



# Aula 2 - Sistemas Fotovoltaicos com Armazenamento de Energia em Baterias

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

1

## Agenda



- Introdução ao armazenamento de energia em baterias;
- Caracterização e Tipos de Baterias;
- Conexão de Baterias;
- Sistemas Off-Grid;
- Dimensionamento com tensão de operação fixa;
- Dimensionamento com MPPT;
- Dimensionamento no PVsyst de sistemas Off-Grid;
- BESS: Battery Energy Storage Systems;
- Definições;
- Partes de um BESS;
- Simulação de um BESS no software SAM;
- LCOE e LCOS, transição de avaliação econômica.

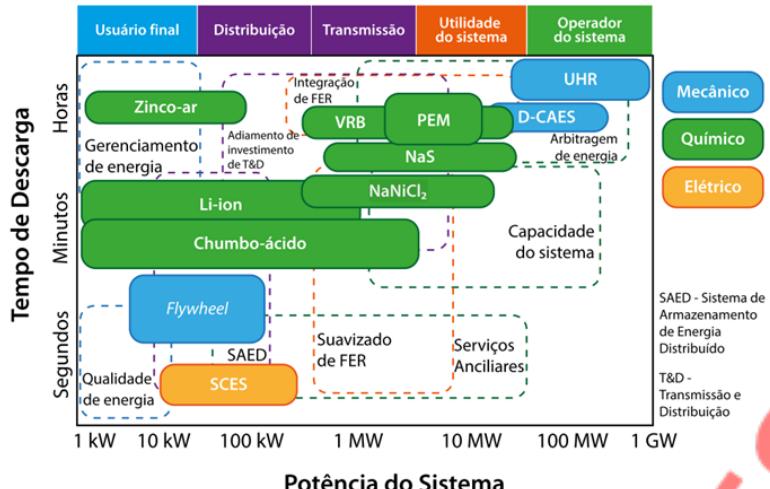
# Armazenamento de energia em baterias



# Armazenamento de energia em baterias

- Nessa aula, nosso foco é o armazenamento de energia com bateria, que é o mais aplicável em sistemas fotovoltaicos;
- Armazenar energia é necessário para utilizar mais tarde ou realizar alguma operação dentro de um sistema;
- Existe uma diversidade de sistemas para armazenar energia, pois existem operações onde a descarga tem que ser realizada em segundos, e outras em horas.

# Armazenamento de energia em baterias



- Para energia solar fotovoltaica, geralmente se trabalha com Li-ion ou Chumbo-ácido;
- Algumas baterias são de descarga lenta levando horas para serem descarregadas, ou seja, tem baixa correntes;
- É comum hoje em dia baterias híbridas para exercer mais de uma função, por exemplo, li-ion + supercapacitores.

## Caracterização e Tipos de Baterias

- Quando falamos de baterias podemos caracterizar de três formas:
- **Tecnologia:** Material e processo de fabricação;
- **Nível de tensão:** Geralmente, 12 V, 24 V, 48 V por unidade;
- **Capacidade de Acumulação de carga (Ah):** Geralmente C10, C20, C100, e é o tempo que leva para a descarga. Ex: C10, 220 Ah, a corrente da bateria é  $220/10 = 22$  A. Para solar fotovoltaica geralmente usa C10 ou C20.

\* Para grandes baterias não é comum usar os termos de capacidade de acumulação de carga, e sim a capacidade de Wh.



# Caracterização e Tipos de Baterias

- Quanto a tecnologia as de chumbo-ácido são as mais presentes no mercado;
- Uma observação é que você **não pode usar bateria automotiva para aplicação com sistemas fotovoltaicos**, pois as baterias automotivas são fabricadas para proporcionar uma grande corrente elétrica de partida e depois fica somente carregando;
- Para aplicações com energia solar fotovoltaica geralmente se usa as baterias estacionárias. O nome estacionário vem da capacidade de operar sem precisar ficar sendo movimentada para homogeneizar o eletrólito;
- As tecnologias da química da bateria faz com que tenha-se diversos valores de densidade energética (Energia específica), que é a relação entre a energia e peso ou volume.

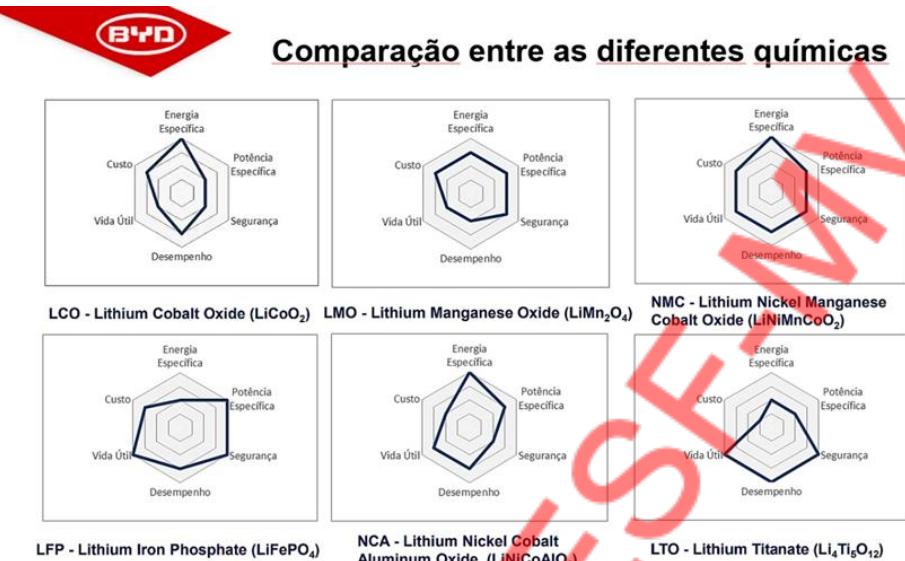
# Caracterização e Tipos de Baterias

Bateria	Vida útil (anos/ciclo)	Densidade energética [Wh.kg <sup>-1</sup> /kWh/m <sup>3</sup> ]	Tempo de descarga	Tempo de recarga	Autodesc. [%/dia]	Temp. de operação [°C]	Tensão crítica [V por célula]
Chumbo-ácido	5-15/2000	30-50/75	min-h	8-16 h	0,1-0,3	-10-40	1,75 V
Níquel-cádmio	15-20/2000	45-80/<200	seg-h	1 h	0,2-0,6	-40-45	2
Lítio-íon	8-15/500-600	100-250/250-620	min-h	9 h	0,1-0,3	-10-50	3
Sódio-enxofre	12-20/<2000	150-240/<400	seg-h	9 h	20	300	1,75-1,9
Sódio-cloreto de níquel	12-20/4000-4500	125/150-200	min-h	6-8 h	15	270-350	1,8 - 2,5
Zinco-brometo	5-10/300-1500	60-80/20-35	seg-10h	4 h	0-1	10-45	0,17-0,30
Vanad. redox	10-20/13000	75/20-35	seg-10h	min	0-10	0-40	0,7-0,8

[2]

## Caracterização e Tipos de Baterias

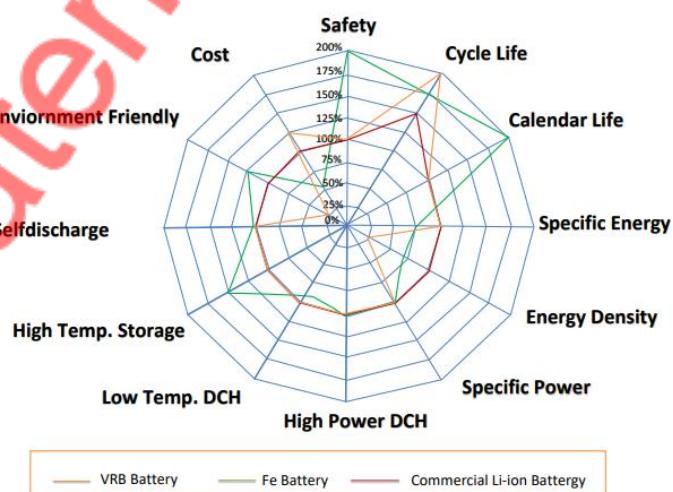
- Dentro do Li-ion tem-se vários tipos de desenvolvimento químico;



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

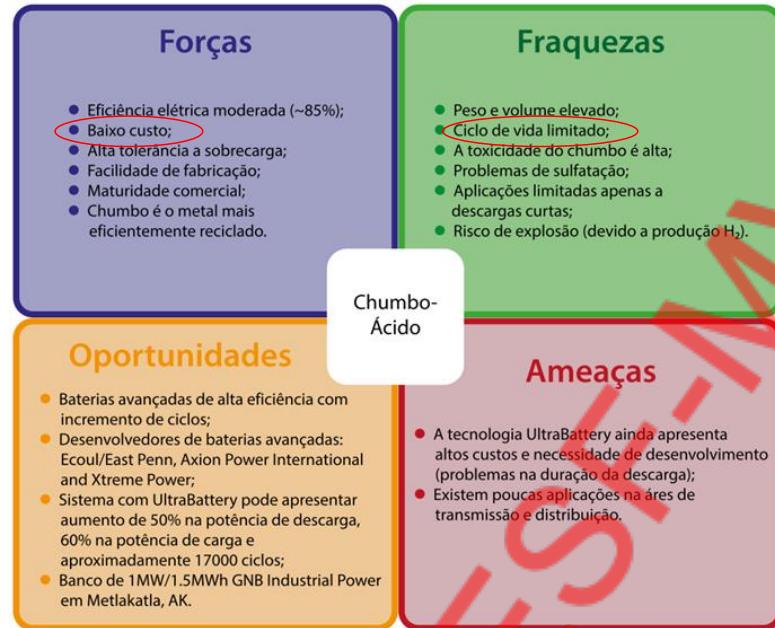
9

## Caracterização e Tipos de Baterias



[3]

# Caracterização e Tipos de Baterias



# Caracterização e Tipos de Baterias



## Caracterização e Tipos de Baterias

- No quesito vida útil, as principais variáveis que influenciam são a profundidade de descarga (DOD - *Depth of Discharge*);
- DOD: É a porcentagem de carga retirada da bateria durante uma descarga. Geralmente, se usam 80%.
- SOC (*state of charge*): É o nível de carga em um momento;
- Para bateria de chumbo-ácido estacionária por exemplo:

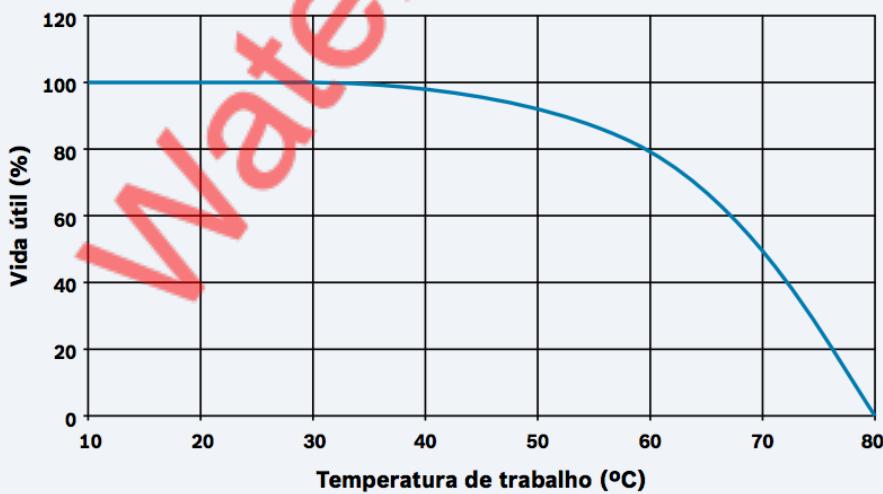
2500 ciclos – descarga de 10%  
 1500 ciclos – descarga de 20%  
 500 ciclos – descarga de 50%



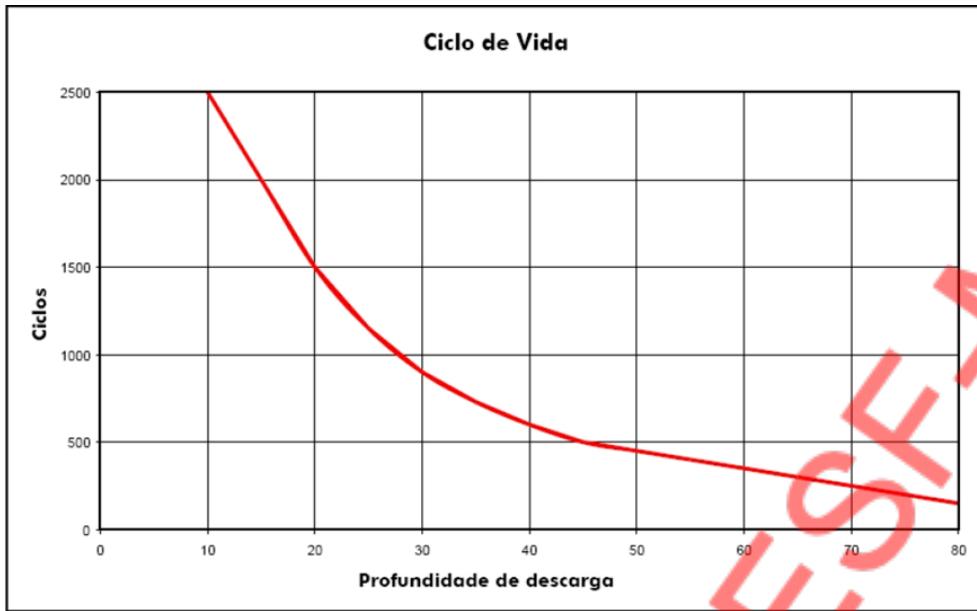
Vida útil = número de ciclos de carga e descarga

## Caracterização e Tipos de Baterias

Projeção da vida útil em função da temperatura



## Caracterização e Tipos de Baterias

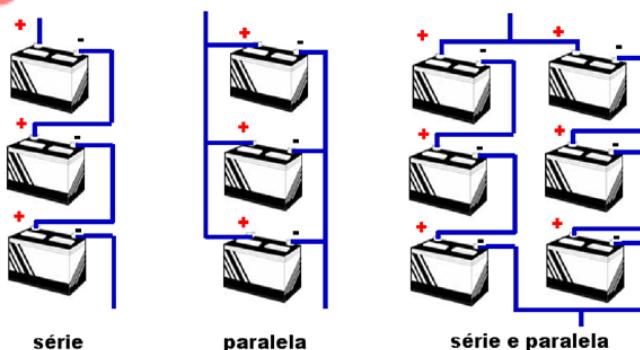


Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

15

## Conexão de 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 capacidade de carga (Ah) ou corrente (A);
- A associação em paralelo permite fornecer mais corrente elétrica com a mesma tensão.



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

16

## Exercício

Em um sistema de armazenamento de energia para uma usina fotovoltaica, utilizam-se baterias de chumbo-ácido de **12V e 100Ah** cada. Para atender à demanda do sistema, as baterias foram conectadas em uma configuração mista série-paralelo, conforme o esquema abaixo:

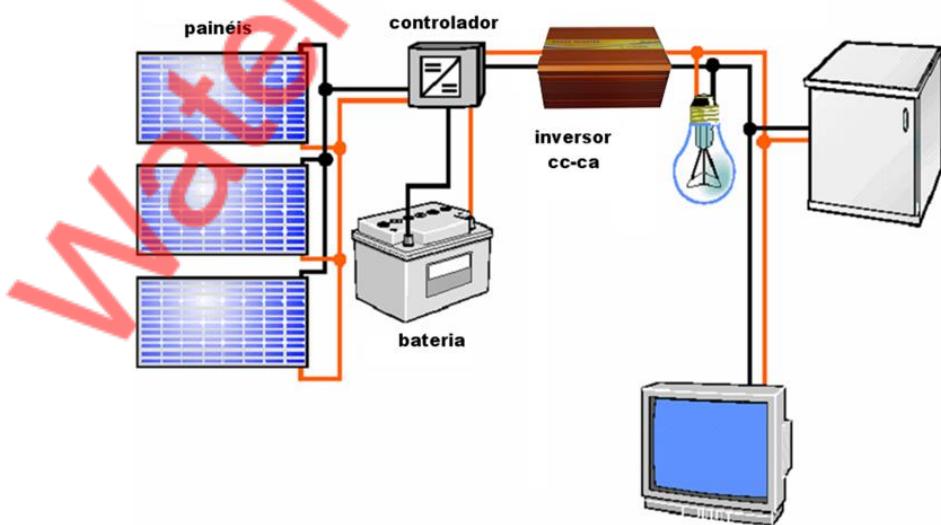
- O banco de baterias possui **4 conjuntos em paralelo**.
- Cada conjunto em paralelo é composto por **3 baterias em série**.

Com base nessas informações, determine:

- A tensão total do banco de baterias.
- A capacidade total em Ah desse banco de baterias.

**Considere que todas as baterias estão idealmente idênticas e despreze perdas internas.**

## Sistemas Off-grid



## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Em sistemas com MPPT é possível trabalhar próximo da máxima potência disponível no momento e aproveitar melhor o seu sistema;
- Para o dimensionamento devemos conhecer a energia produzida pelos painéis.

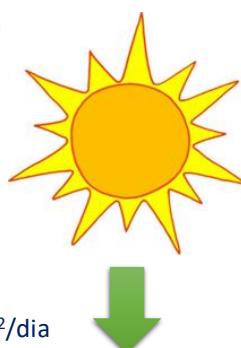
## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Para calcular a energia produzida o primeiro passo é conhecer a energia recebida do sol;
- Essa energia depende da inclinação, orientação, sombras e outras coisas;



Podemos consultar um mapa solarimétrico ou uma ferramenta

Exemplo:  
5000 Wh/m<sup>2</sup>/dia



## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Pela fórmula a seguir encontramos a energia produzida pelo sistema fotovoltaico;

$$E_D = E_S \times A_P \times \eta_P$$

Área do painel ( $m^2$ )
Energia produzida pelo sistema (kWh/dia)
Energia diária recebida do Sol (kWh/ $m^2$ /dia)
Eficiência do painel (%)

## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

### Exemplo

Vamos calcular a energia produzida por **um módulo de 150 W** da Canadian Solar. É um módulo de 36 células, apropriado para sistemas solares com baterias de 12 V. Com eficiência de 15,3%. Para Campinas-SP.

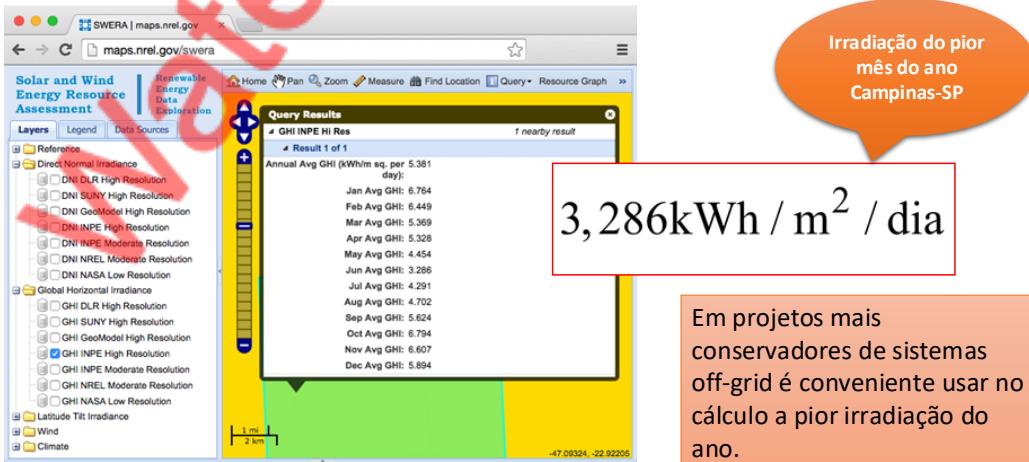
# Dimensionamento em Sistemas com MPPT



# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

## SWERA

Agora com base na irradiação do pior mês do ano



# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

<b>i/150P</b>									
<b>Electrical Data</b>									
<b>CS6C-150P</b>									
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	<table border="1" style="width: 100px; margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>Pmax</td><td></td></tr> <tr> <td>Voc</td><td></td></tr> <tr> <td>Isc</td><td></td></tr> <tr> <td>NOCT</td><td></td></tr> </table>	Pmax		Voc		Isc		NOCT	
Pmax									
Voc									
Isc									
NOCT									

<b>Mechanical Data</b>	
Cell Type	Poly-crystalline
Cell Arrangement	36(4x9)
Dimensions	1485x666x40mm(58.4x26.2x1.57 in)
Weight	12.0kg(26.5lbs)
Front Cover	Tempered glass
Frame Material	Anodized aluminum alloy
Standard packaging (Modules per Pallet)	20pcs

\*Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000W/m<sup>2</sup>.

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

Com irradiação anual:

$$E_D = 5381 \times 0,98 \times 15,3\% = 806,9 \text{ Wh (por dia)}$$

Com a pior irradiação mensal:

$$E_D = 3286 \times 0,98 \times 15,3\% = 492,7 \text{ Wh (por dia)}$$

Com base nessa valor podemos partir para o dimensionamento das baterias...

## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Exemplo de uma residência



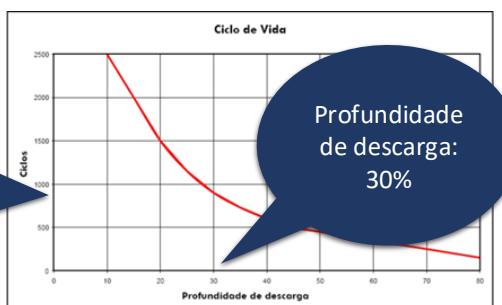
## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

**Definições:** banco de baterias

- 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.

Vida útil adotada: um pouco menos de 1000 ciclos (cerca de três anos de uso considerando ciclos diários)



Profundidade de descarga:  
30%

## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

**Definição:** determinar o modelo e a quantidade de painéis solares



Novamente vamos escolher o painel solar de **150 W** da Canadian.

Precisamos de **3400 Wh por dia**, então: **Ec = 3400 Wh**

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

**Ep = 806,9 Wh**

Energia produzida por um painel

Neste projeto vamos usar um controlador com MPPT, então a energia produzida por painel é maior.

Calculamos isso no início da aula!

## Dimensionamento em Sistemas com MPPT

Determinação do número de painéis (considerando o fator de performance)

$$N_p = E_c / E_p \times 1,25 = 3400 / 806,9 \times 1,25 = 5,26$$

O cálculo resultou 5,26 painéis, então vamos arredondar para o número inteiro mais próximo: 6 painéis

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Banco de baterias

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

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

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

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

Esta capacidade de bateria atende as necessidades do projeto com a vida útil esperada para a bateria (cerca de 1.000 ciclos)

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Modelo de Bateria

Agora escolhemos o modelo e a quantidade de 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
	20 h	26	36	45	60	80	105	150	170
	100 h	30	40	50	70	93	115	165	185
									220

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

Para uso diário vamos escolher um tempo de descarga de 20 h, de acordo com a tabela do fabricante.

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

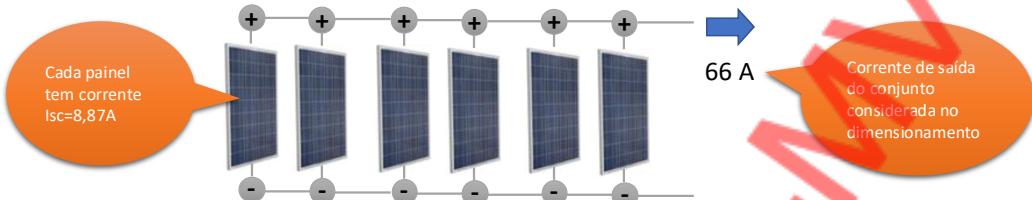


220 Ah x 4

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Controlador de carga

Para trabalharmos 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:

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

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- Controlador de carga

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

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

Valor de referência: R\$ 2.500

Características:

Corrente nominal: **70A**

Corrente de pico: 85A

Tensão: 12V / 24V ou 48V Automático

Cabeamento recomendado: 10 mm<sup>2</sup>

(ou 16 mm<sup>2</sup> se as distâncias forem longas)

Corrente compatível com a que precisamos



# Dimensionamento em Sistemas com MPPT



- Determinação da potência nominal do inversor

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

Potência necessária:

- $2 \times 60 \text{ W} = 120 \text{ W}$
- $1 \times 200 \text{ W} = 200 \text{ W}$
- $1 \times 200 \text{ W} = 200 \text{ W}$

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

Então:

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

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT



## 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 chegar 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:**

- Potência de operação das cargas = 320 W
- Potência de partida de cargas críticas = 2000 W

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

Então:

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

# Dimensionamento em Sistemas com MPPT

- 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).

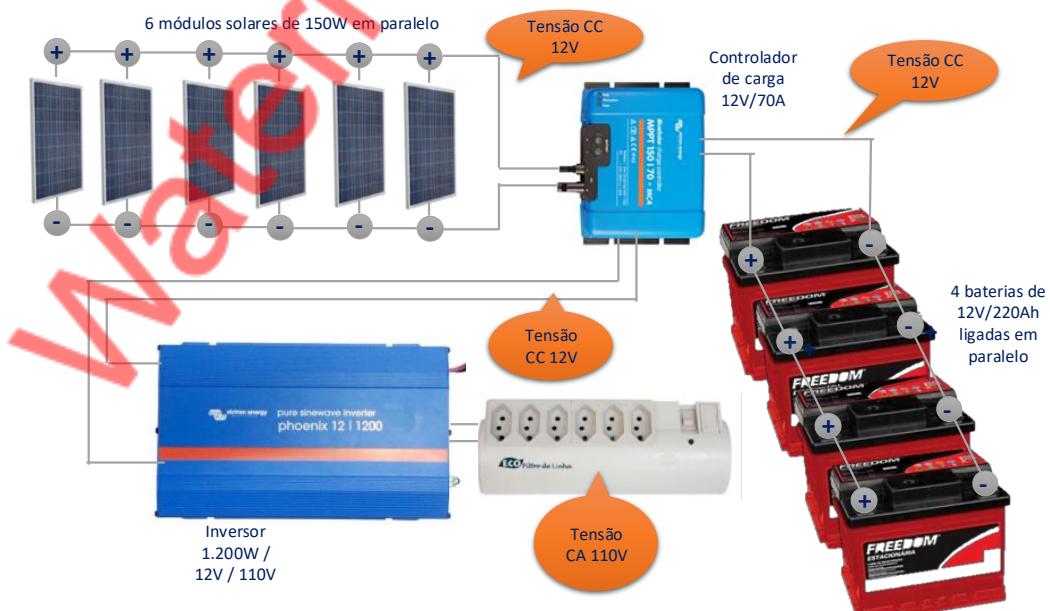
Características:

Entrada = 12 Vcc,  
Saída = 110 Vca,  
Potência Nominal = **1.200 W**  
Potência de Surto = **2.400 W**

Valor de referência: R\$ 2.000



# Dimensionamento em Sistemas com MPPT



## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



- O sistema fotovoltaico off-grid mais simples é o que não tem MPPT, ou seja, ele funciona com uma tensão fixa no controlador;
- Essa tensão fixa é no valor do banco de baterias geralmente;
- O primeiro passo é encontrar a energia produzida por um painel também;
- Vamos fazer um exemplo!

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



**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)

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



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

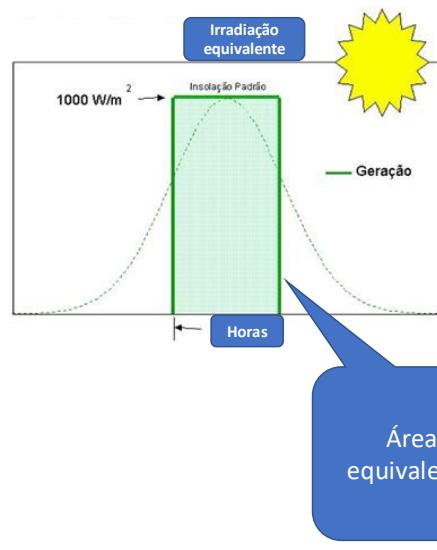


Vamos escolher o painel solar de **150 W** da Canadian. Este painel possui 36 células e suas tensões de saída são compatíveis com a operação em 12 V. Neste projeto vamos usar uma bateria e um controlador de carga de 12 V.

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



**Sem MPPT:**



## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



Dados do cálculo:

$$\text{Irradiação anual} = 5,381 \text{ kWh/m}^2/\text{dia} = 5381 \text{ Wh/m}^2/\text{dia}$$

Número de horas de sol pleno (considerando que a irradiância é 1000 W/m<sup>2</sup> durante o dia todo):

$$\text{Horas} = 5381 \text{ Wh/m}^2/\text{dia} | 1000 \text{ W/m}^2 = 5,381 \text{ horas/dia}$$

Em resumo: para obter o **número de horas de Sol** é só **dividir a irradiação diária (kWh/m<sup>2</sup>/dia) por 1.000**

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



Finalizando o cálculo:

Painel solar de 150 W da Canadian Solar

$I_{sc} = 8,84 \text{ A}$  (corrente de curto circuito em STC)

Tensão da bateria = 12 V

Energia = Tensão x Corrente x Horas =

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

Agora sim! Finalmente vamos calcular a energia...

Compare com o valor de 806,9 Wh obtido com o Método 1

Energia gerada pelo painel sem MPPT

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



### Cálculo do número de painéis

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

Energia gerada por um painel do modelo escolhido sem MPPT

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

Energia consumida pelas lâmpadas (que precisa ser gerada)

$$Np = Ec / Ep = 500 / 570,81 = 0,87 \text{ painel} = 1 \text{ painel}$$

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



Cálculo do número de painéis **incluindo o fator de performance de 1,25.**

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

Energia gerada por um painel do modelo escolhido sem MPPT

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

Energia consumida pela lâmpada (que precisa ser gerada)

$$Np = Ec / Ep = 500 / 570,81 = 0,87$$

Número de painéis sem considerar o fator de performance

$$Np' = Ec / Ep = 0,87 \times 1,25 = 1,08$$

Número de painéis considerando o fator de performance

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa

### Terceiro passo: banco de baterias e controlador de carga

- 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: 15%

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa

- 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)

$$\text{Capacidade} = 42 \text{ Ah} / 0,15 = 280 \text{ Ah}$$

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)

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



Agora escolhemos o modelo e a quantidade de 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	

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



170 Ah x 2

Para uso diário vamos escolher um tempo de descarga de 20 h, de acordo com a tabela do fabricante.

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

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



- 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

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



- Controlador de carga

Exemplo: Victron Light Charge Controllers 12/24V 20A  
Valor de referência: R\$ 250



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		28V / 55V (s)		
Self-consumption	< 10 mA			
Load output		Manual control + low voltage disconnect		
Protection	Battery reverse polarity (fuse)	Output short circuit	Over temperature	
	Shut down after 60 s in case of 150% load	Shut down after 5 s in case of 160% load		
Overload protection		Short circuit: immediate shut down		
Grounding		Common positive		
Operating temp. range	-20 to +50°C (full load)			
Humidity (non-condensing)	Max 95%			
<b>BATTERY</b>				
Charge voltage 'absorption'	14,3V / 28,4V			
Charge voltage 'float'	13,8V / 27,6V			
Low voltage load disconnect	13,2V / 25,4V			
Low voltage load reconnect	12,6V / 24,2V (manual)			
	13,4V / 26,3V (automatic)			
<b>ENCLOSURE</b>				
Protection class	IP20			
Terminal size	5 mm² / AWG10			
Weight	0,15kg			0,2kg
Dimensions (h x w x d)	70 x 133 x 33,5 mm (2.8 x 5.3 x 1.3 inch)			

Trabalha em 12V ou 24V

Corrente compatível com a que precisamos

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



### Determinação da potência nominal do inversor

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

Potência necessária:

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

**Total = 100 W**

Então:

$$P_{N-INVERSOR} = 100 \text{ W}$$

## Dimensionamento com Tensão de Operação Fixa



- 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).

Características:

Entrada=12V, Saída=220V, Potência=200W

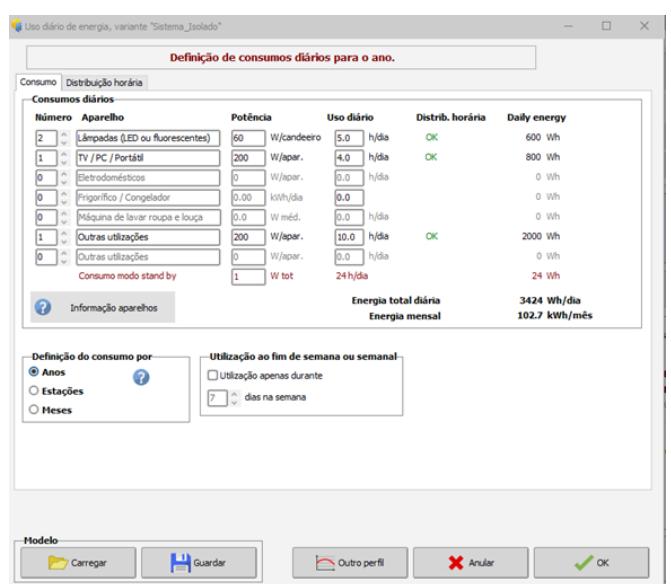
Valor de referência: R\$ 230



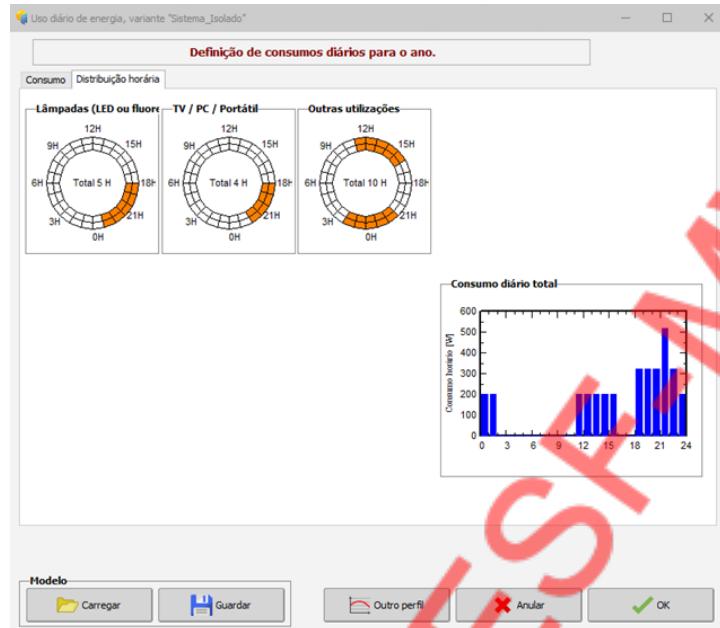
## Simulação no PVsyst



- Objetivo é buscar o kit FV;
- Ou similar um kit FV off-grid;
- A diferença é que você pode definir horários e dias de utilização.



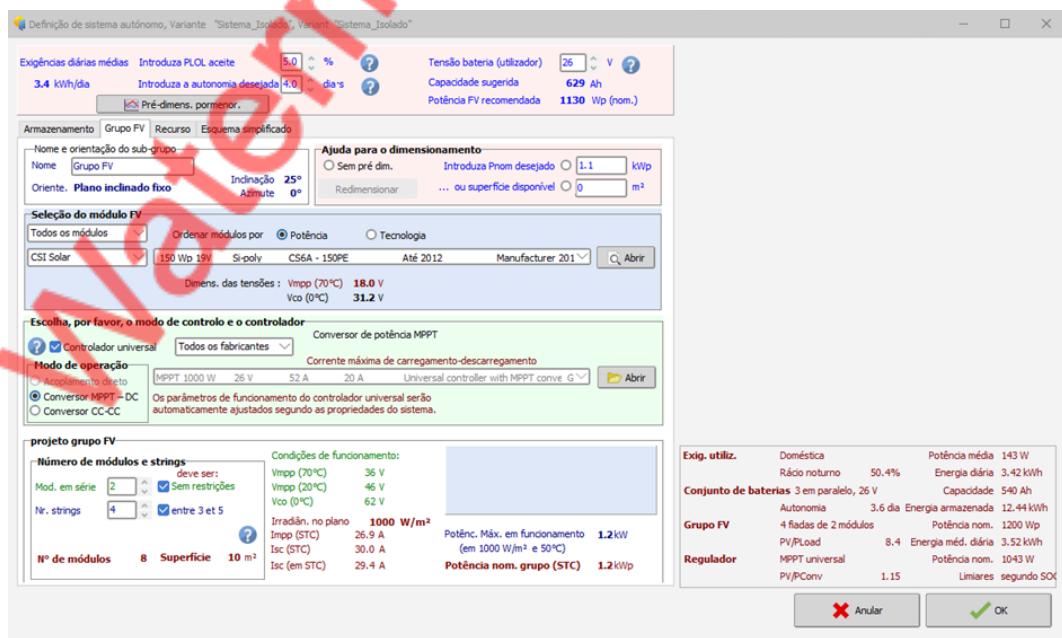
## Simulação no PVsyst



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

55

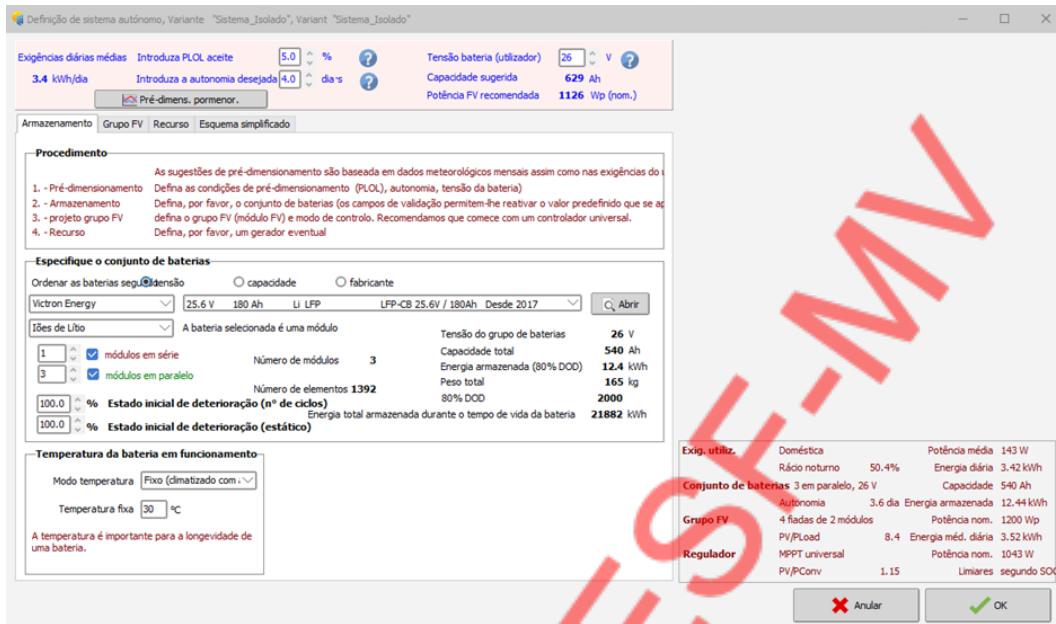
## Simulação no PVsyst



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

56

# Simulação no PVsyst

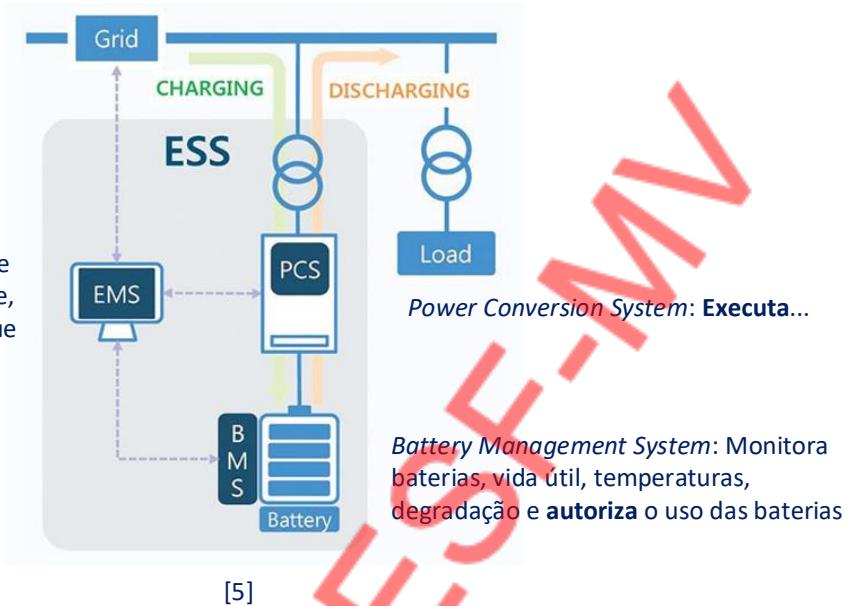


## BESS: Battery Energy Storage Systems

- **BESS (Battery Energy Storage System): Conjunto de baterias eletroquímicas e equipamentos de processamento de energia capazes de armazenar energia para permitir a flexibilização da gestão de energia produzida e/ou comprada com inteligência [4];**
- **Podemos considerar o BESS um sistema de baterias para grande aplicações (geralmente), composto por BMS, EMS e PCS;**
- No Brasil podemos chamar de SAEB (Sistemas de Armazenamento à (em) baterias);
- A IEC-62933 é dividida em 5 partes e trata sobre o BESS, apresentando inclusive normas de segurança.

# BESS: Battery Energy Storage Systems

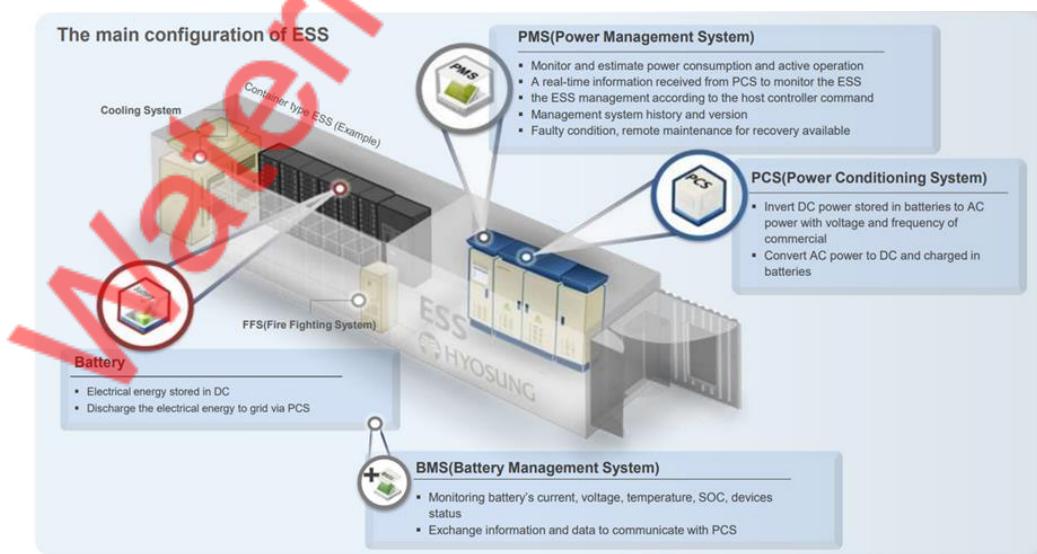
*Energy Management System:* Pode verificar as fontes de energia, rede, custos, e dizer o que o PCS tem que fazer... (Manda!)



Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

59

# BESS: Battery Energy Storage Systems

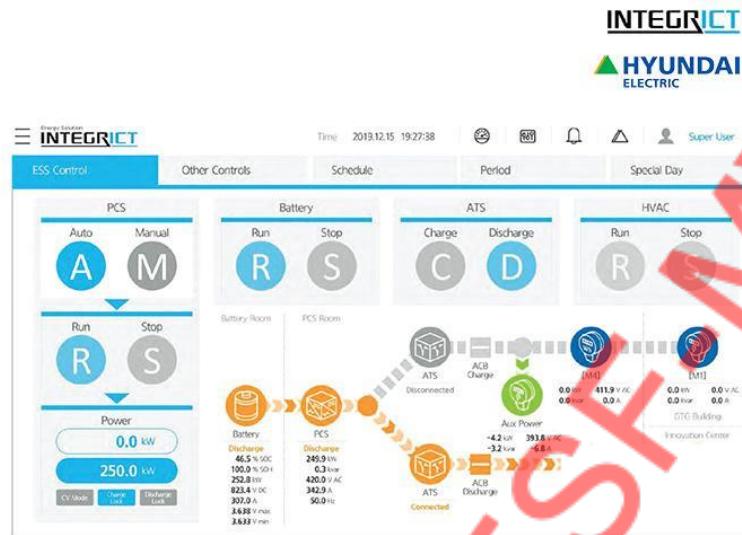


Hyosung Heavy Industries [6]

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

60

# BESS: Battery Energy Storage Systems



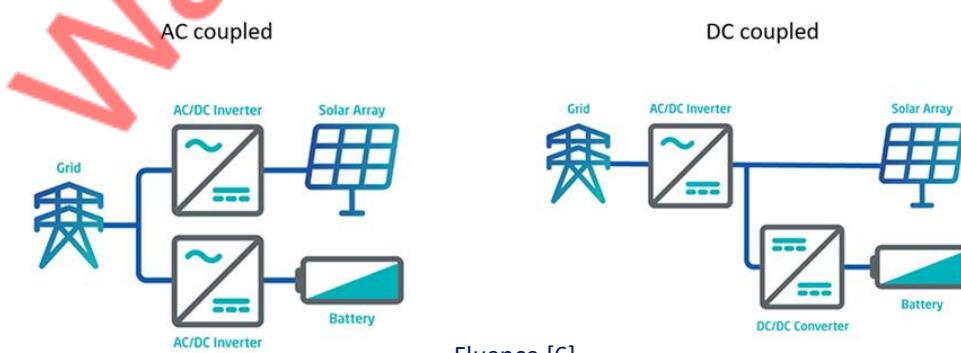
[5]

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

61

# BESS: Battery Energy Storage Systems

- Pode ser acoplado em AC ou em DC;
- Vantagem do DC é que você consegue armazenar a energia que seria cortada pelo inversor, e manter o trabalho dentro dos limites da GD, e que o custo tende a ser menor para novos sistemas;
- O DC não fica conectado diretamente na rede elétrica;
- O AC é excelente para sistemas que já existem.



Fluence [6]

Não é permitida a reprodução do material e gravação do curso - [www.lesfmv.com](http://www.lesfmv.com) - Prof. Dr. João Lucas de Souza Silva

62

# BESS: Battery Energy Storage Systems

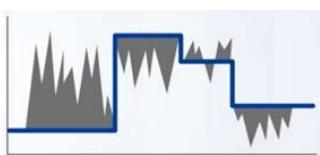
Funções....



Reducir intermitências  
(suavização de energia)...



Time-shift: Deslocar  
energia...



Qualidade de energia.  
Geralmente, nessas  
aplicações tem BESS  
híbridos com  
supercapacitores

Peak-Shaving: Reduzir a  
demanda com auxílio do  
BESS  
  
Backup

## Dimensionamento de um BESS

- Geralmente é feito por sensibilidade, ou seja, é testado diversos parâmetros para chegar no ótimo;
- Isso pode ser feito no SAM ou no HOMER;
- Os principais parâmetros do BESS são Capacidade (kWh), Potência Carga/Descarga (kW), tecnologia da bateria, e DOD (hoje em dia muitas trabalham com 90% ou 100%, então nem precisa variar);
- Parâmetros do fotovoltaicos: potência do inversor, potência dos módulos, **que resultam em relação DC/AC**, tecnologia de módulos, uso ou não de trackers;
- Estratégias: Quais funções o BESS vai realizar na instalação?
- Ou seja, os parâmetros são testados para ver qual situação possibilita o melhor retorno financeiro.

## Dimensionamento de um BESS

- Para estratégia o BESS com melhor inteligência para gestão de energia ou melhor configurado, irá entregar mais;
- No software SAM a inteligência pode ser **Ahead**, em que o software prever horas a frente do comportamento do sistema e tarifas para tomar a decisão. **Behind** onde os dados passados são replicados no futuro, por exemplo, ele considerar que nas próximas 4 horas o comportamento será o mesmo das 4 horas anteriores de produção fotovoltaica. E **customizados**.

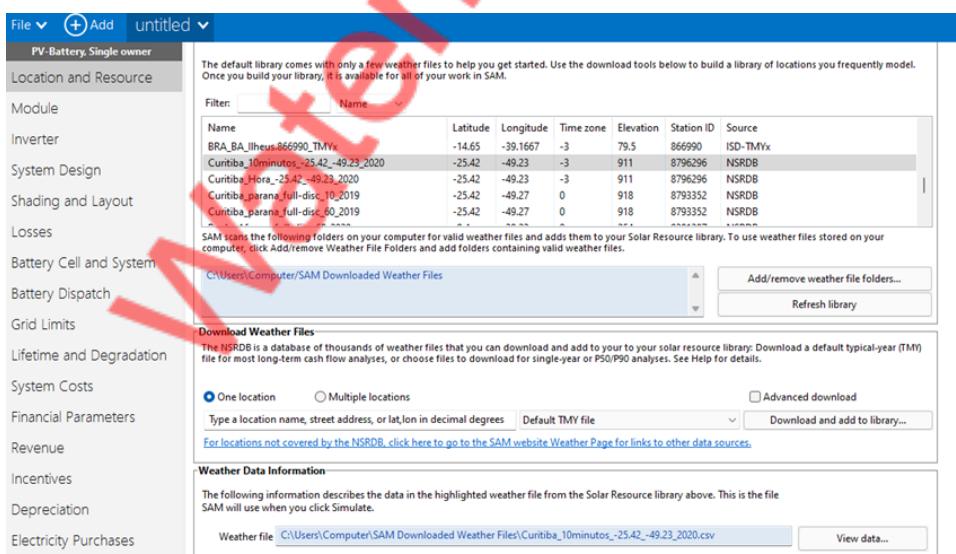
## Dimensionamento de um BESS

Curitiba-PR, com uma base de 10 min;

Bases de 1h não vão ter o real comportamento das intermitências;

Base de 1 min são pesadas para simulação e levam horas;

O SAM é um software que exige um bom processador e pelo menos 16 gb de ram.



Name	Latitude	Longitude	Time zone	Elevation	Station ID	Source
BRA_BA_Iherus_866990_TMY	-14.65	-39.1657	-3	79.5	866990	ISO-TMYx
Curitiba_10minutos_-25.42_-49.23_2020	-25.42	-49.23	-3	911	8796296	NSRDB
Curitiba_Hora_-25.42_-49.23_2020	-25.42	-49.23	-3	911	8796296	NSRDB
Curitiba_paraná_full-disc_10_2019	-25.42	-49.27	0	918	8793352	NSRDB
Curitiba_paraná_full-disc_50_2019	-25.42	-49.27	0	918	8793352	NSRDB

The default library comes with only a few weather files to help you get started. Use the download tools below to build a library of locations you frequently model. Once you build your library, it is available for all of your work in SAM.

SAM scans the following folders on your computer for valid weather files and adds them to your Solar Resource library. To use weather files stored on your computer, click Add/remove Weather File Folders and add folders containing valid weather files.

C:\Users\Computer\SAM Downloaded Weather Files

Add/remove weather file folders... Refresh library

Download Weather Files

The NSRDB is a database of thousands of weather files that you can download and add to your to your solar resource library. Download a default typical-year (TMY) file for most long-term cash flow analyses, or choose files to download for single-year or P50/P90 analyses. See Help for details.

One location Multiple locations Advanced download

Type a location name, street address, or lat,lon in decimal degrees Default TMY file Download and add to library...

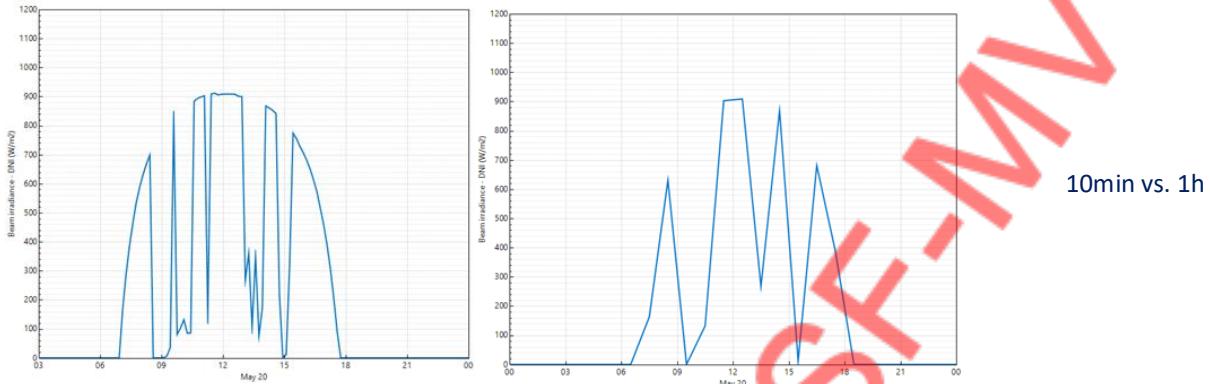
For locations not covered by the NSRDB, click here to go to the SAM website Weather Page for links to other data sources.

Weather Data Information

The following information describes the data in the highlighted weather file from the Solar Resource library above. This is the file SAM will use when you click Simulate.

Weather file: C:\Users\Computer\SAM Downloaded Weather Files\Curitiba\_10minutos\_-25.42\_-49.23\_2020.csv View data...

# Dimensionamento de um BESS



# Dimensionamento de um BESS

Name	Manufacturer	Technology	Bifacial	STC	PTC	A_c	Length	Width	N_s	I_sc_ref	V_oc_ref	I_mp_ref	V_mp_ref	a
BYD Company Limited BYD 315P6...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	315.0399	287.4	1.932	1.961	0.985	72	9.07	46.09	8.61	36.59	0
BYD Company Limited BYD315P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	314.9538	288.8	1.94			72	9.07	46.09	8.61	36.58	0
BYD Company Limited BYD 320P6...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	319.986	292.1	1.932	1.961	0.985	72	9.15	46.39	8.7	36.78	0
BYD Company Limited BYD320P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	319.986	293.5	1.94			72	9.15	46.39	8.7	36.78	0
BYD Company Limited BYD325P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	325.0542	298.2	1.94			72	9.23	46.69	8.79	36.98	0
BYD Company Limited BYD330P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	329.9898	302.9	1.94			72	9.31	46.98	8.88	37.16	0
BYD Company Limited BYD335P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	335.0295	307.6	1.94			72	9.39	47.28	8.97	37.35	0
BYD Company Limited BYD340P6K...	BYD Company Limit...	Multi-c-Si	0	340.0218	312.3	1.94			72	9.47	47.58	9.06	37.53	0

**Module Characteristics at Reference Conditions**

Reference conditions: Total irradiance = 1000 W/m<sup>2</sup>, Cell temp = 25 °C

BYD Company Limited BYD340P6K-36

Module Current (Amps)

Module Voltage (Volts)

Nominal efficiency	17.5269 %	Temperature coefficients
Maximum power (Pmp)	340.022 Wdc	-0.383 %/°C
Max power voltage (Vm)	37.5 Vdc	-1.301 W/°C
Max power current (Imp)	9.1 Adc	
Open circuit voltage (Voc)	47.6 Vdc	-0.302 V/°C
Short circuit current (Isc)	9.5 Adc	-0.040 A/°C

**Bifacial Specifications**

Module is bifacial

Transmission fraction

Bifaciality

Ground clearance height

# Dimensionamento de um BESS

PV-Battery, Single owner   Inverter CEC Database

Location and Resource

Module

Inverter

System Design

Shading and Layout

Losses

Battery Cell and System

Battery Dispatch

Grid Limits

Lifetime and Degradation

System Costs

Financial Parameters

Revenue

Incentives

Depreciation

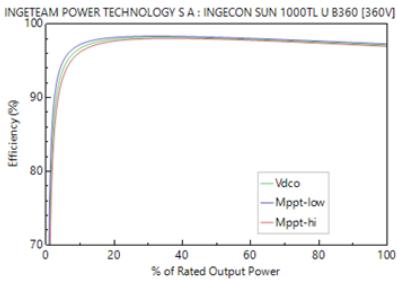
Electricity Purchases

Filter: Name

Name	Paco	Pdco	Pso	Pnt	Vac	Vdcmax	Vdco	Mppt_high	Mppt_low	C0
Hanwha Q CELLS America Inc : Q.HOME+ AC-G1-8.6 [240V]	8613	9035.986328	47.477695	2.583900	240	430	396...	430	363	-2.6128
Hanwha Q CELLS America Inc : Q.HOME+ HYB-G1-7.6 [240V]	7642	7986.081543	49.244095	2.292600	240	500	402	500	304	-2.27195
Hanwha Q CELLS America Inc : Q.HOME+ HYB-G1-8.6 [240V]	8604	9013.821289	47.349014	2.581200	240	500	379	500	258	-2.55851
INGETEAM POWER TECHNOLOGY S A : INGECON SUN 1000TL ...	1000...	1029525	3055.144287	300	360	740	632	740	524	-2.42201
INGETEAM POWER TECHNOLOGY S A : INGECON SUN 1110TL ...	1110...	1140195.125...	3330.634521	333.000000	400	740	660	740	580	-1.9456

Efficiency Curve and Characteristics

INGETEAM POWER TECHNOLOGY S A : INGECON SUN 1000TL U B360 [360V]



Number of MPPT inputs: 1   CEC weighted efficiency: 97.760 %  
European weighted efficiency: 97.675 %

-Datasheet Parameters-

Maximum AC power	1e+06 Wac
Maximum DC power	1.02952e+06 Wdc
Power use during operation	3055.14 Wdc
Power use at night	300 Wac
Nominal AC voltage	360 Vac
Maximum DC voltage	740 Vdc
Maximum DC current	1629 Adc
Minimum MPPT DC voltage	524 Vdc
Nominal DC voltage	632 Vdc
Maximum MPPT DC voltage	740 Vdc

-Sandia Coefficients-

C0	-2.42207e-08 1/Wac
C1	1.6e-05 1/Vdc
C2	0.001758 1/Vdc
C3	0.000655 1/Vdc

Note: If you are modeling a system with microinverters or DC power optimizers, see the Losses page to adjust the system losses accordingly.

-CEC Information-

CEC name: INGETEAM POWER TECHNOLOGY S A : INGECON   CEC hybrid: Y   CEC type: Grid Support   CEC date: n/a

# Dimensionamento de um BESS

PV-Battery, Single owner

Location and Resource

Module

Inverter

System Design

Shading and Layout

Losses

Battery Cell and System

Battery Dispatch

Grid Limits

Lifetime and Degradation

System Costs

Financial Parameters

AC Sizing

Number of inverters: 1   DC to AC ratio: 1.30   Desired array size: 1300 kWdc   Desired DC to AC Ratio: 1.3

Estimate Subarray 1 configuration

**Sizing Summary**

Nameplate DC capacity	1,300.583 kWdc	Number of modules	3,825
Total AC capacity	1,000.000 kWac	Number of strings	255
Total inverter DC capacity	1,029.525 kWdc	Total module area	7,420.5 m <sup>2</sup>
Battery maximum power	999.799 kWdc		

**DC Sizing and Configuration**  
To model a system with one array, specify properties for Subarray 1 and disable Subarrays 2, 3, and 4. To model a system with up to four subarrays connected in parallel to a single bank of inverters, for each subarray, check Enable and specify a number of strings and other properties.

**Electrical Configuration**

	Subarray 1	Subarray 2	Subarray 3	Subarray 4
(always enabled)	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable	<input type="checkbox"/> Enable	
Modules per string in subarray	15			
Strings in parallel in subarray	255			
Number of modules in subarray	3,825			
String Voc at reference conditions (V)	713.7			
String Vmp at reference conditions (V)	563.0			

# Dimensionamento de um BESS

**PV-Battery, Single owner**

**Chemistry**  
Battery type Lithium Ion: Lithium Iron Phosphate (LFP/Graphite)

**Battery Bank Sizing**  
Specify desired values for the nominal bank capacity and power for SAM to calculate the number of cells and strings, or specify the number of cells and strings yourself. Verify the battery size under Current and Capacity below.

Set desired bank size  
 Specify cells

Desired bank power  kW      Desired bank capacity  kWh       DC units       AC units

Number of cells in series       Number of strings in parallel

Max C-rate of charge  per/hour      Max C-rate of discharge  per/hour

Bank capacity and power fields are values measured before conversion and parasitic losses. If specified in AC, the DC/AC conversion efficiency will be used to scale the battery size.

**Lifetime and Degradation**

# Dimensionamento de um BESS

**PV-Battery, Single owner**

**Charge Limits and Priority**  
Minimum state of charge  %      Initial state of charge  %  
Maximum state of charge  %      Minimum time at charge state  min

**Storage Dispatch Controller**

**-Dispatch Options-**

Automated dispatch look ahead  
 Automated dispatch one day look behind  
 Automated dispatch custom weather file  
 Dispatch to custom time series  
 Manual dispatch

**-Charge Options-**

Battery can charge from grid  
 Battery can charge from system  
 Battery can charge from clipped system power

**Automated Dispatch Options**  
The automated dispatch options consider the PPA price, electricity rate, battery cycle cost, and inverter power limiting to decide when to charge and discharge, using one of the time horizon options.

**-Dispatch Frequency and Look-ahead Period**  
Frequency to update dispatch  hours  
Look-ahead period  hours

**-Cycle Degradation Penalty**  
The controller cycles the battery only if anticipated revenue exceeds the cycle degradation penalty. A higher penalty decreases cycling, a lower penalty increases cycling and may result in more frequent battery replacements. Battery replacement inputs are on the Battery Cell and System page.

Cycle degradation penalty option       Cycle degradation penalty  \$/cycle-kWh

**-Custom Weather File for Forecast**

**Custom Time Series Dispatch**  
Import time series data to charge or discharge the battery according to a predetermined schedule by time step.

Time series battery power targets

**Location and Resource**  
**Module**  
**Inverter**  
**System Design**  
**Shading and Layout**  
**Losses**  
**Battery Cell and System**  
**Battery Dispatch**  
**Grid Limits**  
**Lifetime and Degradation**  
**System Costs**  
**Financial Parameters**  
**Revenue**  
**Incentives**  
**Depreciation**  
**Electricity Purchases**

# Dimensionamento de um BESS

**Grid Interconnection Limit**

Enable interconnection limit

The grid interconnection limit is a negotiated limit beyond which the system is not allowed to export power. Any AC power generated above the grid interconnection limit is curtailed.

Grid interconnection limit 1000 kWac

**Grid Curtailment**

Click Edit Array to enter values in the curtailment schedule table. SAM limits the system power output to the MW power values in the table. Any curtailed system power is compensated at the curtailment rate on the Revenue page.

Curtailment  MW

# Dimensionamento de um BESS

Financial Parameters	
Revenue	TOD factors
Incentives	Period 1: 1
Depreciation	Period 2: 0.1
Electricity Purchases	Period 3: 1.665
	Period 4: 1
	Period 5: 1
	Period 6: 1
	Period 7: 1
	Period 8: 1
	Period 9: 1

Weekday		12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm	11pm
Jan	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Feb	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Mar	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Apr	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
May	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Jun	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Jul	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Aug	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Sep	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Oct	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Nov	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	
Dec	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	3	3	3	1	1	1	

Período 2 é um horário reservado, didaticamente para entender as simulações...

# Dimensionamento de um BESS

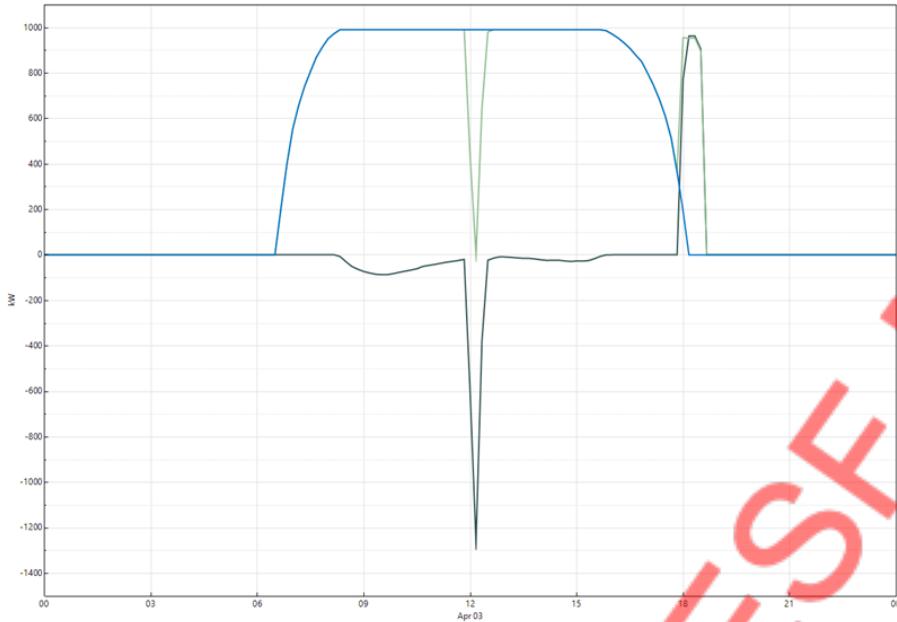
	batt_bank_size (kWh)	batt_bank_power (kW)	annual_energy	annual_inv_cliploss	firstyear_energy_dispatch2	firstyear_energy_dispatch3	lcoe_nom	Number of simulations
1	0	0						
2	450	400						
3	500	400						
4	550	400						
5	600	400						
6	650	400						
7	700	400						
8	750	400						
9	800	400						
10	850	400						
11	900	400						
12	950	400						
13	1000	400						
14	400	600						
15	450	600						
16	500	600						
17	550	600						
18	600	600						
19	650	600						
20	700	600						
21	750	600						
22	800	600						
23	850	600						
24	900	600						

# Dimensionamento de um BESS



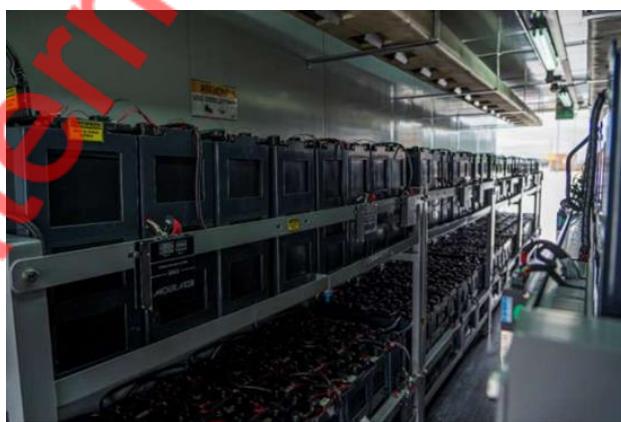
- Azul é a energia FV sem bateria;
- Verde é com bateria;
- Reparem que 12h é o horário de tarifa mais barata, então ele foca em carregar bateria para descarregar no pico...

## Dimensionamento de um BESS



- Azul é a energia FV sem bateria;
- Verde é com bateria;

## Dimensionamento de um BESS



Moura [7]

## Avaliação Econômica LCOE e LCOS

$$\sum_{t=0}^T \left( \frac{\text{LCOE}_t}{(1+r)^t} \times E_t \right) = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

Rearranging, the LCOE can be found explicitly assuming a constant value per year in Eq. (2).

$$\text{LCOE} = \frac{\sum_{t=0}^T C_t / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^T E_t / (1+r)^t} \quad (2)$$

C<sub>t</sub> são custos totais

E<sub>t</sub> energia total...

LCOE é o custo nivelado da energia produzida. **Quanto custa a energia produzida custa?**

LCOS é o custo nivelado da energia descarregada pelo armazenamento. **Quanto custa a energia descarregada da bateria?**

**Em usinas com baterias é interessante avaliar as tecnologias separadamente, já que a bateria aumenta muito o LCOE;**

## Considerações Finais

- Existem os sistemas off-grid: com MPPT ou tensão fixa;
- Existem os sistemas híbridos que não tratamos aqui para residência;
- E o BESS que vem surgindo como uma tecnologia promissora para grandes usinas,

Aplicações com baterias são o futuro da eletricidade, devido a gestão e resiliência proporcionada por elas.

## Exercício

Uma residência localizada em uma área isolada precisa de um sistema fotovoltaico off-grid para suprir sua demanda elétrica. Os equipamentos utilizados na casa são os seguintes:

Aparelho	Potência (W)	Tempo de uso diário (h)
Geladeira	150	24
Televisão	100	5
Iluminação (LED)	80	6
Ventilador	75	8
Máquina de lavar	500	2
Notebook	60	4

## Exercício

O sistema deverá operar com baterias de chumbo-ácido de 12V e 150Ah, e um banco de painéis solares capaz de carregar as baterias durante 5 horas de sol pleno por dia. Com base nesses dados, determine:

- a) A energia diária total consumida pela residência (em Wh).
- b) A capacidade mínima do banco de baterias (em Ah) para garantir **autonomia de 2 dias**.

## Referências

- [1] Bueno, A. F. M., & Brandão, C. A. L. (2016). Visão Geral de Tecnologia e Mercado para os Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica no Brasil. *Abaque*, 62.
- [2] Cantane, D. A., Hideo, O., & Junior, A. (2020). Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro. In *Tecnologias de Armazenamento de Energia Aplicadas ao Setor Elétrico Brasileiro*. <https://doi.org/10.26626/978-65-5668-013-2.2020b0001>
- [3] <http://www.smartgrid.com.br/eventos/smartgrid2018/adalberto.pdf>
- [4] Profjl.com
- [5] <https://www.electricityandindustry.com/what-is-energy-storage-system/>
- [6] <https://www.energytoolbase.com/newsroom/blog/the-primary-components-of-an-energy-storage-system-that-you-need-to-know>
- [7] ITEM. Apresentação Moura Baterias. Onde tem energia, tem moura. (n.d.). Disponível em: <http://www.tec.abinee.org.br/2019/arquivos/e4171.pdf>. Acessado em 26 de Fev. 2021.
- [8] Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M. (2011). A review of solar photovoltaic leveled cost of electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4470–4482. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.104>

Meu Obrigado!

