seccionadora
para corrente
contínua



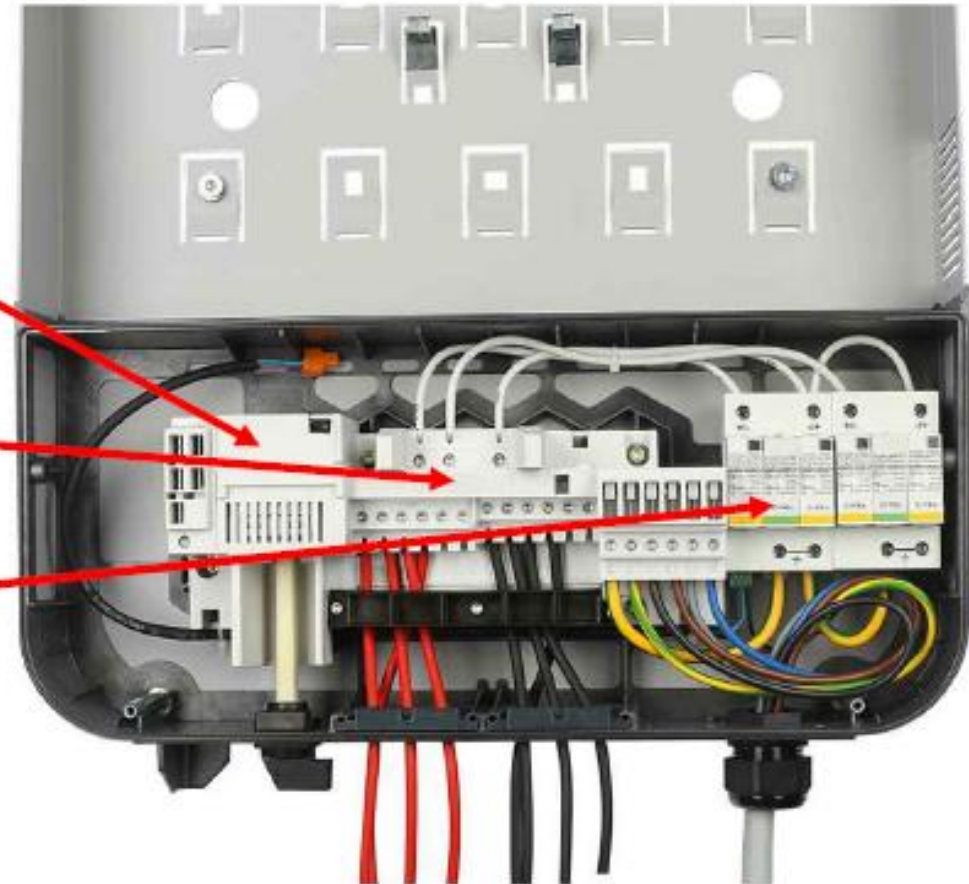
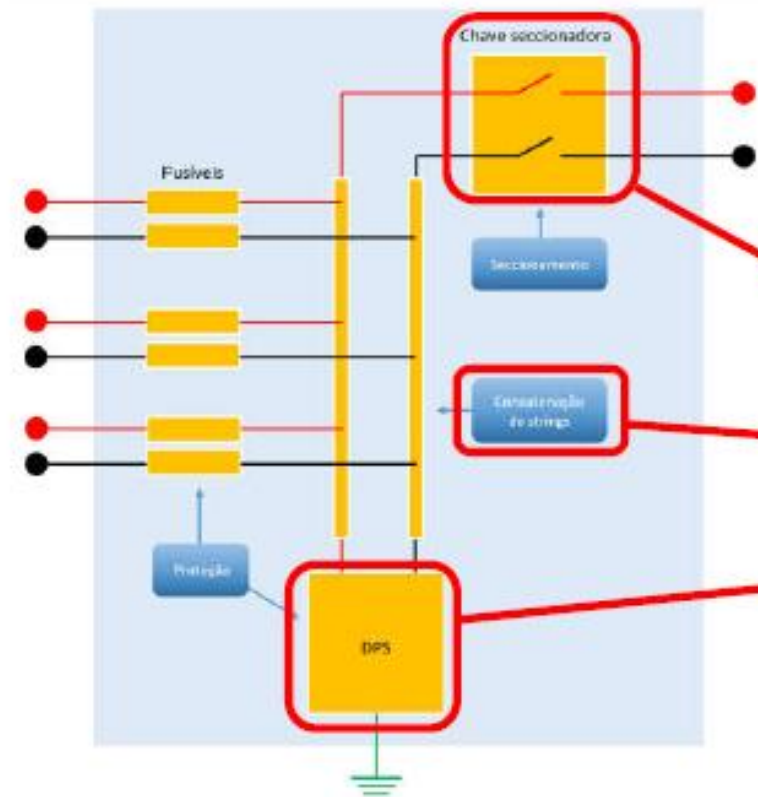
Chave seccionadora
para corrente
contínua

Fusíveis
necessários a
partir de 3
strings em
paralelo

Terminais de
saída positivo e
negativo

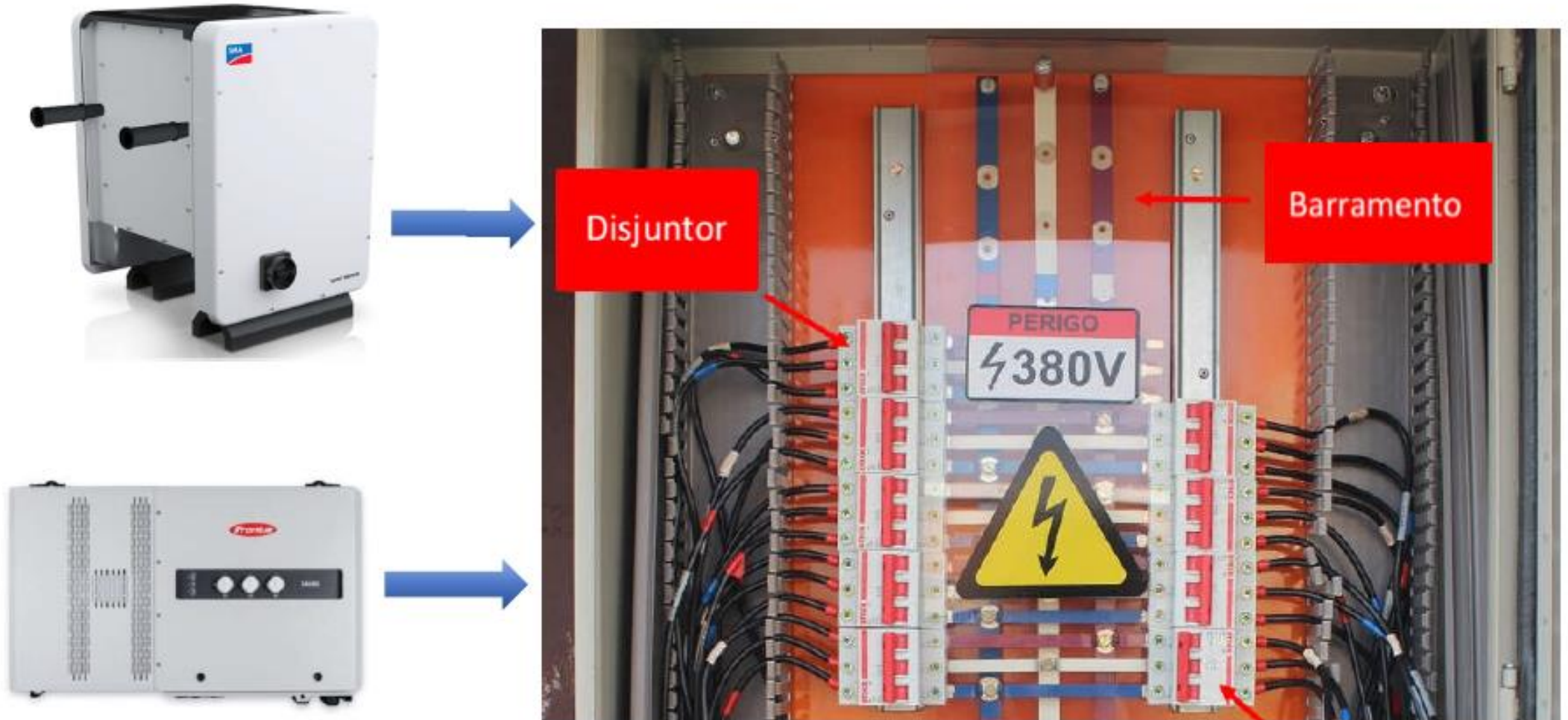


String-box integrada ao inversor





Quadro de conexão CA: recebe a saída CA de um ou mais inversores





Quadro de conexão CA – corrente alternada

Exemplo de quadro CA com vários inversores trifásicos conectados ao barramento por meio de disjuntores tripolares:

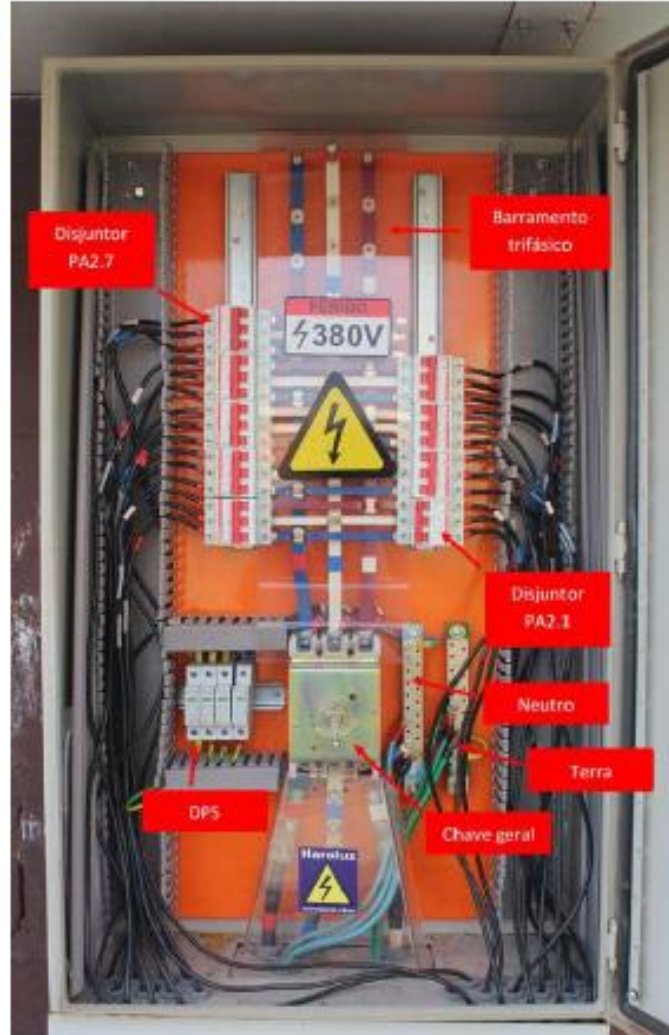
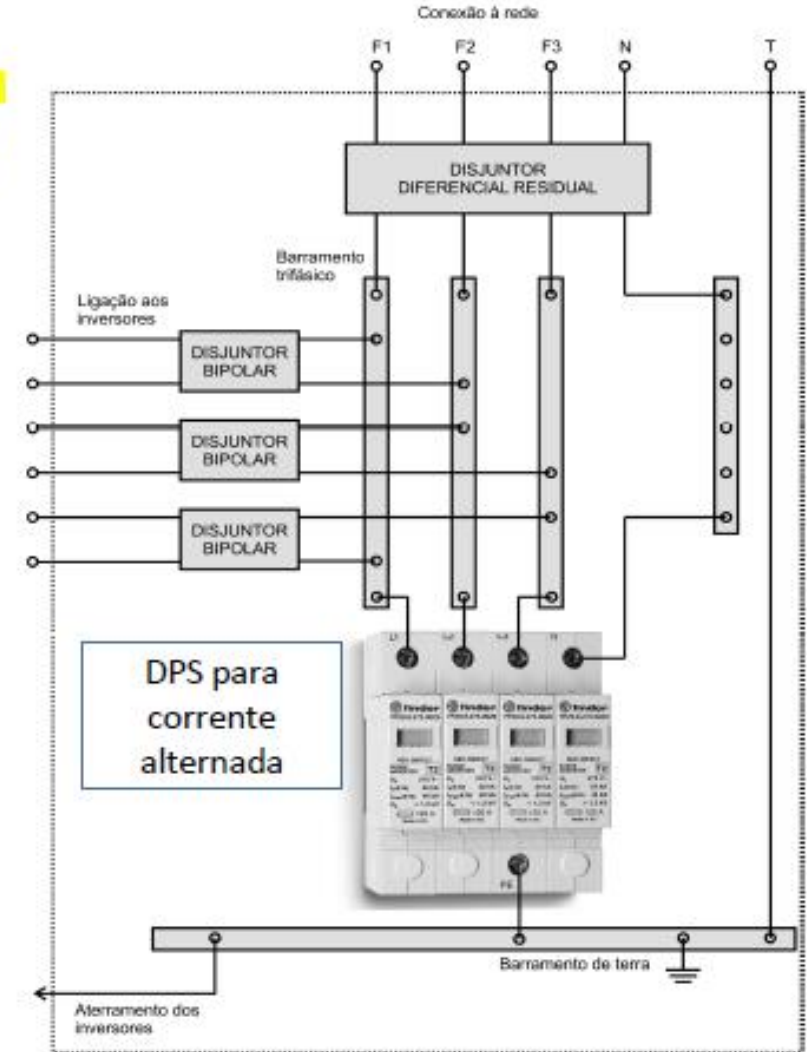
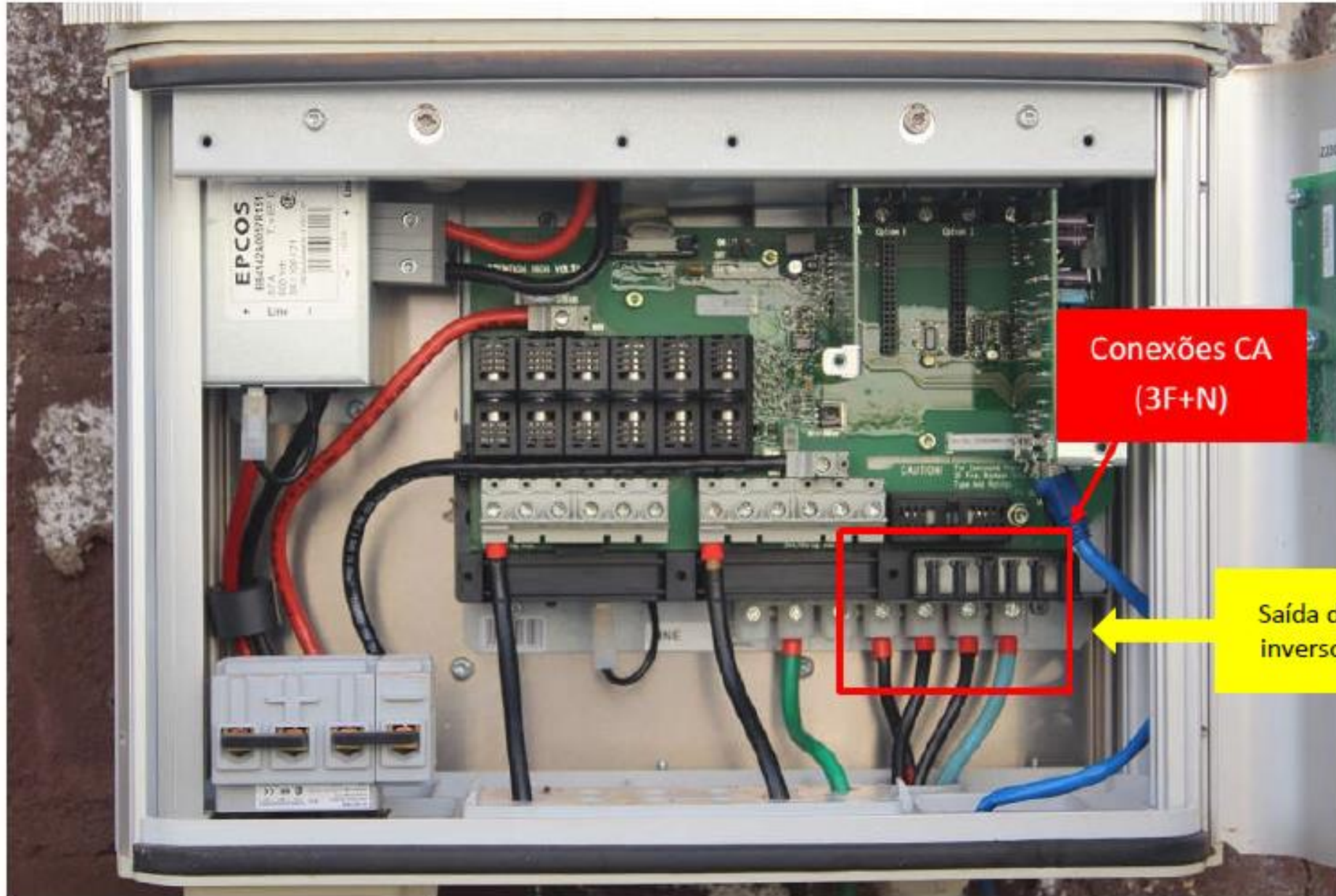


Diagrama elétrico multifilar de um quadro CA com inversores monofásicos conectados por meio de disjuntores bipolares:





Caixa de conexões elétricas do inversor Fronius.



Eletrocentro

Inversor + Trafo + Proteção em um container
Potências tipicamente de 1 MVA a 3 MVA
Utilizados principalmente em usinas de grande porte





Skid (inversor + Trafo)

- Exemplo: Skid Ingeteam – Usina de Guaimbé/SP
- Usado em usinas com arquitetura descentralizada





Cabo solar para os circuitos de corrente contínua



- Adequado para trabalhar com tensões de até 1500 VCC
- Possui dupla isolação
- Possui revestimento emborrachado para proteção UV (ultravioleta)
- Condutores são estanhados para maior resistência à corrosão
- Cabo de longa durabilidade, obrigatório nas instalações fotovoltaicas de qualquer tamanho



Especificações dos conectores: padrão MC4, IP68

Fabricantes recomendados:

- Stäubli-MultiContact
- Weidmüller
- Amphenol
- Tyco



Recuse conectores genéricos e tenha muito cuidado na montagem





Conectores padrão MC4

Conector MC4 fêmea (positivo +)



Conector MC4 macho (negativo -)





Conectores padrão MC4: ferramentas de montagem



”

Seção 6.2.8.10 - É vedada a aplicação de solda a estanho na terminação de condutores, para conectá-los a bornes ou terminais de dispositivos ou equipamentos elétricos.

NOTA - É aconselhável evitar o uso de conexões soldadas em circuitos de energia. Se tais conexões forem utilizadas, elas devem ter resistência à fluência e a solicitações mecânicas compatível com a aplicação. (NBR 5410:2004)

Conectores padrão MC4: ferramentas de montagem



canalsolar.com.br



Crauação

(IL 11)
Abra o grampo (K) e segure-o. Coloque o contacto na gama de secção adequada. Vire os grampos de cravar para cima. Solte o grampo (K). O contacto está fixado.



(IL 12)
Pressione os alicates suavemente até os grampos de cravar ficarem bem posicionados no curvo de cravar.



(IL 13)
Introduza a ponta do cabo descaando até o isolamento se aproximar do encosto do cravar. Feche totalmente os alicates de cravar.



(IL 14)
Verifique visualmente a crauação.

Nota:
Para mais informações sobre a utilização do alicates de cravar, veja M4251 (www.multi-contact.com)



Teste de montagem

(IL 15)
Introduza o contacto crauado no isolamento do acoplamento macho ou do acoplamento fêmea até ficar encaixado no lugar. Retire suavemente o cabo para verificar se a ponta de metal está presa correctamente.

Crimping

(IL 11)
Open the clamp (K) and hold. Place the contact in the appropriate cross section range. Turn the crimp lugs upwards. Release the clamp (K). The contact is fixed.

(IL 12)
Press the pliers gently together until the crimp lugs are properly located within the crimping die.

(IL 13)
Insert the stripped cable end until the insulation comes up against the crimp insert. Completely close the crimping pliers.

(IL 14)
Visually check the crimp.

Nota:
For directions on the operation of the crimping tool, please see operating instructions M4251 at www.multi-contact.com

Assembly check

(IL 15)
Insert the crimped-on contact into the insulator of the male or female coupler until it clicks into place. Put gently on the lead to check that the metal part is correctly engaged.





A (in)compatibilidade dos conectores MC4 genéricos



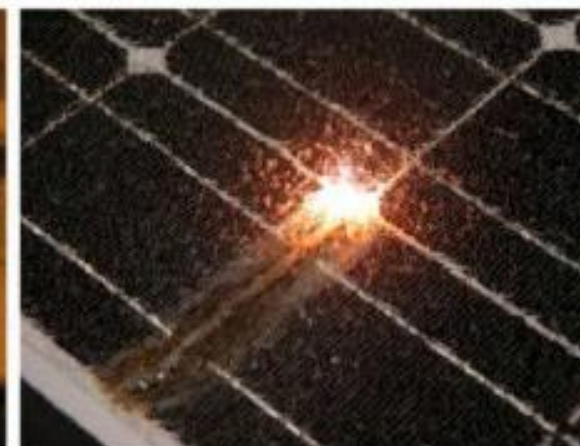


A qualidade das conexões e o problema do arco elétrico



			<p>Força de arrancamento: 454N</p> <p>Resistência à ingestão de água</p> <p>Durabilidade a longo prazo</p>
---	---	---	---

			<p>Força de arrancamento: 94N</p> <p>Ingestão de água</p> <p>Corrosão, alta resistência de contato, risco de choque e incêndio</p>
---	---	---	---





Componentes: sistemas e estruturas de fixação

- Especificações: materiais empregados



Aço galvanizado: melhor custo-benefício. Usado em grandes usinas.



Alumínio: longa durabilidade. Maior custo. Usado em sistemas de GD, especialmente em telhados.



Aço com pintura eletroforética (KTL): bom custo-benefício e longa durabilidade.



Parafusos e porcas de aço zincado (convencionais): baixa durabilidade.



Parafusos, porcas e arruelas com revestimento de GEOMET: maior custo e longa durabilidade.



Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Inversores,
microinversores
e otimizadores





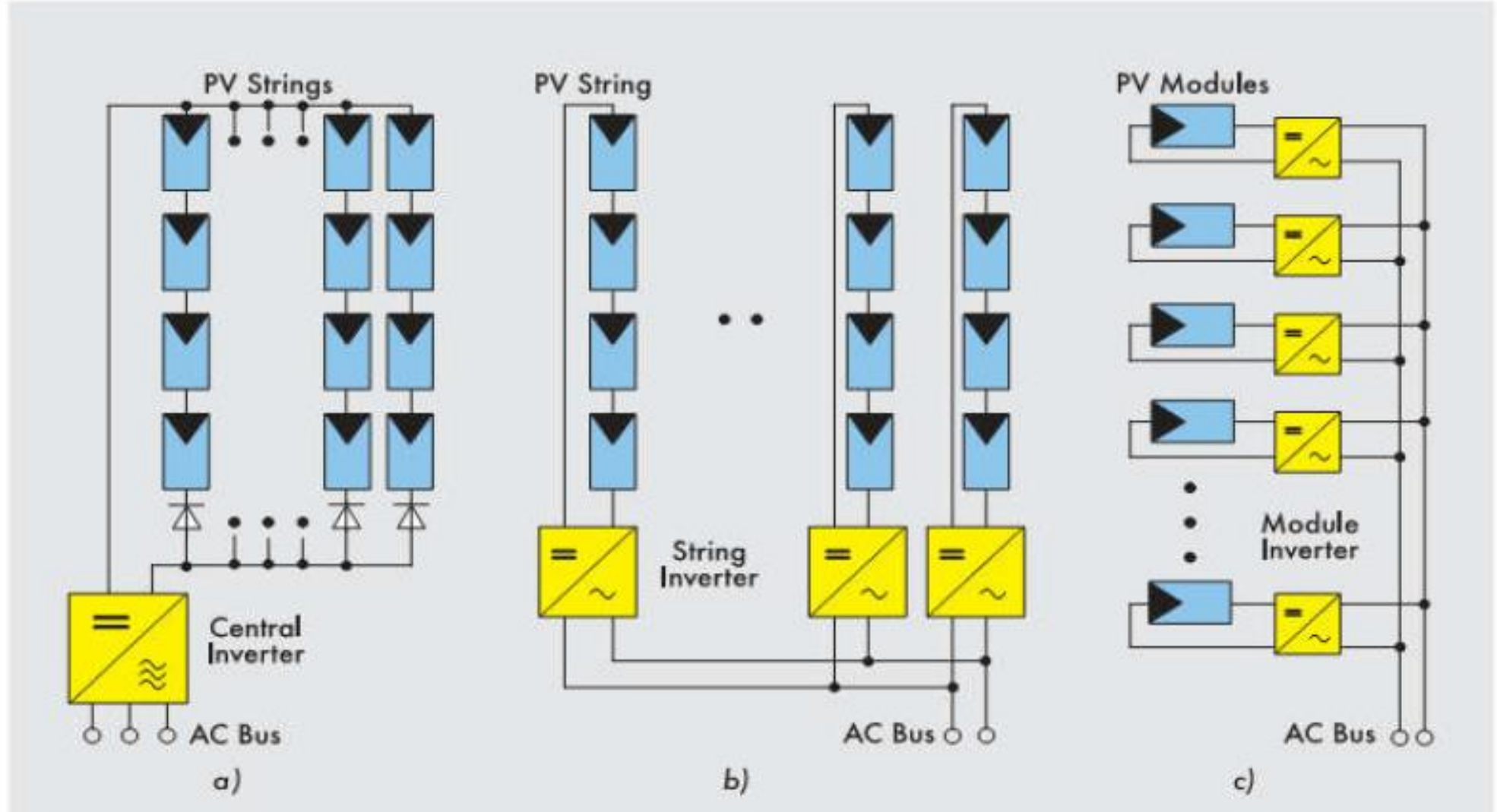
Inversor CC-CA grid-tie

- É responsável por transformar energia de CC para CA, com as mesmas características da rede elétrica
- É o equipamento mais importante de um sistema fotovoltaico conectado à rede





Tipos e inversores: central, *string* ou microinversor





Tipos e inversores: central, *string* ou microinversor



Inversor central

- Alta potência
- Menor custo por watt, maior eficiência elétrica
- Indicado para usinas fotovoltaicas
- Em geral têm potência acima de 100 kW



Inversor de *string*

- Média ou baixa potência
- Usado em sistemas de micro e minigeração
- Em geral com potências entre 1,5 kW e 50 kW

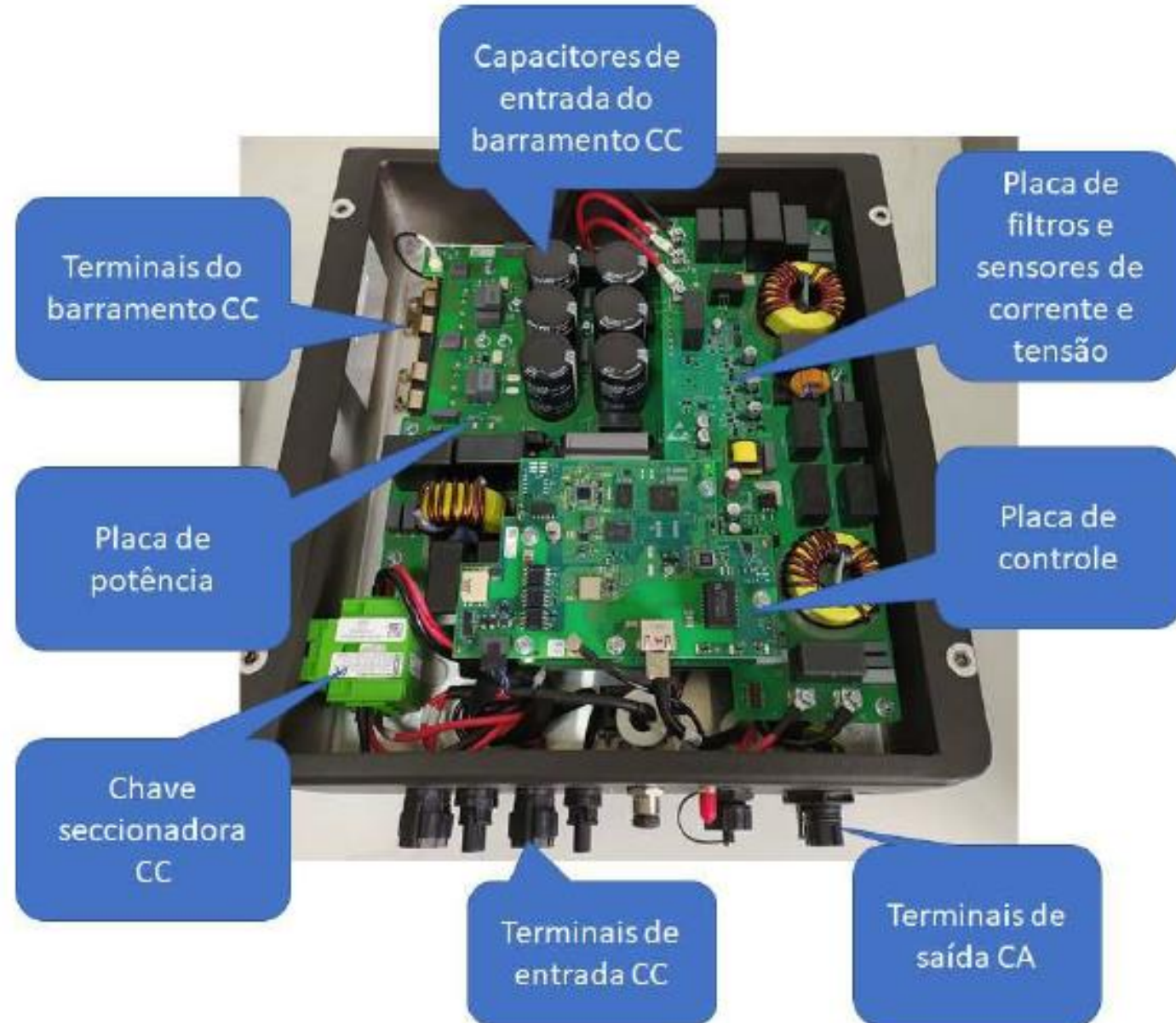


Microinversor

- Baixa potência
- Usado em sistemas de microgeração
- Em geral com potências entre 250 W e 1 kW

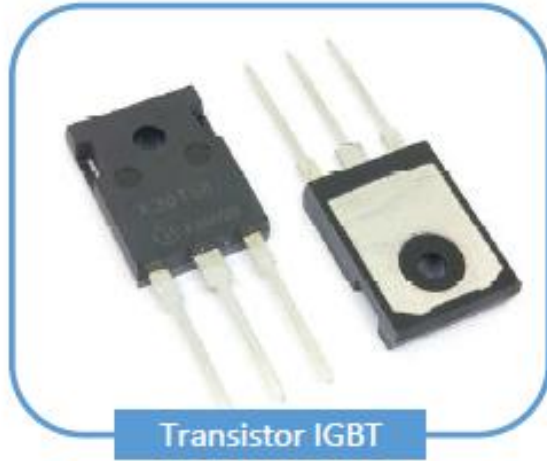


Inversor *grid-tie*: principais componentes

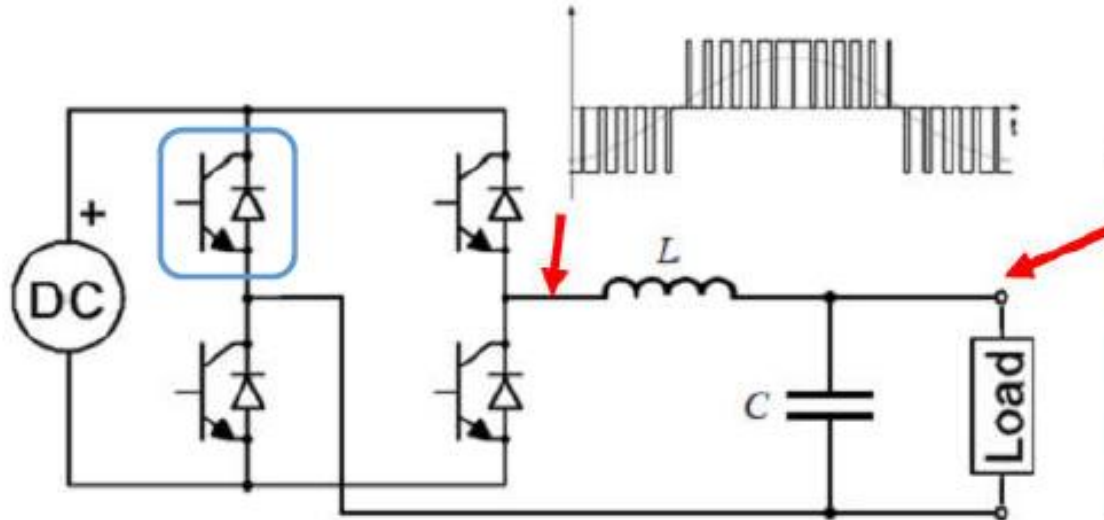




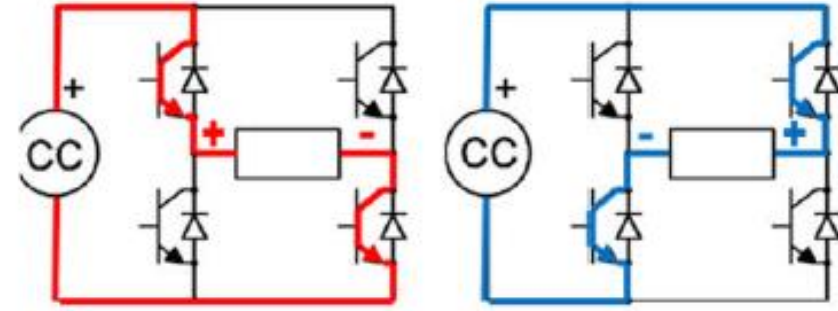
Inversor *grid-tie*: funcionamento



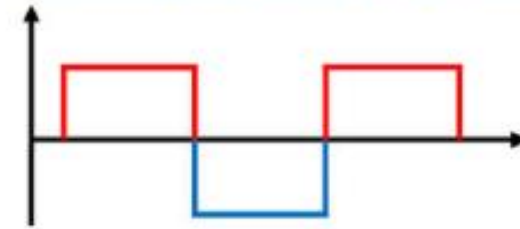
Inversor CC-CA com modulação PWM e filtro de saída:



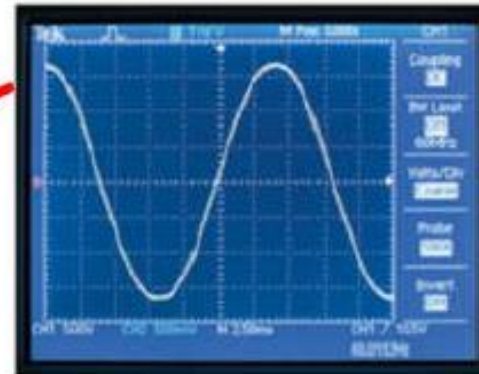
Inversor CC-CA com transistores IGBT:



Funcionamento do inversor CC-CA eletrônico.

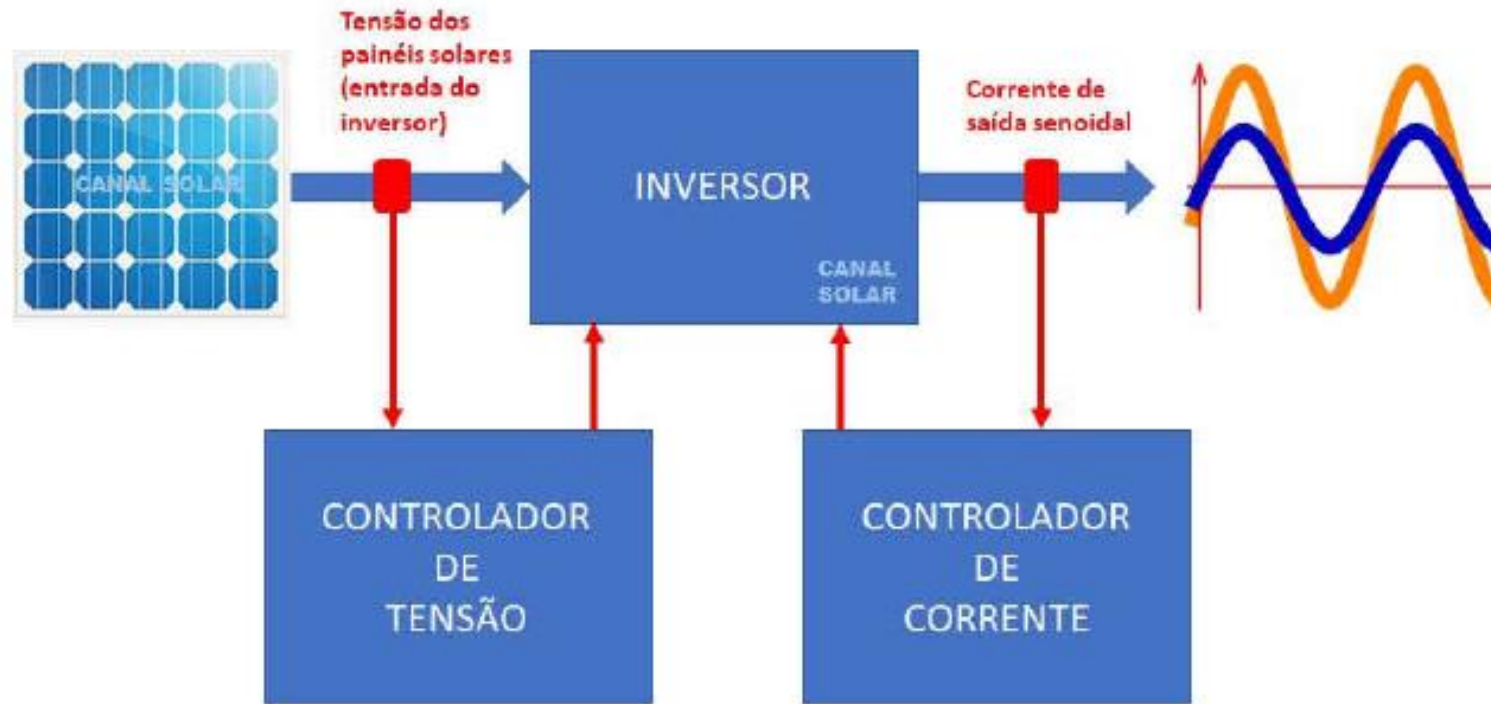


Tensão alternada produzida pelo inversor a partir de uma tensão contínua com a abertura e fechamento dos transistores.



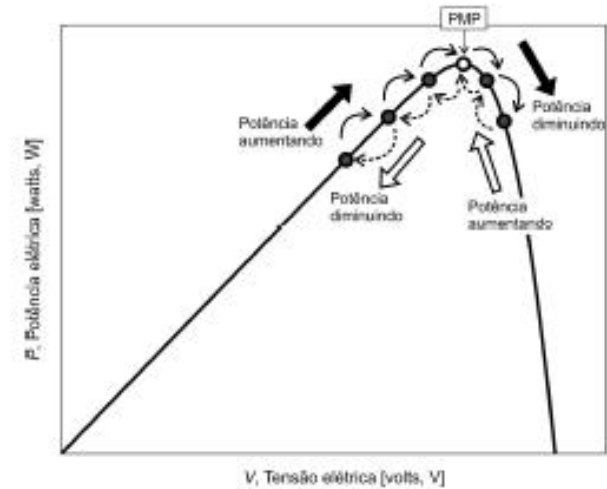
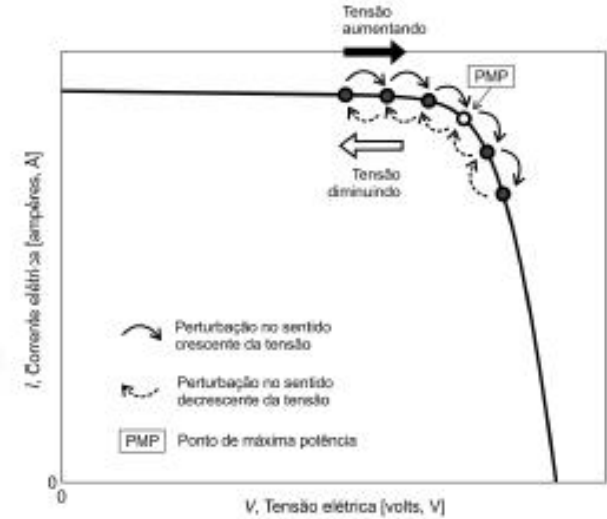
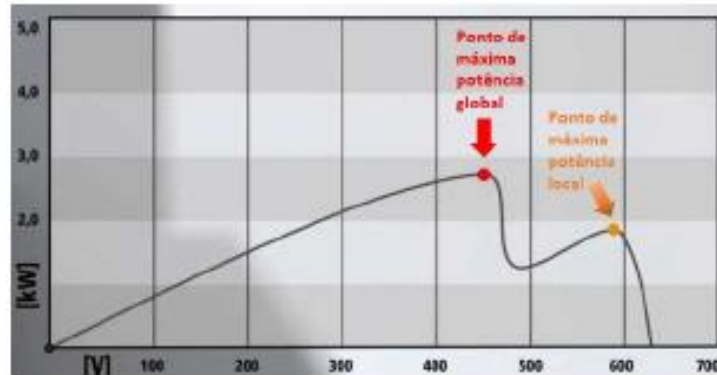
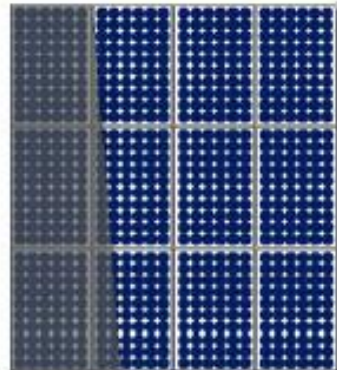
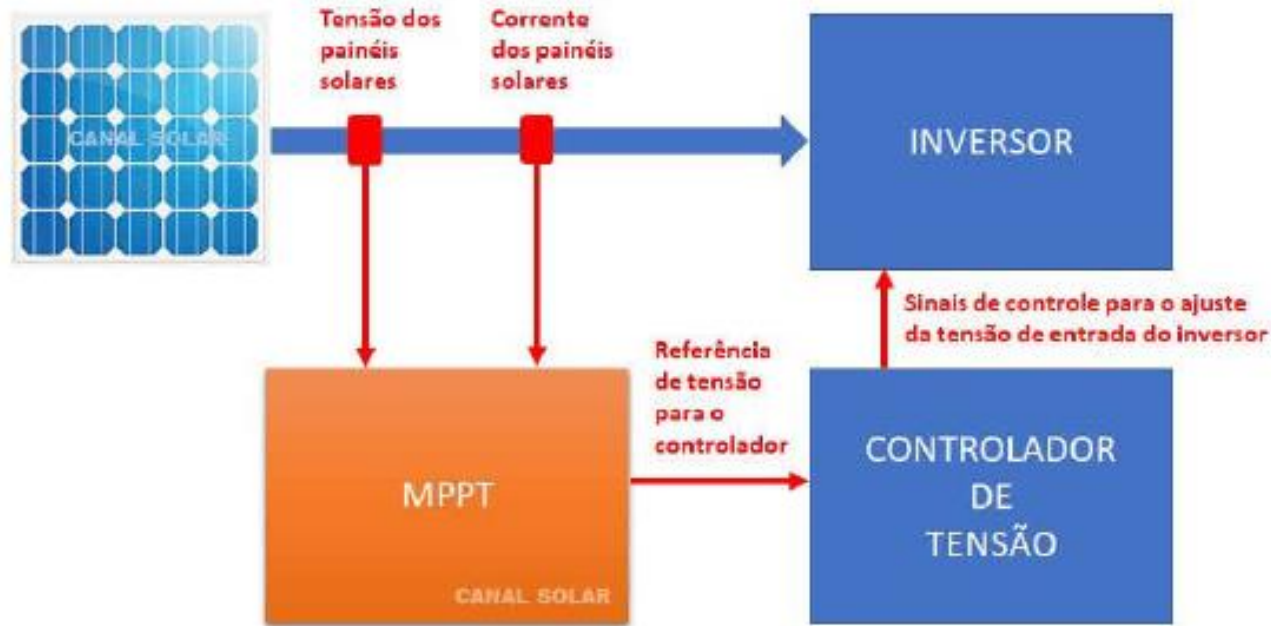


Inversor *grid-tie*: funcionamento



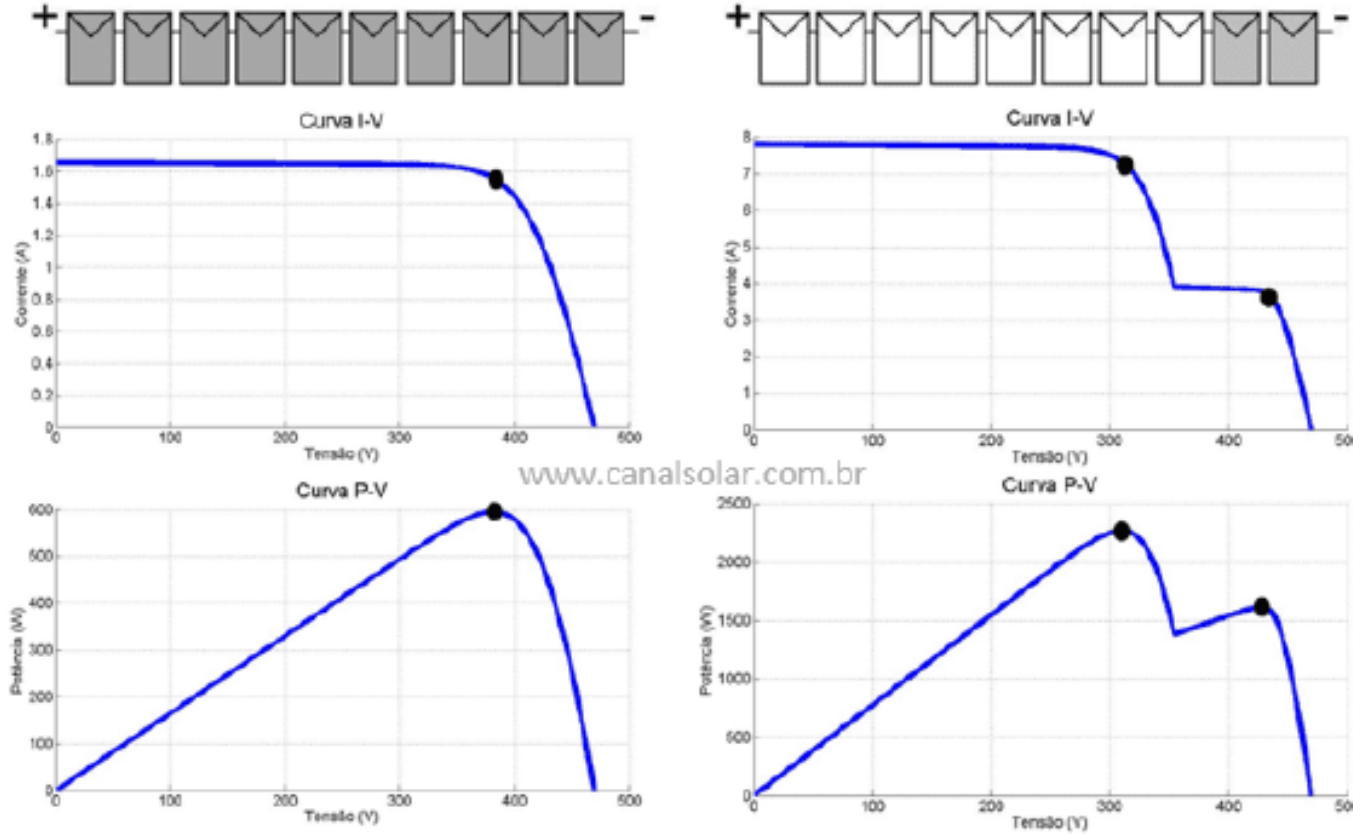


Recursos do inversor *grid-tie*: MPPT - *maximum power point tracking*



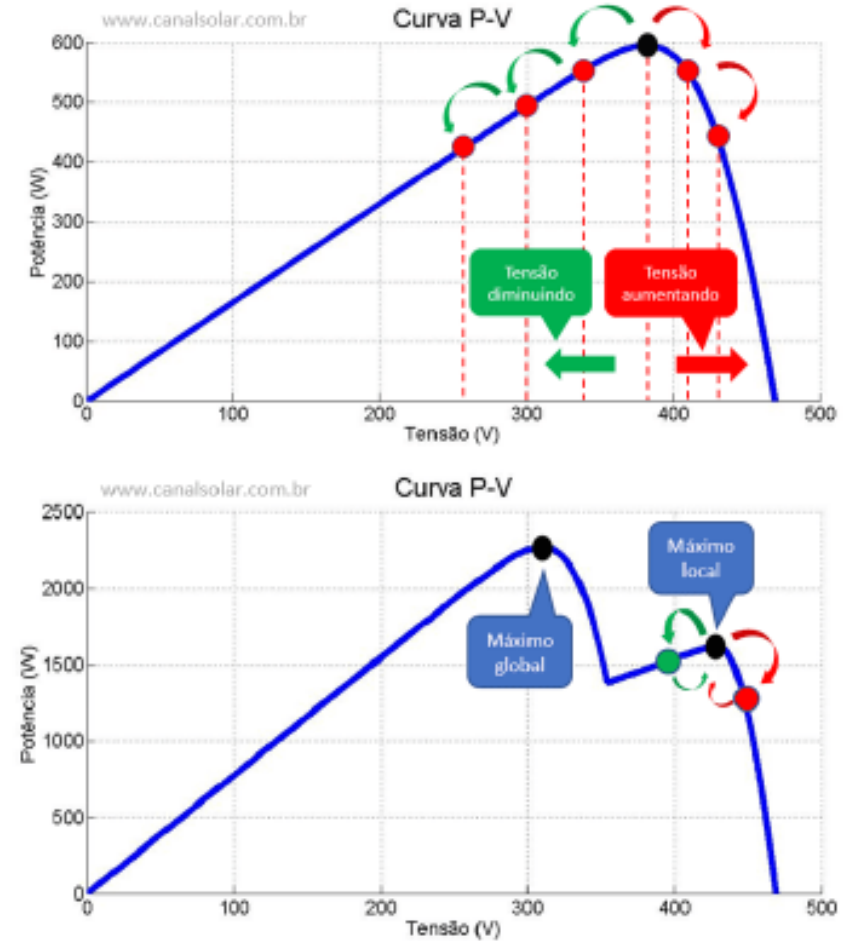


Recursos do inversor *grid-tie*: MPPT resiliente a sombras parciais



(a) Curvas I-V e P-V de um *string* com sombreamento uniforme (redução uniforme da intensidade da luz).

(b) Curvas I-V e P-V de um *string* com sombreamento parcial (apenas dois módulos sombreados).



Exemplos de inversores com MPPT imune a sombras: ShadeFix (SMA) e Dynamic Peak Manager (Fronius)



Recursos do inversor *grid-tie*: múltiplas entradas de MPPT

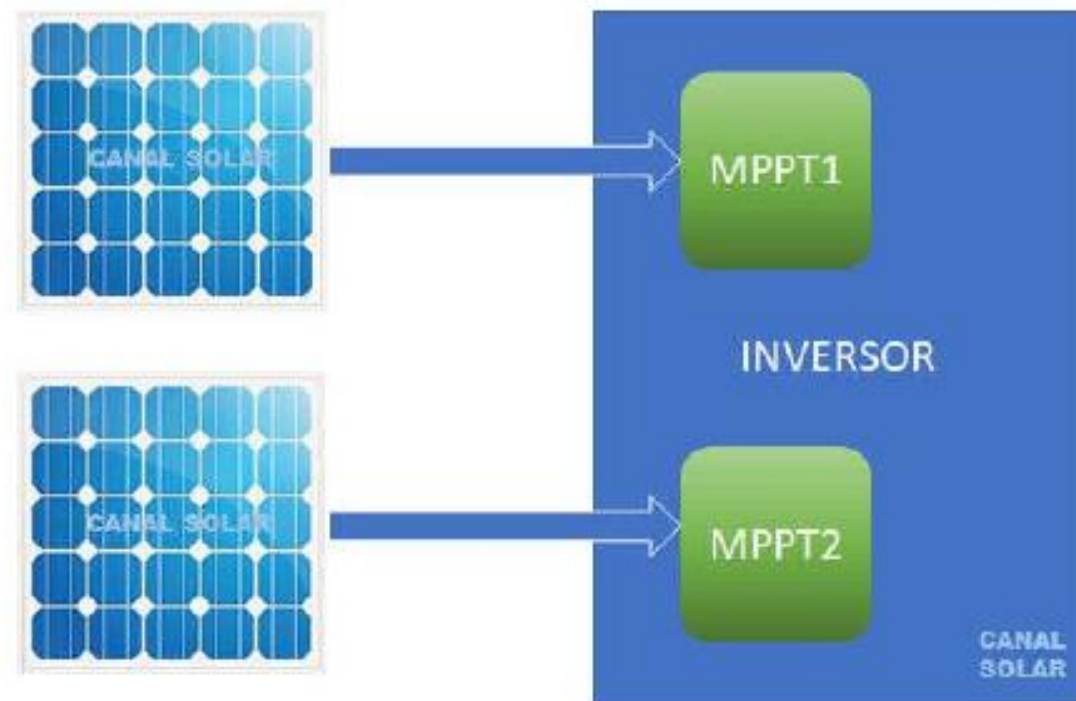
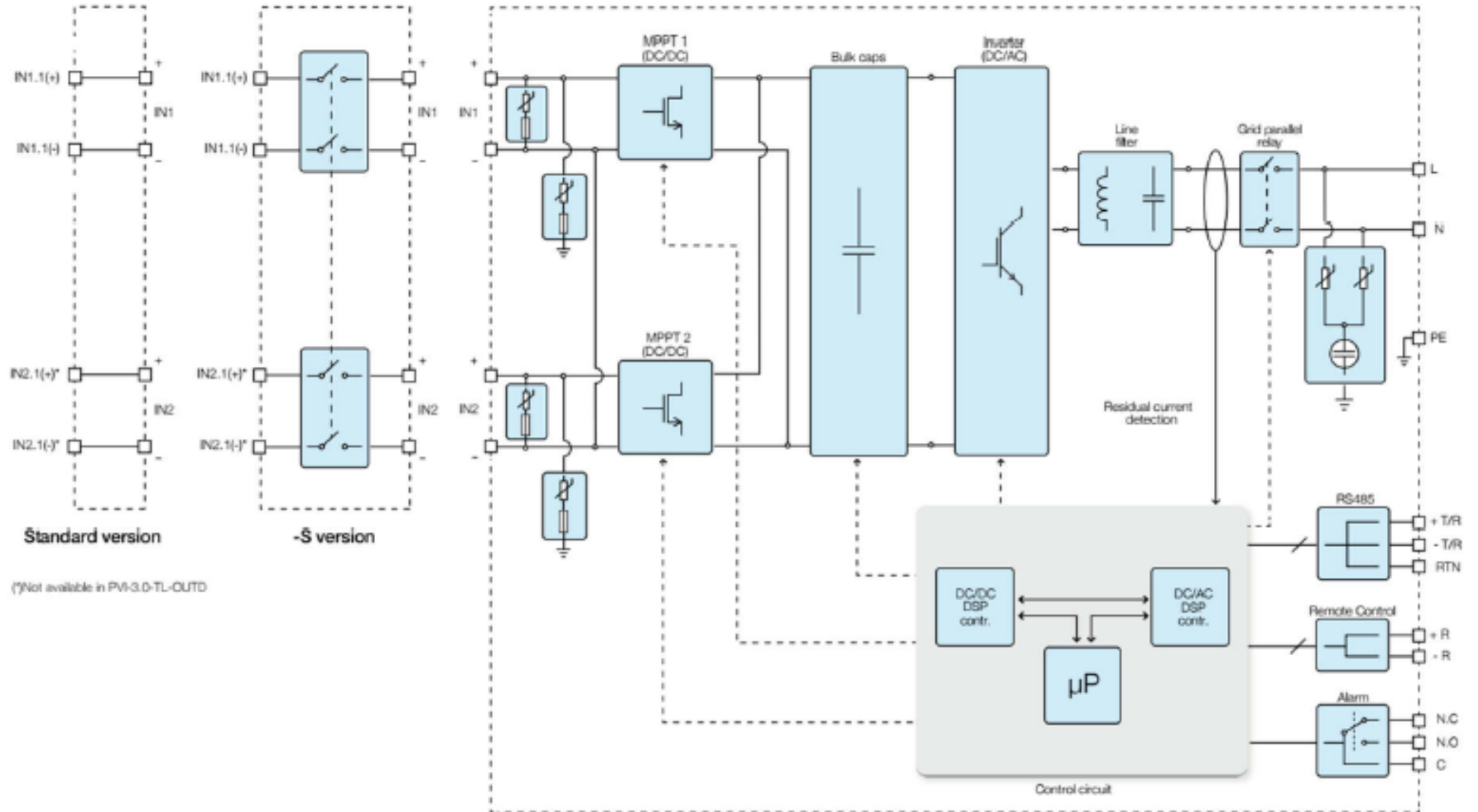


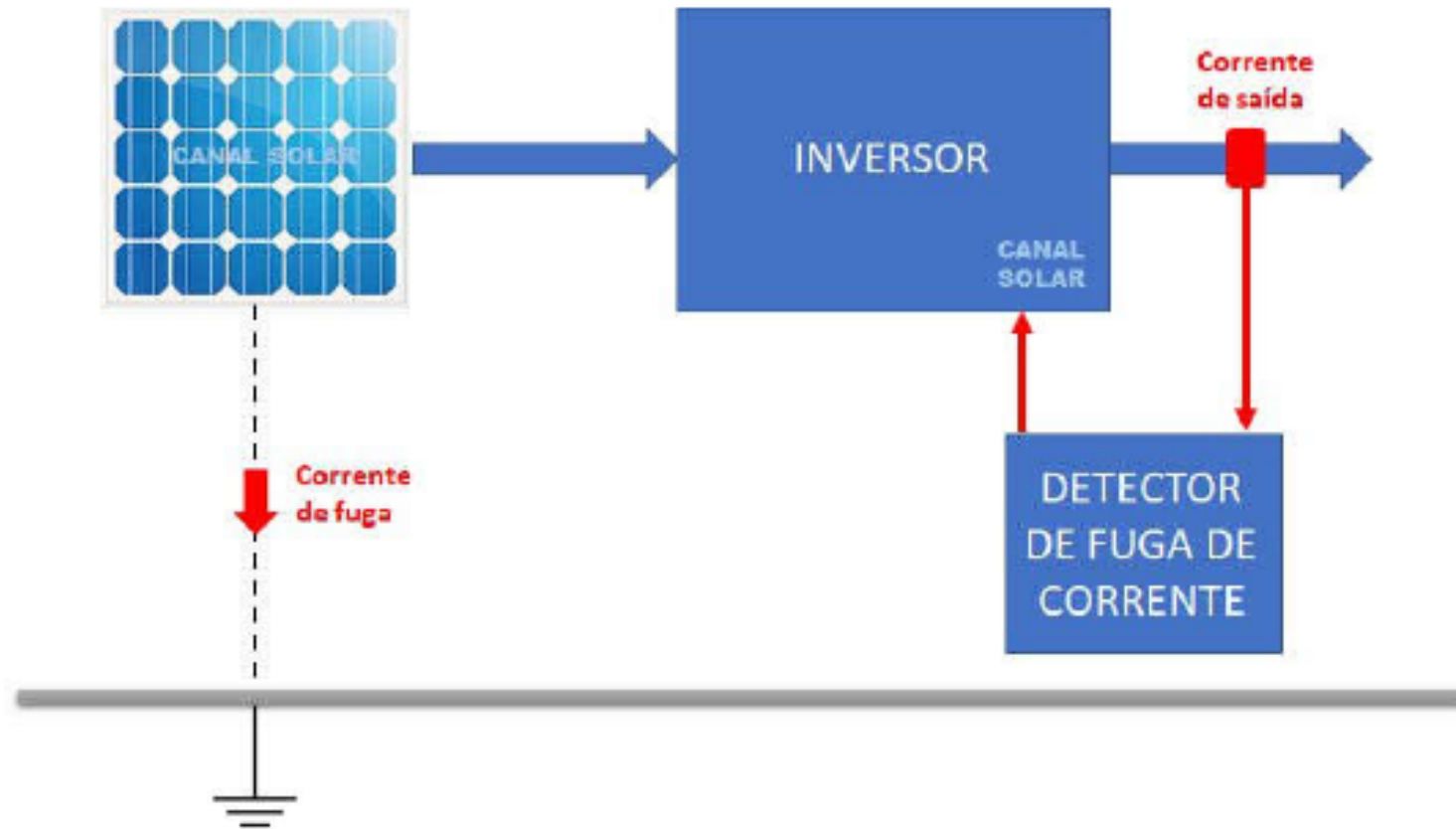


Diagrama interno de um inversor *grid-tie* com 2 entradas de MPPT



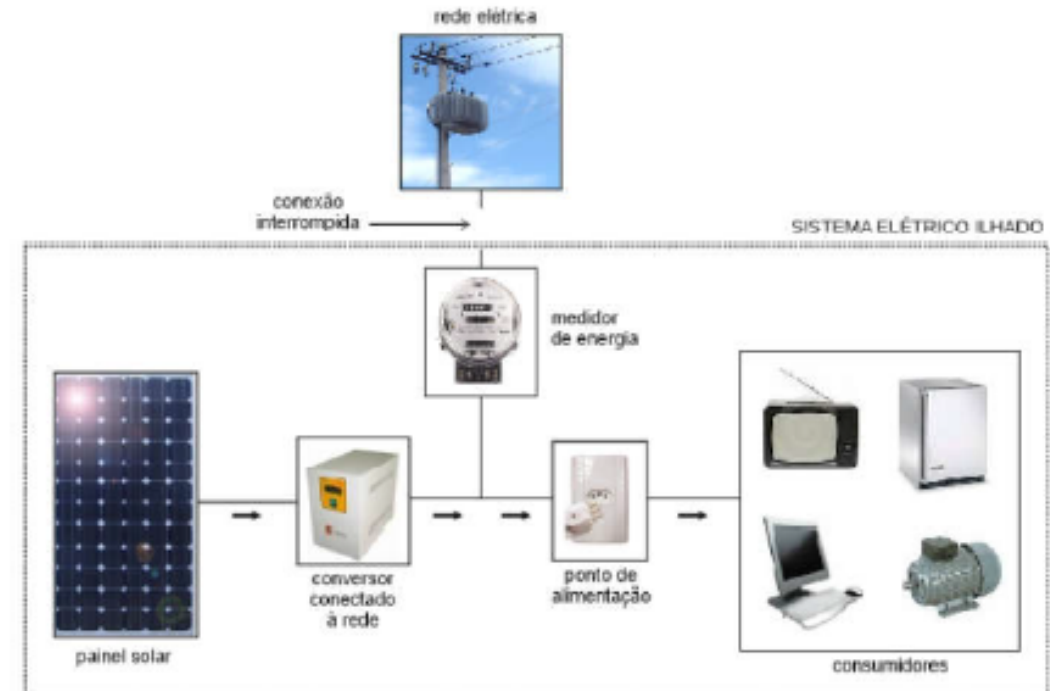
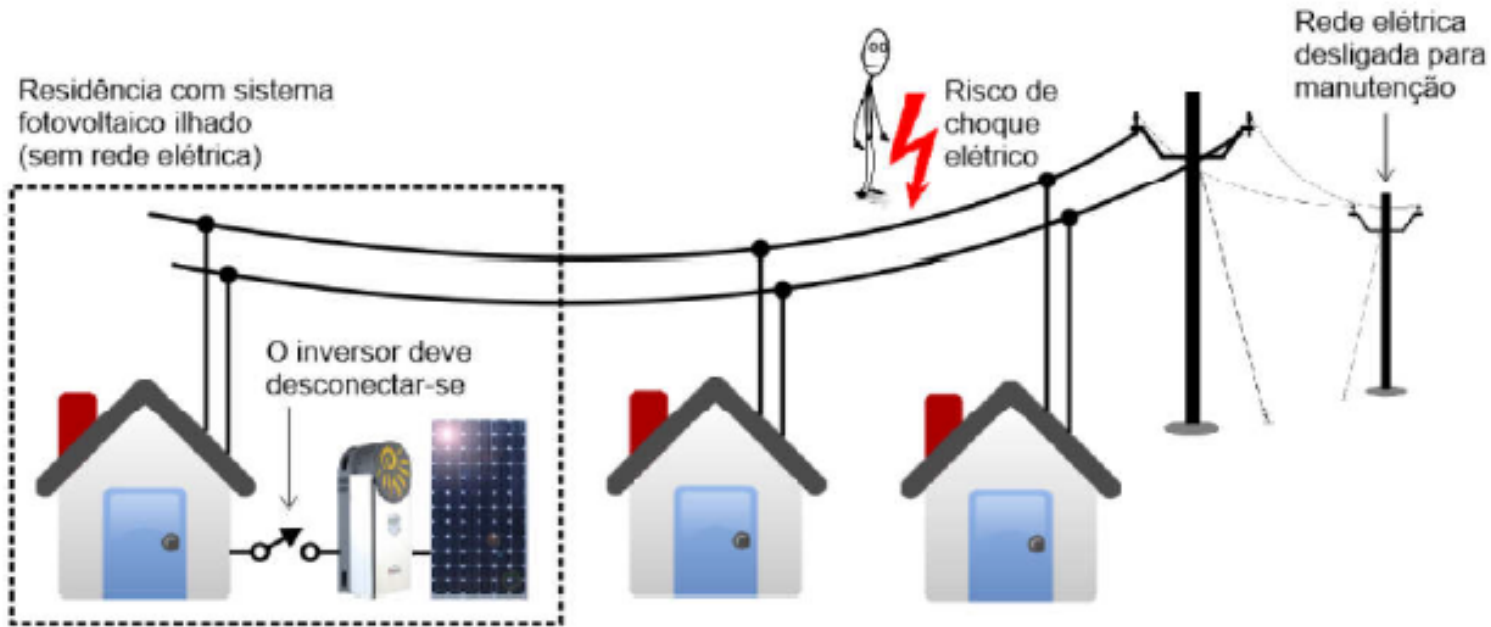


Recursos do inversor *grid-tie*: monitoramento de fuga de corrente



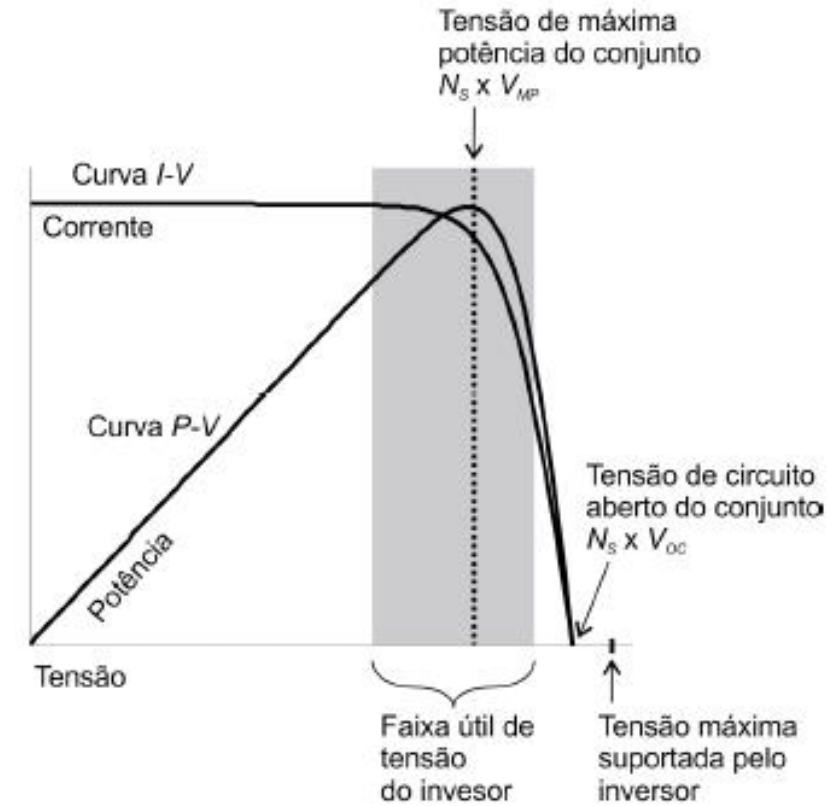
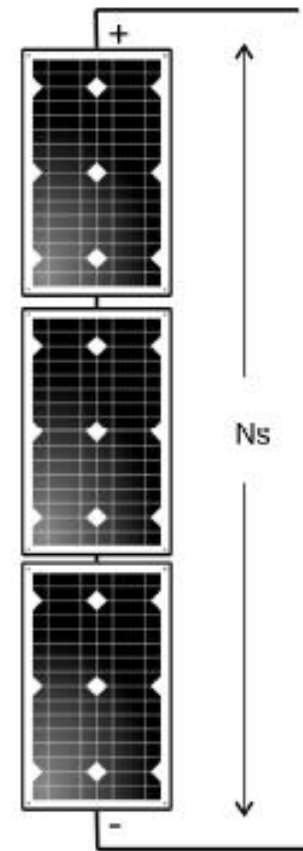
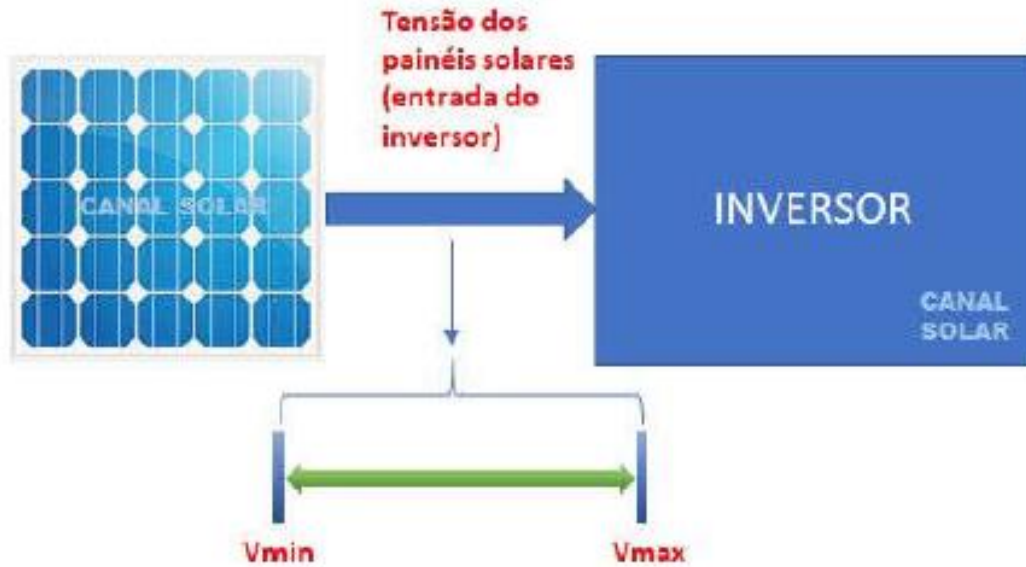
Recurso importante para evitar acidentes em caso de defeitos com falha de isolamento em qualquer parte do sistema fotovoltaico.

Recursos do inversor *grid-tie*: detecção de ilhamento





Inversor *grid-tie*: características de entrada





Inversor *grid-tie*: resumo das funções e características

- Deve possuir alta eficiência (>96%)
- Deve rastrear ponto de máxima potência (MPPT)
- Deve possuir proteção de anti-ilhamento
- Deve permitir o controle do fator de potência
- Desconexão por sobre/sub frequência
- Desconexão por sobre/sub tensão
- Deve gerar uma onda de corrente com a mesma tensão e frequência da rede (sincronismo)
- Pode ser com ou sem transformador interno
- Deve seguir as normas ABNT NBR 16149 *Sistemas fotovoltaicos (FV) – Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição*, ABNT 16150 *Sistemas fotovoltaicos (FV) — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade* e ABNT NBR IEC 62116 *Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica*
- Inversores até 10 kW devem possuir certificação INMETRO compulsória
- Possui recurso de monitoramento de energia e recursos de comunicação com fio ou sem fio



Inversor *grid-tie*: características encontradas nos catálogos dos fabricantes

	15TL M	20TL M	33TL M	Modelo
Input (DC)				
Recommended PV array power range ⁽¹⁾	15.5 - 20.1 kW	20.6 - 26.8 kW	34 - 45 kW	Potência de entrada
Voltage range MPP1 ⁽²⁾	200 - 820 V			Tensão de operação na entrada
Voltage range MPP2 ⁽²⁾	200 - 820 V			Tensão de operação na entrada
Maximum voltage ⁽³⁾	1,000 V			Máxima tensão suportada na entrada
Maximum current (Input 1 / Input 2) ⁽⁴⁾	30 / 20 A	30 / 20 A	40 / 40 A	Máxima corrente na entrada



Inversor Grid-tie: Característica do Inversor encontrada nos catálogos do Fabricantes

Inputs with PV connectors (Input 1 / Input 2) ⁽⁵⁾	3 / 2	3 / 2	5 / 5
MPPT	2		
Output (AC)			
Rated power	15 kW	20 kW	33 kW
Max. temperature at rated power ⁽⁶⁾	55 °C	55 °C	51 °C
Maximum current	22 A	29 A	48 A
Rated voltage	400 V	400 V	400 V
Voltage range	187 - 528 V	187 - 528 V	304 - 528 V
Frequency	50 / 60 Hz		
Power Factor	1		
Power Factor adjustable ⁽⁷⁾	Yes: S _{max} =15 kVA; Q _{max} =15 kVAR	Yes: S _{max} =20 kVA; Q _{max} =20 kVAR	Yes: S _{max} =33 kVA; Q _{max} =20 kVAR
THD	<3%		

Número de conexões de entrada

Número de entradas de MPPT

Potência de saída

Temperatura operacional nominal

Máxima corrente de saída

Tensão de saída nominal

Faixa operacional de tensão de saída

Frequência de operação na saída

Máximo fator de potência

Fator de potência ajustável?

Distorção harmônica da corrente



Inversor Grid-tie: Característica do Inversor encontrada nos catálogos do Fabricantes

Efficiency				
Maximum efficiency	98.5%			
Euroefficiency	98.3%			
General Information				
Refrigeration system	Forced ventilation			
Air flow	200 m ³ /h	200 m ³ /h	400 m ³ /h	400 m ³ /h
Stand-by consumption [®]	10 W			
Consumption at night	1 W			
Ambient temperature	-25 °C to 55 °C			
Relative humidity (non-condensing)	0 - 100%			
Protection class	IP65			
Marking	CE			
EMC and security standards	EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4, EN 61000-3-2, EN 61000-3-3, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12, EN 62109-1, EN 62109-2, IEC62103, EN 50178, FCC Part 15, AS3100			
Grid connecton standards	RD1699/2011, DIN V VDE V 0126-1-1, EN 50438, CEI 0-16 Ed. III, CEI 0-21, VDE-AR-N 4105:2011-08, G59/2, G83/2 [®] , P.O.12.3, AS4777.2, AS4777.3, IEC 62116, IEC 61727, UNE 206007-1, ABNT NBR 16149, ABNT NBR 16150, South African Grid code, Chilean Grid Code, Romanian Grid Code, Ecuadorian Grid Code, Peruvian Grid code, IEEE 929, Thailand MEA & PEA requirements, DEWA (Dubai) Grid Code, Jordan Grid Code			

Eficiência máxima

Eficiência média
(europeia)

Tipo de ventilação

Consumo em standby

Consumo noturno

Normas aplicáveis



Inversor Grid-tie: Característica do Inversor encontrada nos catálogos do Fabricantes

	Integrated elements
Terminal blocks	✓ ^(*)
PV connectors	✓
DC switch	✓
DC surge arresters, type 2	✓
DC and AC surge arresters, type 3	✓
DC fuses	✓
Current measuring kit	✓

Dispositivos de
proteção embutidos



- Distorção harmônica de corrente (limite de THD)

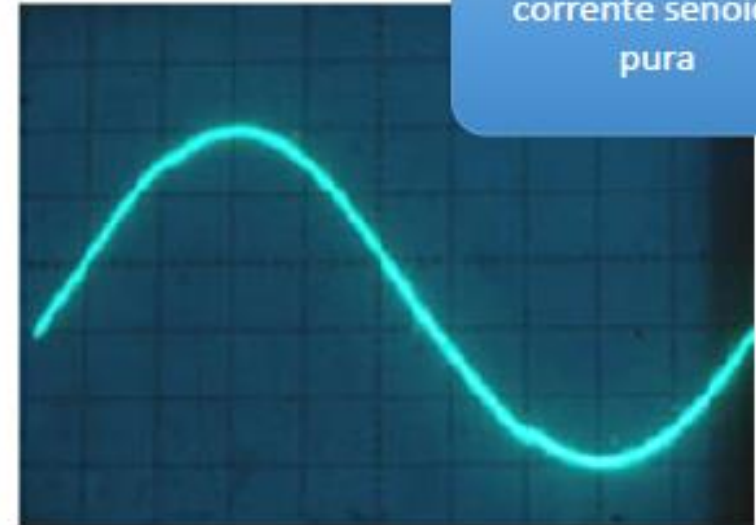
Harmônicas	Limite
THD (todas as harmônicas)	5%
da 3 ^a à 9 ^a	4%
da 11 ^a à 15 ^a	2%
da 17 ^a à 21 ^a	1,5%
da 23 ^a à 33 ^a	0,6%
acima da 33 ^a	0,3%
harmônicas pares	25% dos limites acima



corrente com
harmônicas



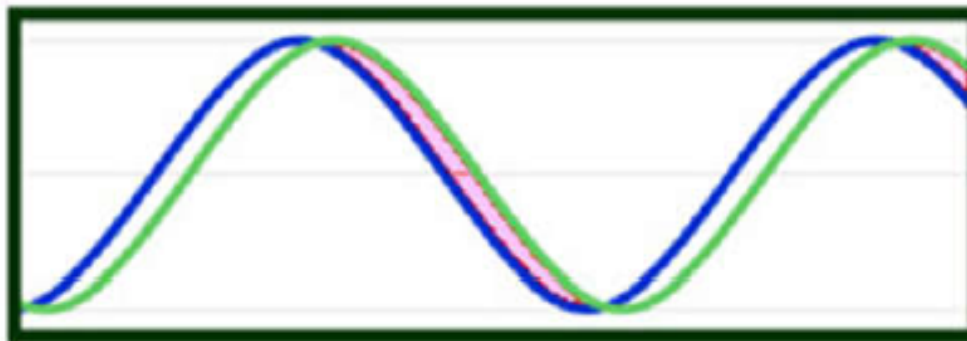
corrente senoidal
pura



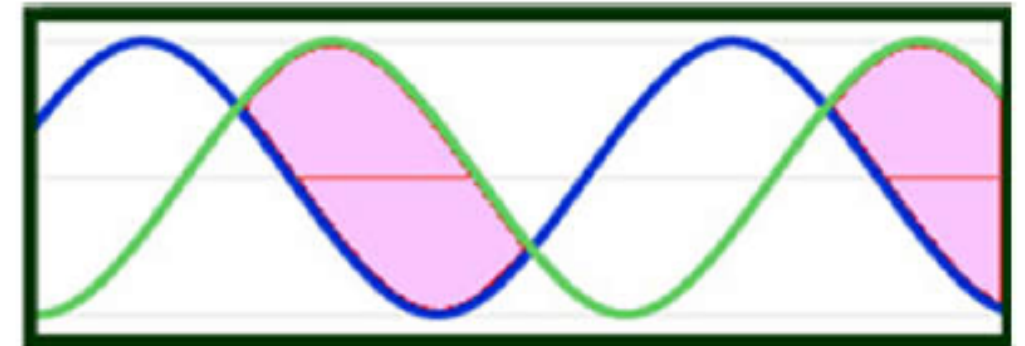


Inversor *grid-tie*: controle do fator de potência

- Antigamente o fator de potência imposto aos inversores *grid-tie* era 1 (fator unitário)
- Atualmente as normas não só permitem como exigem que os inversores tenham o fator de potência ajustável dentro de certos limites



Voltage

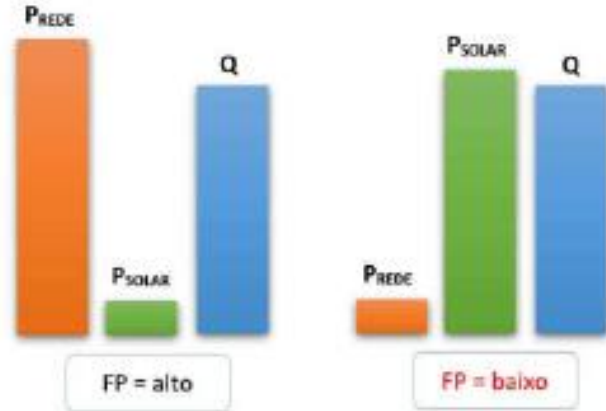


Current

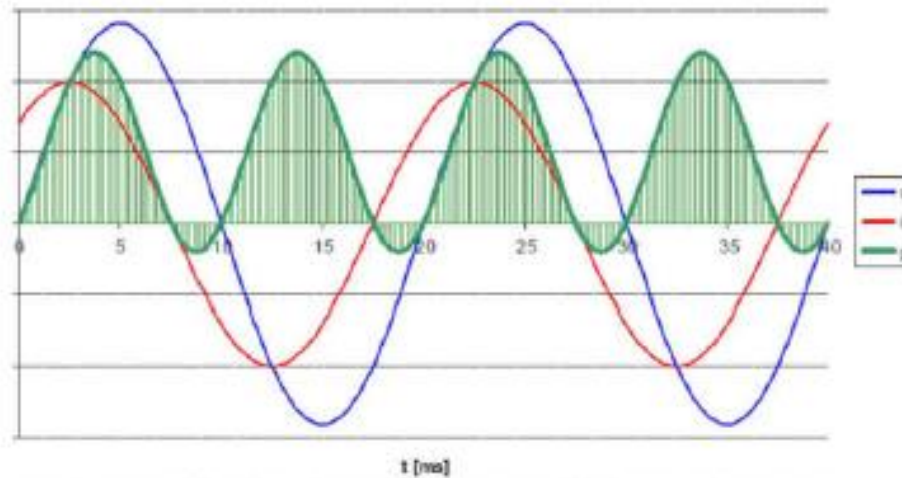


Problema: a injeção de energia pelo sistema FV piora (diminui) o FP da instalação.

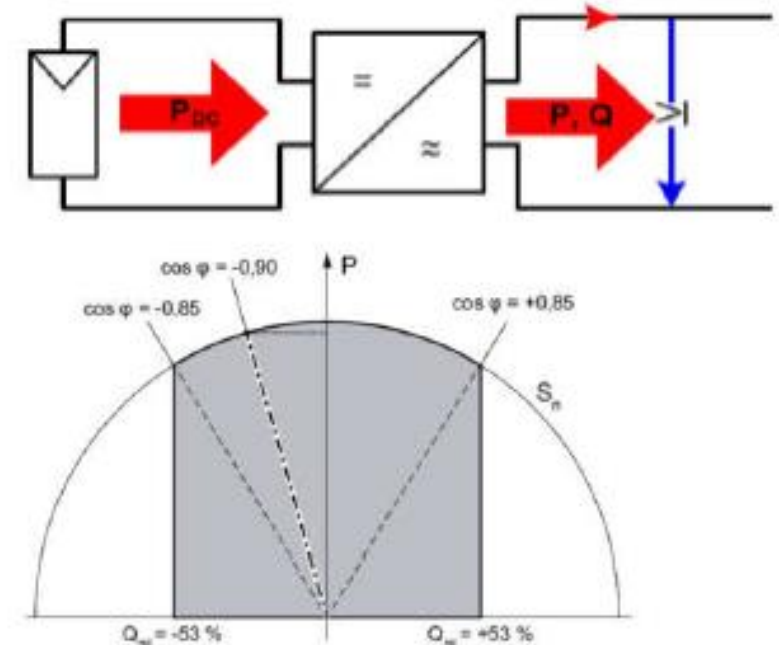
Solução 1: banco de capacitores



Solução 2: controle da potência reativa do inversor



Tensão (u), corrente (i) e potência (p) na saída de um inversor fotovoltaico. Neste caso alguma potência reativa é injetada, além da potência ativa fornecida pelos painéis. A área verde negativa (abaixo do zero) indica que o inversor recebe energia da rede, comportando-se como um elemento reativo (capacitor). A fase da corrente (em vermelho) está adiantada em relação à tensão (azul).

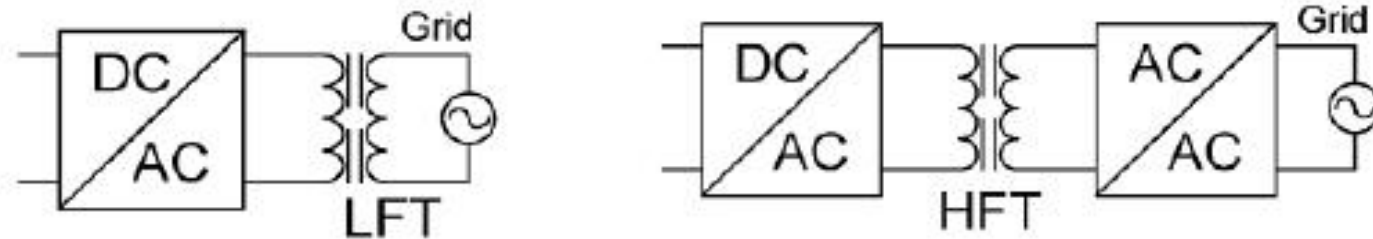




Inversor *grid-tie*: presença de transformador de saída

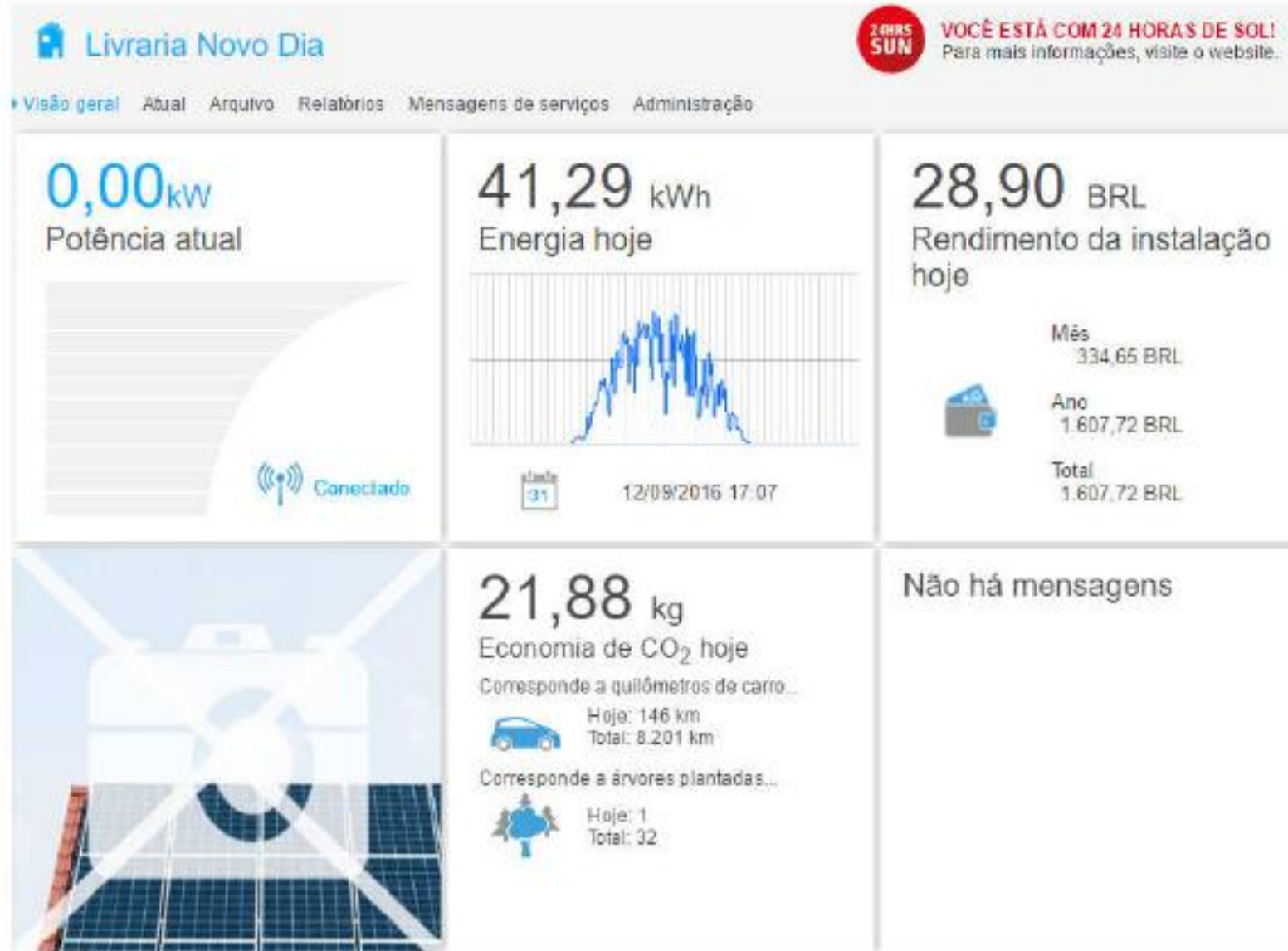
Os conversores para sistemas conectados à rede podem possuir ou não um transformador de isolamento. A presença de um transformador torna o sistema mais seguro, pois possibilita a isolação completa entre o lado CC (painéis fotovoltaicos) e o lado CA (rede elétrica), impedindo a circulação de correntes de fuga. A isolação por transformador também facilita o aterramento dos painéis fotovoltaicos, principalmente nos sistemas com neutro aterrado, uma vez que os potenciais da rede elétrica e dos painéis ficam dissociados.

Um aspecto importante nos sistemas com transformador é a localização deste dispositivo: no estágio CC (transformador de alta frequência) ou na saída do estágio CA (transformador na frequência da rede elétrica). As figuras a seguir ilustra as diferenças entre o transformador em baixa ou em alta frequência.





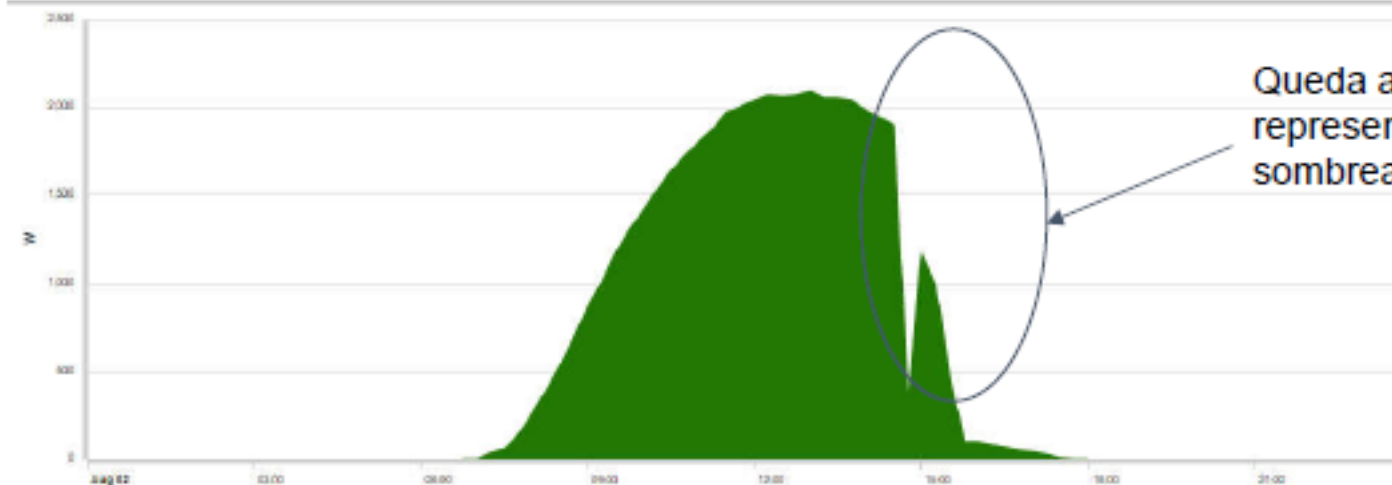
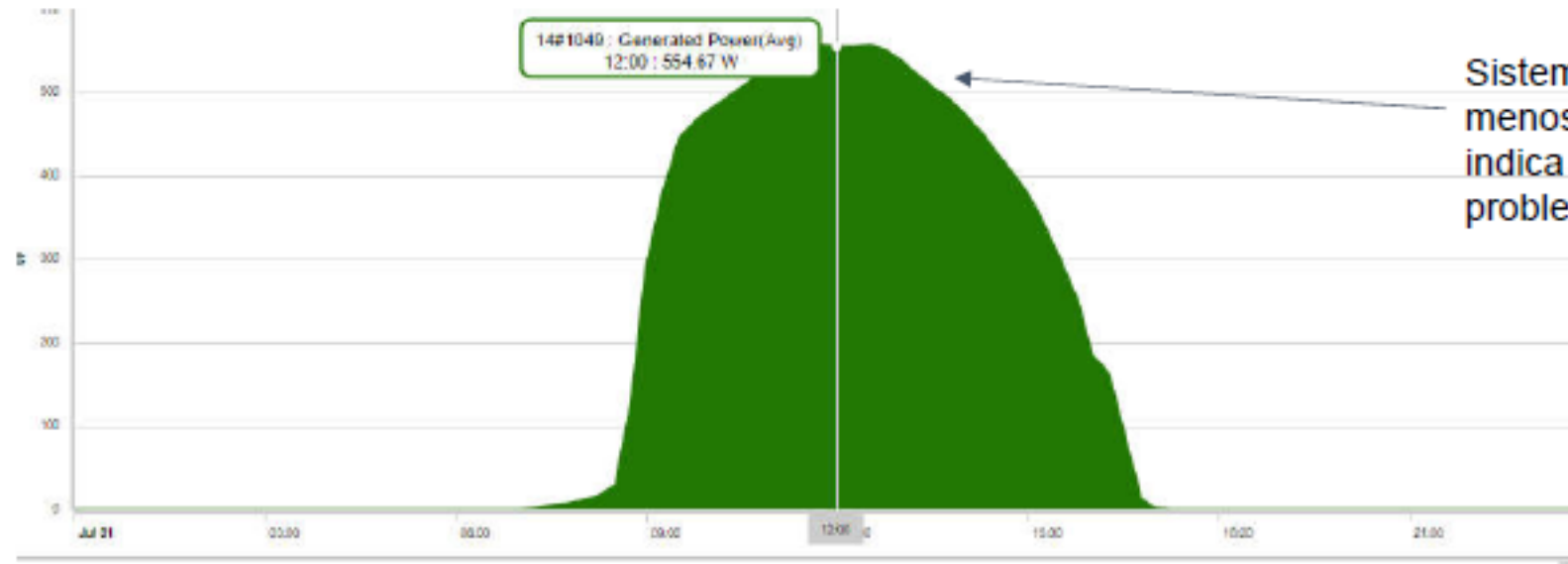
Inversor *grid-tie*: recurso de monitoramento da geração





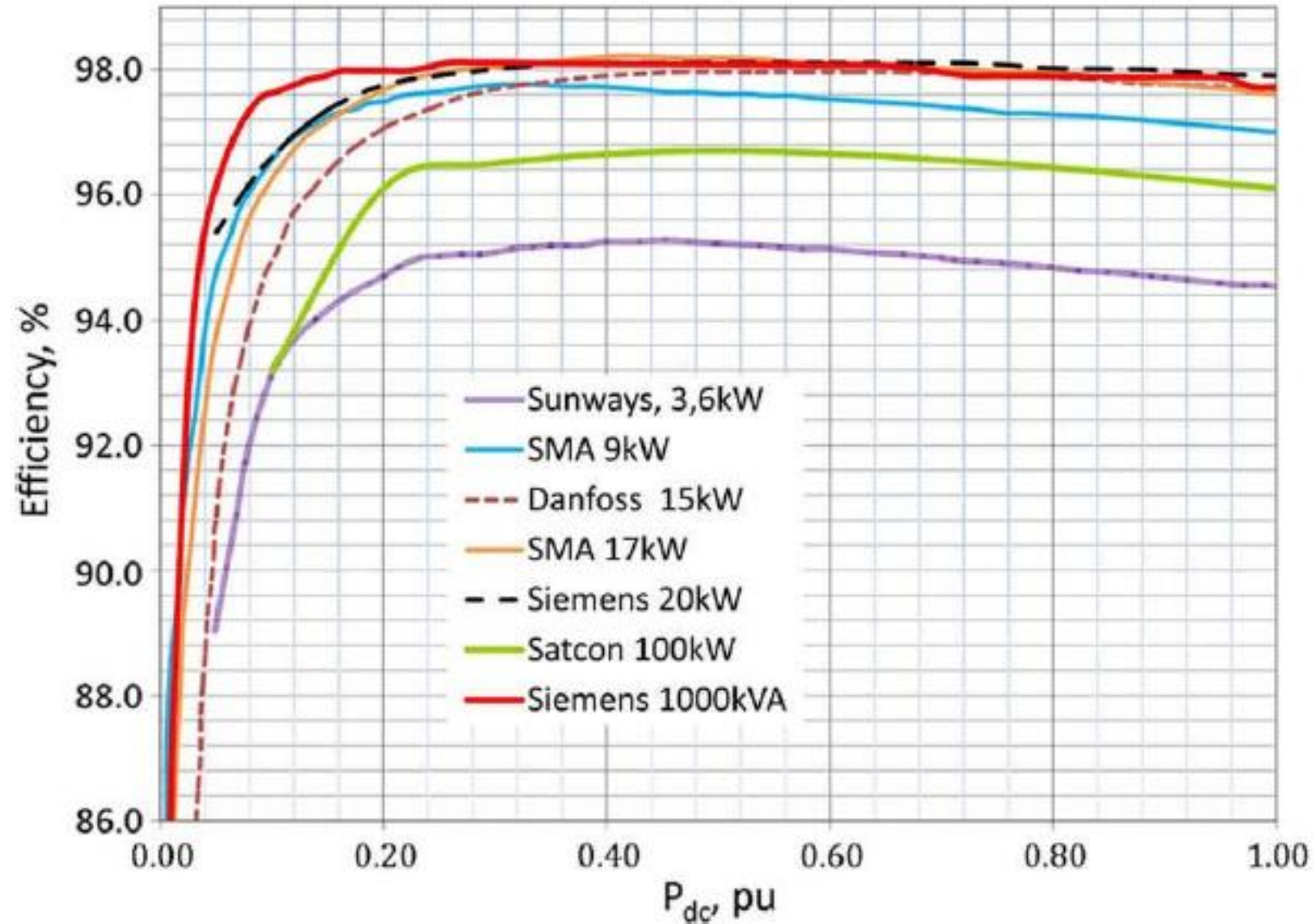
Inversor *grid-tie*: recurso de monitoramento da geração

- Permite identificar problemas no sistema fotovoltaico e garantir o melhor desempenho

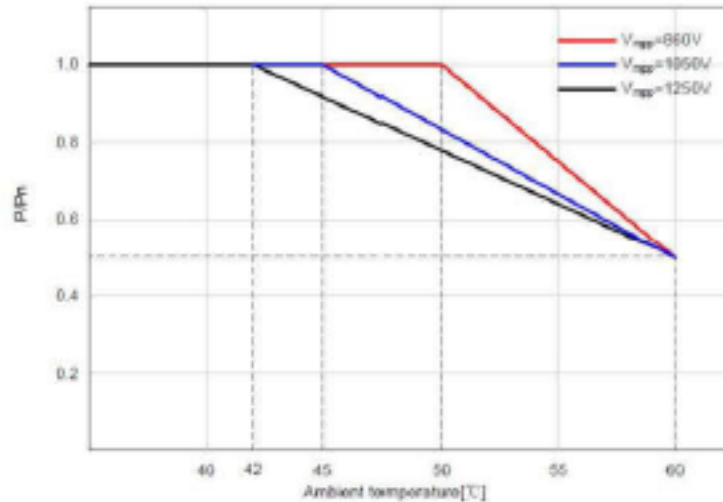
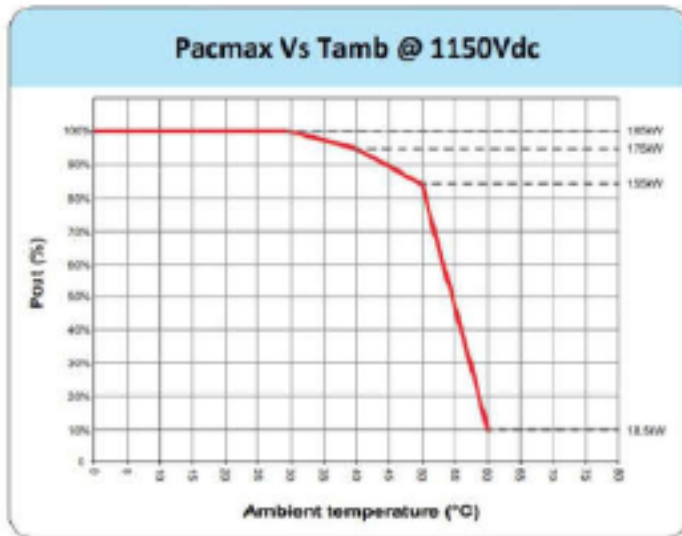
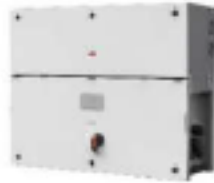




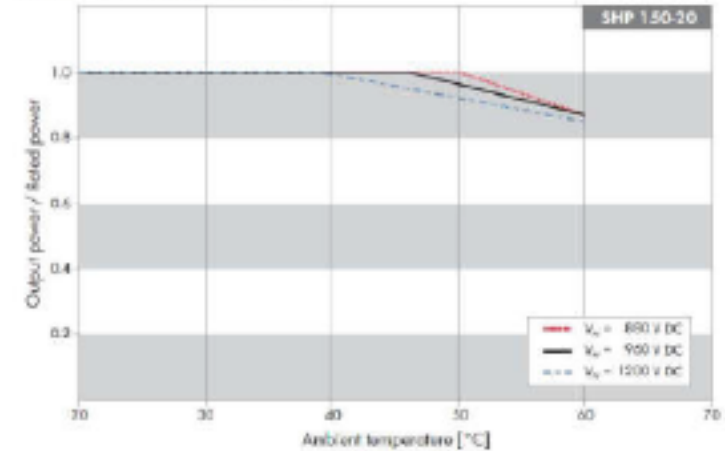
Inversor *grid-tie*: curvas de eficiência x potência



Inversores com curva de eficiência plana apresentam melhor desempenho, mantendo elevada eficiência em toda a sua faixa de potência operacional.



7.4.2 Derating Behavior

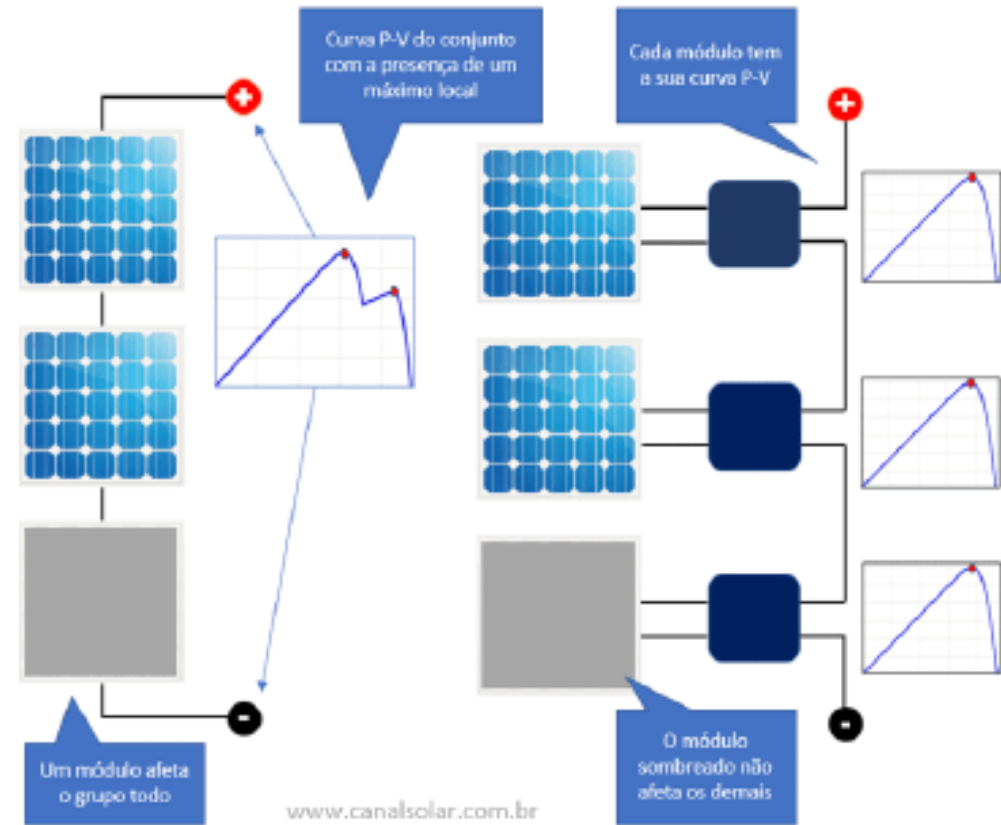


Inversores de diferentes fabricantes apresentam quedas de potência (*derating*) mais ou menos acentuadas com o aumento da temperatura. Este é um importante aspecto na escolha do equipamento que vai ser utilizado em um projeto de usina.

Exemplo comparativo:

- Inversor Sungrow 250 kVA @30°C, 225 kVA @40°C, 200 kVA @50°C (perda de 20% de potência em 50°C)
- Inversor SMA: começa a ter *derating* de temperatura a partir de 40°C (se estiver trabalhando com 1200 VDC), mesmo assim sofre redução menor do que 10% em 50°C. Se estiver trabalhando em 880 VDC sofre *derating* somente a partir de 50°C).

MLPE – *module level power electronics*





Otimizadores de potência: operam junto com o inversor





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Como
dimensionar
o sistema
fotovoltaico





Dimensionamento e projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede

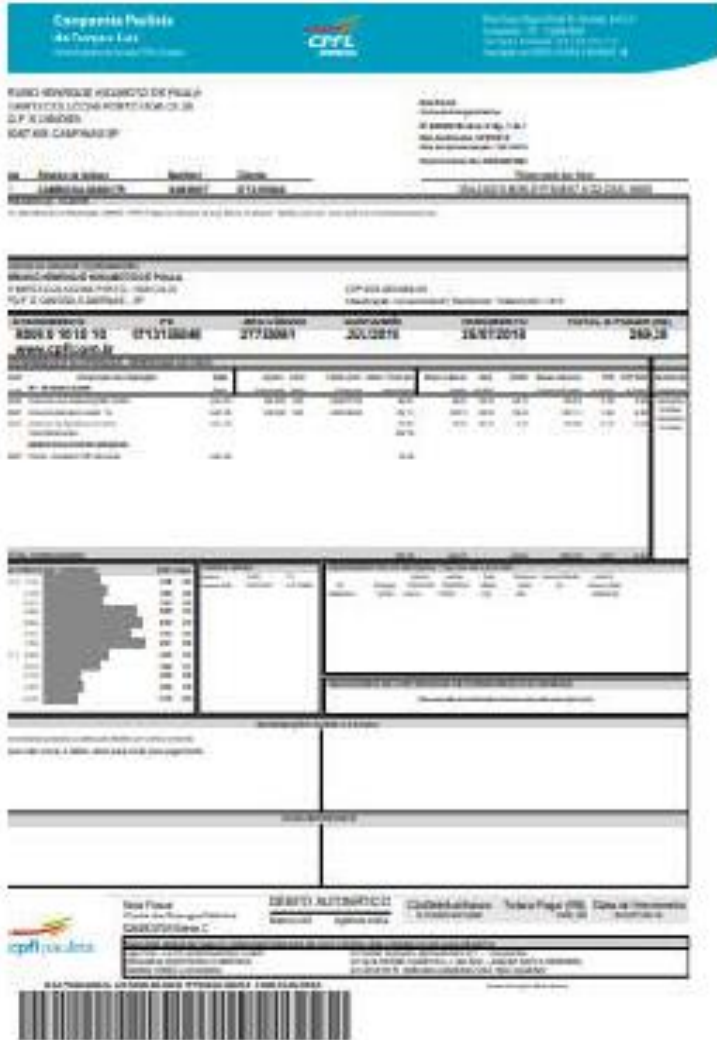
- O procedimento é parecido com o dimensionamento de sistemas off-grid que abordamos no módulo II, com algumas diferenças.
- Na maior parte dos casos o **dimensionamento do sistema grid-tie começa com a leitura da conta** de energia elétrica do cliente. Quando a construção é nova ou não existe ainda, é necessário fazer uma estimativa (procedimento semelhante ao dos sistemas off-grid, baseado na análise do consumo das cargas).
- **Passos para o projeto de sistema grid-tie em geral:**
 - Determinação da **energia** que precisa ser produzida (normalmente considerando o histórico de consumo dos últimos 12 meses do consumidor)
 - Busca das informações de **irradiação solar do local**, escolha do tipo de **painel solar** (decisão do projetista) e cálculo do **número de módulos** necessários
 - Escolha do **inversor** (em função das características dos módulos) e dos demais componentes (**string-box**).
 - Desenho do **diagrama unifilar** do sistema incluindo os circuitos CC e CA
 - Elaboração da **documentação para homologação** na concessionária (assunto que vamos abordar no módulo IV)





Dimensionamento e projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede

Passo 1: leitura da conta de energia elétrica e determinação da energia que precisa ser produzida



INSC. EST: ISENTO		
Convencional B1 Residencial - Bifásico 220 / 127 V		
CONTA/MÊS	VENCIMENTO	
HISTÓRICO DE CONSUMO		
	kWh	Dias
2018 JUL	1334	30
JUN	1481	32
MAI	1334	30
ABR	1294	29
MAR	1296	32
FEV	1053	29
JAN	1023	29
2017 DEZ	1029	31
NOV	1004	31
OUT	1018	29
SET	1390	30
AGO	1290	31
JUL	1420	31

Exemplo

Consumo médio mensal:
1.213 kWh

Taxa mínima de disponibilidade:
50 kWh/mês (bifásico)

Geração mensal necessária:
1.630 kWh



Dimensionamento e projeto de um sistema fotovoltaico conectado à rede

Passo 2: Tipo e quantidade de módulos fotovoltaicos

A escolha do módulo fotovoltaico é uma decisão do projetista ou do fornecedor, levando em conta a disponibilidade do mercado ou o estoque do distribuidor. Obviamente, também essa escolha leva em conta aspectos de qualidade, custo e eficiência, entre outras coisas. Uma vez definido o modelo do módulo solar a ser empregado, deve-se calcular a quantidade de módulos necessária para se alcançar a geração de energia desejada. Esse cálculo é realizado com base na irradiação solar do local.



HIGH PERFORMANCE MONOCRYSTALLINE MODULE
RSM72-G-330M-350W/588
72 CELL MONOCRYSTALLINE MODULE
330-350Wp POWER OUTPUT RANGE
1500VDC MAXIMUM SYSTEM VOLTAGE
18.0% MAXIMUM EFFICIENCY

KEY SALIENT FEATURES

- Black TiN transparent front, with independently certified anti-reflection and anti-dust coating
- Plasma independent front coating - Maximize the use of 100% mono-crystalline wafers
- Industry leading lower temperature coefficient of power
- Industry leading 10 years production warranty
- Worldwide maximum performance
- Best-in-class performance
- Positive light power tolerance of 1%
- Best-in-class 100% EL inspection to ensure high level of quality
- Module long life significantly reduces lifetime maintenance
- More than 20 years of stringent quality assurance and beyond standard requirements
- Get 100% of the total power over the module's lifetime
- 20-year salt mist, ammonia & nitrogen acid resistance. For example, 1000h salt mist, ammonia & nitrogen acid resistance
- 10-year salt mist, ammonia & nitrogen acid resistance. For example, 1000h salt mist, ammonia & nitrogen acid resistance

LINEAR PERFORMANCE WARRANTY
10 year Product Warranty (24 years Linear Power Warranty)

WARRANTY GRAPH

WEN ENERGY CO. LTD
Fuzhou Industrial Zone, 200000
Wenhai 2 Street, Fuzhou, China
Tel: +86 591 23888888
Fax: +86 591 23888888
Email: wenenergy@wenenergy.com
Website: www.wenenergy.com

Exemplo

Módulo de 330 Wp, com eficiência de 18% (em STC – 25 °C e 1000 W/m²)

Precisamos saber a **potência de pico (Wp) do módulo**. Com ela, com base na irradiação solar do local, vamos calcular a quantidade de energia que um módulo pode produzir e a quantidade de módulos necessários no projeto.

Não precisamos conhecer também a eficiência do módulo? Não, a informação da eficiência está embutida na relação entre a potência e a área do módulo, que não vamos utilizar em nossa metodologia. Precisamos somente da potência.

Vamos relembrar os procedimentos que abordamos nos módulos I e II deste curso...



Cálculo da energia mensal produzida pelo módulo fotovoltaico



Painel solar de 330 Wp (escolha do projetista)

Exemplo

Local com irradiação solar de 5,2 kWh/m²/dia

$$5,2 \text{ kWh/m}^2 = 5200 \text{ Wh/m}^2 \text{ (por dia)}$$

$$5200 \div 1000 = 5,2 \text{ h}$$

$$5,2 \text{ h} \times 330 \text{ W} = 1716 \text{ Wh} = 1,716 \text{ kWh} \text{ (por dia)}$$

$$FP = 0,80 \rightarrow E = 1,716 \text{ kWh} \times 0,80 = 1,372 \text{ kWh} \text{ (por dia)}$$

Vamos considerar que o sistema FV tem um fator de performance de 0,80. Desta forma descontamos as perdas dos módulos e outras perdas existentes em um sistema real.

$$1,372 \text{ kWh} \times 30 = 41,184 \text{ kWh} \text{ (por mês)}$$

Este é o número que estamos buscando!



Cálculo do número de painéis solares necessários no projeto

Exemplo

41,184 kWh

Energia que um módulo produz mensalmente (do slide anterior)

1630 kWh

Necessidade de energia levantada da conta de luz

$$\text{Número de painéis} = \frac{1630 \text{ kWh}}{41,184 \text{ kWh}} = 40$$



Definição do arranjo fotovoltaico

- A definição do arranjo deve ser feita em conjunto com a análise das características do inversor que vai ser empregado na instalação.
- É comum encontrar inversores com 1, 2 ou 3 entradas de MPPT. O número de entradas pode determinar o número de strings que serão empregadas.
- Além de analisar as características de entrada do inversor, uma boa sugestão inicial é tentar formar strings com tamanhos que variam de 10 a 20 módulos nos sistemas de microgeração ou podem ter até 30 módulos nos sistemas de minigeração e nas usinas solares.

Exemplo

Número de módulos do projeto: 40

Número de strings: 2 (tentativa)

Número de módulos por string: 20

Agora precisamos encontrar um inversor que seja adequado para essas duas strings...



Escolha do inversor

- Vamos empregar neste projeto um inversor com potência nominal 20% abaixo da potência de pico dos módulos fotovoltaicos.
- É uma prática comum nos sistemas fotovoltaicos empregar inversores ligeiramente subdimensionados, já que os módulos fotovoltaicos raramente alcançam a sua potência de pico em condições reais de operação.

Potência de pico do sistema fotovoltaico: $40 \times 330 \text{ Wp} = 13,2 \text{ kWp}$

Potência nominal do inversor necessário: $80\% \times 13,2 \text{ kWp} = 10,56 \text{ kW}$

Um inversor com potência entre 10,5 kW e 13 kW é adequado para este projeto

Exemplo

INVERSOR SOLIS

Modelo: Solis-3P12K-4G

Potência: 12 kW

Saída: trifásico 380V/220V

Entrada: 2 MPPT





Compatibilidade do inversor com as strings



INVERSOR SOLIS

Modelo: Solis-3P12K-4G

Potência: 12 kW

Saída: trifásico 380V/220V

Entrada: 2 MPPT

DADOS DE ENTRADA

Máxima corrente de entrada: 22 A

Máxima corrente de curto-circuito: **17,2 A**

Tensão mínima de partida: 120 V

Tensão máxima de entrada: **1000 V**

Faixa operacional de MPPT: **160 V – 850 V**

Numero de entradas de MPPT: 2

DADOS DE SAÍDA

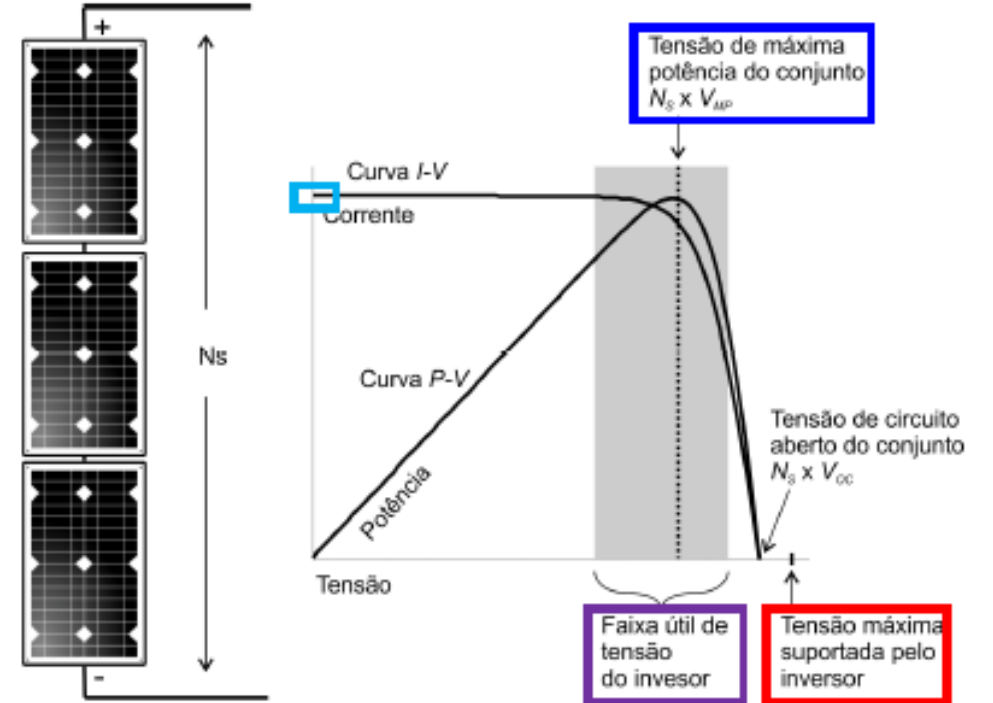
Potência nominal: 12 kW

Corrente de saída máxima: 19,1 A

Tensão de saída nominal: trifásico 380 V / 220 V

Distorção harmônica de saída: < 1,5 %

Eficiência máxima: >99,5%



Compatibilidade do inversor com as strings



DADOS DE ENTRADA

Máxima corrente de entrada: 22 A
 Máxima corrente de curto-circuito: **17.2 A**
 Tensão mínima de partida: 120 V

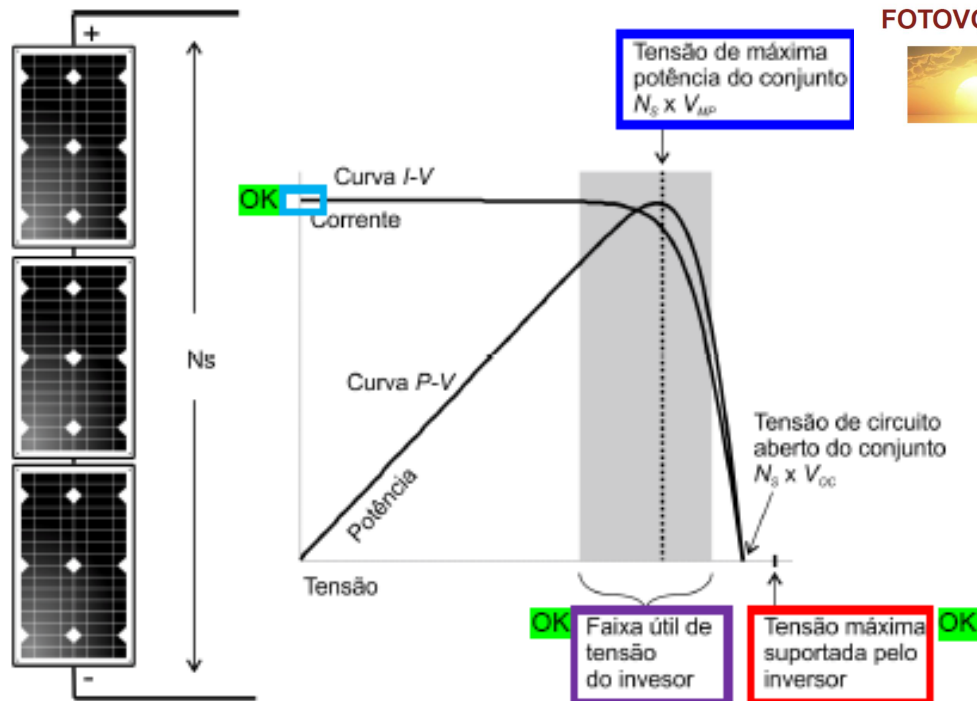
Tensão máxima de entrada: **1000 V**
 Faixa operacional de MPPT: **160 V – 850 V**
 Numero de entradas de MPPT: 2

DADOS DOS MÓDULOS

Rated Power in Watts-Pmax(Wp)	330
Open Circuit Voltage-Voc(V)	46.3
Short Circuit Current-Isc(A)	9.29
Maximum Power Voltage-Vmpp(V)	37.6
Maximum Power Current-Impp(A)	8.78

DADOS DAS STRINGS

Tensão de circuito aberto: $20 \times 46,3 \text{ V} = \mathbf{926 \text{ V}}$ **OK**
 Tensão de MPP (maximum power point): $20 \times 752 \text{ V}$ **OK**
 Corrente máxima: $1 \times \mathbf{9,29 \text{ A}}$ **OK**



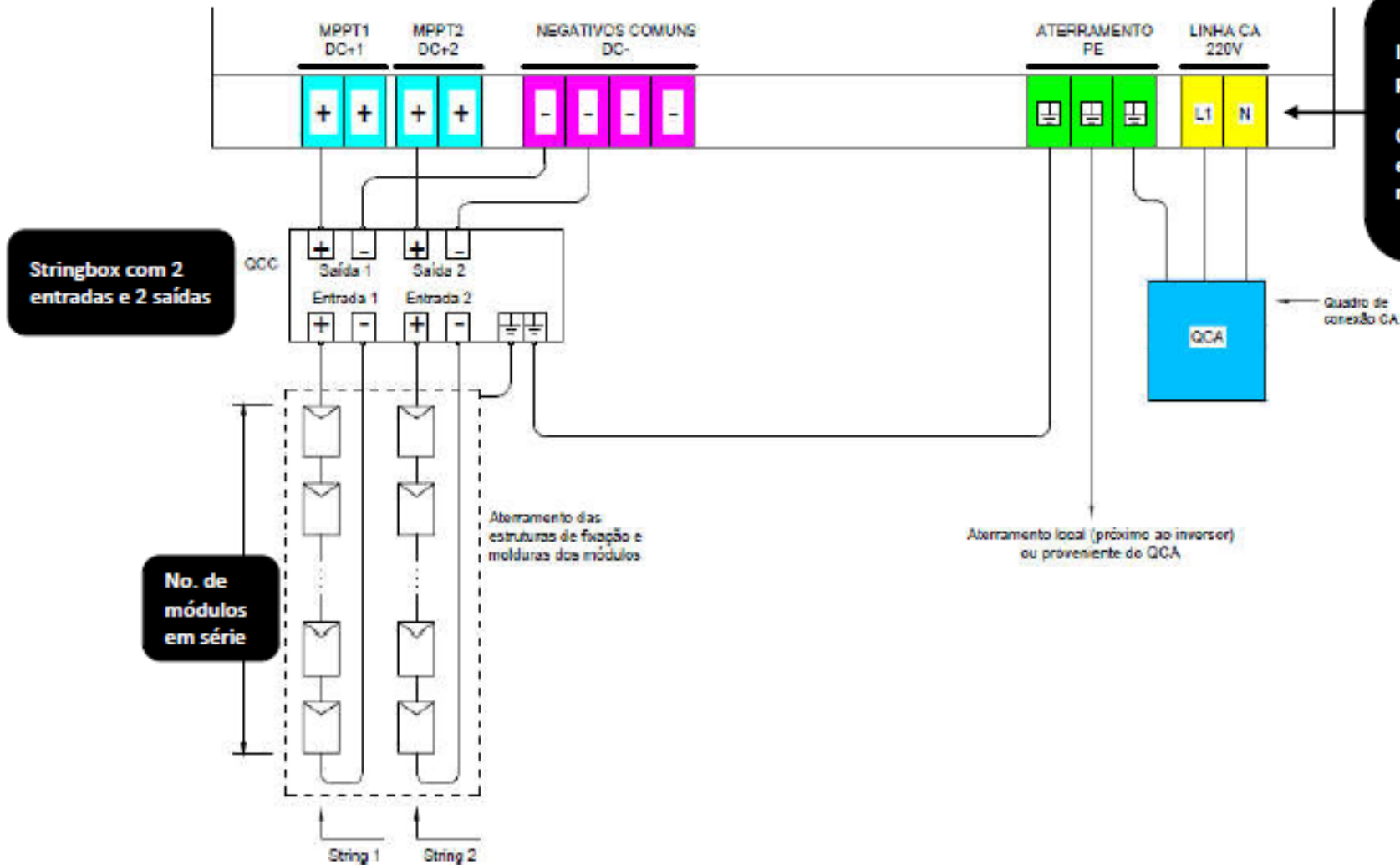
É importante verificar cada detalhe das características dos módulos e dos inversores. Neste caso constatamos que é possível ter strings com 20 módulos no inversor escolhido.

A tensão de circuito aberto está próxima da tensão máxima suportada pelo inversor (1000 V). Tipicamente ocorre um aumento de 8% na tensão de saída quando a temperatura ambiente chega a 5 °C. Então este inversor pode trabalhar com strings de 20 módulos na maior parte das localidades brasileiras nas regiões Sudeste, Centro-Oeste, Norte e Nordeste.

Em localidades com temperaturas muito baixas pode ser necessário escolher outro inversor ou reduzir o número de módulos por string.



Diagrama elétrico de um sistema fotovoltaico (exemplo)



Inversor monofásico, com 2 fios de saída, para ligar em 220 VCA F-F ou 220 VCA F-N

Obs: diferente do inversor que usamos no exemplo de dimensionamento mostrado nos slides anteriores

Diagrama elétrico de um sistema fotovoltaico (exemplo)

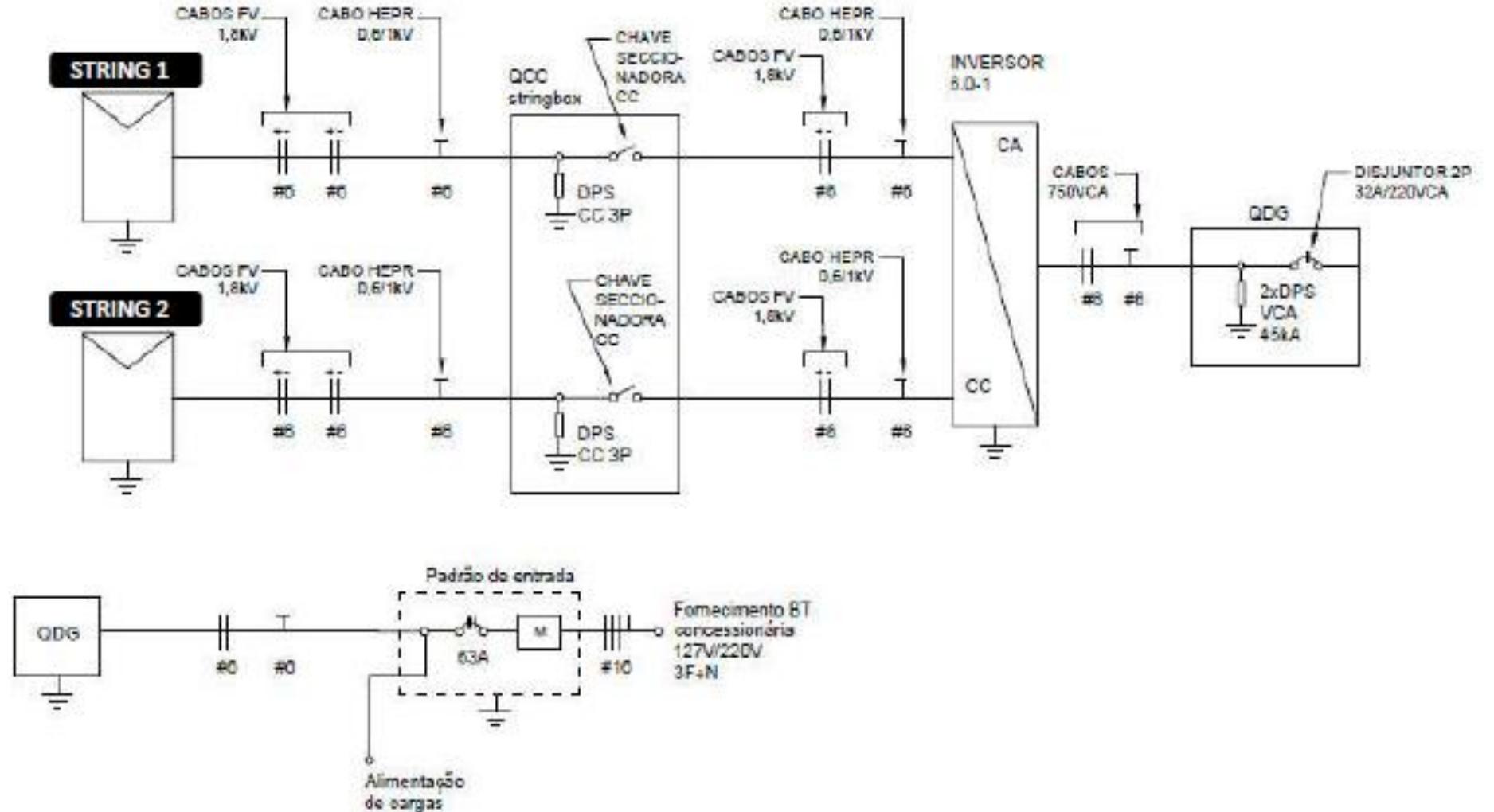
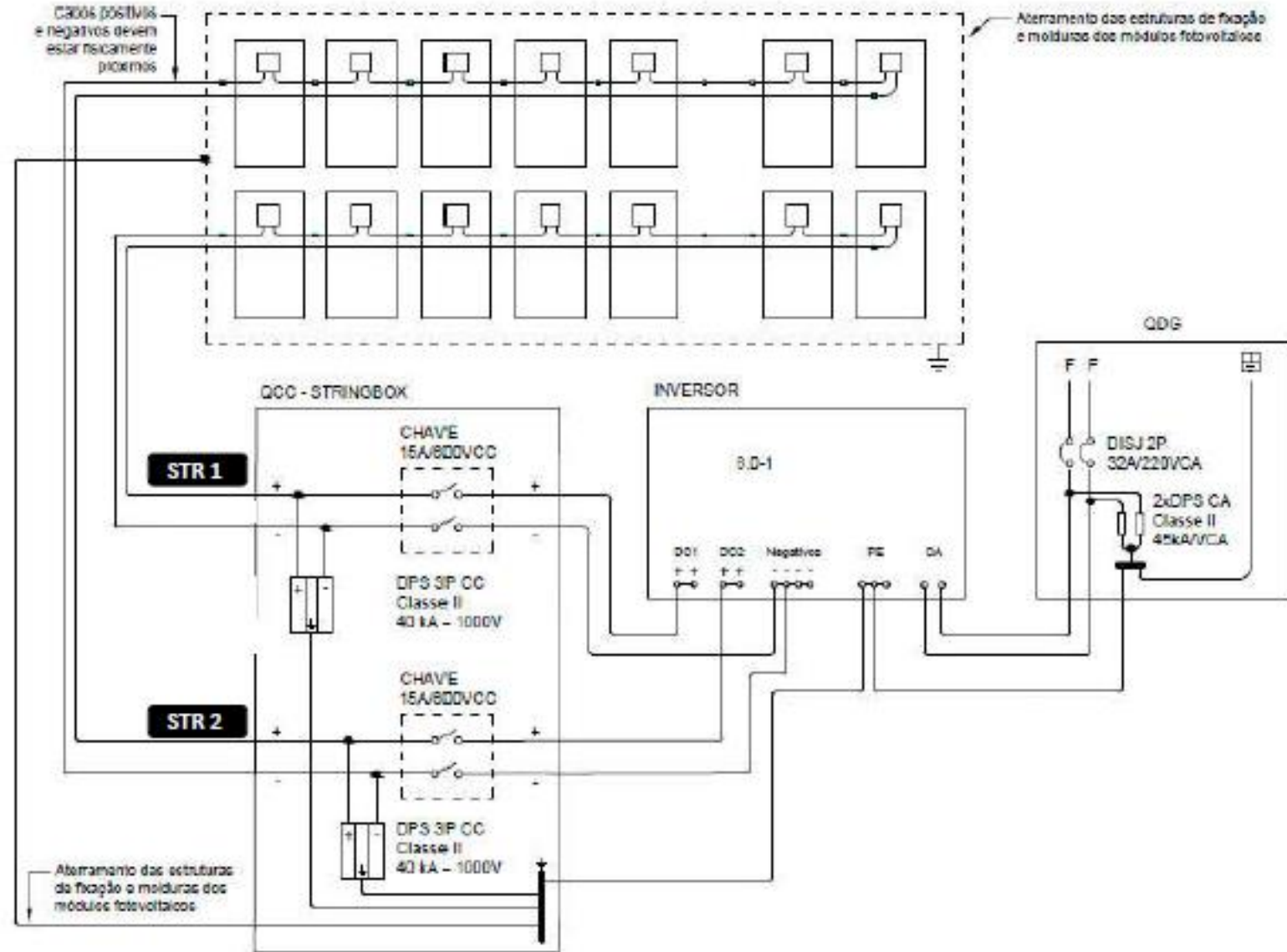


Diagrama elétrico de um sistema fotovoltaico (exemplo)





Para projetistas de sistemas fotovoltaicos:

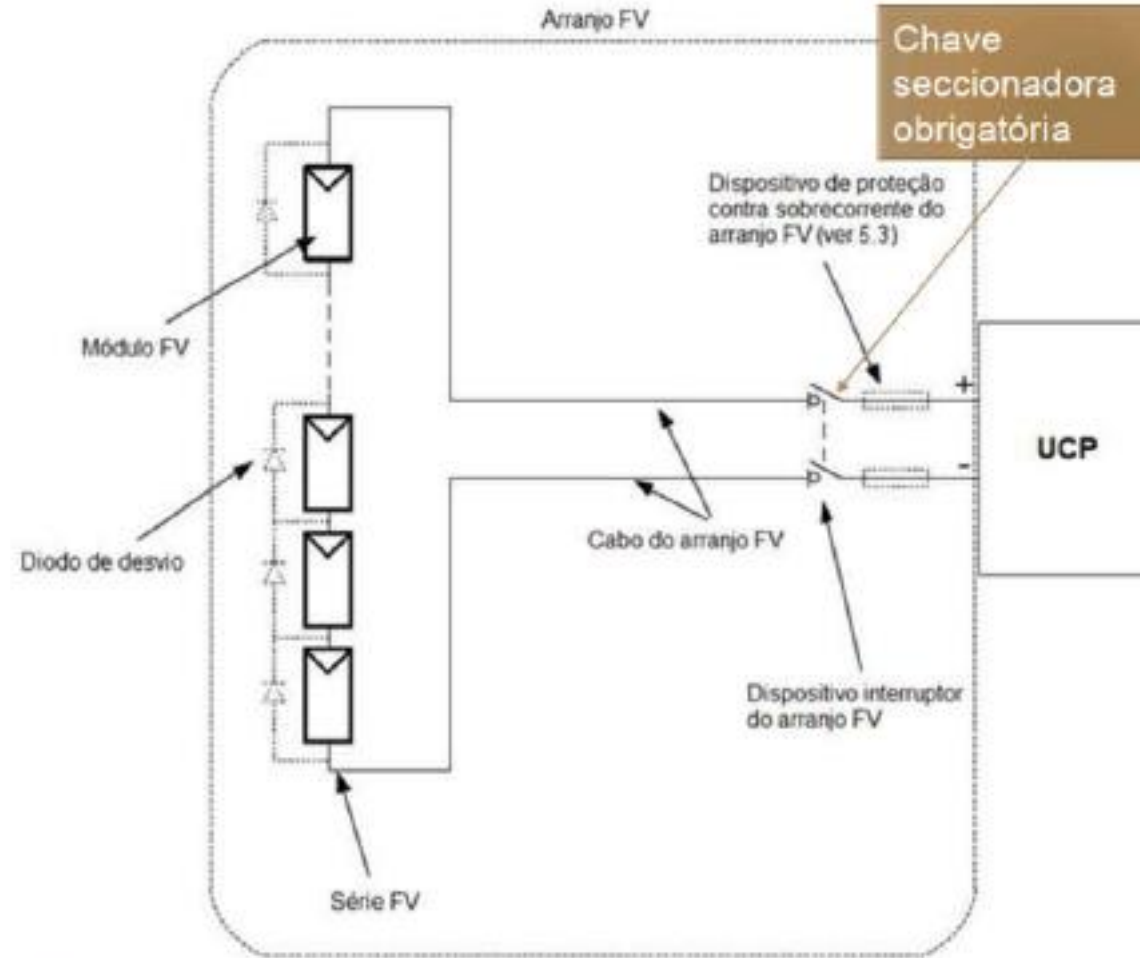
- **NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão** – Apresenta os requisitos para a instalação de sistemas elétricos (do inversor até a rede)
- **NBR16690 de 10/2019 - Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos - Requisitos de projeto**
- **PRODIST MÓDULO 3 SEÇÃO 3.7** – Apresenta os procedimentos para acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema de distribuição
- **NBR 16274 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede** — Requisitos mínimos para documentação, ensaios de comissionamento, inspeção e avaliação de desempenho
- **NORMAS DA DISTRIBUIDORA LOCAL** – Apresenta especificidades da rede elétrica onde o sistema será instalado

Para fabricantes de inversores:

- **NBR 16150 de 03/2013 - Sistemas fotovoltaicos (FV)** — Características da interface de conexão com a rede elétrica de distribuição — Procedimento de ensaio de conformidade
- **NBR IEC 62116 de 03/2012 - Procedimento de ensaio de anti-ilhamento para inversores de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica**



Diagrama do arranjo fotovoltaico – caso com **apenas uma série** fotovoltaica.



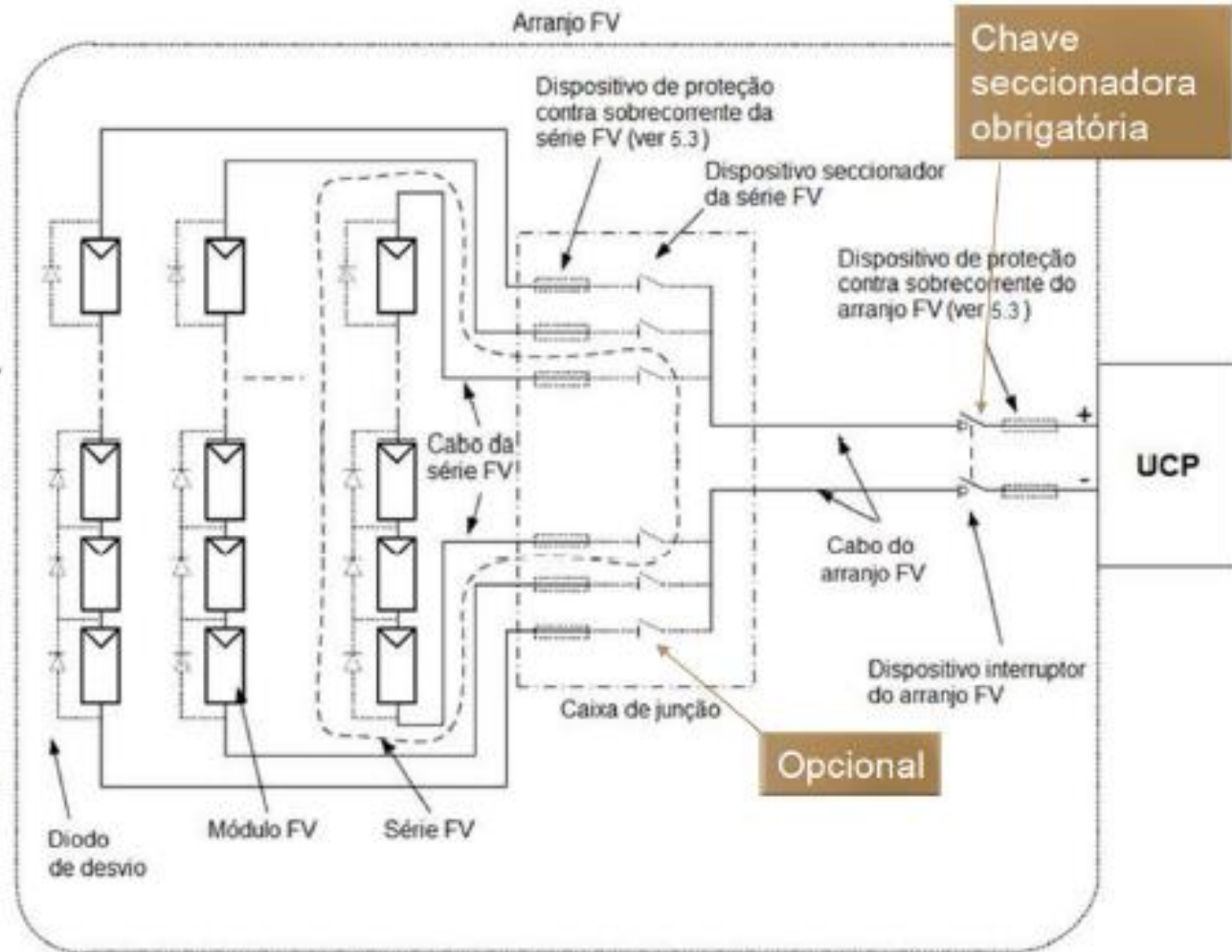
Legenda

- Elementos que não são necessário em todos os casos
- - - Limite do sistema ou subsistema



Diagrama do arranjo fotovoltaico - caso com múltiplas séries fotovoltaicas

NOTA: Em alguns sistemas, o cabo do arranjo fotovoltaico pode não existir e todas as séries fotovoltaicas podem ser terminadas em uma caixa de junção adjacente ao inversor ou dentro do inversor



Legenda

- Elementos que não são necessário em todos os casos
- - - Encapsulamento
- - - Limite do sistema ou subsistema

Opcional