

NOÇÕES BÁSICAS DE ENERGIA SOLAR



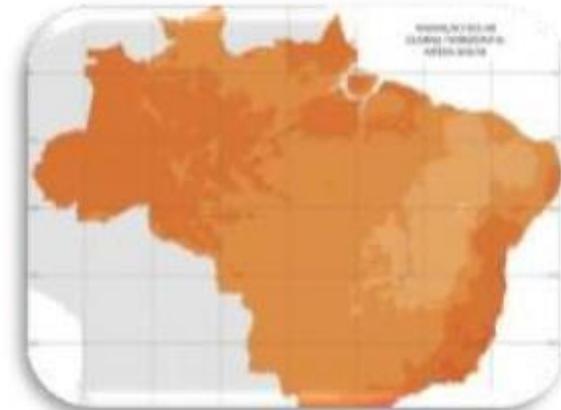
KSA
ENERGIA SOLAR

Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

PROFESSOR: KLEBER SANTANA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Módulo II

Sistemas fotovoltaicos
com baterias





Conceitos básicos
de eletricidade

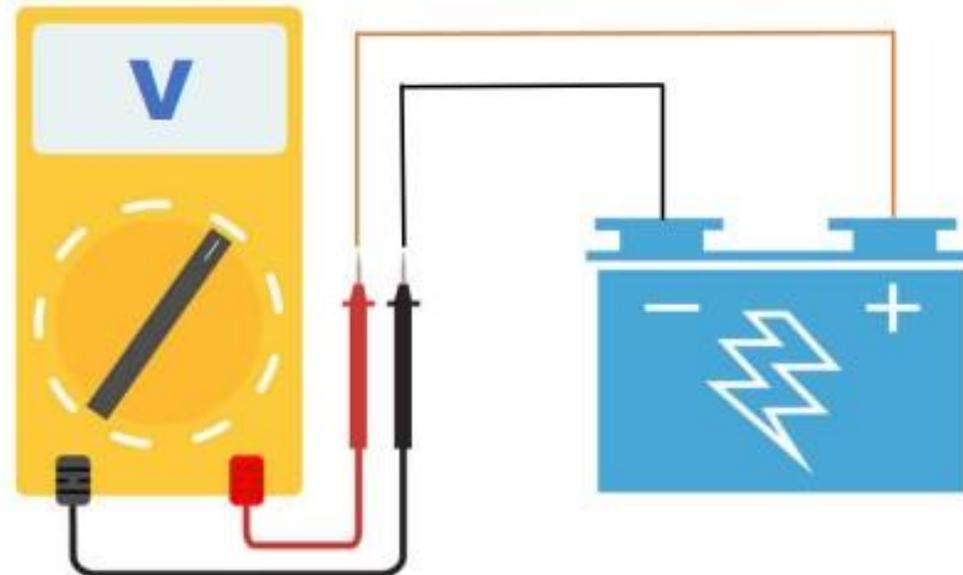




Tensão elétrica

- Tensão é a diferença de potencial medida entre dois terminais de uma fonte elétrica
- Exemplos de fontes: bateria, pilha, rede elétrica, módulo fotovoltaico
- A tensão é medida em volts [símbolo: V]
- Nome popular da tensão elétrica: “voltagem”

A **tensão** pode ser medida com um multímetro no modo “voltímetro”.

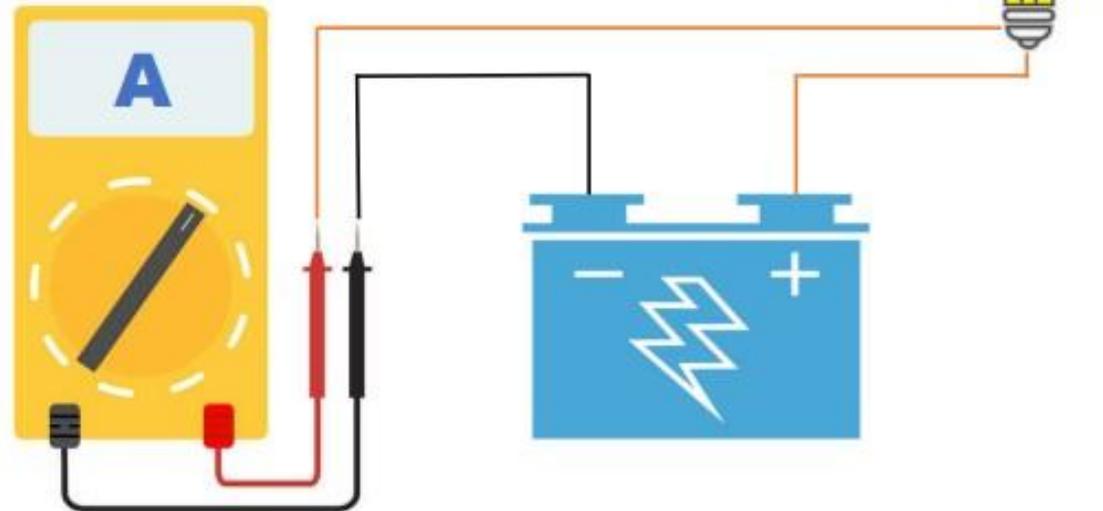




Corrente elétrica

- Intensidade de **corrente elétrica** é quantidade de **carga elétrica** que circula em um condutor **por unidade de tempo**
- Em linguagem simples, a intensidade da corrente é uma medida da quantidade de elétrons que se deslocam por um condutor durante um determinado intervalo de tempo
- A corrente elétrica existe em um circuito fechado no qual existem uma fonte de tensão e uma carga
- A intensidade da corrente elétrica é medida em ampères [símbolo: A]
- Nome popular da tensão elétrica: “amperagem”

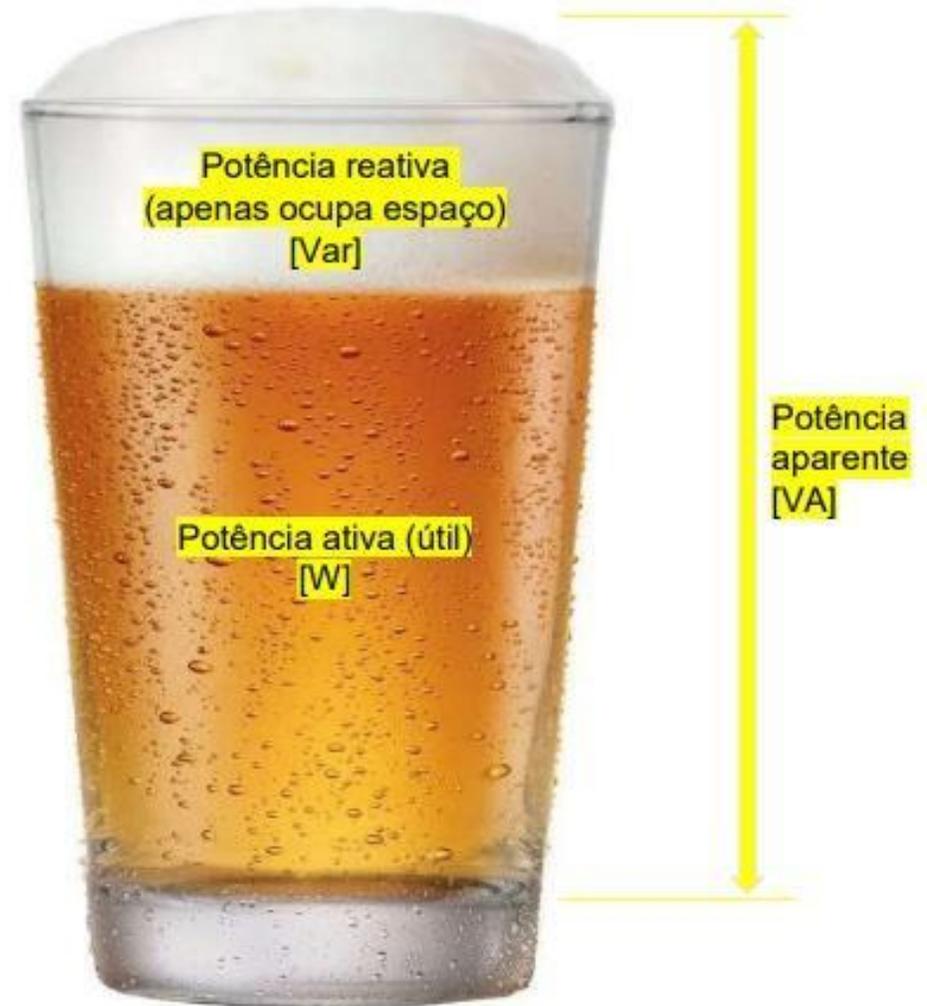
A intensidade da corrente pode ser medida com um multímetro no modo “amperímetro”.





Potência elétrica

- Potência é o produto da tensão [V] e da intensidade de corrente elétrica [A]
- A potência elétrica expressa a quantidade de energia consumida ou produzida por um equipamento em um dado intervalo de tempo. Em resumo: potência é a energia dividida pelo tempo.
- São conhecidos três tipos de potência elétrica :
 - Potência ativa, medida em watt [W]: é a potência útil de uma instalação elétrica. É a potência que é convertida, transformada ou utilizada.
 - Potência reativa, medida em volt-ampère reativo [Var]: é a energia que não se transforma e não é utilizada no circuito. A potência reativa apenas circula pelas instalações elétricas, ocupando espaço nos condutores elétricos. É uma potência não útil.
 - Potência aparente, medida em volt-ampère [VA]: é a soma das potências ativa e aparente.





Watt [W] e watt-hora [Wh]

Watt (**W**) é uma unidade de **potência**. O **W** é maiúsculo.
Um quillowatt (**kW**) é igual a 1.000 W. O **k** é minúsculo.
Um megawatt (**MW**) é igual a 1.000.000 W. O **M** é maiúsculo.

Watt-hora (**Wh**) é uma unidade de **energia**. A energia depende do tempo. Por isso colocamos a hora (**h**) na frente do watt (**W**).

Você também pode dizer “watt vezes hora” (não é comum, mas está correto). Só não diga “watt/hora”. Watt por hora não existe!

Você também pode usar o quillowatt-hora (kWh). Um kWh é igual a 1.000 Wh.

Exemplo:



Potência da
lâmpada =
20W



Ligada por 10 horas: consome 200 Wh
Ligada por 100 horas: consome 2000 Wh



Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Conceitos
básicos de
sistemas off-grid





Aplicações dos sistemas off-grid

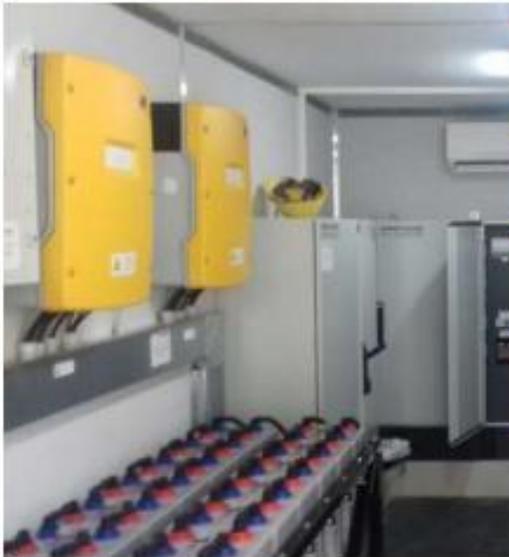
Sistemas de pequeno porte: para abastecer pequenas residências, sistemas de bombeamento e aplicações móveis





Aplicações dos sistemas off-grid

Sistemas de médio e grande portes: para abastecer residências, escolas, empresas ou até pequenos vilarejos

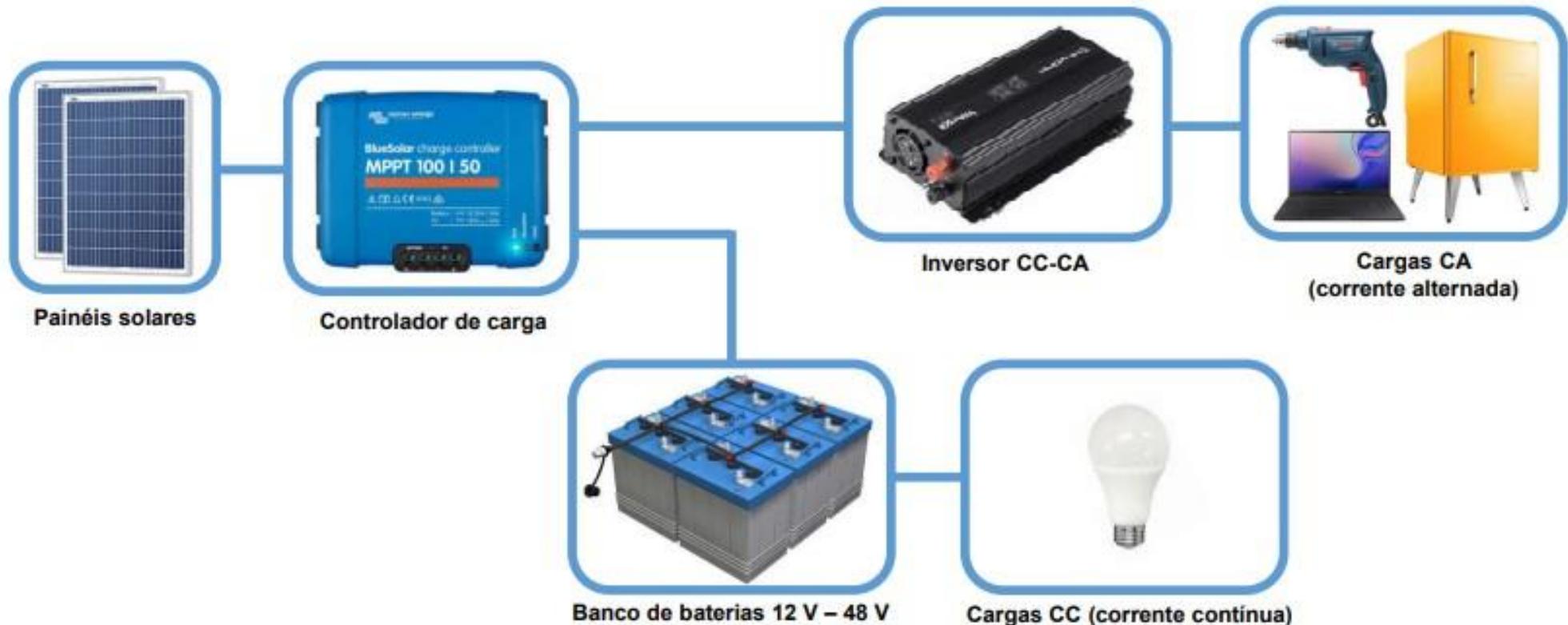




Sistema off-grid de pequeno porte com inversor – organização típica

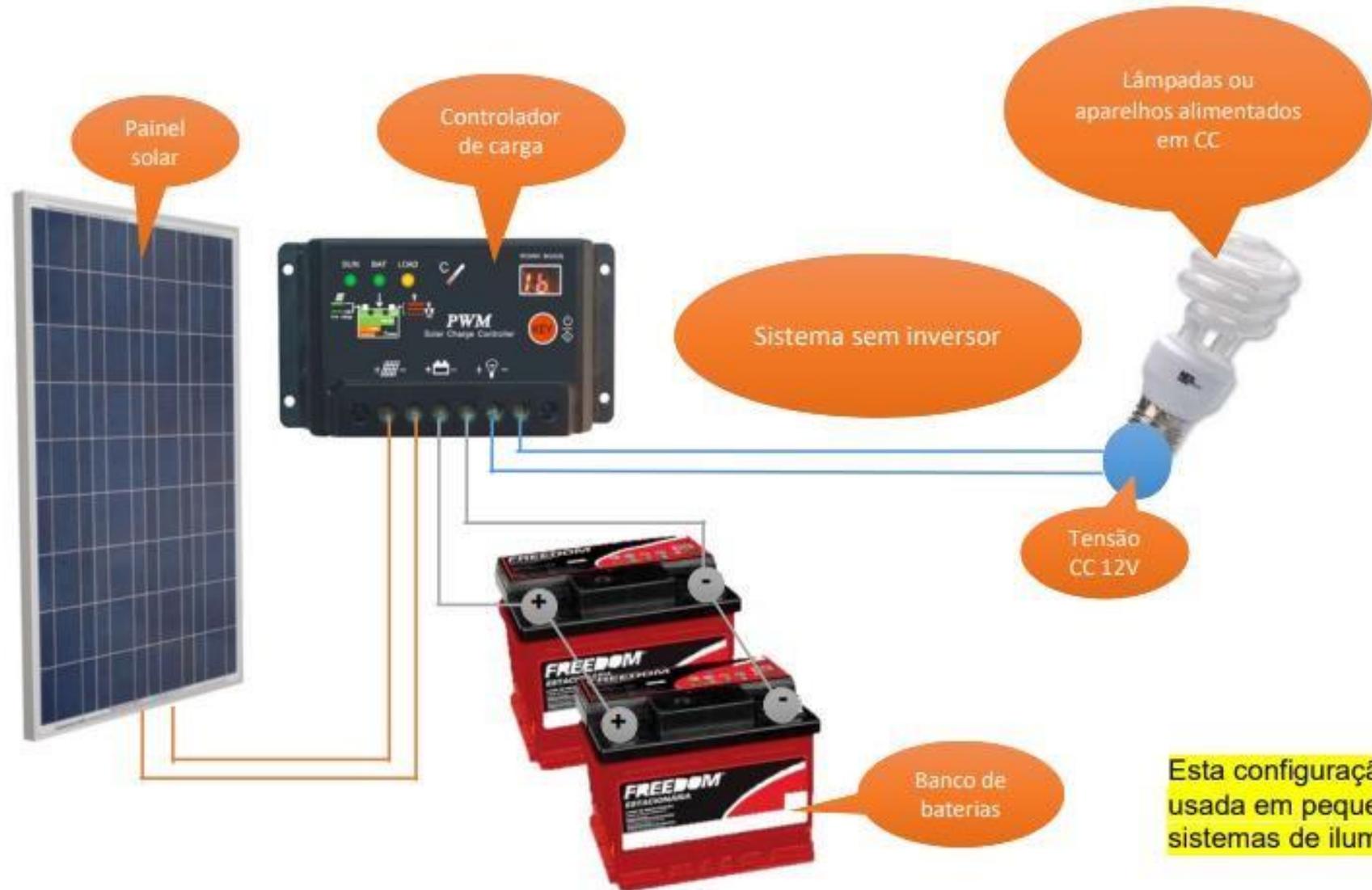
Componentes:

- Módulos fotovoltaicos
- Controlador de carga
- Banco de baterias de baixa tensão (12 V – 48 V)
- Inversor CC-CA





Sistema off-grid de pequeno porte sem inversor – organização típica



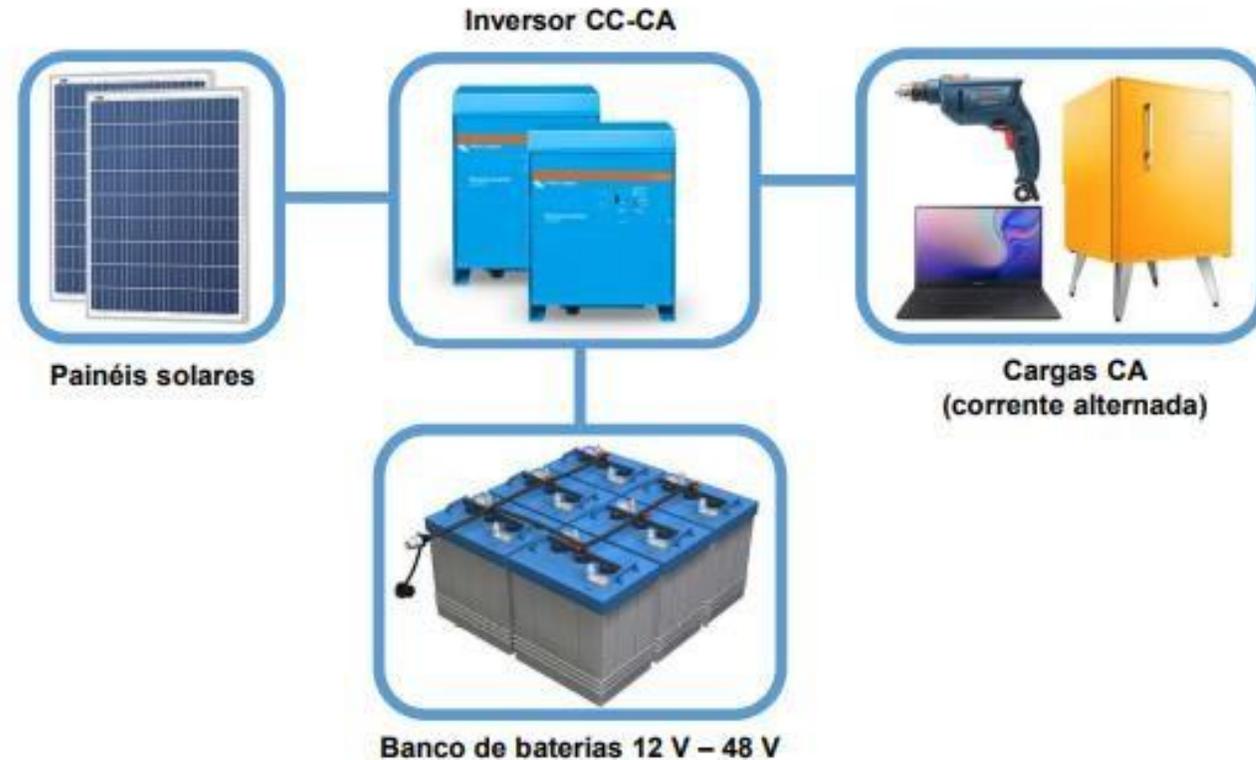
Esta configuração é usada em pequenos sistemas de iluminação



Sistema off-grid de médio porte – organização típica

Componentes:

- Um ou mais inversores CC-CA com entrada para baterias e controlador de carga interno
- Banco de baterias de baixa tensão (12 V – 48 V)
- Inversor CC-CA





Sistema off-grid de grande porte – organização típica

Componentes:

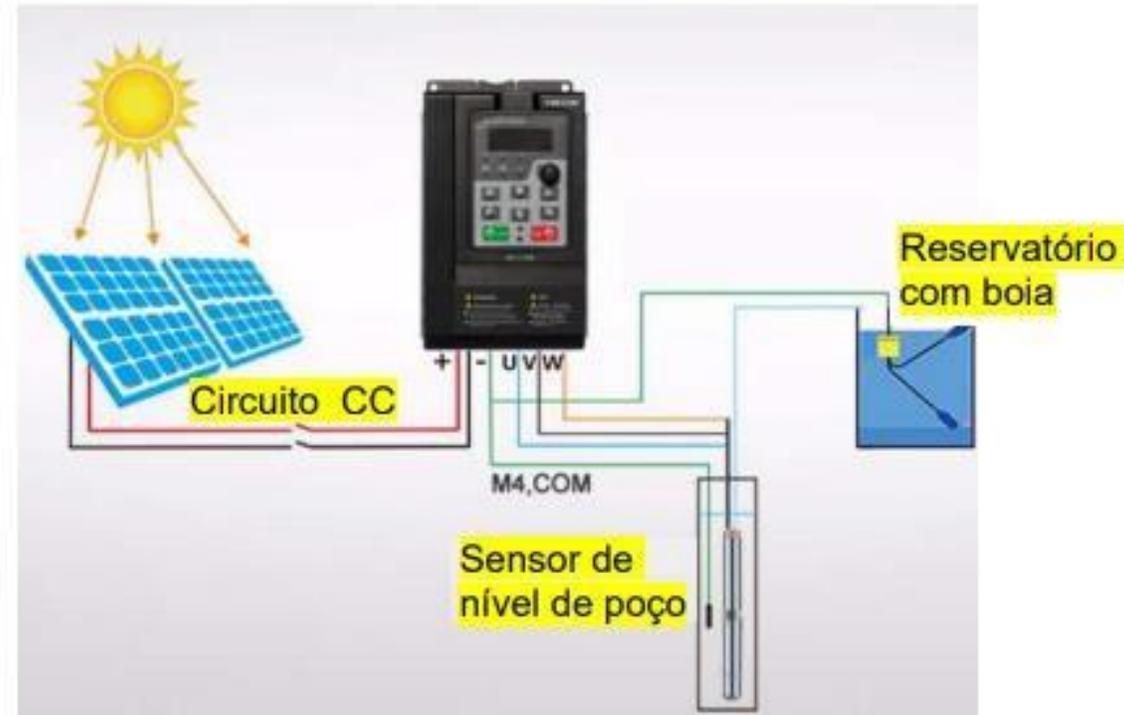
- Inversores CC-CA fonte de tensão (formadores de rede)
- Banco de baterias de grande capacidade e tensão mais elevada
- Inversores CC-CA fonte de corrente (grid-tie)





Sistemas off-grid sem baterias para bombeamento de água

- Vantagem: não requer uso de baterias
- O inversor/controlador alimenta a bomba elétrica e faz o controle de MPPT (*maximum power point tracking*) dos módulos solares





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

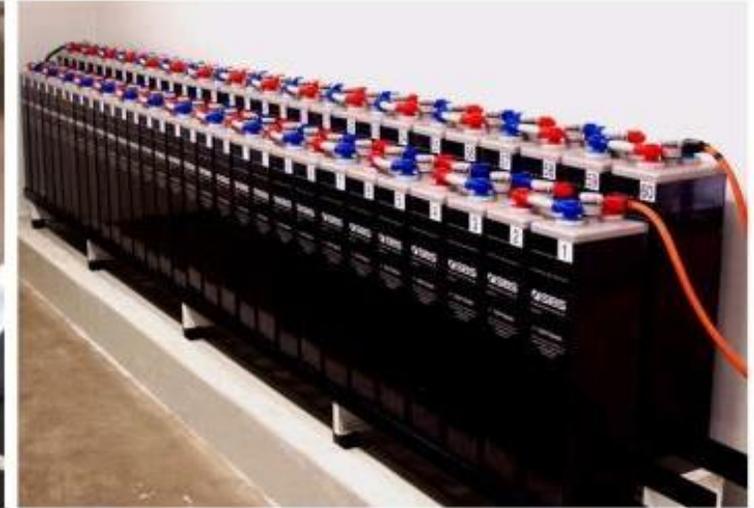
Baterias
elétricas





Baterias elétricas

- A bateria tem um papel muito importante nos sistemas fotovoltaicos autônomos (off-grid).
- A geração de energia solar varia ao longo do tempo. Para termos energia disponível (principalmente à noite) é necessário um meio de armazenamento.
- O consumo de energia também é variável. É necessário ter energia armazenada para alimentar as cargas, principalmente quando existem picos de consumo, independentemente de haver luz solar ou não.





Baterias elétricas

Funções das baterias:

- Acumulação de energia
- Balanceamento de geração e consumo
- Estabilização da tensão dos painéis solares (nos sistemas off-grid de pequeno porte com controladores de carga simples, que não têm controle de MPPT – *maximum power point tracking*)

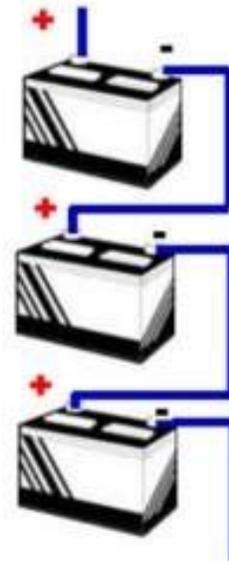
Principais especificações das baterias:

- Tecnologia (chumbo ácido, íons de lítio etc)
- Tensão (12V, 24V, 48V etc)
- Capacidade de acumulação de carga (Ah, ampère-hora)
- Profundidade de descarga (%)
- Número de ciclos de carga/descarga permitidos

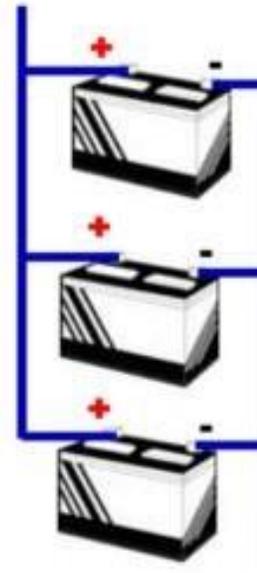


Modo de conexão das baterias

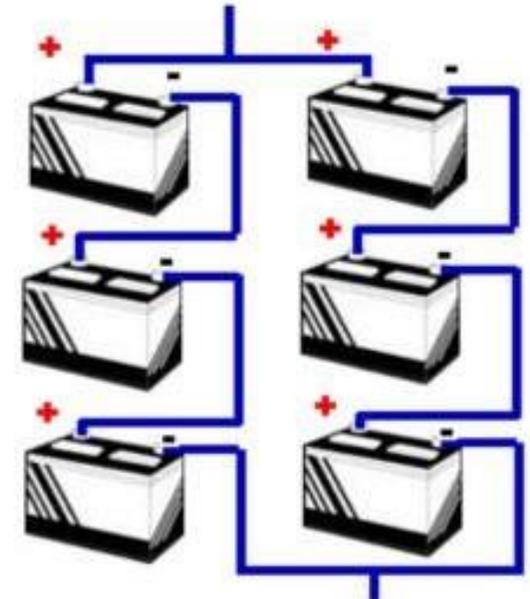
- As baterias podem ser agrupadas em **série** ou em **paralelo** para formar **bancos de baterias**.
- A associação em série permite obter tensões (V) maiores com a mesma corrente (A).
- A associação em paralelo permite somar corrente elétrica (A), mantendo-se constante a tensão (V).



série



paralela



série e paralela



Tipos de baterias

- Baterias de chumbo ácido



Bateria automotiva:
Inadequada para aplicação em sistemas fotovoltaicos.



Bateria VRLA – valve regulated lead acid):
Versão otimizada da bateria de chumbo ácido. Ideal para instalação dentro de equipamentos eletrônicos.



Bateria estacionária:
Adequada para aplicações fotovoltaicas, mas tem durabilidade (número de ciclos de vida) limitada e não permite descargas muito profundas.



Bateria estacionária de alto desempenho:
Versão mais robusta da bateria de chumbo ácido. Aceita maior número de ciclos e descargas mais profundas.



Bateria automotiva x estacionária

As **baterias automotivas** não são adequadas para aplicações em que devem fornecer corrente elétrica por períodos prolongados e **não podem se descarregar muito**.

Por outro lado, as **baterias estacionárias** podem ser usadas por um longo tempo e podem ser **descarregadas** até atingir uma **pequena porcentagem** de sua carga máxima sem se danificar (ou seja, aceitam **profundidade de descarga maior**).

Vantagens da bateria estacionária

Possui **taxa de auto-descarga menor** do que a de uma bateria automotiva convencional.

Pode **operar sem movimento**, daí o seu nome. Ela foi projetada para isso e é tecnicamente melhor do que uma bateria automotiva.

Uma bateria automotiva precisa ser movimentada pra **homogeneizar o eletrólito**, caso contrário sua vida útil é reduzida.



Baterias VRLA – *valve regulated lead acid*



Bateria de gel VRLA

- Versão melhorada da bateria de chumbo ácido convencional
- Dura mais (mais ciclos de carga e descarga)
- Aceita descargas mais profundas
- Não vaza (selada) e possui um gel em seu interior
- Pode ser usada em locais menos ventilados, pois libera menos gases
- Custo mais elevado
- Mais sensível a sobrecargas (exige controladores de carga adequados) para limitar a tensão máxima, evitando a liberação de gases



Bateria de AGM VRLA

- É muito semelhante à bateria de gel VRLA. Entretanto, no lugar do gel é empregada uma manta de microfibras de vidro que faz a absorção do eletrólito.
- Oferece maior autonomia do que a bateria de gel, mas não é recomendada para operar com muitos ciclos de carga e descarga, sendo adequada para operar mais tempo em flutuação (em nobreaks, por exemplo).
- São mais sensíveis ao calor



Bateria de chumbo ácido de alto desempenho



- Emprega eletrólito líquido
- Possui tampas de ventilação que permitem a expulsão de gases formados durante o processo de carga. Por isso recebe o nome de “bateria ventilada”.
- O eletrólito precisa ser repostado com a adição de água devido à evaporação.
- Exemplo: Bateria Solar Fulguris OPzS 250Ah - 5.000 ciclos
 - Operação com baixíssima manutenção e vida útil superior a 12 anos em condições padrão
 - Baixa auto descarga através do uso de ligas especiais nas grades positivas e negativas
 - Alta capacidade de ciclagem pelo uso de placas positivas tubulares
 - Alta capacidade de descarga
 - Boa resistência a temperaturas elevadas



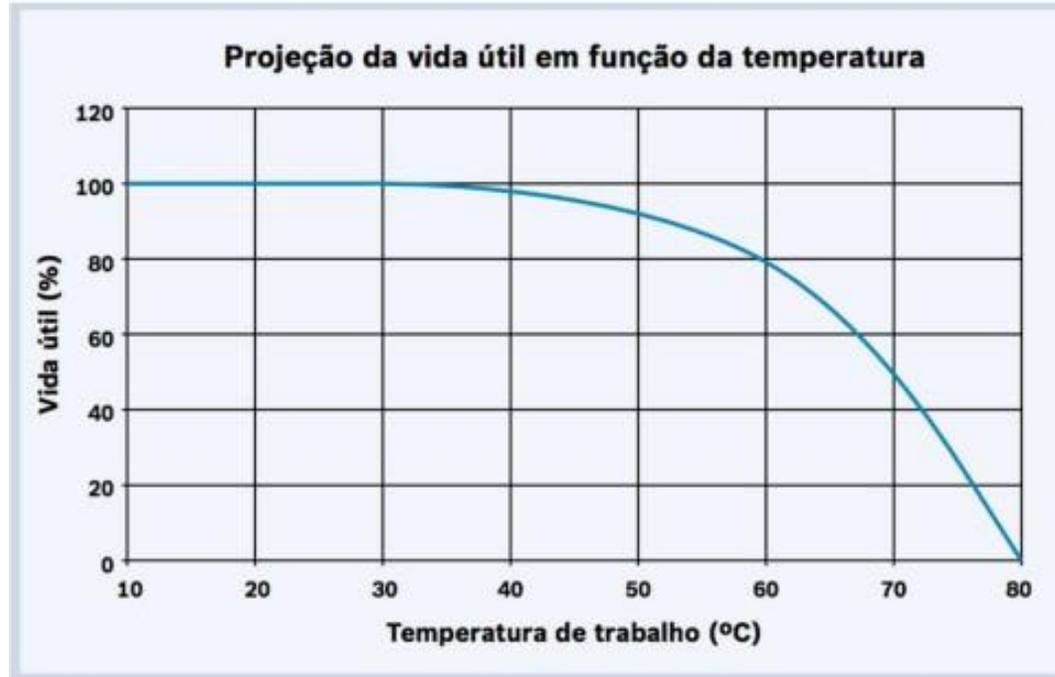
Bateria de íons de lítio



- São a opção mais moderna e de maior desempenho para sistemas fotovoltaicos
- Principais características: longa vida útil e grande densidade volumétrica de energia
- Permitem elevada taxa de descarga e grande número de ciclos
- O processo de carga afeta a vida útil e deve ser realizado com cuidado
- Em bancos de baterias as células precisam ser balanceadas. O desbalanceamento pode ocasionar aquecimento e desgaste prematuro.
- As baterias de íons de lítio não são fornecidas avulsas, como os outros tipos de baterias. Estão sempre associadas a um BMS (*battery management system*).
- O BMS da bateria deve ser colocado em comunicação com o inversor para a utilização desse tipo de bateria. O inversor deve ser parametrizado corretamente para o uso do BMS. Essa parametrização é realizada pelos fabricantes do inversor e do BMS.



Vida útil de uma bateria de chumbo ácido



Vida útil = número de
ciclos de carga e descarga

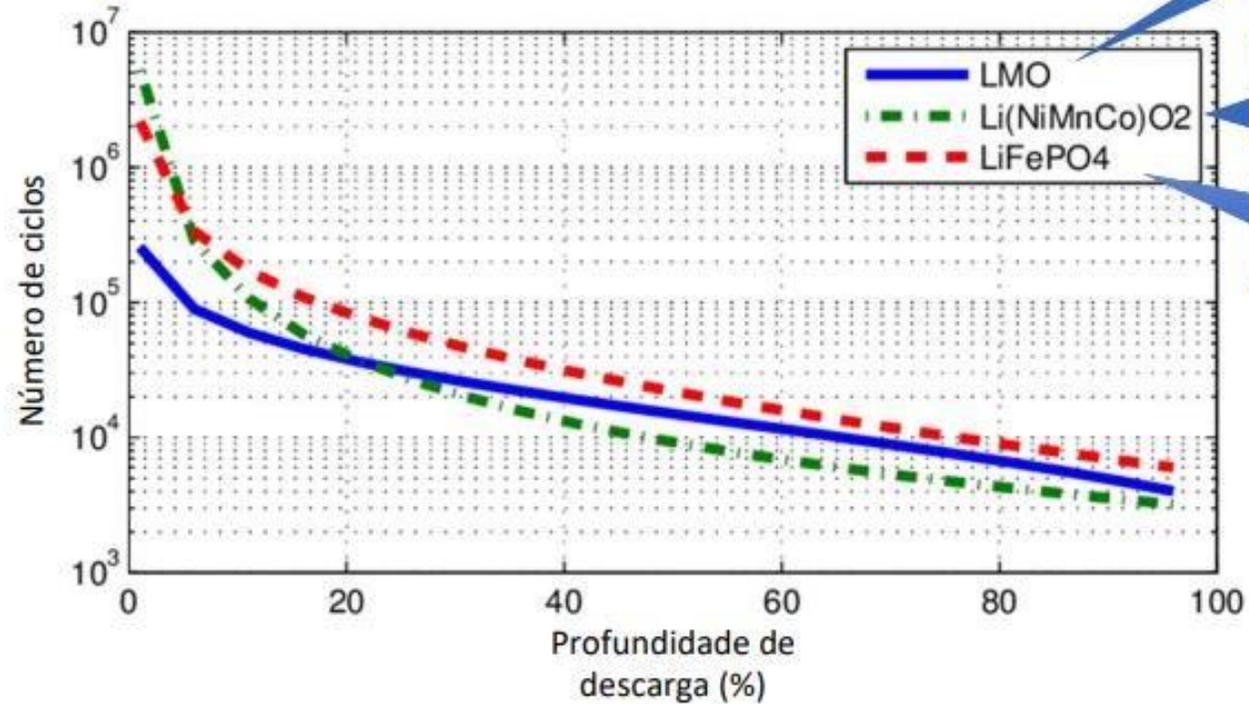
Tipicamente a vida útil de uma bateria estacionária de chumbo ácido está relacionada à profundidade de descarga da seguinte forma:

2500 ciclos – descarga de 10%
1500 ciclos – descarga de 20%
500 ciclos – descarga de 50%



Vida útil da bateria de íons de lítio

O número de ciclos de vida é mais elevado



Lítio e óxido de manganês

Lítio, níquel, manganês e cobalto

Lítio, ferro e fosfato

Existem diferentes tecnologias de baterias de lítio, com características muito parecidas.





Flutuação da bateria

- Quando a bateria está totalmente carregada ela é colocada em flutuação.
- A flutuação consiste na aplicação de uma tensão para compensar a autodescarga (perda de energia interna) da bateria.
- A tensão de flutuação deve ser cuidadosamente regulada por um controlador de carga ou por um sistema BMS (*battery management system*), em função da temperatura e do tipo de célula ou tecnologia empregada na bateria.
- Baterias de lítio devem ser flutuadas com muito cuidado, caso contrário as células podem se danificar severamente.
- Sobreaquecimento e explosão podem resultar da flutuação de uma bateria de lítio minimamente acima do valor ótimo. É por esta razão, entre outras, que as baterias de lítio são sempre acompanhadas de um equipamento eletrônico de BMS. As baterias de lítio nunca operam sozinhas.
- As baterias de chumbo ácido, por outro lado, têm um processo de flutuação menos rigoroso e podem operar ligadas diretamente a um inversor com controlador interno ou a um controlador de carga.



O controlador de carga realiza o ajuste da tensão de flutuação das baterias de chumbo ácido ventiladas ou VRLA.



As baterias de lítio requerem um sistema de BMS para sua correta operação, incluindo o processo de flutuação, que é muito delicado.



C-rate: taxa de carga ou descarga

- Toda bateria possui uma taxa “C”, que indica a velocidade com que pode ser carregada ou descarregada.

Exemplo: uma bateria de 200 Ah de capacidade pode ser carregada/descarregada nas seguintes taxas:

- 1C 200 A em 1 hora
- 2C 400 A em ½ hora
- 0,5C: 100 A em 2 horas



A C-rate afeta o desempenho ou a potência que a bateria pode entregar.

Exemplo: banco de baterias de 300 Ah com tensão de saída de 100V

Energia armazenada no banco = $300 \text{ Ah} \times 100 \text{ V} = 30.000 \text{ Wh}$
(A capacidade de armazenamento de energia não depende da taxa. É uma característica do banco.)

Taxa 1C: Fornece 30 kW de potência (300 A x 100 V), podendo ser carregada ou descarregada totalmente em 1 hora.

Taxa 0,5 C: Fornece apenas 15 kW de potência (150 A x 100V), podendo ser carregada/descarregada totalmente em 2 horas.

Taxa 3C: Fornece 90 kW (900 A x 100 V), podendo ser carregada/descarregada totalmente em 20 minutos.



Cuidados necessários com as baterias

- Manutenção do estado de carga (flutuação)
- Evitar descarga completa ou excessivamente profunda
- Evitar sobrecarga
- Operação em ambientes de temperatura controlada
- Usar controlador de carga apropriado ou BMS (*battery management system*)
- Reposição do eletrólito com água (nas baterias ventiladas)





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Dimensionamento
do banco de
baterias





Requisitos do banco de baterias

O dimensionamento leva em consideração:

- Quanta **energia** precisa ser **armazenada** (energia demandada pelo consumidor)
- O tipo de bateria a ser usada
- **Profundidade de descarga** permitida (ou desejada pelo projetista)
- A tensão da bateria usada
- A tensão desejada no banco
- A forma de organização das baterias





Determinação do número de baterias em série

Número de baterias em série:

$$N_{BS} = \frac{V_{\text{banco}}}{V_{\text{bat}}}$$

Número de
baterias ligadas
em série

Tensão do banco de
baterias [V]

Tensão da bateria
utilizada [V]



Capacidade de carga do banco de baterias

A capacidade (Ah) do banco de baterias é determinada pela fórmula:

$$C_{banco} = \frac{E_A}{V_{banco} \times P}$$

Energia que precisa ser armazenada [Wh]

Profundidade de descarga desejada

Capacidade de carga do banco [Ah]

Tensão do banco de baterias [V]



Escolha da profundidade de descarga

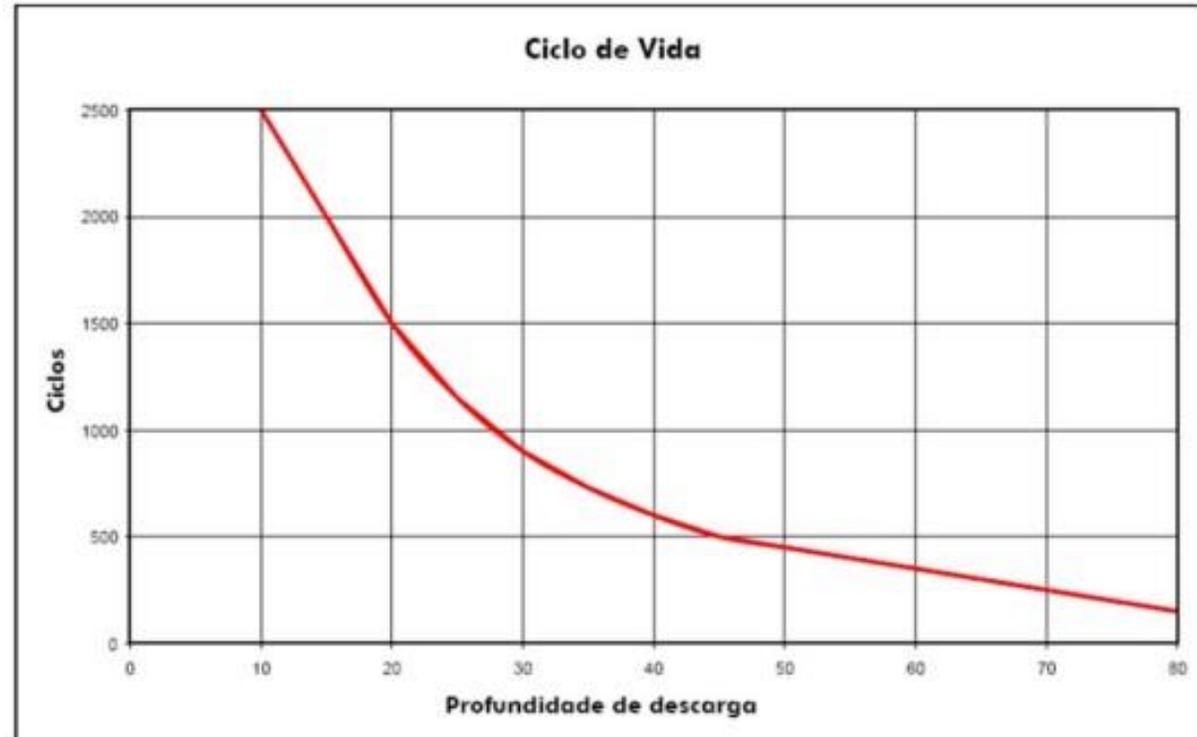
$$C_{banco} = \frac{E_A}{V_{banco} \times P}$$

← Profundidade de descarga desejada

Importante:

A profundidade de descarga das baterias deve ser escolhida já no momento do projeto do banco

A profundidade determina a duração (vida útil) das baterias





Quantidade de baterias ou conjuntos em paralelo

O número de conjuntos paralelos é determinado pela fórmula:

$$N_{BP} = \frac{C_{\text{banco}}}{C_{\text{bat}}}$$

Número de conjuntos de baterias em paralelo

Capacidade de carga do banco [Ah]

Capacidade de carga de cada bateria [Ah]



Exemplo de dimensionamento de banco de baterias

Objetivo: dimensionar um banco de baterias para um sistema que precisa armazenar **8.600 Wh**

Tensão do banco de baterias: **24 V (dado de projeto)**

Profundidade de descarga máxima de **30 % (dado de projeto)**

Modelo adotado (escolha do projetista): bateria estacionária de **12 V** com capacidade de **240 Ah (modelo adotado)**



Exemplo de dimensionamento de banco de baterias

Primeiro passo: Determinação do número de baterias ligadas em série

$$N_{BS} = \frac{V_{\text{banco}}}{V_{\text{bat}}} = \frac{24}{12} = 2$$



Exemplo de dimensionamento de banco de baterias

Segundo passo: Calcular a capacidade de carga [Ah] do banco de baterias

$$C_{banco} = \frac{8600}{24} \div 0,3 = 1195 \text{ Ah}$$

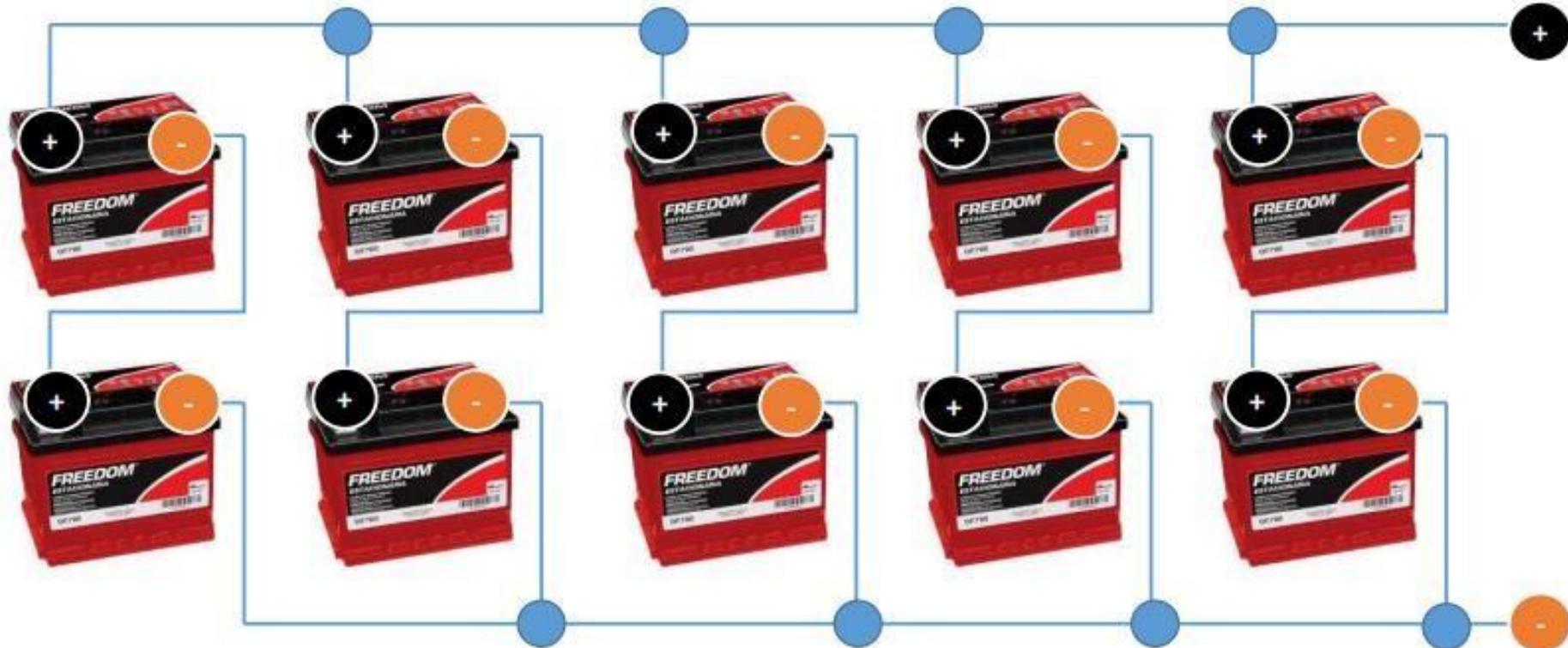
Terceiro passo: Calcular número de conjuntos de baterias em paralelo

$$N_{BP} = \frac{1195}{240} = 5$$



Exemplo de dimensionamento de banco de baterias

Banco de baterias dimensionado:





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Controlador
de carga





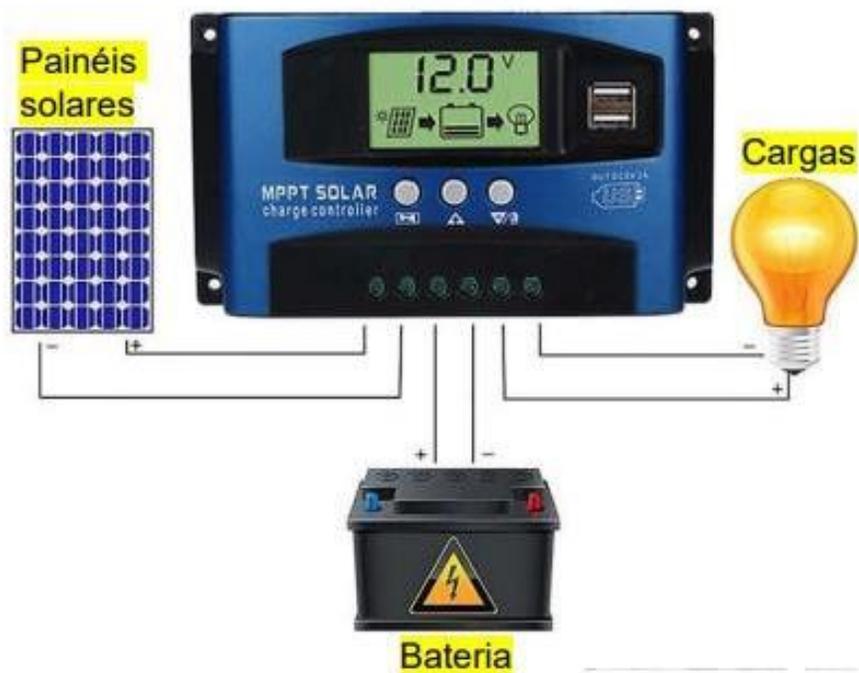
Controlador de carga para baterias de chumbo ácido

- É um componente essencial do sistema fotovoltaico autônomo de pequeno porte.
- O controlador faz a interface entre os painéis solares e o restante do sistema (baterias e cargas consumidoras).
- O controlador é necessário para manter as baterias de chumbo ácido em condições ótimas de funcionamento.
- Prolonga a vida útil das baterias.





Controlador de carga para baterias de chumbo ácido



Um painel solar não pode ser ligado diretamente à bateria sem o uso de um controlador



Funções do controlador de carga

Controle de descarga profunda (LVD – *low voltage disconnect*)

- Impede o descarregamento completo da bateria, evitando que seja danificada. Desconecta o consumidor quando a bateria atinge um nível crítico de carga.
- Nas baterias de chumbo ácido de 12V a desconexão ocorre quando a tensão da bateria estiver com tensão terminal próxima de **10,5 V**.

Controle de sobrecarga

- Impede que a bateria seja danificada por carregamento excessivo.
- A carga completa de uma bateria de chumbo ácido de 12V ocorre quando a bateria atinge tensão entre **14,4 V** e **15,5 V**.

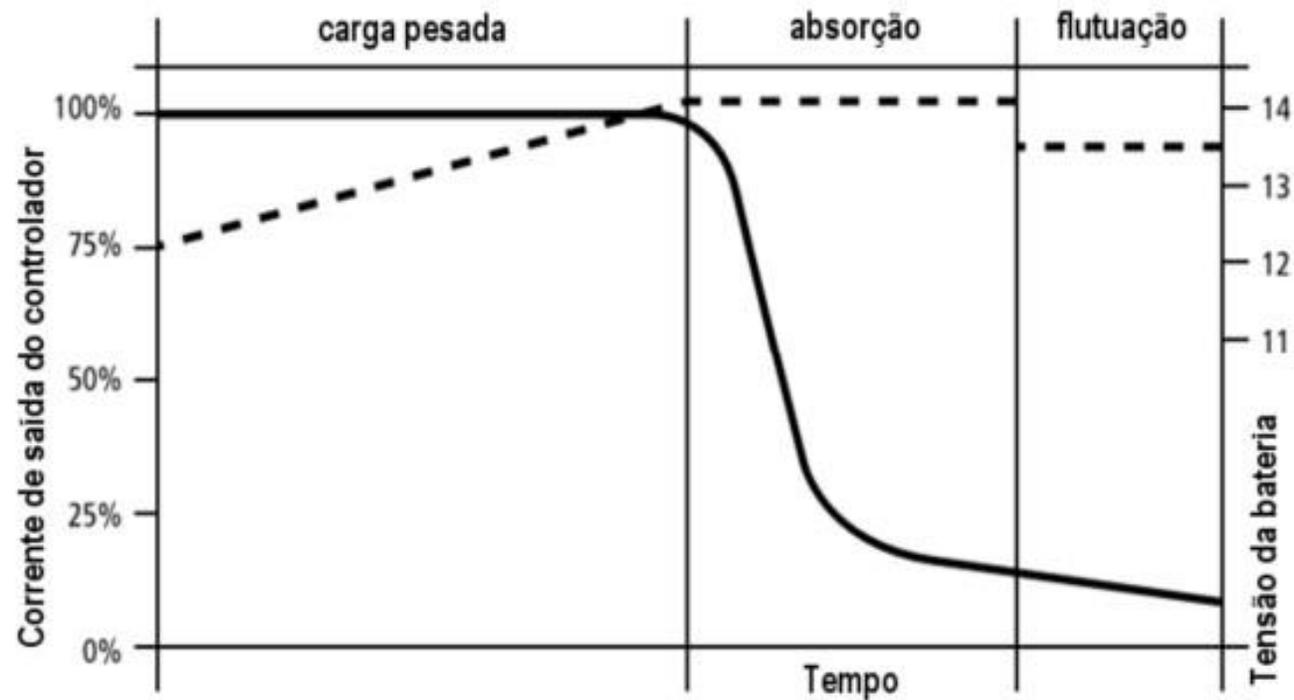




Funções do controlador de carga

Controle de carga adequado

- Faz o carregamento correto da bateria, respeitando seu **perfil de carga**



Perfil de carga de uma bateria de chumbo ácido em três etapas

LEGENDA:

tensão

corrente de carga



Funções do controlador de carga

Controle de descarga inversa

- Impede o descarregamento da bateria quando a tensão do painel é menor do que a tensão da bateria.

Controle de equalização

- Equaliza as cargas das baterias de um banco de baterias
- Esta função está disponível apenas em controladores mais sofisticados.
- No processo de equalização as baterias de um banco sofrem ligeiras sobrecargas, com o objetivo de equalizar as tensões (e as cargas) de todas as baterias do sistema.
- A equalização é feita periodicamente, de acordo com a programação do controlador.





Tipos de controladores de carga

- Controladores simples, de baixo custo – do tipo ON/OFF



- Controladores PWM (eletrônicos)



- Controladores eletrônicos com PWM e MPPT - são os mais completos

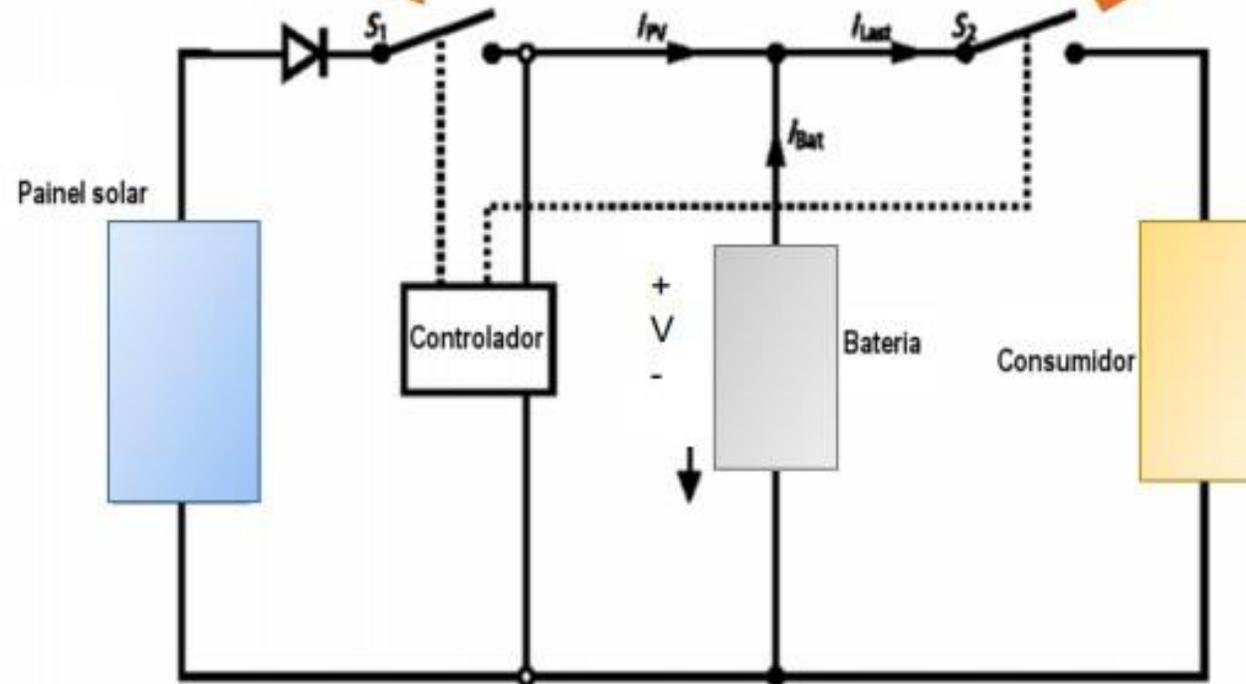




Funcionamento simplificado do controlador de carga

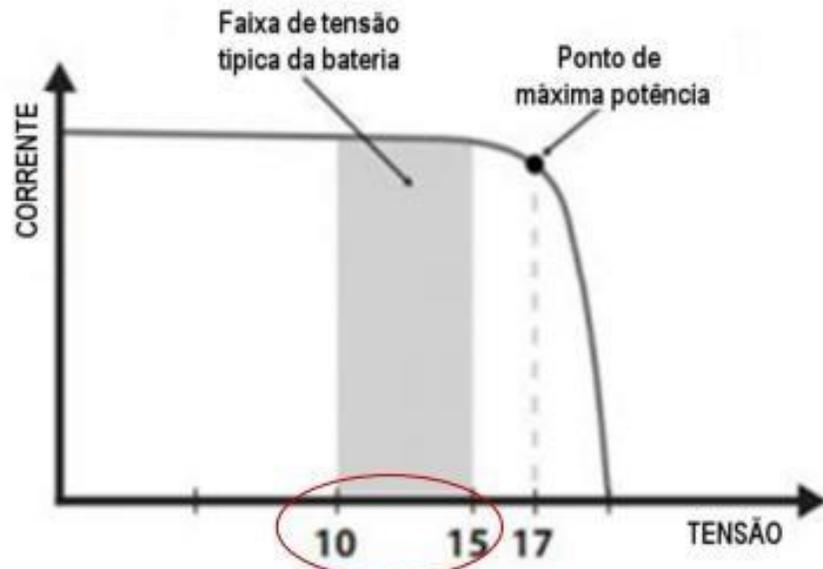
Quando a bateria está cheia o controlador abre a chave S_1 , impedindo que o painel mande mais energia

Quando a bateria está com nível de carga crítico o controlador abre a chave S_2 , impedindo o consumo de energia





Controlador de carga com MPPT (*maximum power point tracking*)



Sem MPPT o painel solar opera na mesma faixa de tensão das baterias



Com MPPT o painel solar opera exatamente na tensão necessária (máxima potência)



Como especificar um controlador de carga

- Tipo do controlador (ON/OFF, PWM, com MPPT)
- Tensão do banco de baterias (12V, 24V, etc)
- Corrente de entrada (módulo solar) e saída (aparelhos) – 10A, 20A, 30A, 60A, 80A, etc
- Valores de tensão de desligamento e da tensão de religamento – são padronizados de acordo com o tipo de bateria
 - Na maior parte dos controladores os valores são fixos
 - Existem reguladores que permitem o ajuste dos valores, o que possibilita usá-los com vários tipos de baterias (ventilada, selada, VRLA, AGM etc)





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Inversor
off-grid





Inversor CC-CA: função

- O inversor CC-CA é o equipamento que faz a conversão da tensão contínua (dos painéis e das baterias) em tensão alternada (110V, 220V)





Inversor CC-CA: modo de uso



Entrada de corrente contínua (12V, 24V, etc) – conexão do circuito formado pelo controlador de carga, baterias e painéis

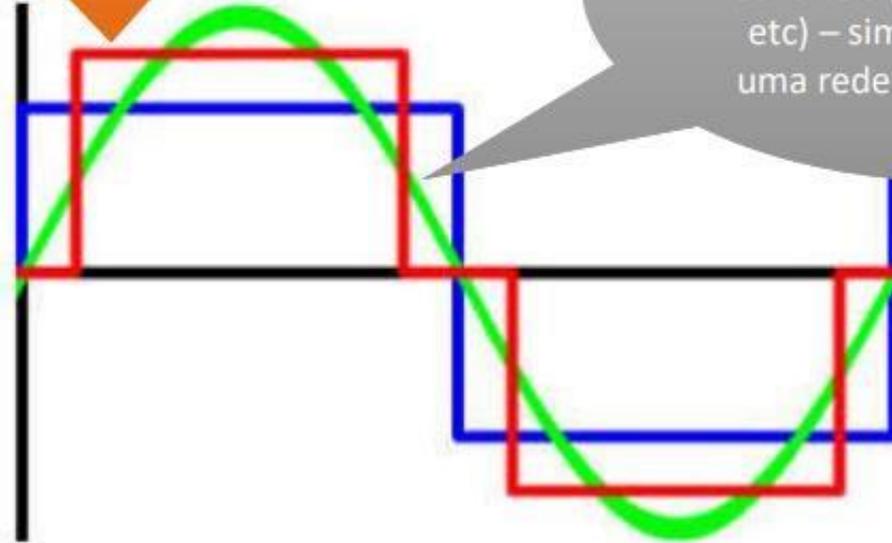


Saída de corrente alternada (CA) (110V, 220V, etc) – conexão dos aparelhos que serão alimentados (TV, lâmpadas, computador, etc)



Inversor CC-CA: onda quadrada e onda senoidal

Onda quase quadrada: tensão distorcida e de baixa qualidade, suficiente para ligar lâmpadas, computadores e outros equipamentos pouco sensíveis – inversores de baixo custo



Onda senoidal pura: é boa para alimentar equipamentos sensíveis (telecom, médicos, etc) – simula a tensão CA e uma rede elétrica tradicional

Inversores mais caros





Como especificar um inversor off-grid

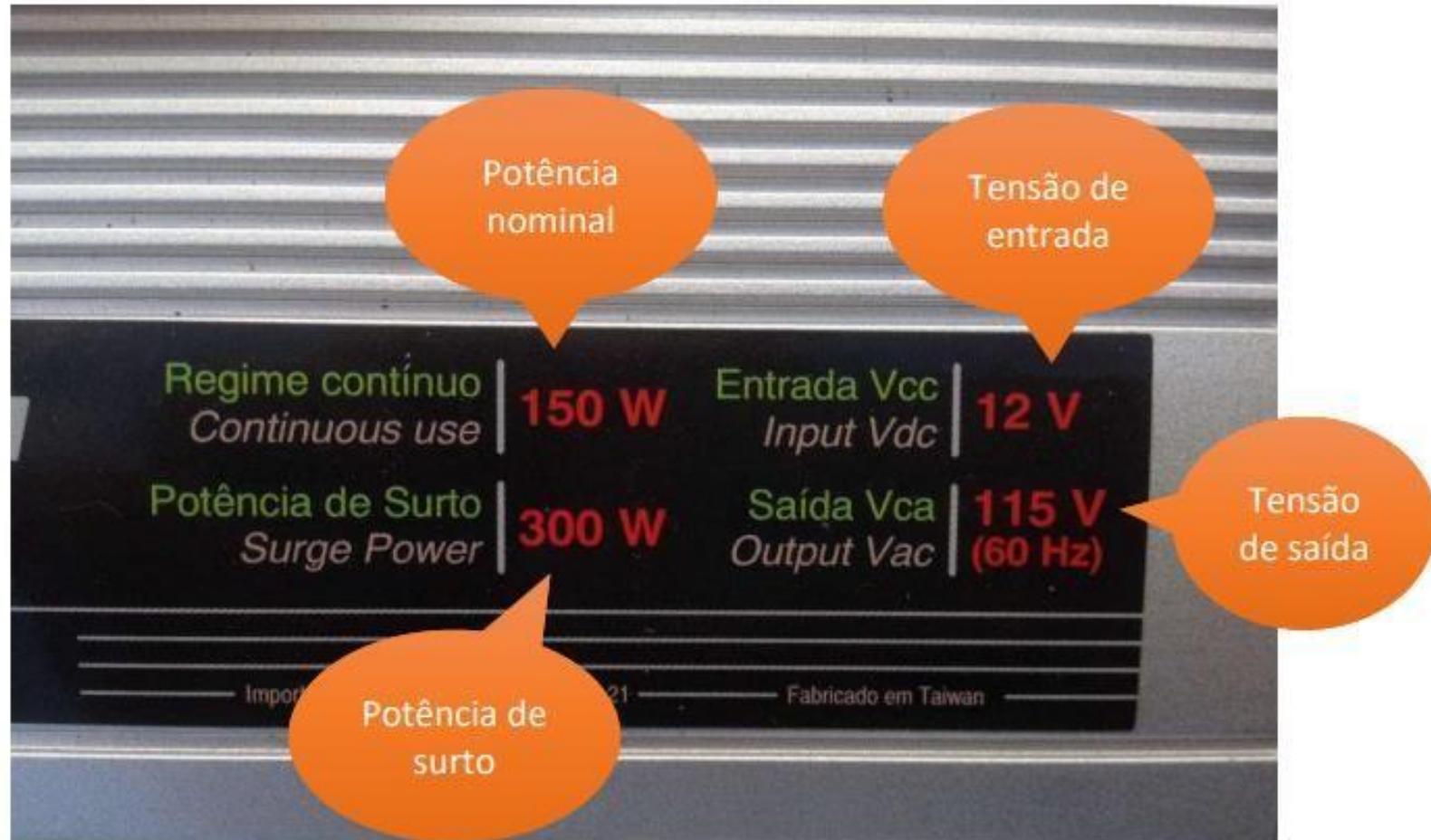
- Tipo do inversor (onda quadrada, onda senoidal pura)
- Tensão (12V, 24V, etc)
- Corrente (A)
- Potência nominal (W)
- Potência de surto (ou de pico) (W) (necessária para alimentar equipamentos com motores, que têm corrente de partida alta)





Como especificar um inversor off-grid

- Inversor off-grid típico





Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Dimensionamento
de sistemas off-grid

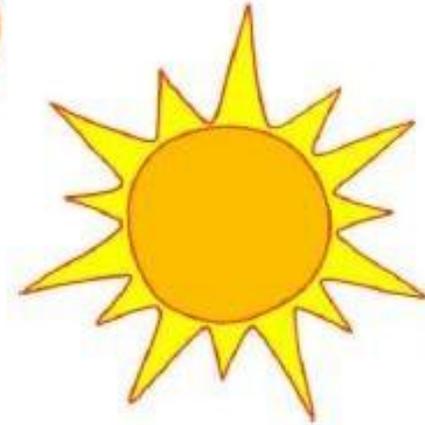




Cálculo da energia produzida pelo módulo fotovoltaico

1º passo: conhecer energia recebida do Sol no local da instalação.

Podemos consultar um
mapa solarimétrico ou um
banco de dados



Exemplo:
5000 Wh/m²/dia





Cálculo da energia produzida - desafios

- A **energia produzida** depende de vários fatores como o **ângulo de inclinação** dos módulos fotovoltaicos, o **ângulo da orientação do painel** com relação ao Norte geográfico, a **eficiência do painel** fotovoltaico e a **eficiência do inversor** eletrônico empregado no sistema.
- É muito difícil determinar a energia produzida por um sistema em função de todas essas variáveis.
- Sem uma ferramenta de software o **dimensionamento** é apenas **aproximado**. Isso é satisfatório para a maior parte dos projetos simples.



Cálculo da energia produzida usando controlador de carga com MPPT

- Este método considera o uso de controladores de carga com o recurso do **MPPT**, que conseguem extrair a máxima energia dos painéis fotovoltaicos.
- MPPT significa *Maximum Power Point Tracking*, ou seja, **Rastreamento do Ponto de Máxima Potência**

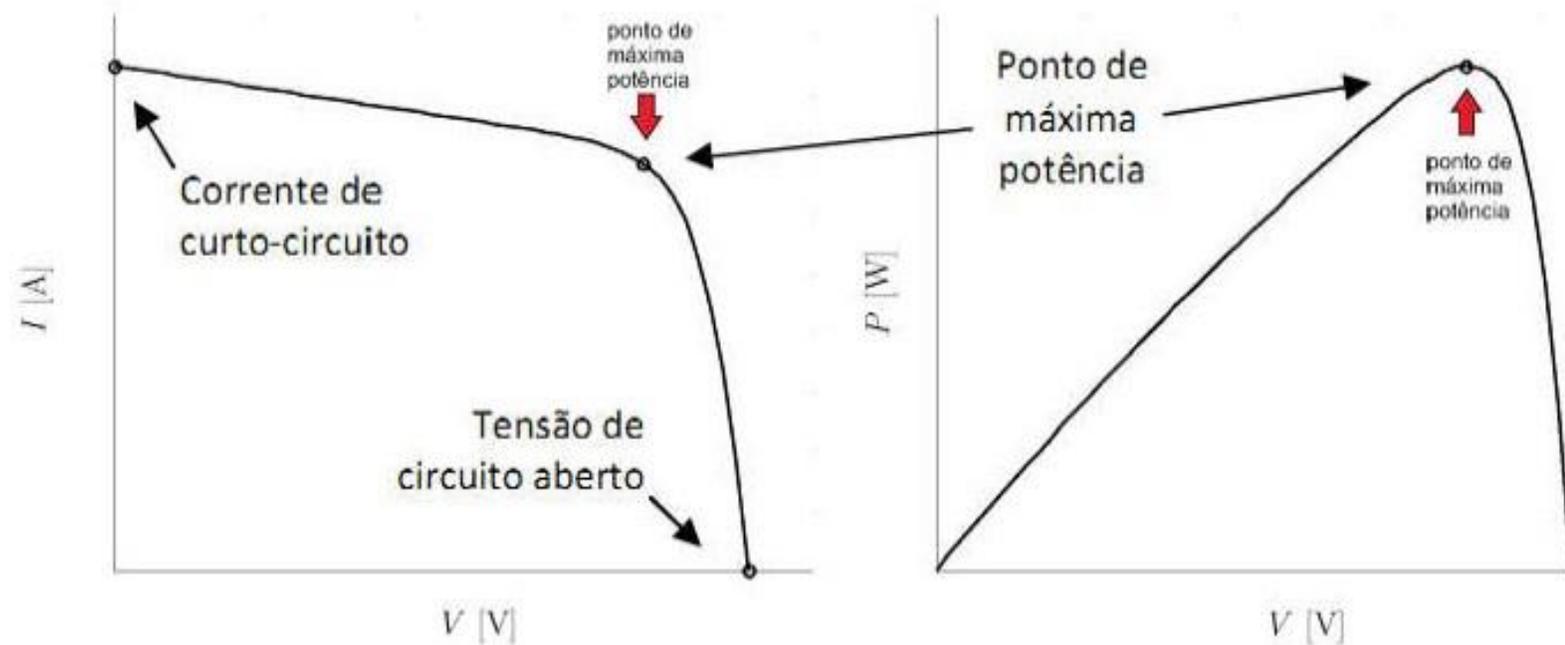


Controlador de carga com MPPT. Permite extrair a máxima potência do painel solar.



Cálculo da energia produzida usando controlador de carga com MPPT

- **Controladores** com o recurso de **MPPT** fazem o painel solar trabalhar sempre no ponto de máxima potência.





Cálculo da energia produzida pelo módulo FV usando controlador **com MPPT**

REVISÃO DO MÓDULO I: Obtenção da irradiação solar do local (Wh/m^2) e do número de horas de Sol pleno



Procedimento de cálculo:

**Irradiação
diária do
local
(Wh/m^2)**

$\div 1000 =$

**Número de
horas de
Sol pleno
(h)**

**Número de
horas de
Sol pleno
(h)**

\times

**Potência de
pico do
painel solar
(W)**

$=$

**Energia
produzida
pelo painel
(Wh)**

(por dia)



Cálculo da energia produzida pelo módulo FV usando controlador com MPPT

REVISÃO DO MÓDULO I: Obtenção da energia diária produzida pelo módulo fotovoltaico



Exemplo: Painel solar de 350 W em um local com irradiação solar de 4,8 kWh/m²/dia

$$4,8 \text{ kWh/m}^2 = 4800 \text{ Wh/m}^2 \text{ (por dia)}$$

Irradiação
diária do local
em Wh/m²

$$4800 \div 1000 = 4,8 \text{ h}$$

Horas de
Sol pleno

$$4,8 \text{ h} \times 350 \text{ W} = 1680 \text{ Wh} = 1,68 \text{ kWh} \text{ (por dia)}$$

Potência do
painel

Energia
produzida



Cálculo da energia produzida pelo módulo FV considerando o fator de performance

Exemplo: Painel solar de 350 W em um local com irradiação solar de 4,8 kWh/m²/dia

$$4,8 \text{ kWh /m}^2 = 4800 \text{ Wh/m}^2 \text{ (por dia)}$$

$$4800 \div 1000 = 4,8 \text{ h}$$

$$4,8 \text{ h} \times 350 \text{ W} = 1680 \text{ Wh} = 1,68 \text{ kWh}$$

(por dia) (por dia)

$$FP = 0,85 \rightarrow E = 1680 \text{ Wh} \times 0,85 = 1428 \text{ Wh} = 1,428 \text{ kWh}$$

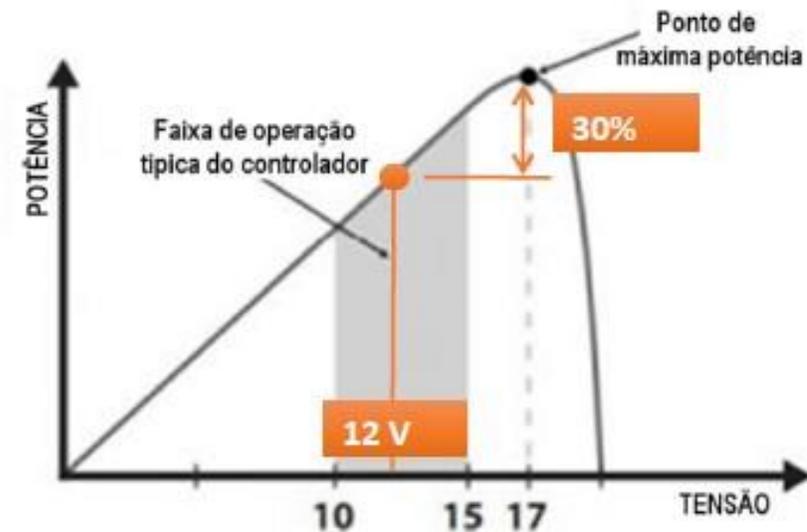
Energia diária produzida pelo módulo fotovoltaico já descontando as perdas existentes no módulo e outras perdas que podem existir em um sistema fotovoltaico real.

Pegamos o resultado anterior e agora consideramos o **fator de performance ou de desempenho** do sistema fotovoltaico (tipicamente perto de 0,8 a 0,85). Isso permite descontar as perdas térmicas dos painéis solares e outras perdas existentes nos sistemas, dando um resultado mais realista sobre a energia elétrica que efetivamente será produzida pelo módulo.



Cálculo da energia produzida pelo módulo usando controlador simples (sem MPPT)

Consideramos o uso de um controlador de carga simples, sem o recurso do MPPT. Neste caso empregamos a corrente máxima fornecida pelo painel quando está ligado a uma bateria. A tensão de operação do painel é a mesma tensão da bateria. Isso faz o painel trabalhar com uma potência menor (produzindo menos energia)





Cálculo da energia produzida pelo módulo usando controlador simples (sem MPPT)

Exemplo:

Painel solar de 150 W

$I_{sc} = 8,87 \text{ A}$ (corrente de curto circuito)

Tensão da bateria = 12 V

Potência de trabalho

Energia = Tensão x Corrente x Horas =

= 12 V x 8,87 A x Horas

Potência de trabalho

Tempo de geração

Precisamos obter o número de horas de Sol pleno do local usando o mesmo procedimento anterior (dividindo por 1.000 o valor da irradiação diária).

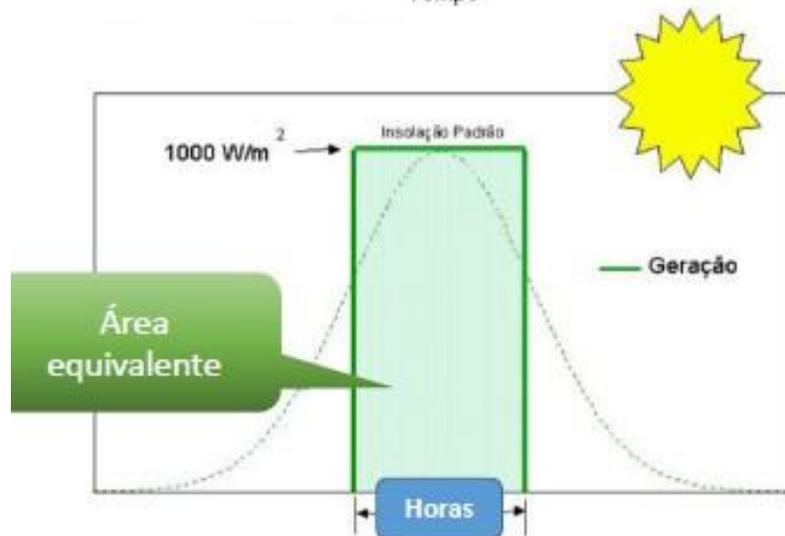
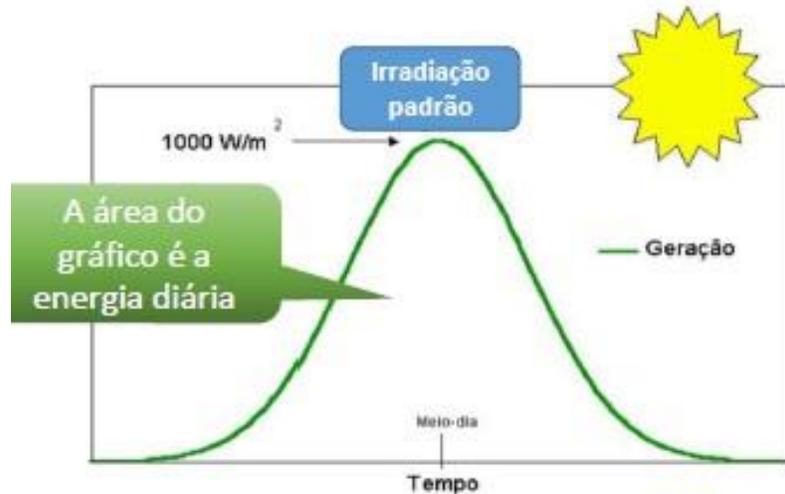
CS6C-150P	
Nominal Maximum Power at STC (Pmax)	150W
Optimum Operating Voltage (Vmp)	18.1V
Optimum Operating Current (Imp)	8.30A
Open Circuit Voltage (Voc)	22.3V
Short Circuit Current (Isc)	8.87A
Operating Temperature	
Maximum System Voltage	
Maximum Series Fuse Rating	
Power Tolerance	
Temperature Coefficient	

*Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m².

Isc (STC)

Horas de Sol pleno (HSP)

Para calcular as horas de Sol pleno (HSP) basta dividir a irradiação solar diária (Wh/m²/dia) por 1.000



Exemplo

Irradiação diária = 5,381 kWh/m²/dia = 5381 Wh/m²/dia

Número de horas de Sol pleno (considerando que a irradiância é 1000 W/m² durante o dia todo):

HSP = 5381 / 1000 = 5,381 horas



Cálculo da energia produzida pelo módulo usando controlador simples (sem MPPT)

Exemplo

Painel solar de 150 W

Isc = 8,84 A (corrente de curto circuito em STC)

Tensão da bateria = 12 V

Energia = Tensão x Corrente x Horas =

$$= 12 \text{ V} \times 8,84 \text{ A} \times 5,381 = 570,81 \text{ Wh (por dia)}$$

Energia gerada pelo
painel sem MPPT

Fator de performance

Podemos ainda incluir o fator de performance, multiplicando o resultado por 0,80 (número mais conservador) ou 0,85.



Dimensionamento do sistema autônomo (off-grid)

Primeiro passo: levantamento do consumo

O que vai ser alimentado?

Durante quanto tempo cada aparelho vai funcionar?





Cálculo da energia necessária

Primeiro passo: levantamento do consumo

$$\text{Energia} = \text{Potência} \times \text{Tempo de utilização}$$

watts (W)

horas (h)

$$W \times h = W.h \text{ (energia)}$$



Tabela de potência e tempo de uso típico dos aparelhos eletro-eletrônicos

Primeiro passo: levantamento do consumo

Aparelhos	Potência (W)	Dias de uso no mês	Tempo de utilização diária	Consumo mensal (kWh)
Ar condicionado 7.500 BTU	1000	30	8 h	240
Freezer	400	30	10 h (*)	120
Geladeira (2 portas)	300	30	10 h (*)	90.0
Geladeira (1 porta)	200	30	10 h (*)	60
Boiler elétrico	1500	30	2 h	90
Chuveiro elétrico	3500	30	40 min (**)	70
Torneira elétrica	3500	30	30 min	52
Forno elétrico	1500	30	1 h	45
Secadora de roupas	3500	12	1 h	42
Cafeteira elétrica	1000	30	1 h	30
Lavadora de louças	1500	30	40 min	30
Ventilador	100	30	8 h	24
Computador	250	30	3 h	22



Tabela de potência e tempo de uso típico dos aparelhos eletro-eletrônicos

Primeiro passo: levantamento do consumo

Aparelhos	Potência (W)	Dias de uso no mês	Tempo de utilização diária	Consumo mensal (kWh)
Lâmpada	100	30	5 h	15
TV (20 polegadas)	90	30	5 h	13
TV (14 polegadas)	60	30	5 h	9
Forno de microondas	1300	30	20 min	13
Ferro elétrico	1000	12	1 h	12
Aspirador de pó	1000	30	20 min	10
Lavadora de roupas	1500	12	30 min	9
Secador de cabelo	1000	30	10 min	5
Aparelho de som	20	30	4 h	2
Telefone sem fio	5	30	24 h	3
TV em <i>stand by</i>	6	30	19 h	3
Carregador de celular	1,5	30	5 h	0
Rádio relógio	1,6	30	24 h	1



Exemplo 1: Iluminação

Segundo passo: determinar o número de painéis solares



Etapas deste passo:

- Definir o módulo desejado no projeto (é uma escolha do cliente ou do projetista).
- Calcular a energia que um módulo produz diariamente (aprendemos a fazer isso nos slides anteriores).
- Dividir a necessidade de energia pelo valor da energia produzida por módulo. O resultado da divisão é o número de módulos necessários no projeto.



Dimensionamento do banco de baterias

Terceiro passo: dimensionamento do banco de baterias para armazenar a energia necessária para atender o consumo diário



Quarto passo: especificar o controlador de carga e o inversor usados no projeto



Vamos aprender a executar esses passos através de exemplos logo a seguir...



Exemplo 1: iluminação



5 Lâmpadas compactas de 20 W = 100 W

Tempo de utilização diária: 5 horas

Primeiro passo: calcular a energia consumida por dia

Energia = 100 W x 5 horas = 500 Wh (por dia)



Exemplo 1: Iluminação

Segundo passo: determinar o modelo e a quantidade de painéis solares para que essa lâmpada possa ficar acesa durante 5 horas diariamente



Vamos escolher um painel solar de **150 W** e vamos usar uma bateria e um controlador de carga simples de 12 V (sem MPPT).



Exemplo 1: iluminação

Segundo passo

Cálculo do número de painéis

$$E_p = 570,81 \text{ Wh (por dia)}$$

Energia gerada
por um painel
do modelo
escolhido sem
MPPT

$$E_c = 500 \text{ Wh (por dia)}$$

Energia
consumida
pelas lâmpadas
(que precisa ser
gerada)

Quantidade de
painéis solares
necessária

$$N_p = E_c / E_p = 500 / 570,81 = 0,87 \text{ painel} = 1 \text{ painel}$$

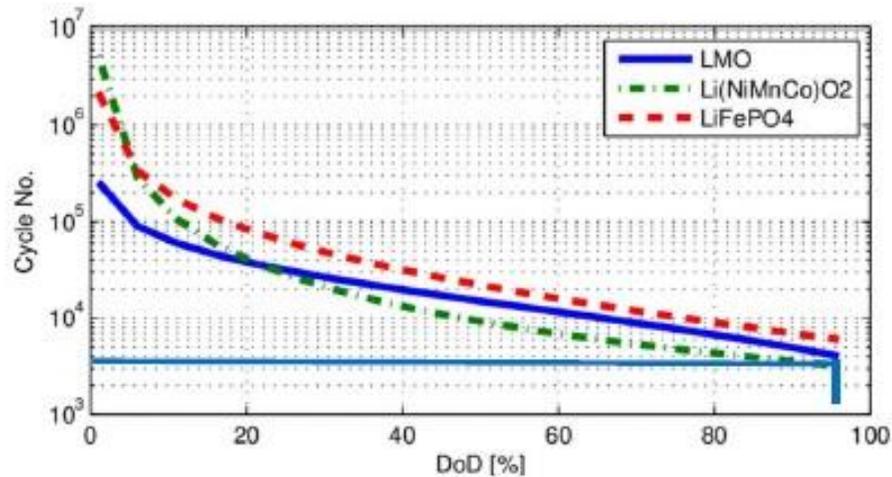


Exemplo 1: Iluminação

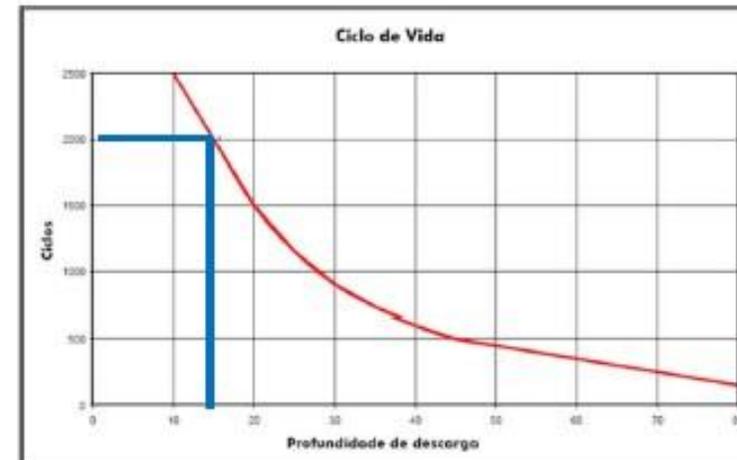
Terceiro passo: definição do banco de baterias

- Precisamos armazenar diariamente 500 Wh
- Precisamos calcular a capacidade do banco para essa finalidade
- Dado importante: profundidade de descarga (determina a vida útil da bateria)

Exemplo: queremos que a bateria dure 2000 ciclos (pode alimentar as lâmpadas durante pelo menos 6 anos)



Profundidade de descarga para LiFePO₄: 90%



Profundidade de descarga para Chumbo ácido: 15%



Exemplo 1: Iluminação

Terceiro passo: definição do banco de baterias

$$\text{Capacidade} = 500 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 42 \text{ Ah}$$

Agora dividimos o valor obtido pela profundidade de descarga de 15% (necessária para a bateria operar durante 2.000 ciclos)

$$\text{Capacidade da bateria chumbo ácido} = 42 \text{ Ah} / 0,15 = 280 \text{ Ah}$$

$$\text{Capacidade da bateria de LiFePO}_4 = 42 \text{ Ah} / 0,9 = 47 \text{ Ah}$$

Teoricamente isso seria suficiente, porém temos ainda que considerar a profundidade de descarga da bateria!

Esta capacidade de carga atende as necessidades do projeto com a vida útil esperada para a bateria (2000 ciclos)



Exemplo 1: Iluminação

Terceiro passo: definição do banco de baterias

Agora escolhemos o modelo e a quantidade das baterias:

Principais Características Elétricas										
MODELOS		DF300	DF500	DF700	DF1000	DF1500	DF2000	DF2500	DF3000	DF4001
Capacidade a 25°C (Ah)	10 h	24	30	41	54	76	94	130	156	200
	20 h	26	36	45	60	80	105	150	170	220
	100 h	30	40	50	70	93	115	165	185	240

Para uso diário vamos escolher um tempo de descarga de 20 h, compatível com um ciclo diário de utilização.

A capacidade da bateria depende da velocidade com que ela é carregada ou descarregada.

$$\text{Número de baterias} = 280 \text{ Ah} / 170 \text{ Ah} = 2$$



170 Ah x 2



Exemplo 1: Iluminação

Quarto passo: escolha do controlador de carga

Temos apenas um painel no projeto. A corrente máxima de saída do painel (curto-circuito) é 8,87 A (dado do catálogo)

Considerando um fator de sobredimensionamento de 25%, precisamos de um controlador de carga capaz de suportar esta corrente:

$$\text{Corrente} = 8,87 \times 1,25 = 11\text{A}$$

Corrente usada
para especificar o
controlador de
carga



Exemplo 1: Iluminação

Quarto passo: escolha do controlador de carga

Exemplo: Victron Light Charge Controller 12/24V 20A

Trabalha em
12V ou 24V

Corrente
compatível
com a que
precisamos



BlueSolar PWM-Light	12/24-5	12/24-10	12/24-20	12/24-30
Battery Voltage	12/24 V with automatic system voltage detection			
Rated charge current	5A	10A	20A	30A
Automatic load disconnect	Yes			
Maximum solar voltage	±8V / 55V (±)			
Self-consumption	< 10 mA			
Load output	Manual control + low voltage disconnect			
Protection	Battery reverse polarity (fuse)	Output short circuit	Over temperature	
Overload protection	Shut down after 60 s in case of 130% load			
	Shut down after 5 s in case of 160% load			
	Short circuit: immediate shut down			
Grounding	Common positive			
Operating temp. range	-20 to +50°C (full load)			
Humidity (non-condensing)	Max 95%			
BATTERY				
Charge voltage 'absorption'	14.1V / 14.4V			
Charge voltage 'float'	13.8V / 13.8V			
Low voltage load disconnect	11.2V / 11.4V			
Low voltage load reconnect	12.6V / 12.5V (manual)			
	13.1V / 12.2V (automatic)			
ENCLOSURE				
Protection class	IP20			
Terminal size	5 mm ² / AWG10			
Weight	0,15kg			0,1kg
Dimensions (h x w x d)	70 x 133 x 33,5 mm (2.8 x 5.3 x 1.3 inch)			



Exemplo 1: Iluminação

Quarto passo: escolha do inversor

Considerando que todas as lâmpadas podem estar em operação no mesmo instante de tempo:

Potência necessária:

$$5 \times 20 \text{ W} = 100 \text{ W}$$

$$\text{Total} = 100 \text{ W}$$

Então: $P_{\text{INVERSOR}} = 100 \text{ W}$ (potência nominal do inversor necessário)



Exemplo 1: Iluminação

Quarto passo: escolha do inversor

A **potência do inversor** está associada à **potência dos aparelhos** que serão alimentados. Neste exemplo queremos alimentar aparelhos de **100 W**, portanto é necessário um inversor com **no mínimo** essa potência.

Por exemplo, vamos escolher um inversor de **200 W** (é mais do que precisamos, mas não encontramos inversores muito menores do que isso no mercado).

Exemplo de inversor:

Entrada=12V

Saída=220V

Potência=200W





Exemplo 1: Iluminação

Projeto final (diagrama elétrico)





Exemplo 2: Residência

Primeiro passo: energia consumida

Levantamento de cargas:

- 2 lâmpadas de 60 W – ligadas 5 horas por dia
- 1 televisor de 200 W – ligado 4 horas por dia
- 1 refrigerador de 200 W – ligado 10 horas por dia (tempo de funcionamento médio do compressor)





Exemplo 2: Residência

Primeiro passo: energia consumida

Energia necessária diariamente:

- $2 \times 60 \text{ W} \times 5 \text{ h} = 600 \text{ Wh}$
- $1 \times 200 \text{ W} \times 4 \text{ h} = 800 \text{ Wh}$
- $1 \times 200 \text{ W} \times 10 \text{ h} = 2000 \text{ Wh}$

$$\text{Total} = 600 \text{ Wh} + 800 \text{ Wh} + 2000 \text{ Wh} = 3400 \text{ Wh}$$

Então:

Econsumida = 3400 Wh
(energia consumida diariamente)



Exemplo 2: Residência

Segundo passo: número de módulos fotovoltaicos



Novamente vamos escolher o painel solar de 150 W

Precisamos de 3400 Wh por dia, então: $E_c = 3400 \text{ Wh}$

Energia
desejada
(consumida)

Um painel desse modelo produz 806,9 Wh/dia (já calculamos isso anteriormente), então:

$$N = 3400 \text{ Wh} / 806,9 \text{ Wh} = 4,2 \rightarrow 5 \text{ módulos fotovoltaicos}$$

Energia
desejada

Energia de
um painel

Número de painéis (ou módulos) necessários
para produzir a energia desejada



Exemplo 2: Residência

Terceiro passo: banco de baterias

Neste exemplo vamos adotar uma **profundidade de descarga maior**, para não resultar um banco de baterias muito grande e muito caro. Infelizmente a durabilidade das baterias será reduzida. Para chumbo ácido, equivale a uma vida útil de 2,5 anos. Para lítio, podemos escolher um compromisso melhor entre profundidade e vida útil, como 70%, resultando em uma vida útil de 15 anos.



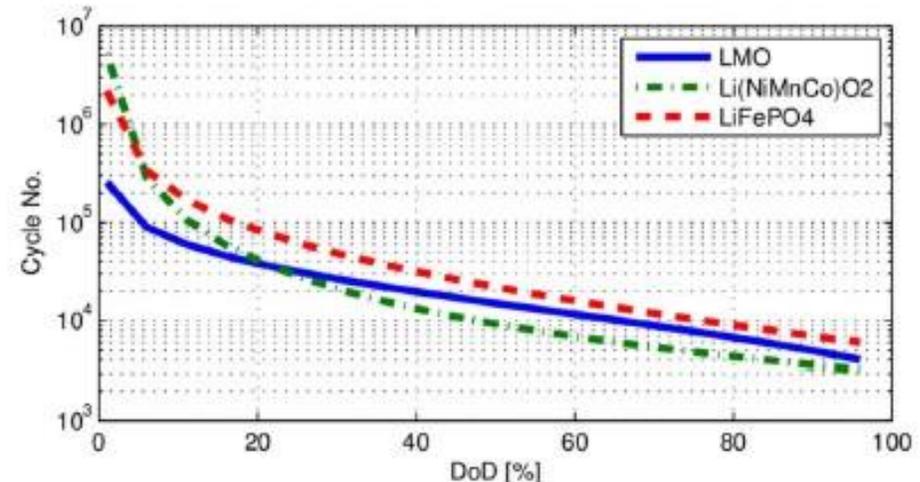
$$\text{Capacidade} = 3400 \text{ Wh} / 12 \text{ V} = 284 \text{ Ah}$$

Capacidade teórica do banco de baterias.

Agora dividimos o valor obtido pela profundidade de descarga de 30% (necessária para a bateria operar durante cerca de 1.000 ciclos)

$$\text{Capacidade para chumbo ácido} = 284 \text{ Ah} / 0,30 = 945 \text{ Ah}$$

$$\text{Capacidade para LiFePO4: } 284 \text{ Ah} / 0,7 = 405 \text{ Ah}$$





Principais Características Elétricas										
MODELOS		DF300	DF500	DF700	DF1000	DF1500	DF2000	DF2500	DF3000	DF4001
Capacidade a 25 °C (Ah)	10 h	24	30	41	54	76	94	130	156	200
	20 h	26	36	45	60	80	105	150	170	220
	100 h	30	40	50	70	93	115	165	185	240

Número de baterias = $945 \text{ Ah} / 220 \text{ Ah} = 4$



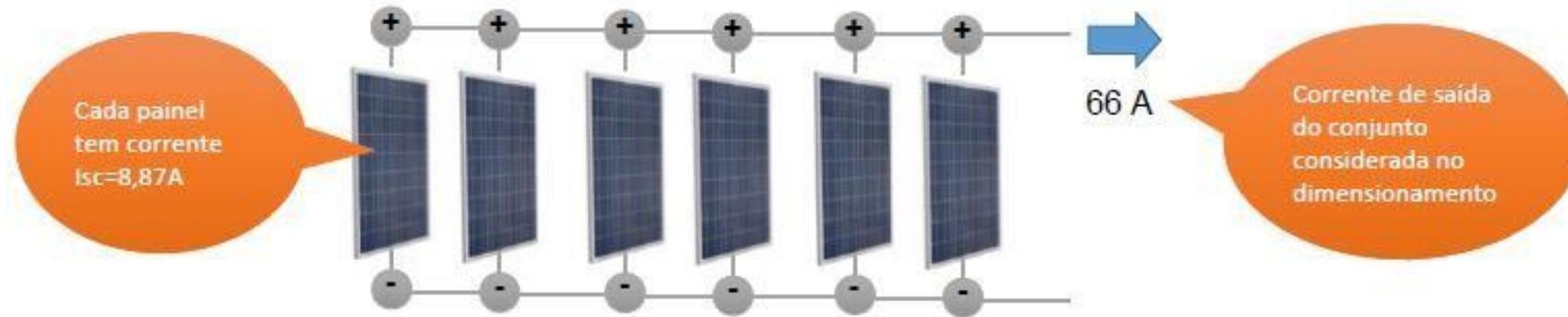
220 Ah x 4



Exemplo 2: Residência

Quarto passo: escolha do controlador

Para trabalhar em 12 V vamos ter 6 painéis em paralelo:



Considerando um fator de sobredimensionamento de 25%, precisamos de um controlador de carga capaz de suportar esta corrente:

$$\text{Corrente} = 8,87 \times 6 \times 1,25 = 66 \text{ A}$$

Corrente usada para especificar o controlador de carga

Exemplo: Victron MPPT 150V 70A 12/24/48V MC4 SMART ENERGY

Corrente nominal: 70A
Corrente de pico: 85A
Tensão: 12V / 24V ou 48V Automático
Cabeamento recomendado: 10 mm²
(ou 16 mm² se as distâncias forem longas)





Exemplo 2: Residência

Quarto passo (continuação): escolha do inversor

Determinação da potência nominal

- Considera-se que todas as cargas podem estar em operação no mesmo instante de tempo

Potência necessária:

$$2 \times 60 \text{ W} = 120 \text{ W}$$

$$1 \times 200 \text{ W} = 200 \text{ W}$$

$$1 \times 200 \text{ W} = 200 \text{ W}$$

$$\text{Total} = 120 \text{ W} + 200 \text{ W} + 200 \text{ W} = 520 \text{ W}$$

$$\text{Então: } P_{N\text{-INVERSOR}} = 520 \text{ W}$$

Potência de surto do refrigerador

Potência nominal do refrigerador

Potência nominal inversor

Determinação da potência de surto do inversor

- O elemento que possui uma corrente de partida crítica neste exemplo é o refrigerador. Correntes de partida de motores e compressores podem superar 10 vezes a corrente de operação. Uma regra prática é considerar uma potência na partida de 10 vezes a potência nominal, assim:

Potência de surto:

$$\text{Potência de operação das cargas} = 320 \text{ W}$$

$$\text{Potência de partida de cargas críticas} = 2000 \text{ W}$$

$$\text{Total} = 320 \text{ W} + 2000 \text{ W} = 2320 \text{ W}$$

$$\text{Então: } P_{S\text{-INVERSOR}} = 2320 \text{ W}$$

Potência de surto do inversor



Exemplo 2: Residência

Quarto passo (continuação): escolha do inversor

A **potência do inversor** está associada à **potência dos aparelhos** que serão alimentados. Neste exemplo queremos alimentar aparelhos de **520 W**, portanto é necessário um inversor com **no mínimo** essa potência.

Porém, precisamos garantir também o atendimento da **potência de surto** de 2.320W.

Por exemplo, vamos escolher o inversor de **1.200W** (a potência de operação é maior do que o necessário, mas é a melhor opção para garantir a potência de surto).

Exemplo de inversor:

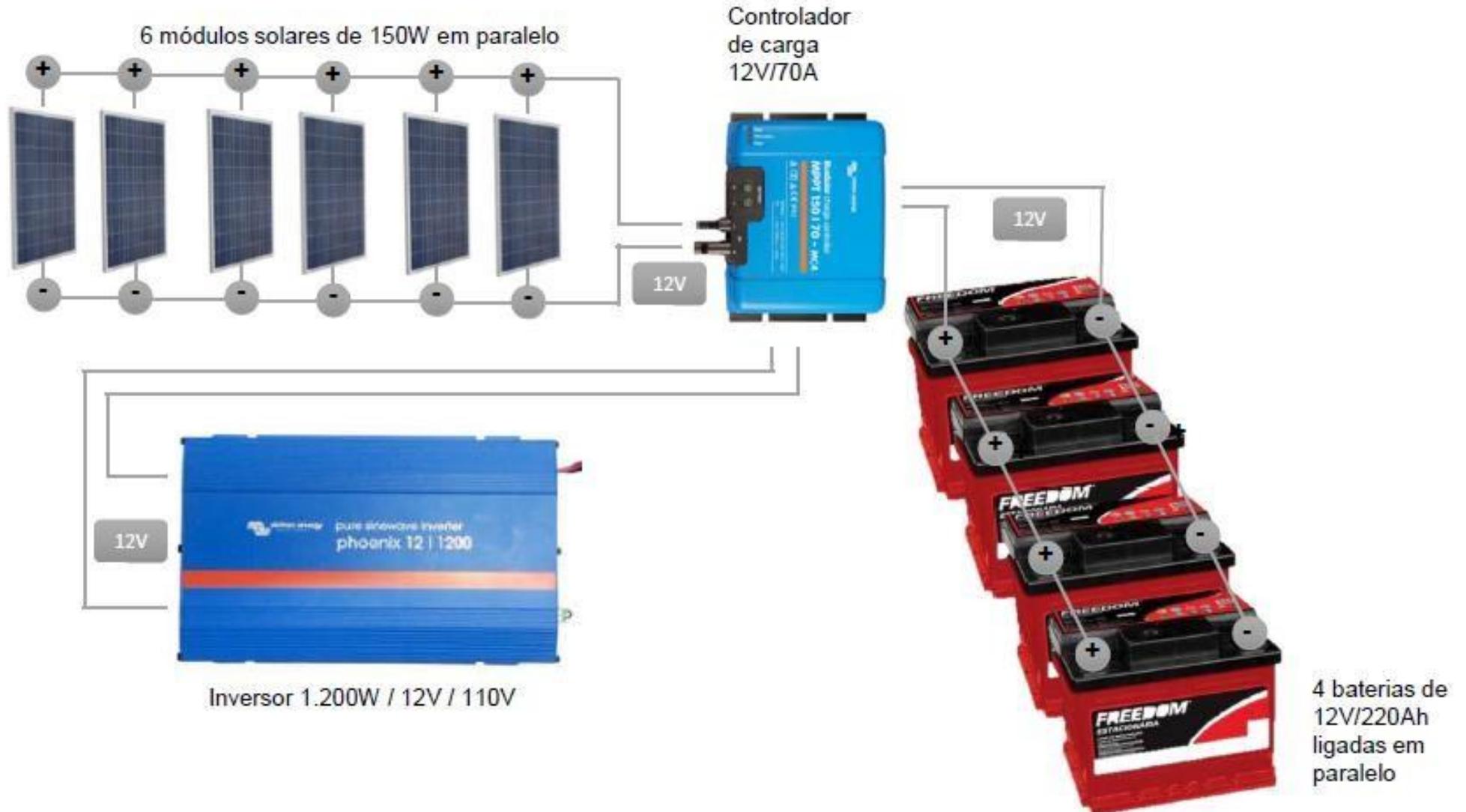
Entrada = 12 VCC
Saída = 110 VCA
Potência nominal = 1.200 W
Potência de surto = 2.400 W



	12 Volt	24 Volt	48 Volt
PhoenixInverter	12/800	24/800	48/800
	12/1200	24/1200	48/1200
Potência AC a 25°C (VA) (3)	800	1200	
Pico de potência (W)	1600	2400	



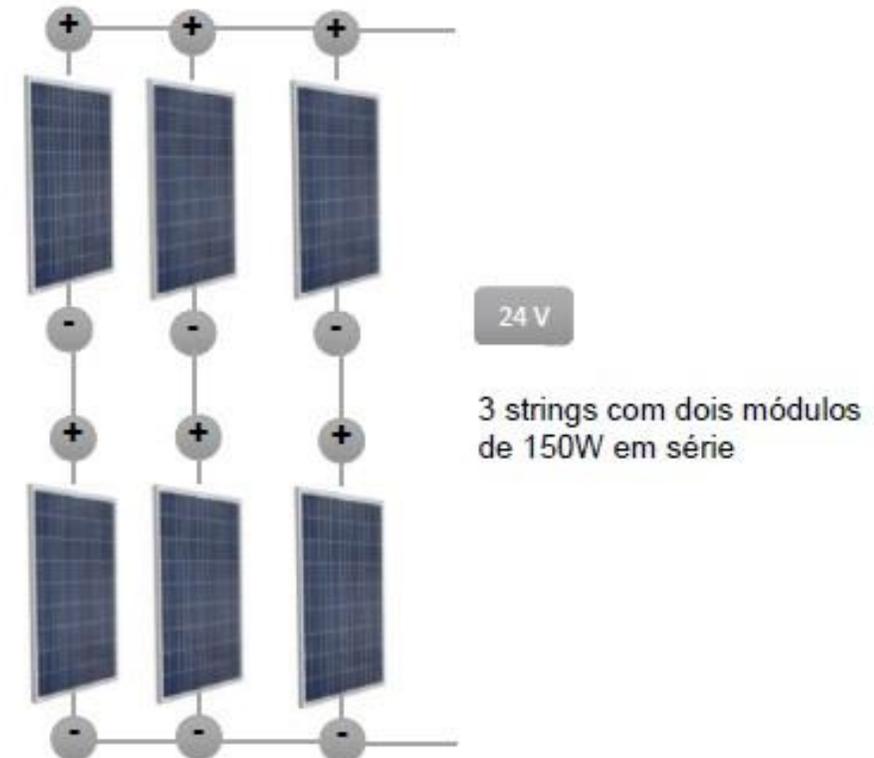
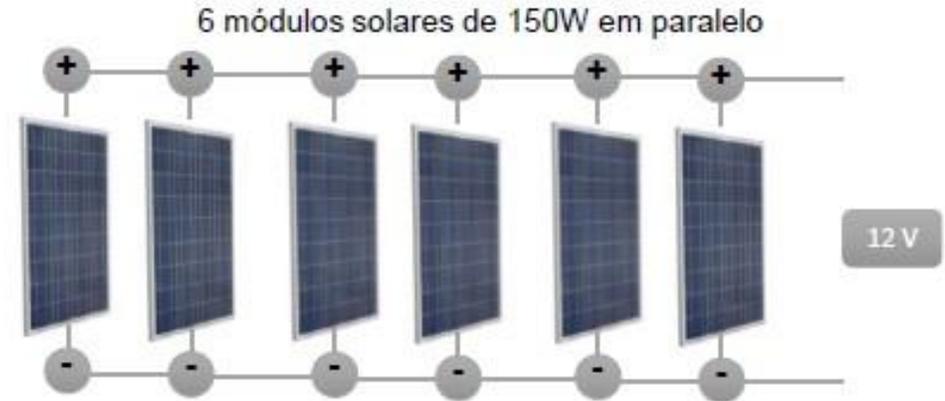
Exemplo 2: Residência – diagrama elétrico





Trabalhando em tensões maiores

- Muitas vezes, de acordo com o tamanho do projeto, não encontramos controladores de carga para as correntes desejadas. Podemos optar por trabalhar com tensões maiores, reduzindo as correntes do sistema.
- No exemplo anterior, podemos subir a tensão do sistema para 24V, o que vai permitir trabalhar com um controlador de carga metade da corrente (35 A).
- O dimensionamento do sistema permanece inalterado (número de painéis, baterias, etc). Só mudamos o tipo de controlador.
- Para trabalhar em 24V os módulos serão ligados em série e também em paralelo. Vamos ver a seguir como fica o sistema...





Sistema remodelado para 24V





Sistemas off-grid de maior potência

Para alimentar sistemas muito grandes algumas estratégias são possíveis:

- Usar **controladores de carga em paralelo** para poder agregar um número grande de painéis ao Sistema
- Usar um **inversor com controlador de carga integrado**. Esses equipamentos geralmente têm um custo elevado, porém a operação é mais confiável. Problema: é difícil de encontrar no mercado esse tipo de equipamento.
- Usar um **sistema de microrrede** com inversores off-grid (fonte de tensão) e grid-tie (fonte de corrente) combinados
- Usar **sistemas híbridos** (solar + baterias + gerador a combustão)

Sistema com controladores de carga em paralelo





Sistemas off-grid de maior potência: **inversor com controlador integrado**



Datasheet	SPF 3000TL LVM-48P
Battery voltage	48VDC
INVERTER OUTPUT	
RATED POWER	3000W/3000W
Parallel Capability	Yes
AC voltage Regulation (Battery Mode)	120VAC \pm 5% @ 50/60Hz
Surge Power	6000VA
Efficiency (Peak)	93%
Waveform	Pure sine wave
Transfer Time	10 ms (For Personal Computers); 20 ms (For Home Appliances)
SOLAR CHARGER Controlador integrado	
Maximum PV Array Power	4500W
MPPV Range @ Operating Voltage	60VDC - 115VDC
Maximum PV Array Open Circuit Voltage	145VDC
Maximum Solar Charge Current	80A
Maximum Efficiency	98%
Standby Power Consumption	2 W

Principais características:

Banco de baterias de 48 V

Potência de saída de 3 kW (nominal)

Potência de saída de 6 kVA
(para surto com carga indutiva)

Potência de entrada (4,5 kW) - painéis solares

Possui MPPT



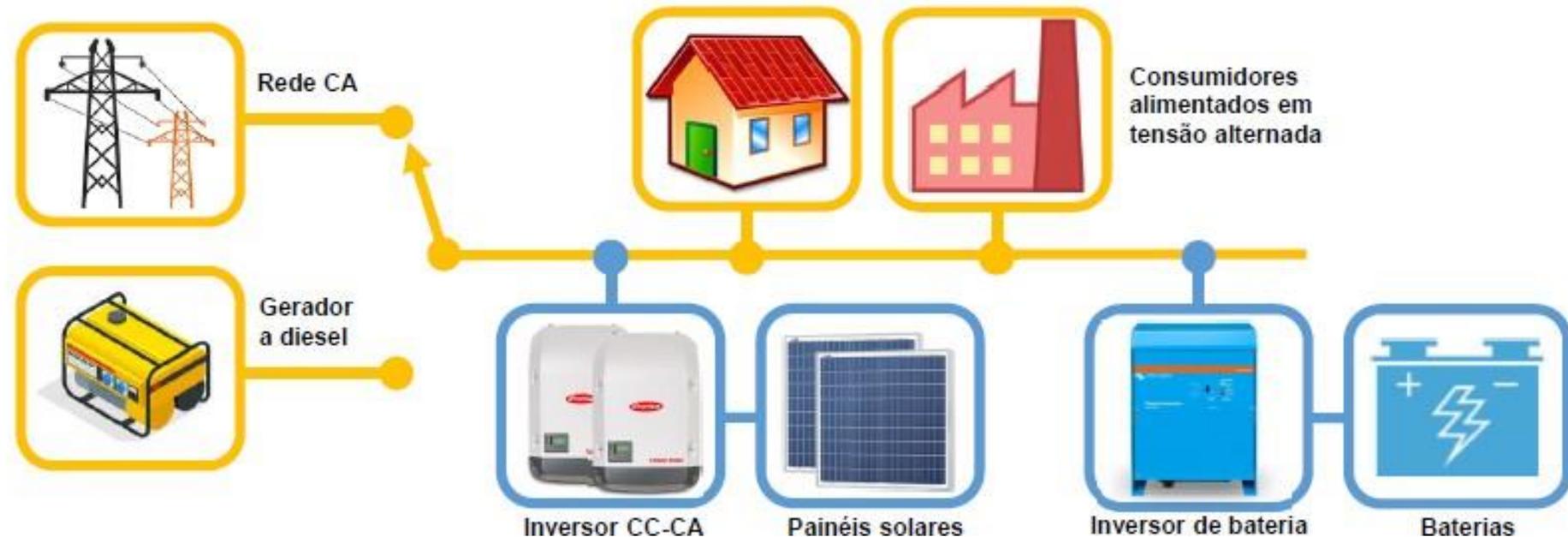
Fundamentos de Energia Solar Fotovoltaica

Microrredes e
sistemas
híbridos





Sistemas fotovoltaicos híbridos: são sistemas que trabalham conectados à rede elétrica e, além de serem alimentados por painéis solares, permitem o armazenamento e o fornecimento de energia através de bancos de baterias. São usados em locais atendidos pela rede elétrica. As baterias permitem o gerenciamento do uso da energia (evitando, por exemplo, o consumo de energia da concessionária em horário de ponta) e também possibilitam a operação ilhada.





Sistemas fotovoltaicos híbridos: principais componentes



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



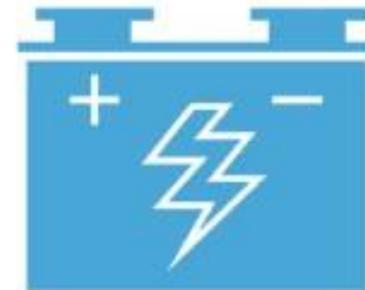
Inversor CC-CA grid-tie: Converte a energia de corrente contínua para alternada.



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



Inversor CC-CA para uso com baterias: No modo **on-grid**, armazena energia nas baterias e descarrega (retira energia da rede ou injeta de volta). No modo **off-grid** (quando o sistema está ilhado), fornece tensão alternada para alimentação de cargas locais.



Banco de baterias: Armazena energia para ser usada em horários de pouca geração solar ou no período noturno, evitando consumo de energia da rede elétrica ou servindo como fonte principal quando o sistema estiver operando no modo ilhado.



Inversor off-grid formador de rede (fonte de tensão)

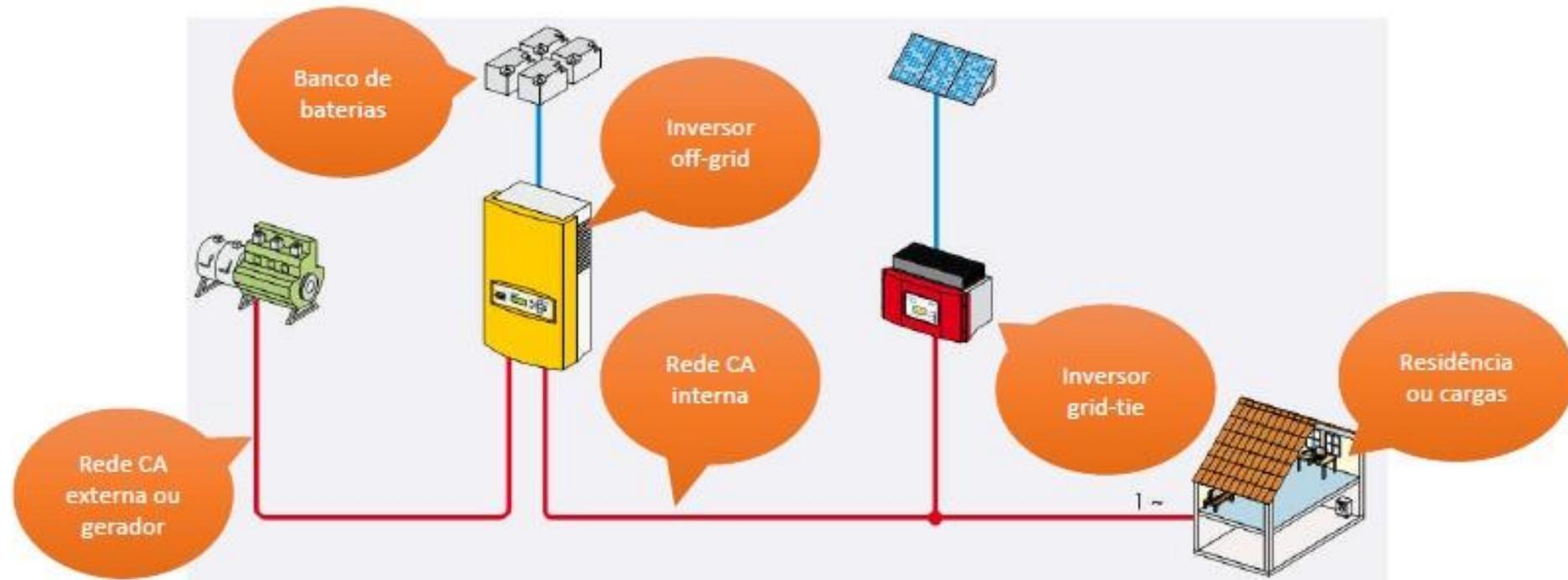




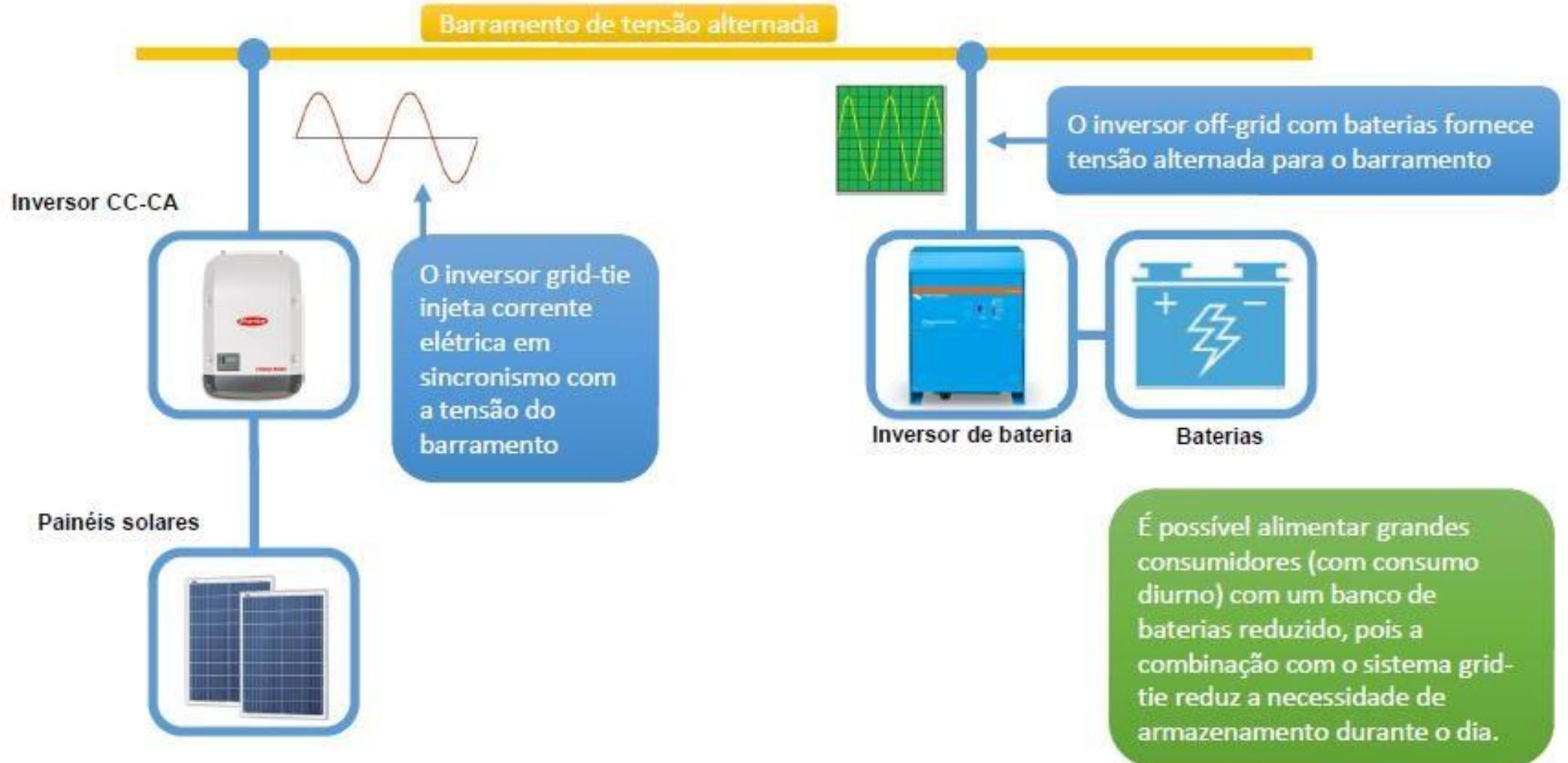
Microrrede com inversores off-grid (fonte de tensão) e grid-tie combinados

Este tipo de sistema usa dois tipos de inversores:

- Inversor off-grid: fornece tensão
- Inversor grid-tie: injeta a energia dos painéis solares

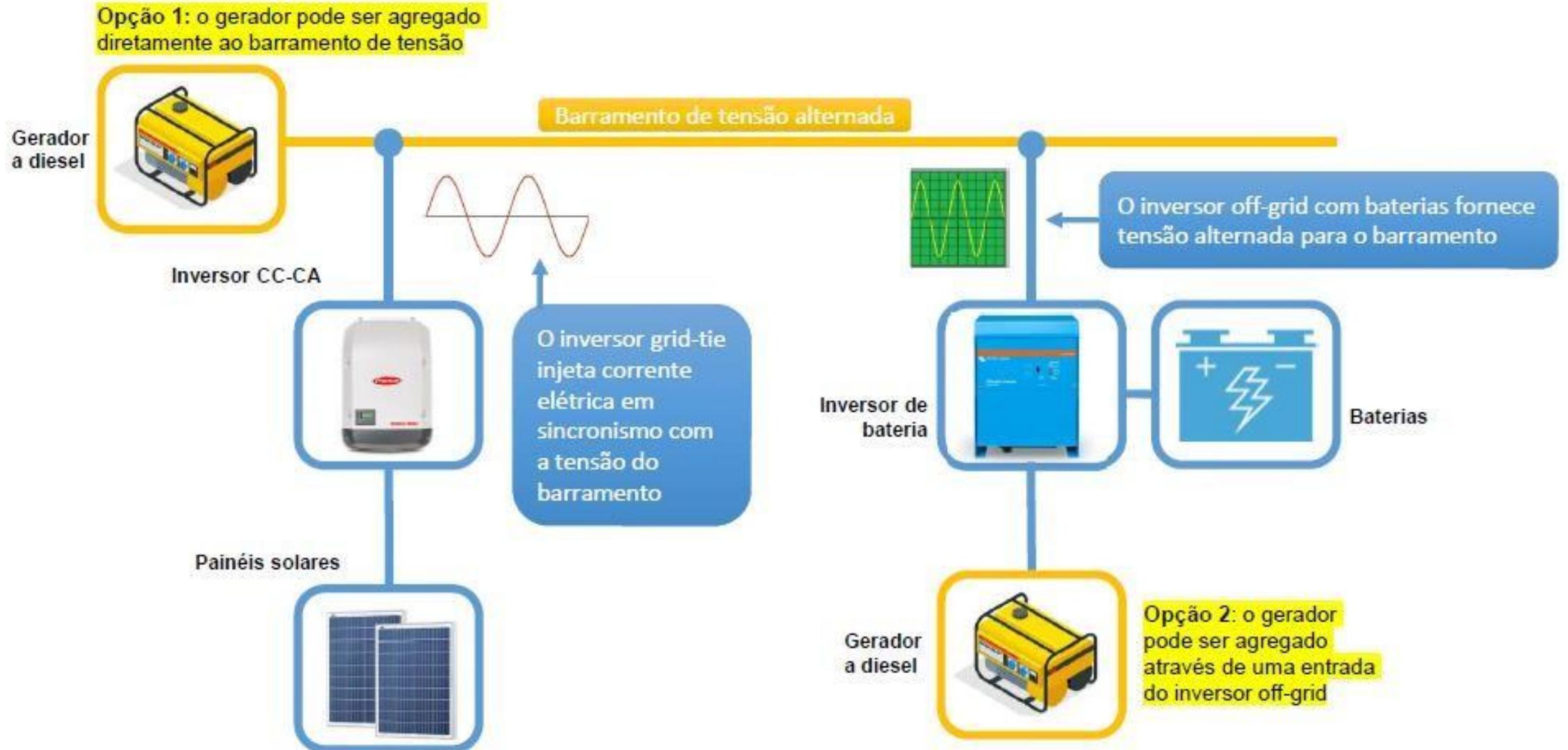


Microrrede com energia solar + baterias: inversores combinados



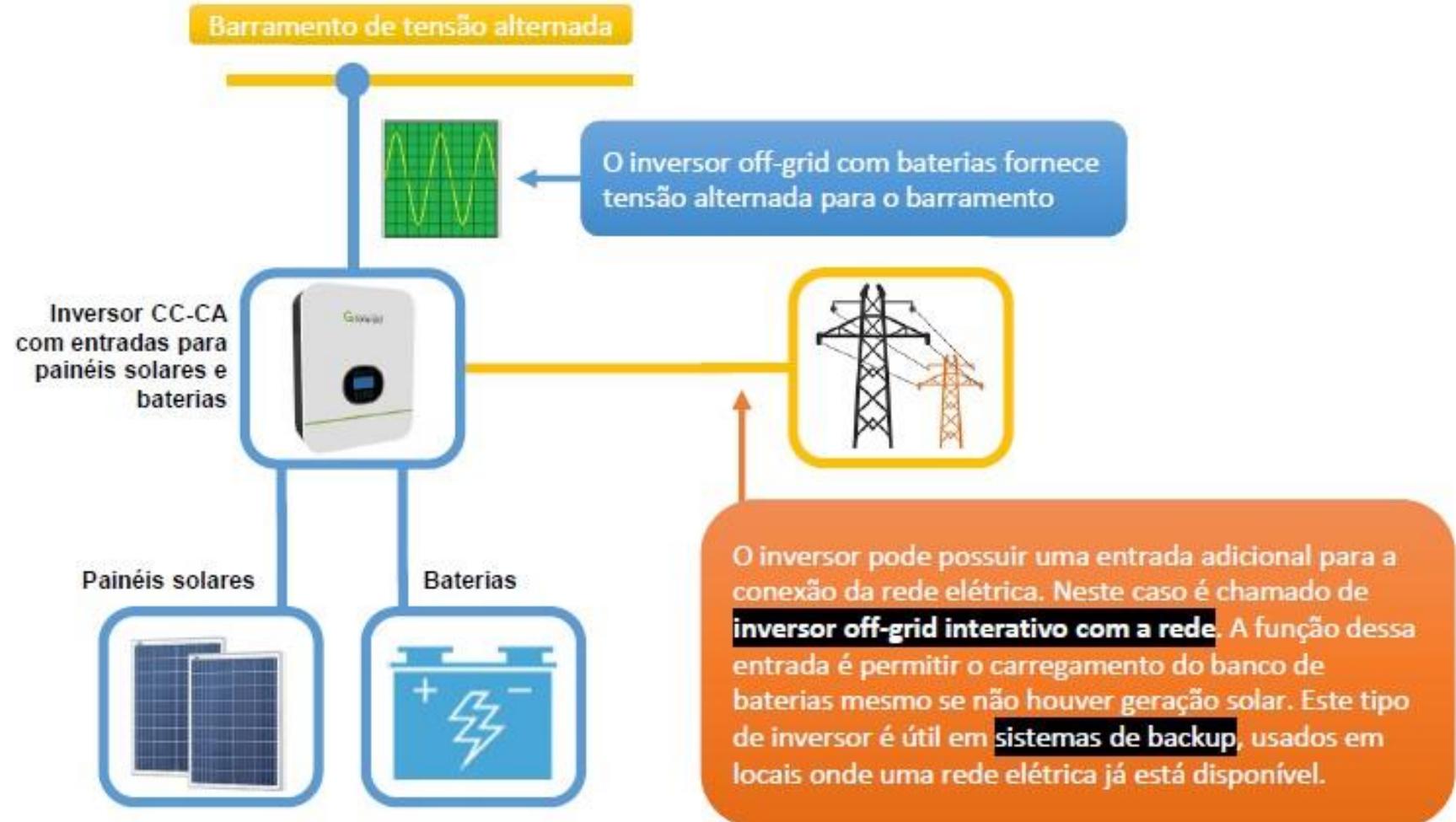


Microrrede com energia solar + baterias + gerador a combustão: inversores combinados

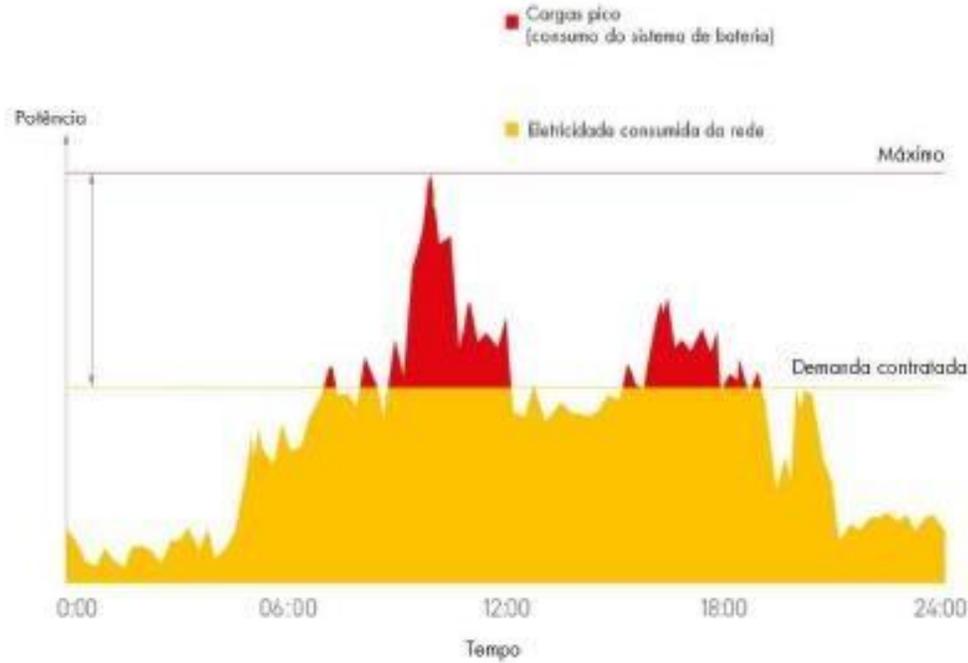




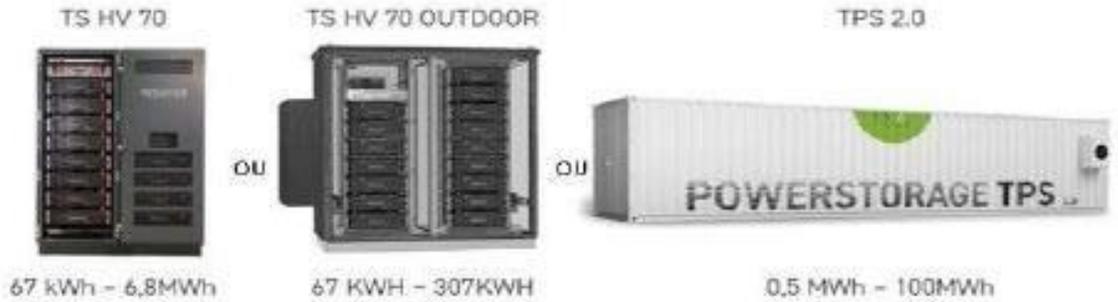
Microrrede com energia solar + baterias: inversor com duas entradas



Aplicação dos bancos de baterias: *peak shaving*



Bancos de baterias



Inversores para armazenamento e descarregamento da energia



Medidor/controlador de energia
Mede o consumo e a geração solar e regula o armazenamento ou a injeção de energia dos bancos de baterias