

Sistemas de Armazenamento de Energia a base de baterias

PATRICIO RODOLFO IMPINNISI
rodolfo@lactec.org.br



institutos **lactec**

BORN INNOVATIVE

ÍNDICE

- 1. BATERIAS - APLICAÇÕES E SEUS PROBLEMAS**
- 2. BATERIAS - CONCEITOS FUNDAMENTAIS**
- 3. DIMENSIONAMENTO BÁSICO**
- 4. EXERCÍCIOS**
- 5. COMENTÁRIOS**
- 6. TESTES DE BATERIAS**

UNIDADES

Lembrando definições de **unidades**

Ampere : 1 Coulomb/segundo

Capacidade [C] = I [A] x t [s] ou **Capacidade** [Ah] = I [A] x t [h]

E a Energia? **Energia** [J] = tensão [V] x Corrente [A] x Tempo [s] ou

Energia [Wh] = Tensão [V] x Corrente [A] x Tempo [h] = Capacidade [Ah] x tensão [V]

Potência [W] = Tensão [V] x Corrente [A] = Energia [Wh] / Tempo [h]

Quantos Joules é 1 kWh? R: 1 kWh = 3600 J

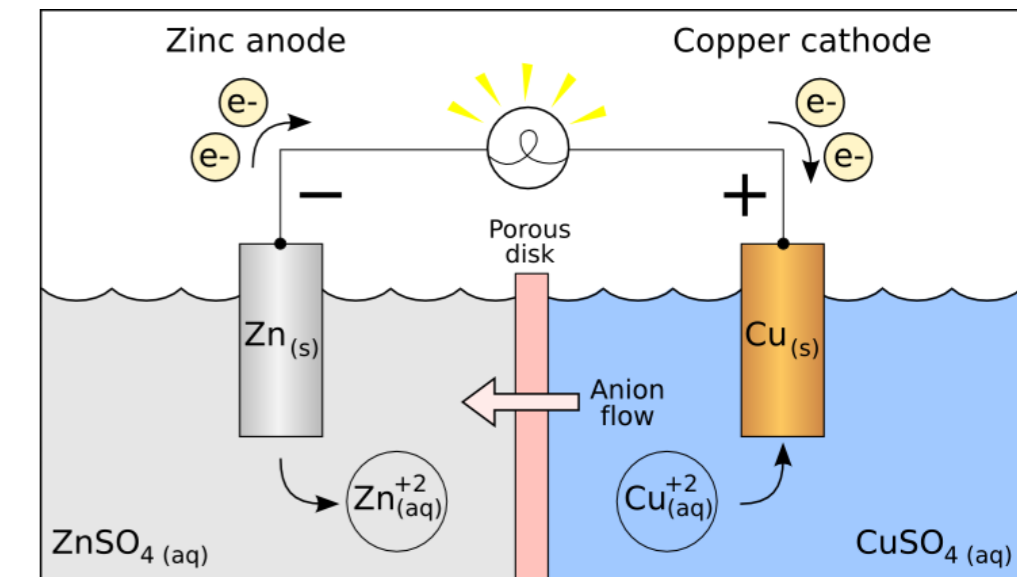
Qual a energia em kWh produzida por 5,2 MW em 3 segundos? R: 4,3 kWh



BATERIAS

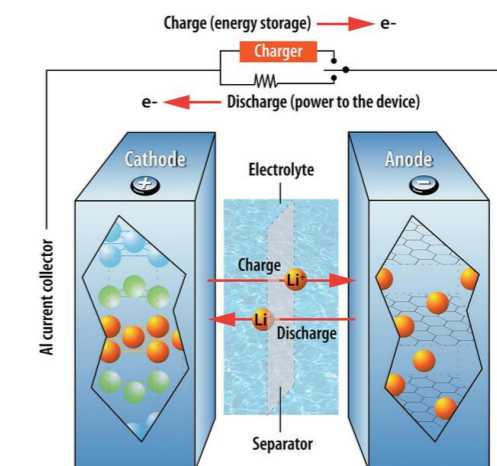
Uma bateria é um dispositivo que converte energia química em elétrica e vice-versa.

Este dispositivo separa as reações catódicas das anódicas!



Seus principais componentes são **eletrodos, eletrólito e separador**.

Sua unidade básica é a célula. Baterias são arranjos de muitas células.



A PORTABILIDADE...

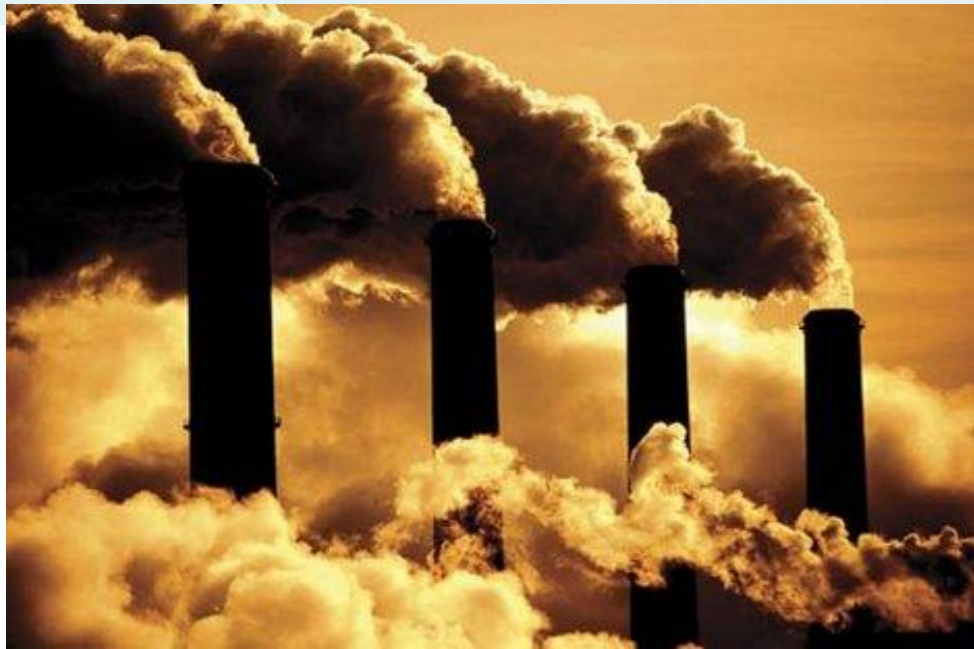


Problema central da portabilidade.....

...os sistemas de armazenamento de energia!!!



AS ENERGIAS RENOVÁVEIS...



O problema da utilização de fontes de energia renováveis.....
...o sistema de armazenamento!!!



OS VEÍCULOS ELÉTRICOS...

China...



O problema central dos
veículos elétricos.....
...os sistemas de
armazenamento de energia!!!



São Paulo...



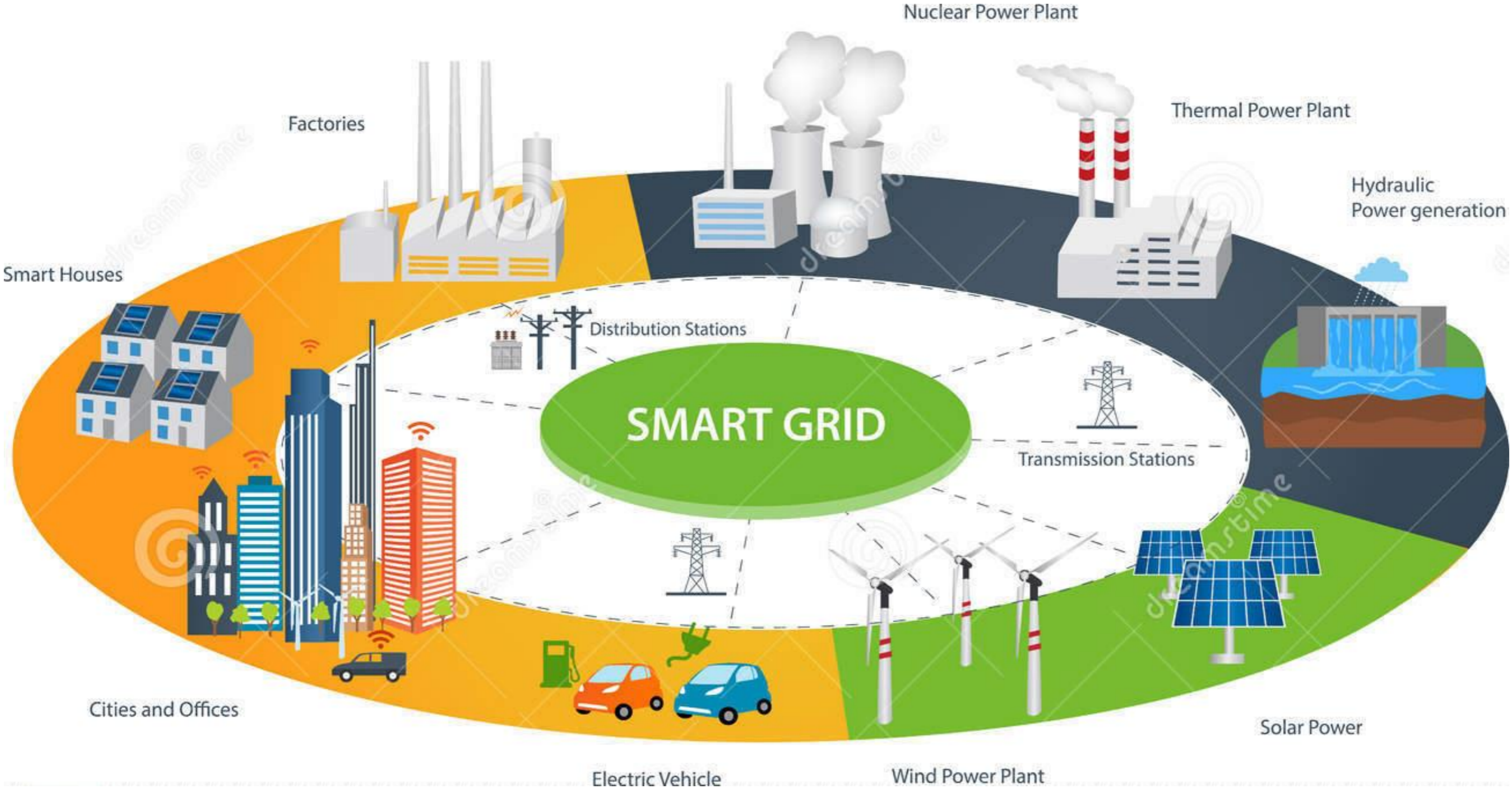
Índia...



REDES E CIDADES INTELIGENTES



institutos **lactec**



SMART GRIDS E EV'S



O PROBLEMA CENTRAL: AS BATERIAS



O conhecimento sobre sistemas de baterias é central a muitos problemas



Conhecer e entender as baterias é um tema atual

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Primarias e secundarias



Baterias estacionarias



Baterias tracionarias



Baterias de arranque



Baterias para
aplicações especiais

Baterias ventiladas

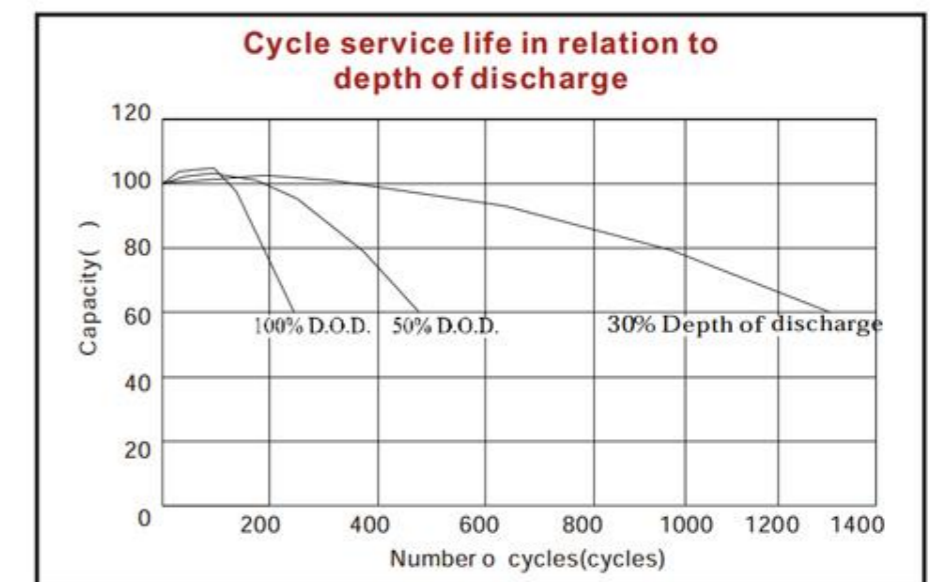
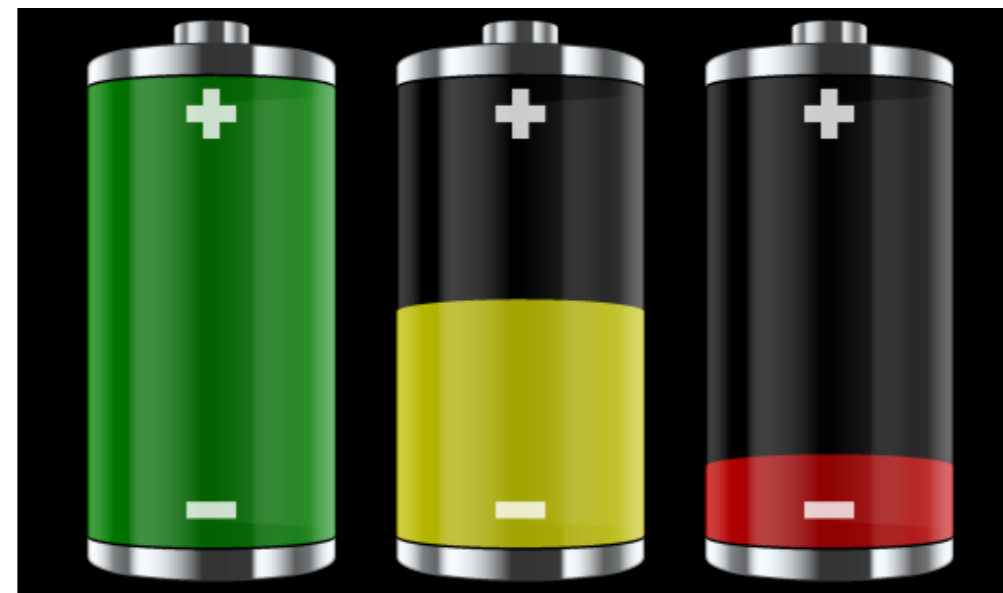
Baterias seladas (VRLA)

Tubulares ou planas

Baterias GEL

Baterias AGM

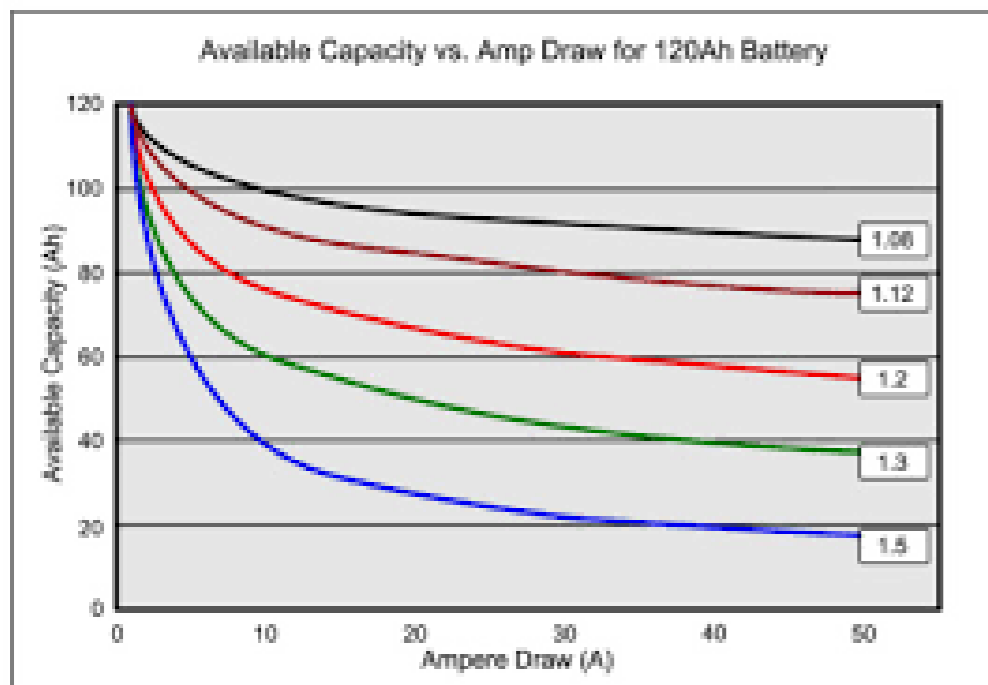
Capacidade de uma bateria [Ah]



Terminologia C_n : C_1 , C_{20} , C_{100} , etc.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Capacidade em função da corrente de descarga. A Lei de Peukert



Qual o regime de descarga para dar 120 Ah ?

$$t_r = \left(\frac{C_n}{I_r t_n} \right)^k t_n$$
$$t_r = \left(\frac{100}{10 \cdot 20} \right)^{1,4} 20$$

$$t_r = 7,6 h$$

Suponha que a capacidade de uma bateria em regime de 20 horas de descarga é 100 Ah.

Baseado nesta especificação sabemos que a bateria pode fornecer 5 A por 20 h mantendo a tensão acima de 10,5 V.

Se aumentamos a corrente de descarga para 10 A poderíamos **concluir erroneamente** que a bateria vai durar 10 horas.

Utilizando a Lei de Peukert se encontra que a bateria vai durar significativamente menos que 10 horas.

Para resolver esta equação é necessário conhecer o **exponente** que nela aparece. Para baterias ventiladas de chumbo-ácido este expoente vale entre 1,2 e 1,6. No exemplo foi utilizado 1,4.

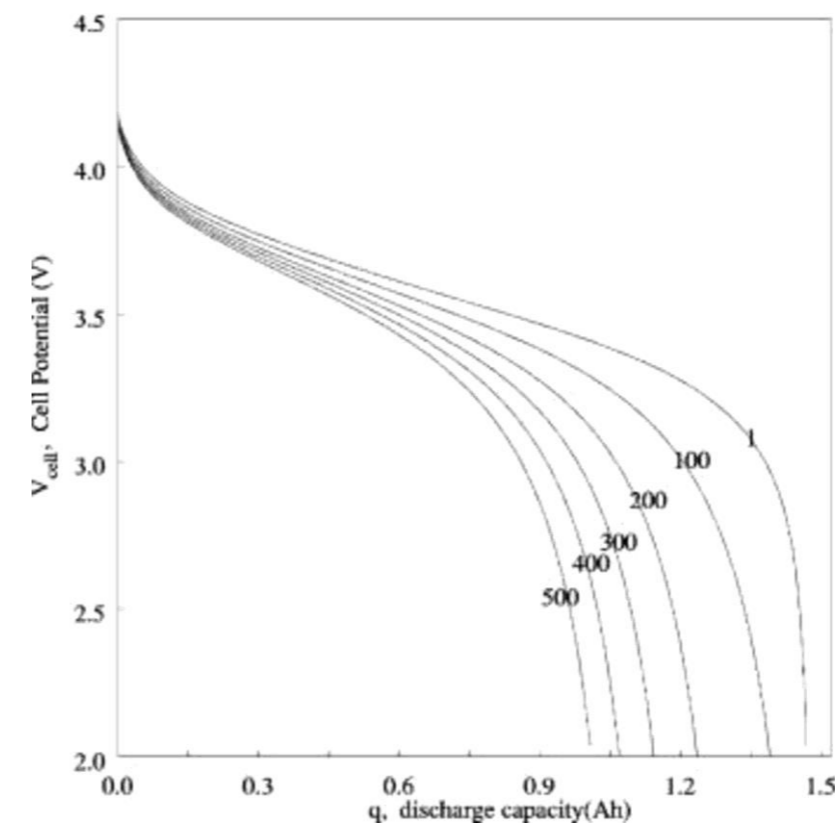
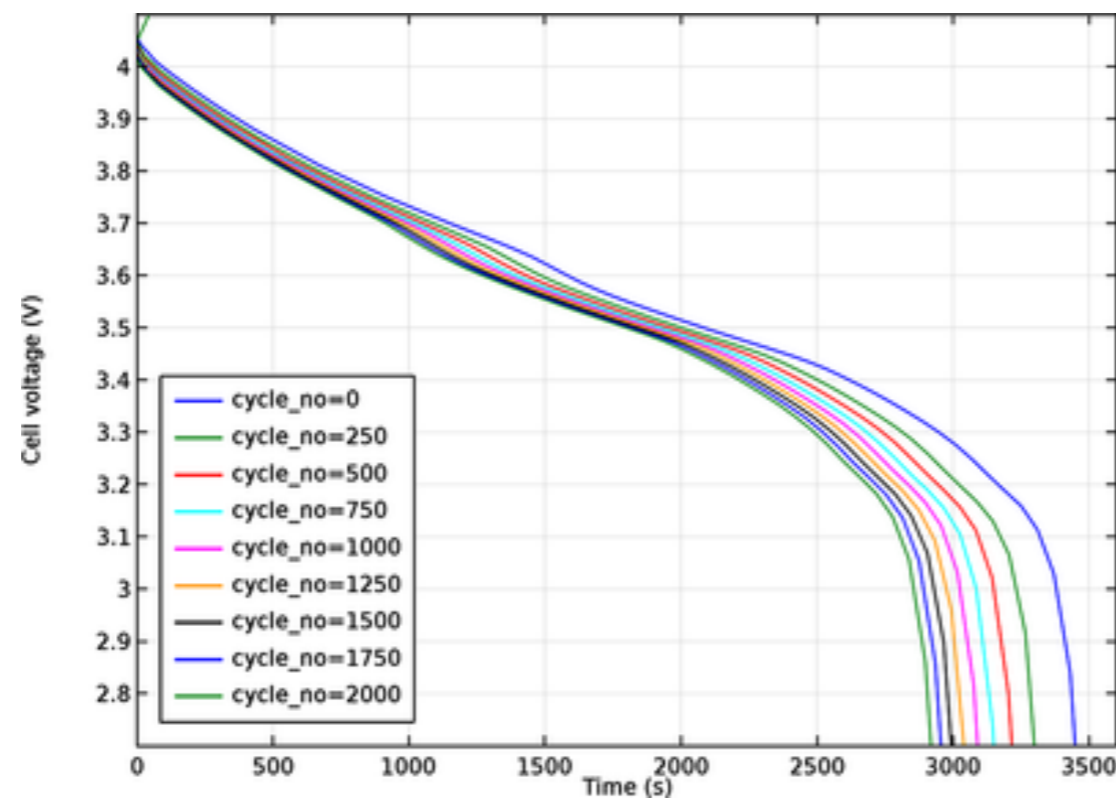
CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Outras características elétricas

RC - Reserva de Capacidade: 25 A até o potencial de corte.

CCA - Cold Cranking Amperage: -18 °C, 30 ou 60 segundos, elevadas correntes.

A **capacidade não é constante** ao longo da vida útil da bateria...nem os outros parâmetros...



CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Tensões

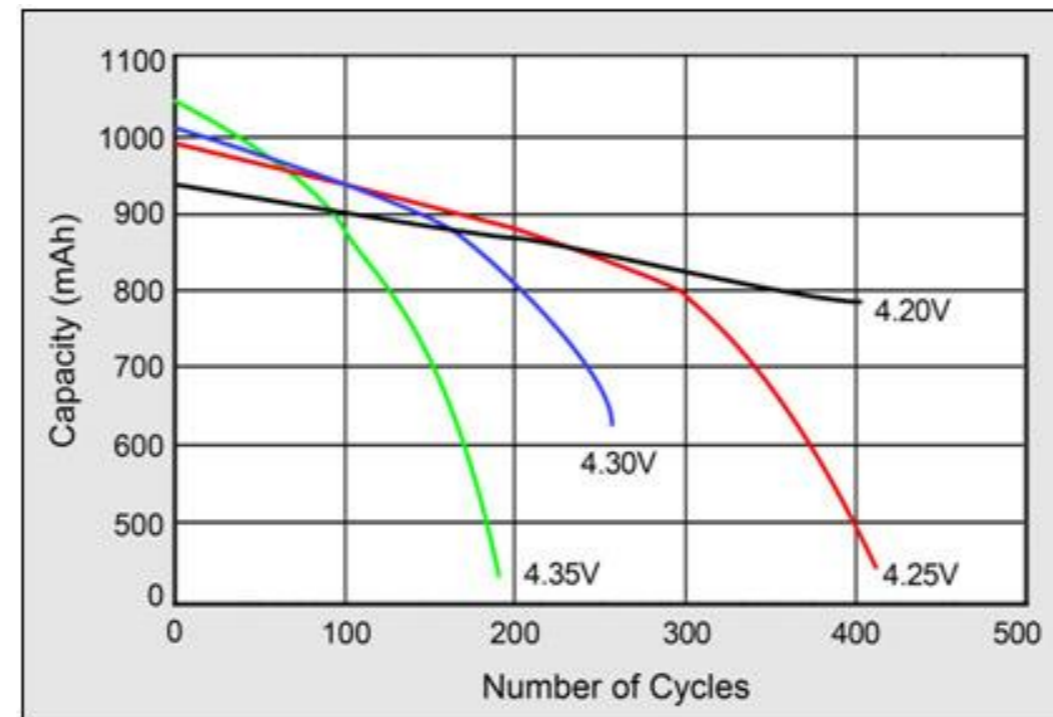
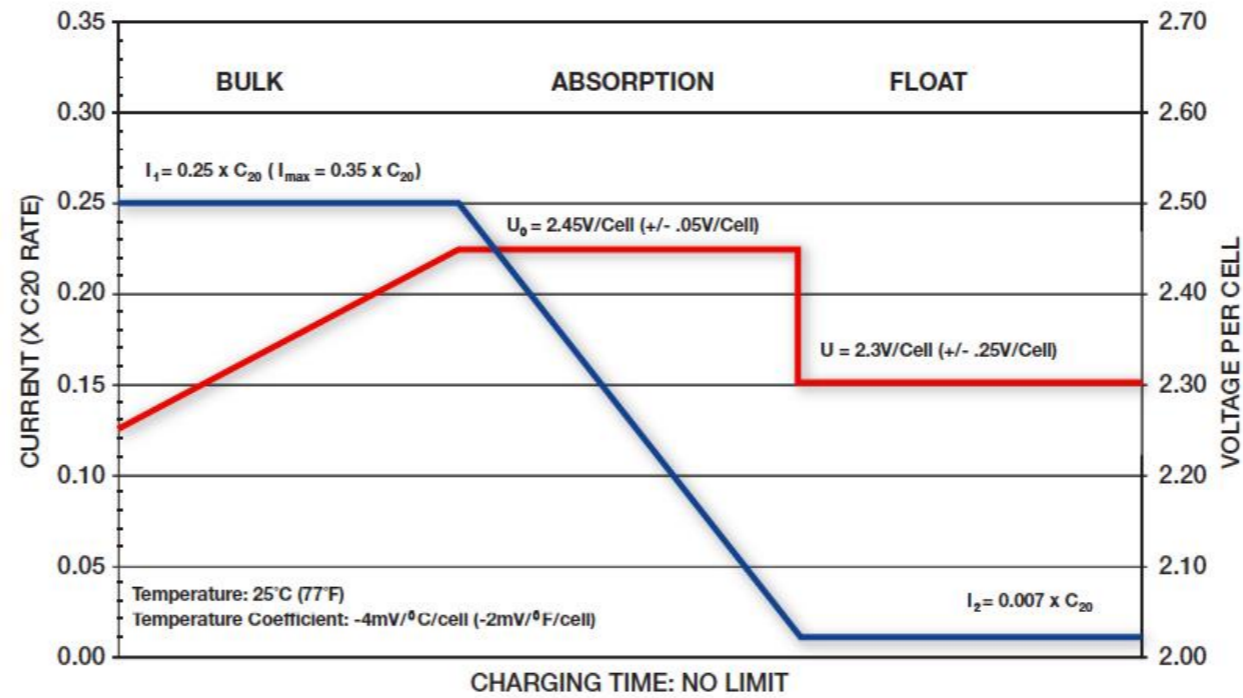
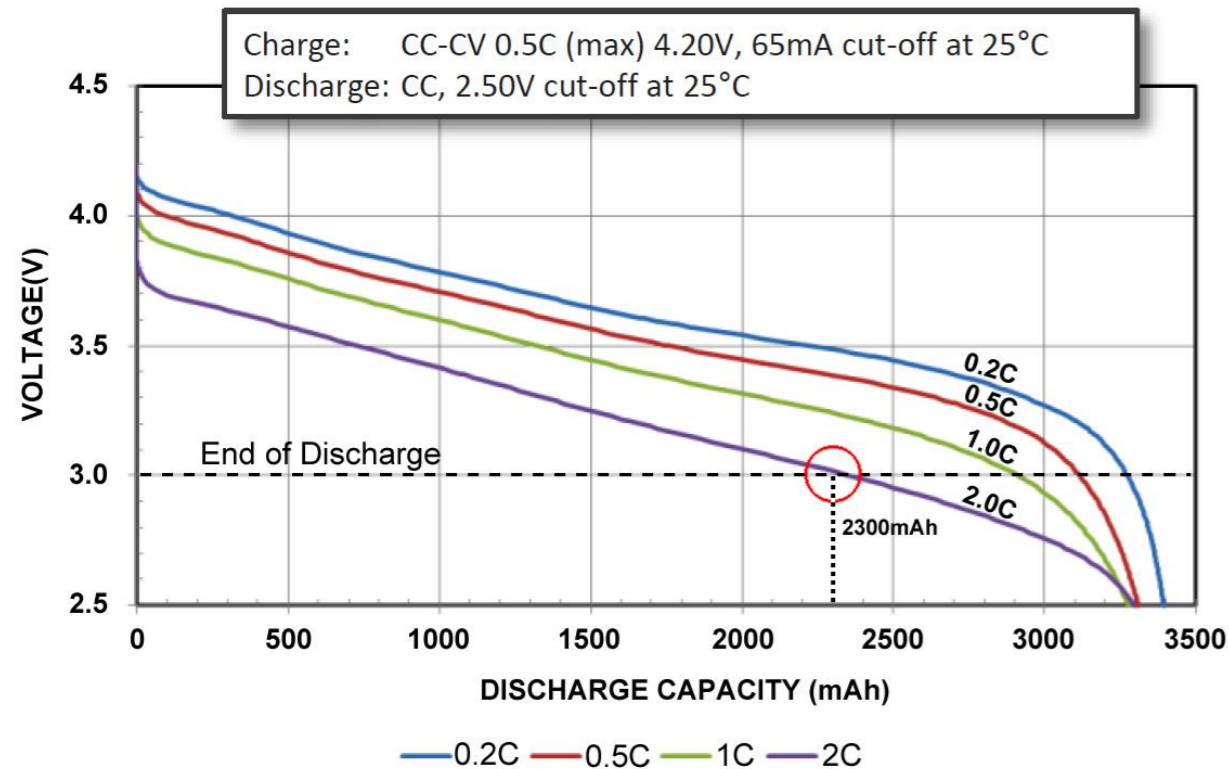
Nominal

Final de descarga

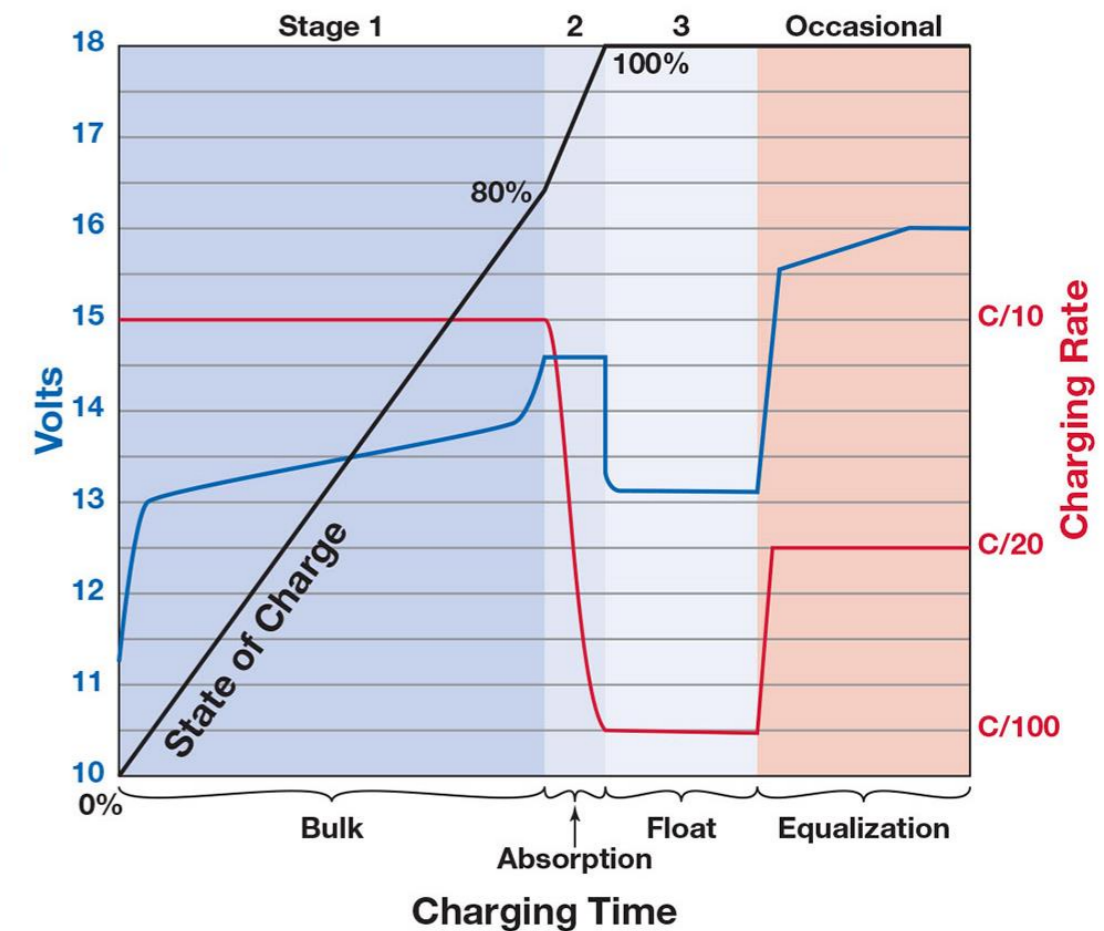
de carga

de flutuação

de equalização

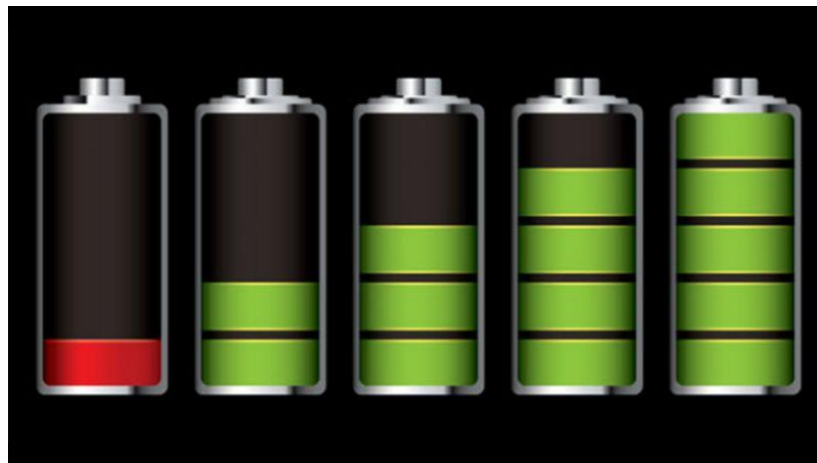


Equalização de uma bateria de 12 V de chumbo-ácido



CONCEITOS FUNDAMENTAIS

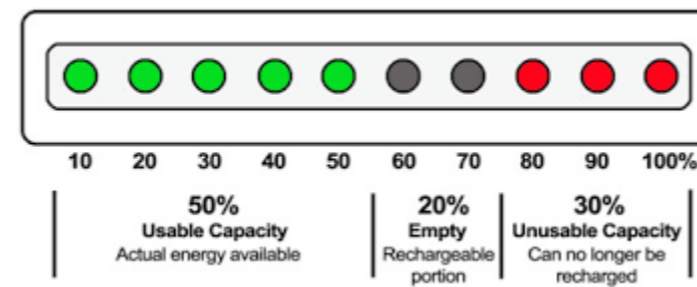
Estado de Carga - SoC



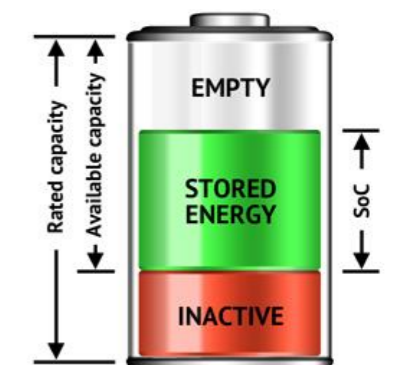
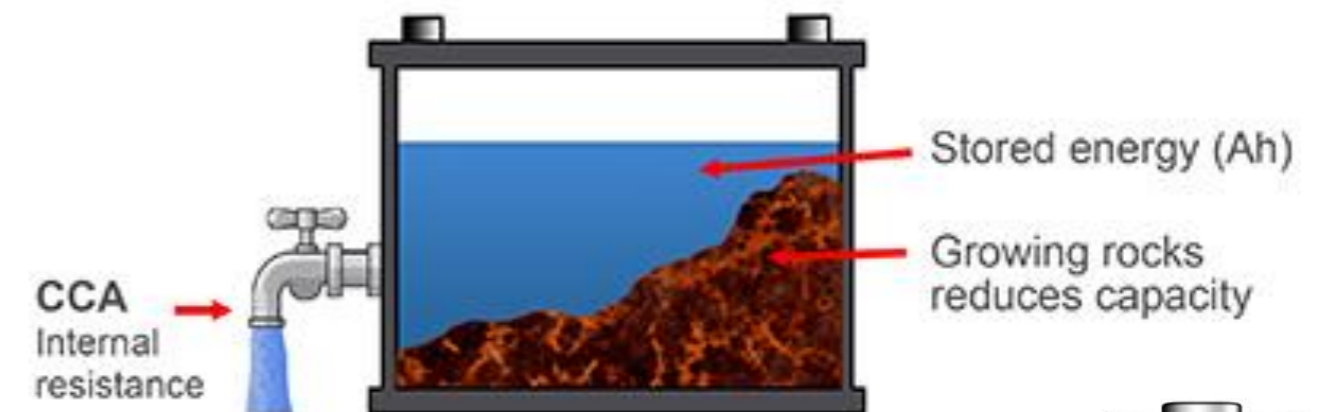
Estado de Função - SoF



Estado de Saúde - SoH



Resistência Interna (impedância)



Voltage	State of Charge
12.6+	100%
12.5	90%
12.42	80%
12.32	70%
12.20	60%
12.06	50%
11.9	40%
11.75	30%
11.58	20%
11.31	10%
10.5	0%

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

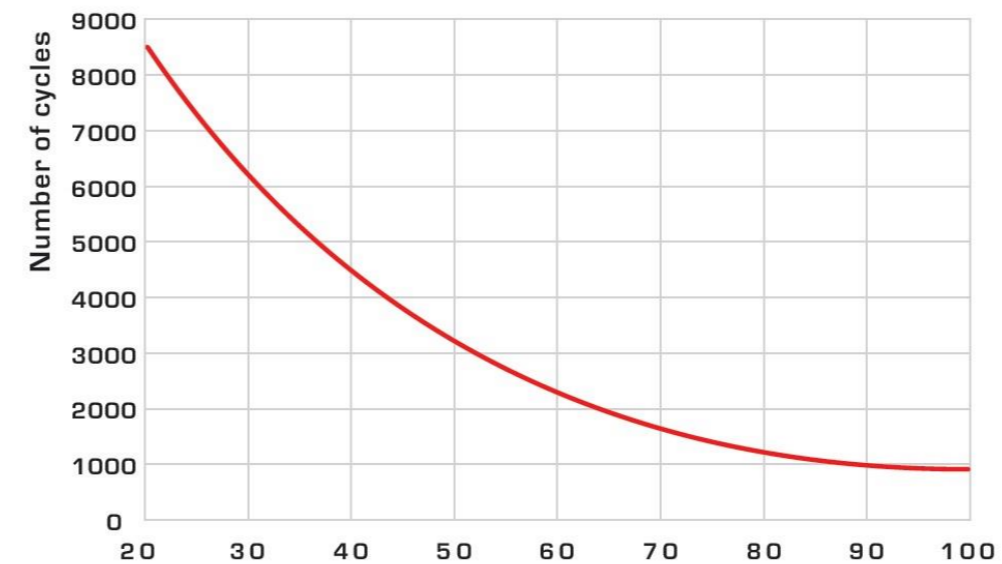
Eficiência da carga

$$Eficiência = \frac{Fornecido}{Acumulado}$$

Reações paralelas

Vida cíclica

Vida útil da bateria (durabilidade)



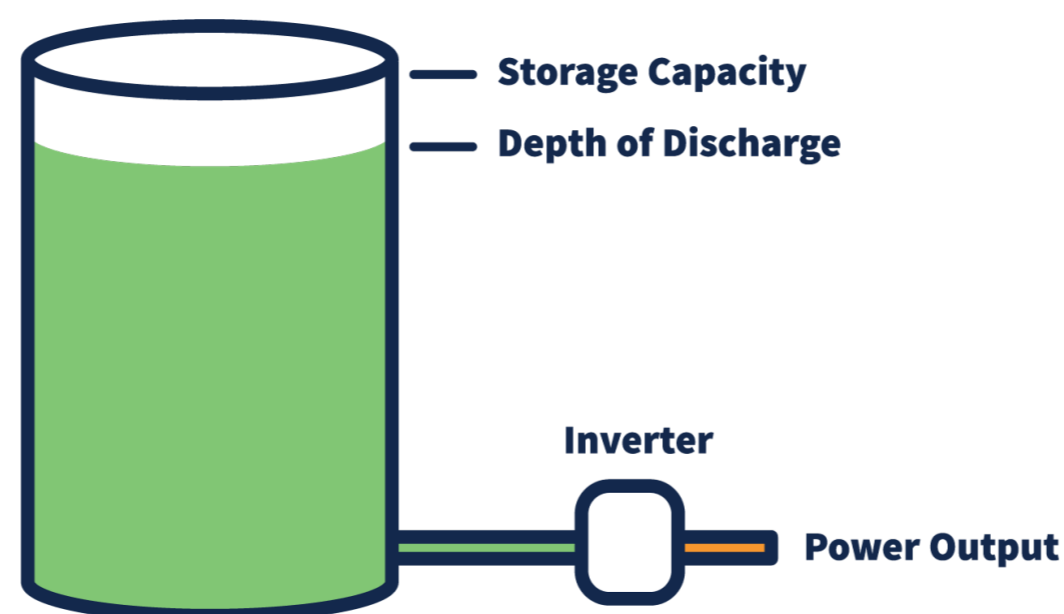
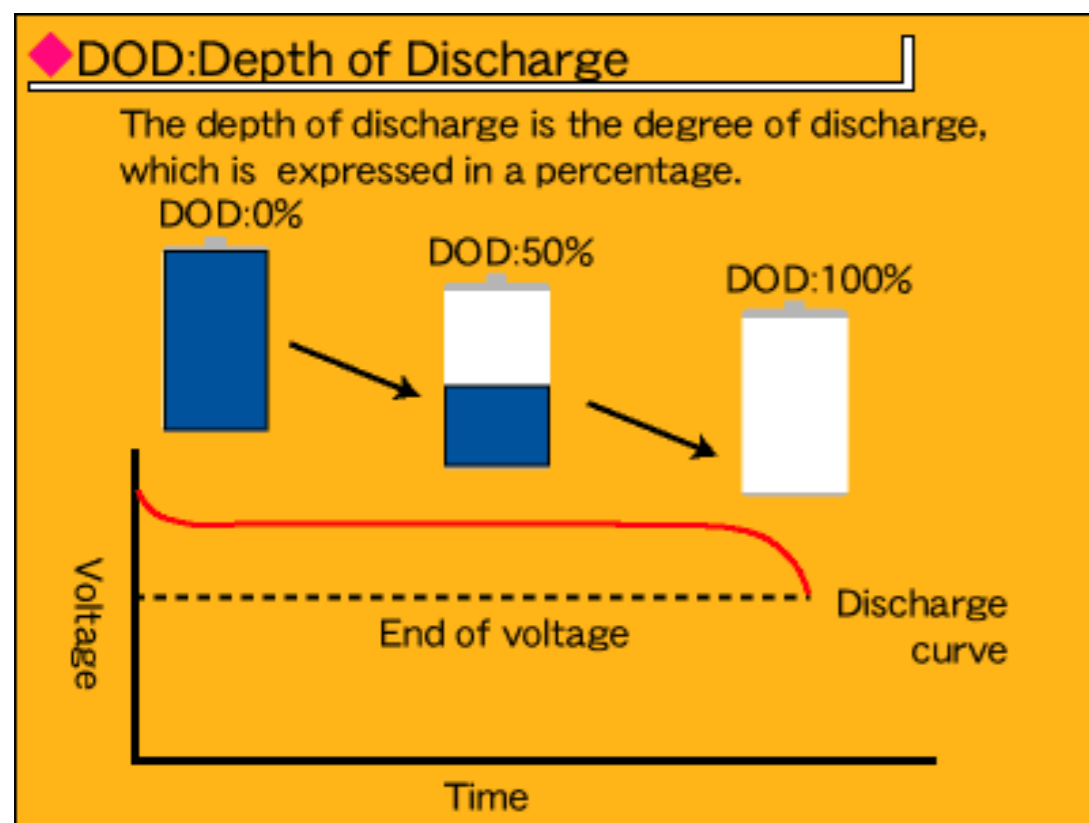
Vida de prateleira

Determinada pela tecnologia e pelos processos de produção (fabricante). Depende do tempo transcorrido desde sua produção

Fim da vida útil – 80%

CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Profundidade de descarga- DoD



Energy throughput - E_{th}

○ *Energy Throughput* é definido como:

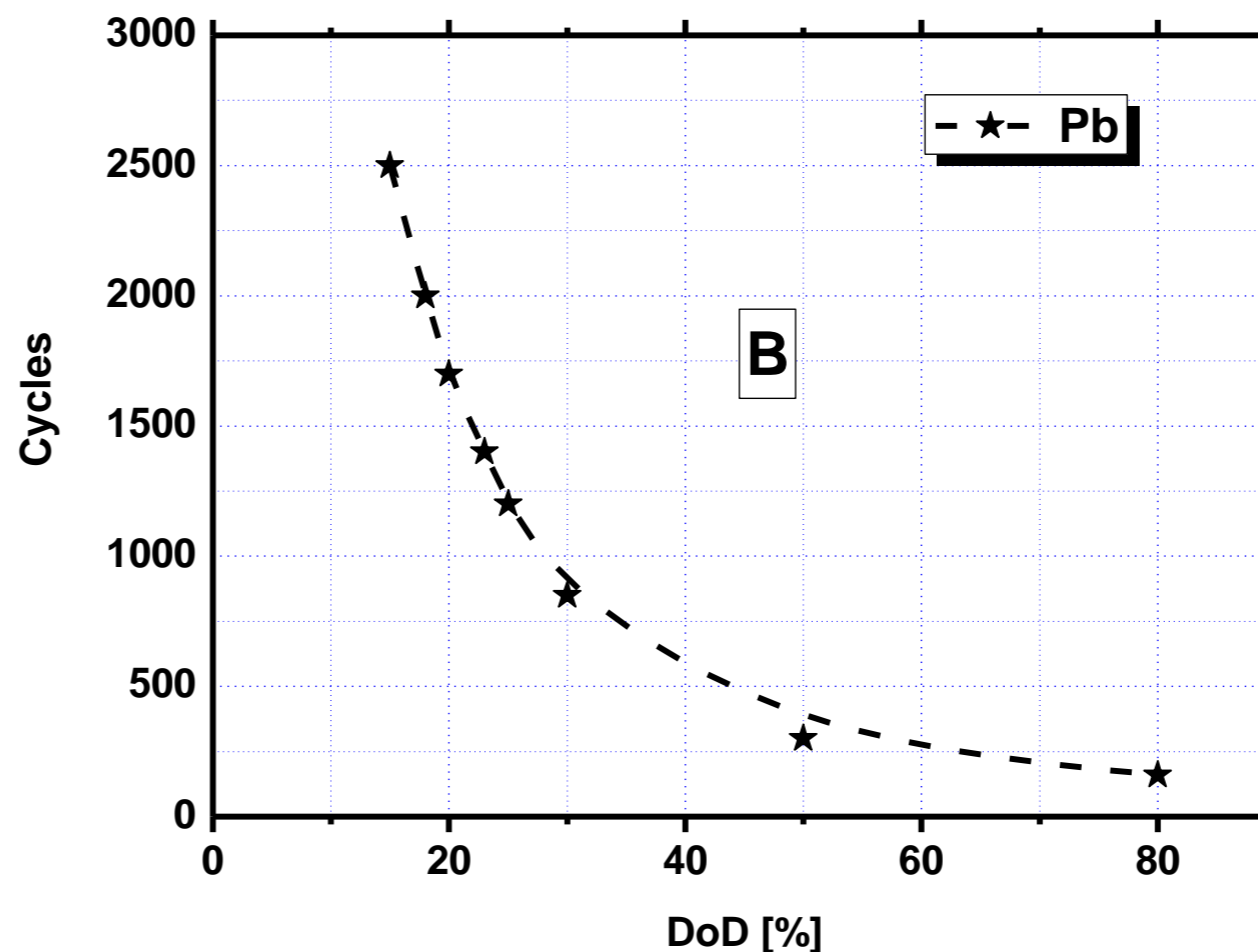
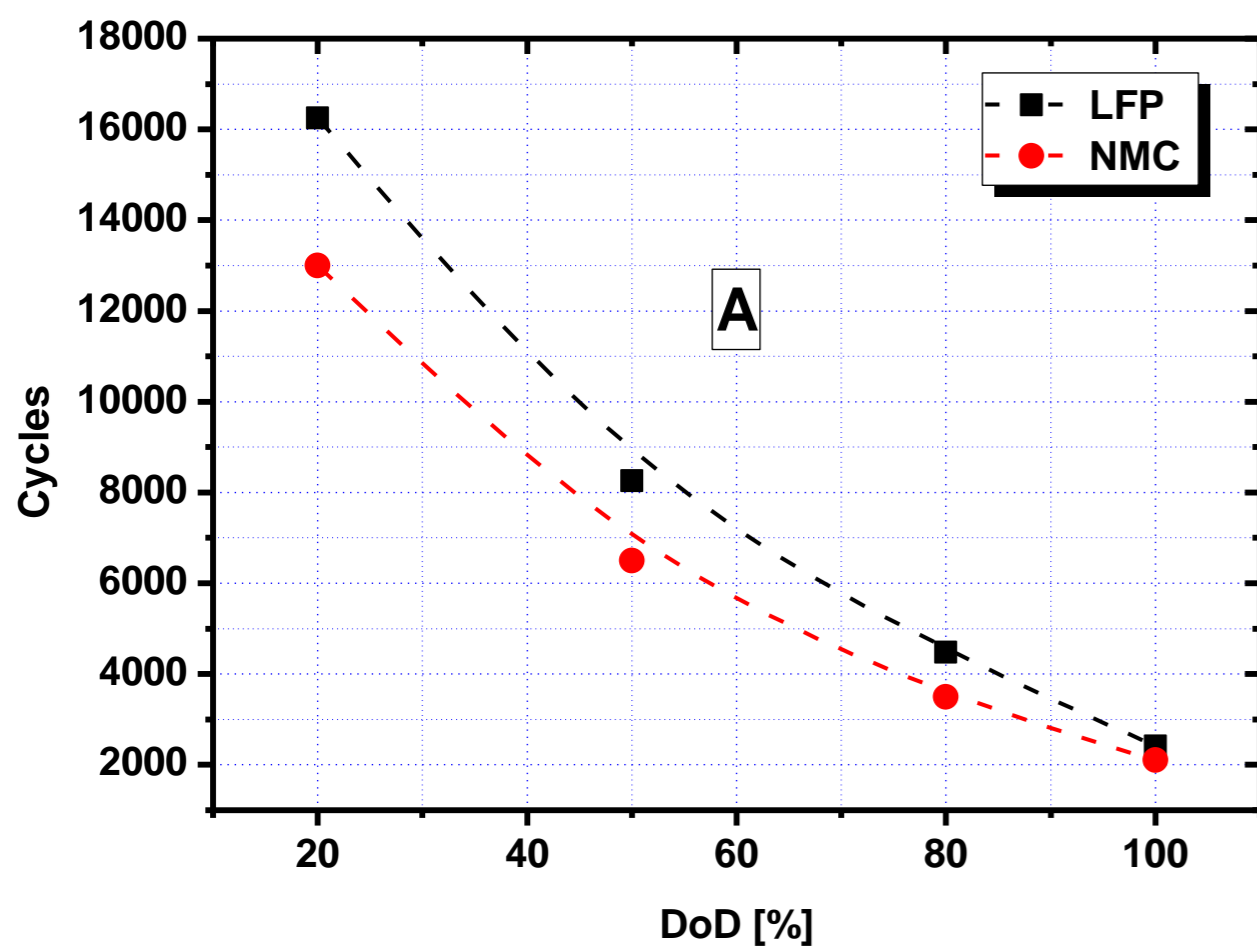
$$E_{th} = C \times V \times \text{DoD}(\%) \times \text{Ciclos}$$

DIMENSIONAMENTO

DoD e vida cíclica

Exemplo com três baterias: chumbo-ácido, íons de lítio LFP e íons de lítio NMC

Technology	Capacity	Voltage
NMC	40 Ah (C ₅)	3,2 V
LFP	45 Ah (C ₅)	3,2 V
Lead-acid	180 Ah (C ₅)	12 V



Como escolher o DoD ideal?....como utilizar a bateria o máximo possível?...

DIMENSIONAMENTO

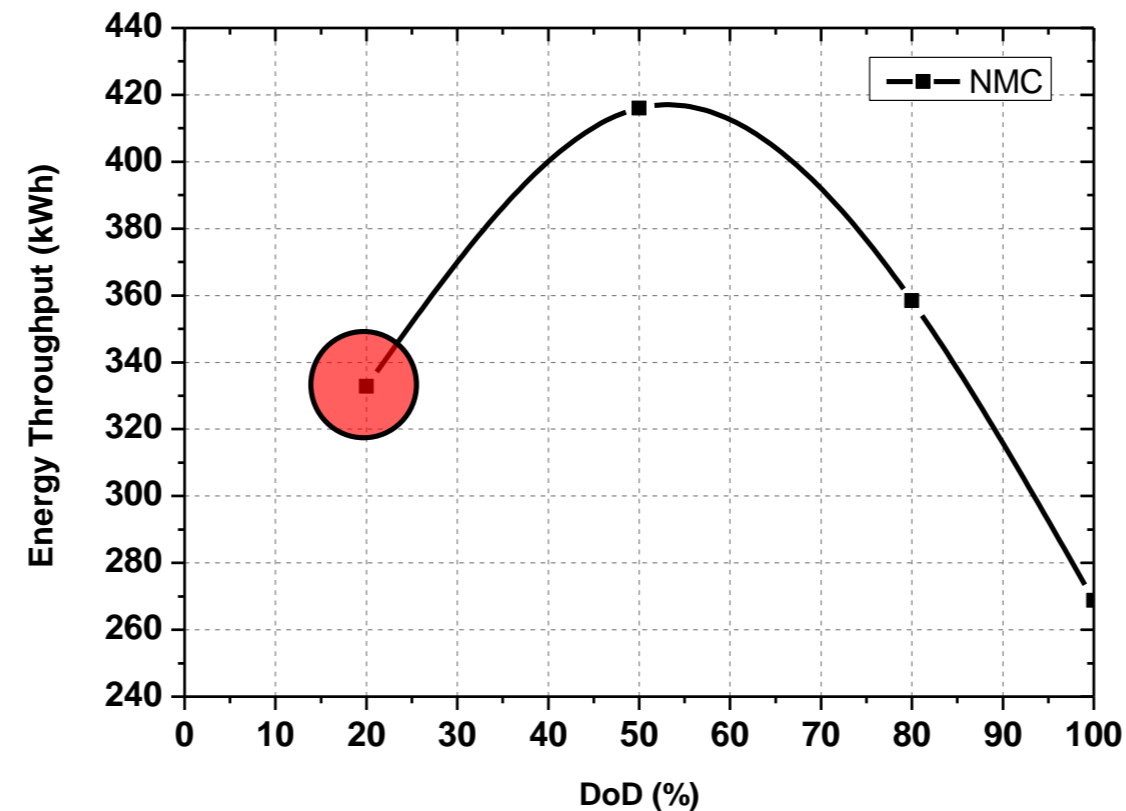
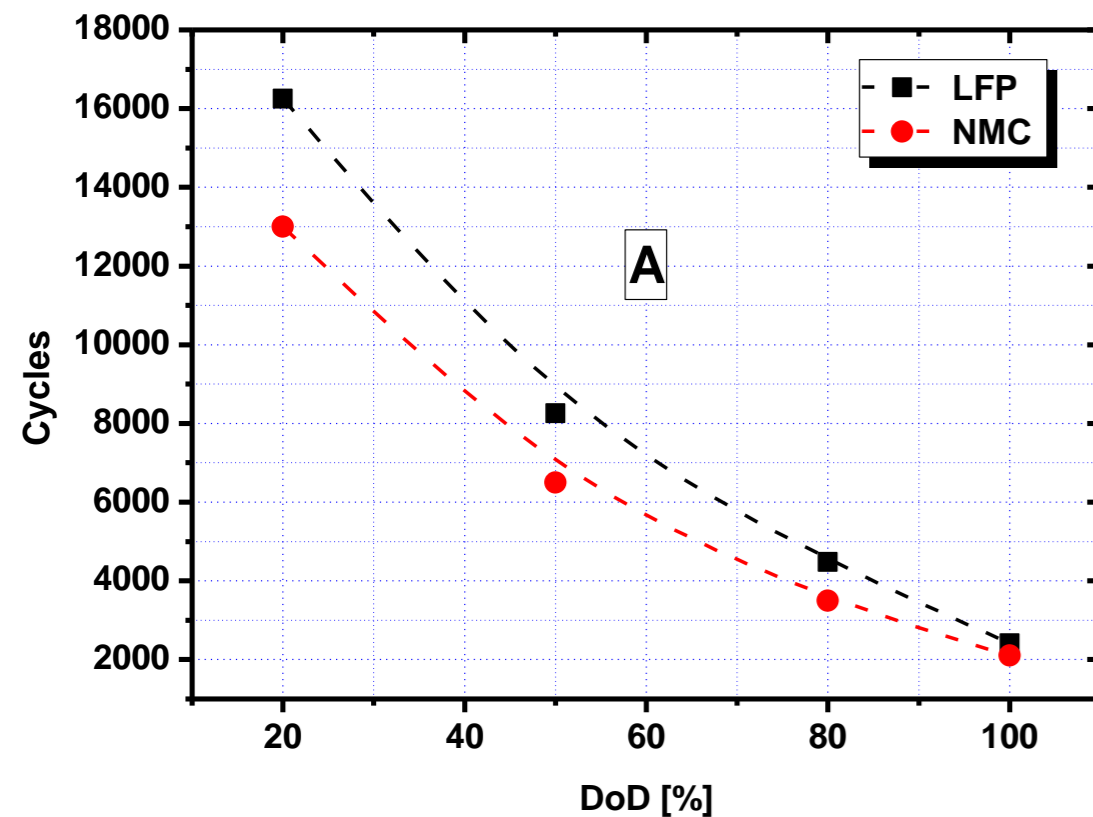
Dimensionamento pelo E_{th}

$$E_{th} = C \times V \times DoD(\%) \times Ciclos$$

Technology	Capacity	Voltage
NMC	40 Ah (C_5)	3,2 V
LFP	45 Ah (C_5)	3,2 V
Lead-acid	180 Ah (C_5)	12 V

Calculemos o E_{th} em função do DoD....

O primeiro ponto para a bateria NMC é.... $40 \times 3,2 \times 0,2 \times 13000 = 332.800 \text{ Wh} = 332,8 \text{ kWh}$



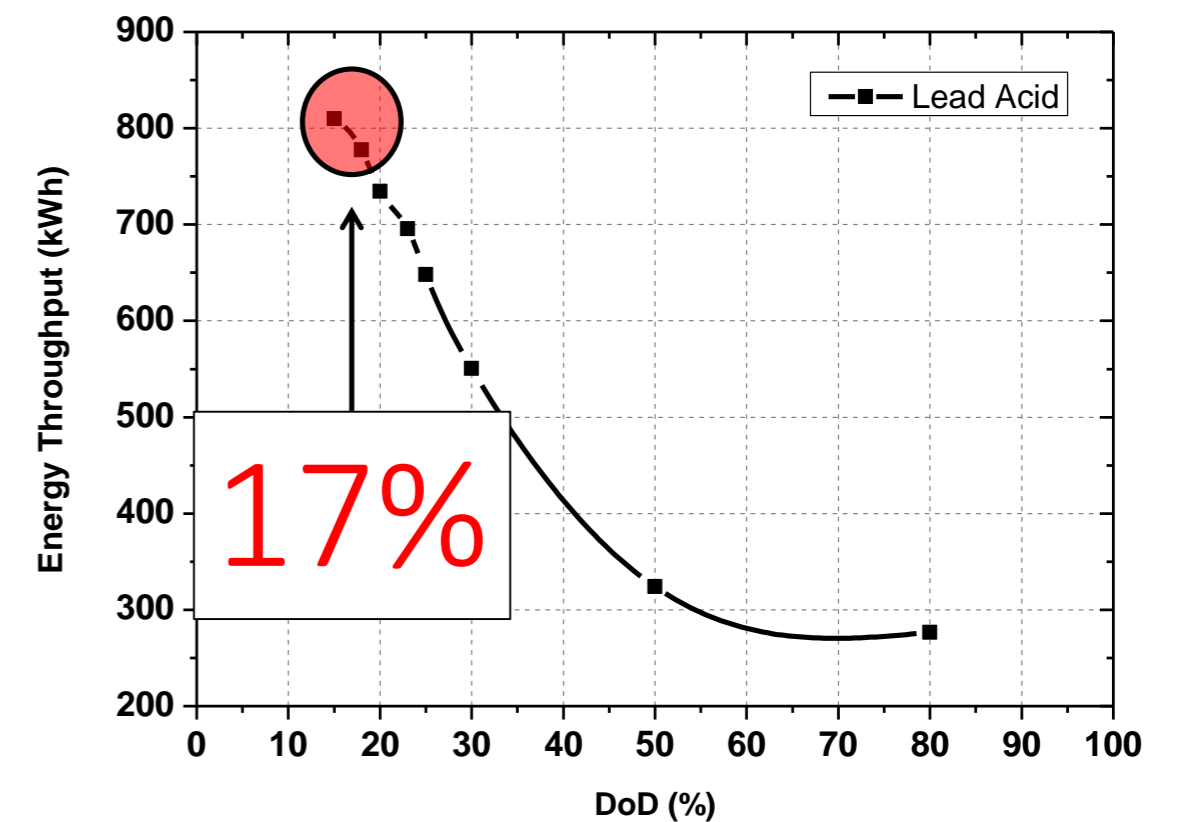
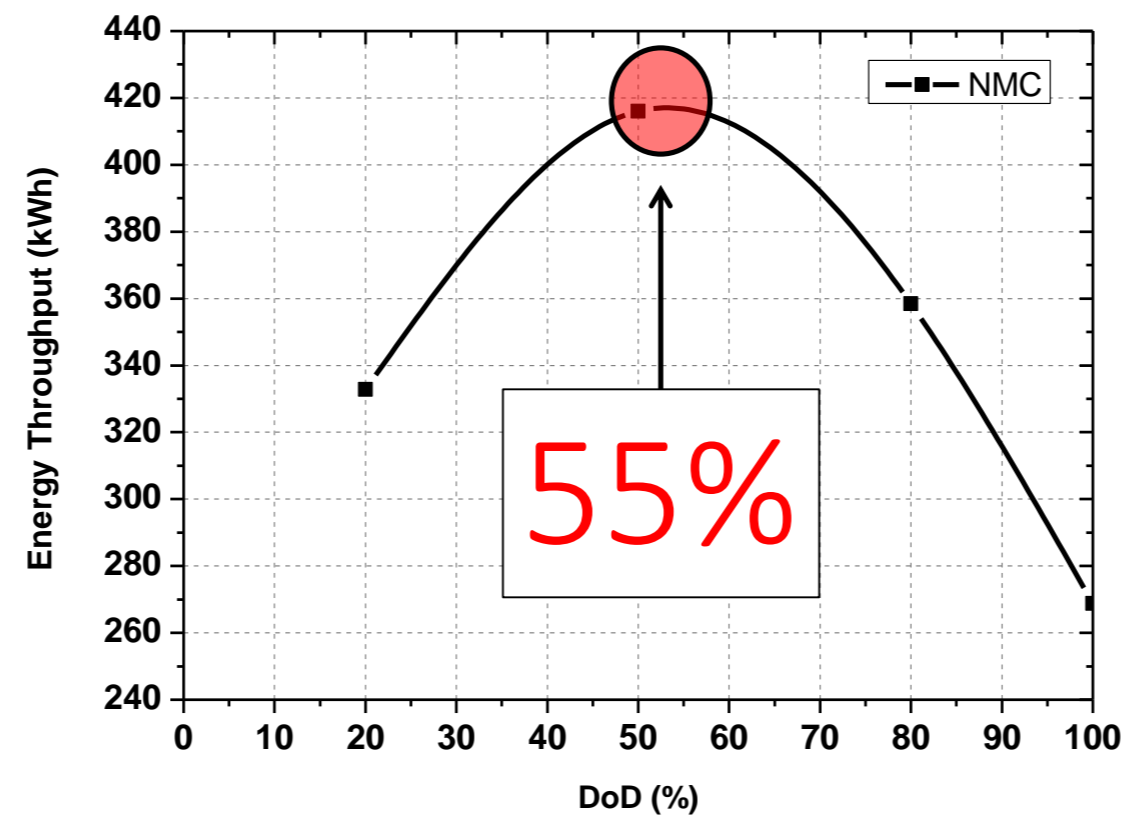
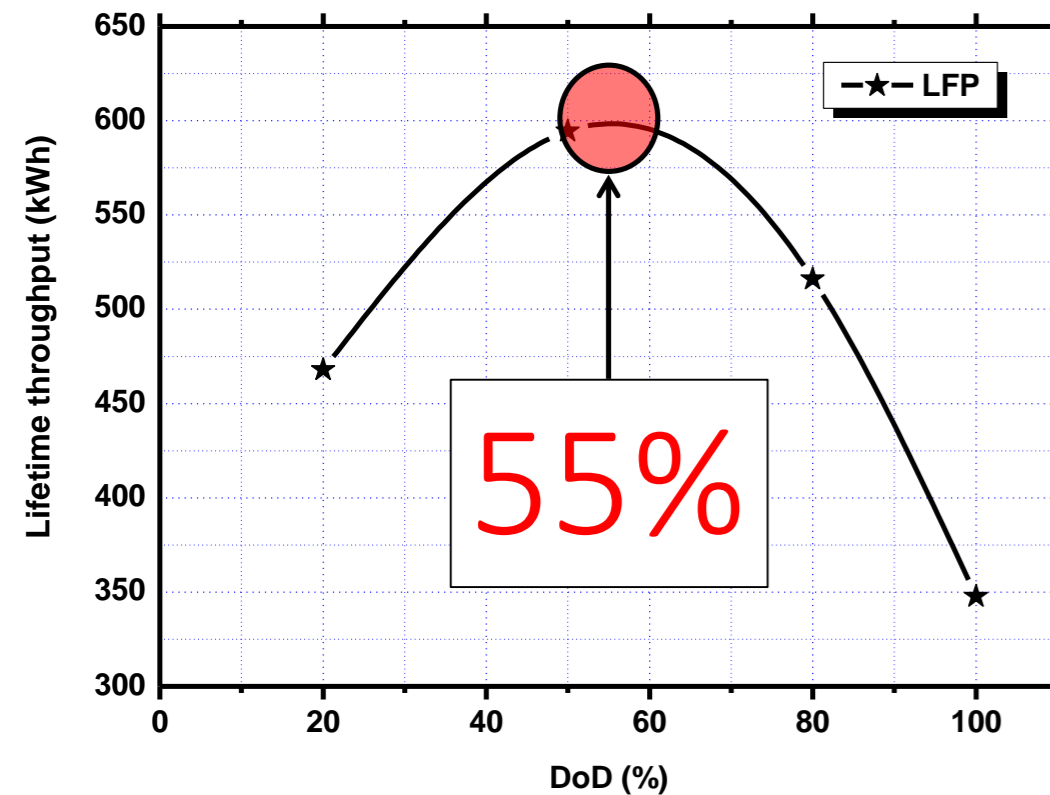
DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento pelo E_{th}

$$E_{th} = C \times V \times DoD(\%) \times Ciclos$$

Technology	Capacity	Voltage
NMC	40 Ah (C_5)	3,2 V
LFP	45 Ah (C_5)	3,2 V
Lead-acid	180 Ah (C_5)	12 V

Calculando para todas as três baterias....



Agora a partir da demanda podemos obter o dimensionamento inicial da bateria...

DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento pelo E_{th}

$$E_{th} = C \times V \times DoD(\%) \times Ciclos$$

Technology	Capacity	Voltage
NMC	40 Ah (C_5)	3,2 V
LFP	45 Ah (C_5)	3,2 V
Lead-acid	180 Ah (C_5)	12 V

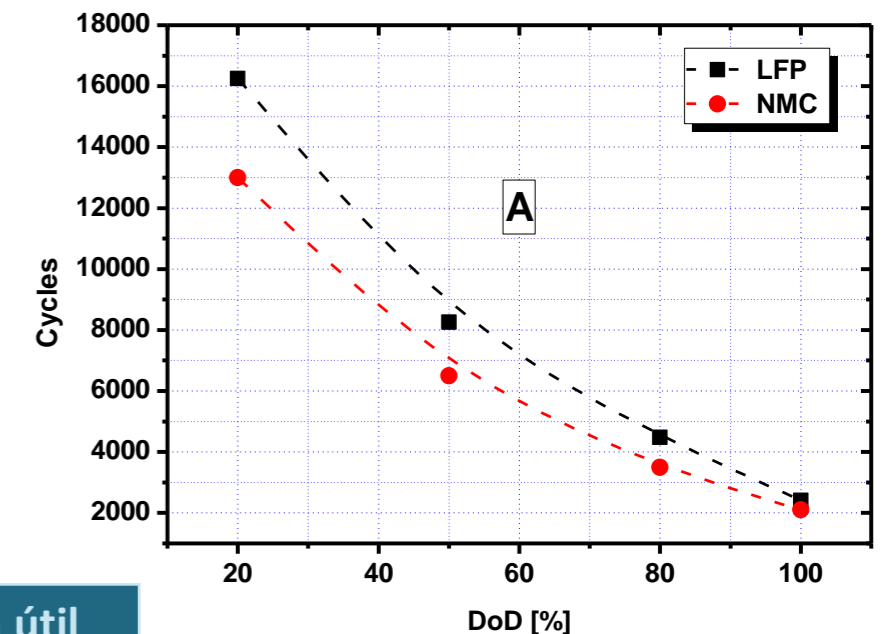
Vamos supor uma carga de 3 kW

Células NMC = $3000 \text{ Wh} / (3,2 \text{ V} \times 40 \text{ Ah} \times 0,55) = 42,6 \text{ células} = 43 \text{ células}$

Tensão da bateria NMC = $43 \text{ células} \times 3,2 \text{ V/célula} = 137,6 \text{ V}$

NMC Ciclos (for 55% DoD) ver a figura = 6200 ciclos

Vida cíclica da NMC = 6200 ciclos (1 ciclo por dia) = 17 anos



Tecnologia	Capacidade	Tensão	DoD	Células (serie)	Tensão	Ciclos	Vida útil
NMC	40 Ah (C_5)	3,2 V	55%	43	137,6 V	6200	17 anos
LFP	45 Ah (C_5)	3,2 V	55%	38	121,6 V	?	?
Lead-acid	180 Ah (C_5)	12 V	17%	9	108,0 V	?	?

8000 **22**
2500 **6,9**

DIMENSIONAMENTO

Dimensionamento pelo E_{th}

Informações das baterias de íons de lítio (**calendar life** e **cycling life**)

Parameter	NMC	LFP
FLOAT LIFETIME (years)	20	20
LIFETIME THROUGHPUT of cell (kWh)	415 @ 50 %DOD @ 25°C	590 @ 50 %DOD @ 25°C
MINIMUM SoC (%) recommended	20 % DOD 80 SoC	20 % DOD 80% SoC
ROUND TRIP EFFICIENCY (%)	97.5	97.2

Redimensionar a bateria LFP!

DIMENSIONAMENTO

Redimensionando LFP

Tecnologia	Capacidade	Tensão	DoD	Células (série)	Tensão	Ciclos	Vida útil
NMC	40 Ah (C ₅)	3.2 V	55%	43	134 V	6200	17 anos
LFP	45 Ah (C ₅)	3.2 V					20 anos
Chumbo-ácido	180 Ah (C ₅)	12 V	17%	9	108 V	2500	6.9 anos

Se a vida útil de prateleira da bateria LFP é 20 anos, não vai durar 22 ciclando...

...assim poderíamos utilizar mais do que 55% em ciclagem para igualar as vidas uteis (ciclagem e prateleira) aos 20 anos

Agora é necessário refazer a conta para a profundidade de descarga na direção oposta (do fim para o início)...

20 anos são **7300** ciclos

7300 ciclos significa **58%** DoD!

Tecnologia	Capacidade	Tensão	DoD	Células (série)	Tensão	Ciclos	Vida útil
NMC	40 Ah (C ₅)	3.2 V	55%	43	134 V	6200	17 anos
LFP	45 Ah (C ₅)	3.2 V	58%	36	115,2 V	7300	20 anos
Chumbo-ácido	180 Ah (C ₅)	12 V	17%	9	108 V	2500	6.9 anos

DIMENSIONAMENTO

Custo

Sobre o custo....

Tecnologia	Capacidade nominal	Tensão nominal	Número de células	Custo por célula	Custo da bateria	Custo anual
NMC	40 Ah (C ₅)	3.2 V	43	U\$ 318.00	U\$ 13,674.00	U\$ 804.4
LFP	45 Ah (C ₅)	3.2 V	36	U\$ 270.00	U\$ 9,720.00	U\$ 486.0
Lead-acid	180 Ah (C ₅)	12 V	9	U\$ 196.00	U\$ 1,764.00	U\$ 255.6

Comentário: Num cálculo detalhado devem entrar todos os custos envolvidos na compra, instalação, operação, manutenção e decomissionamento (por ano). Neste exemplo só utilizamos o custo FOB da bateria.

DIMENSIONAMENTO

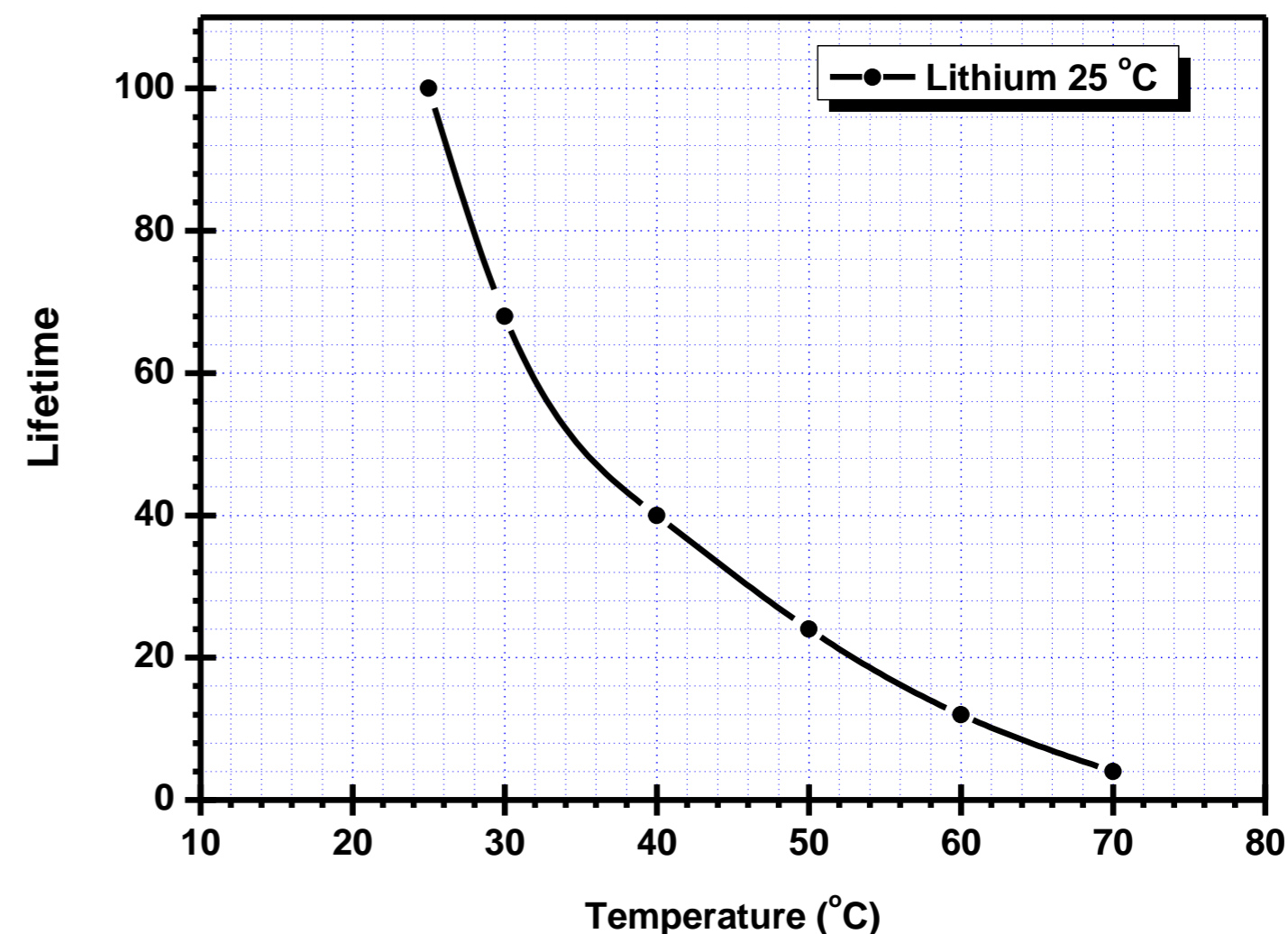
Temperatura e vida cíclica

Qual a influência da temperatura?

Deve ser considerada através de um fator de correção.

Veja a dependência da vida útil em função da temperatura.

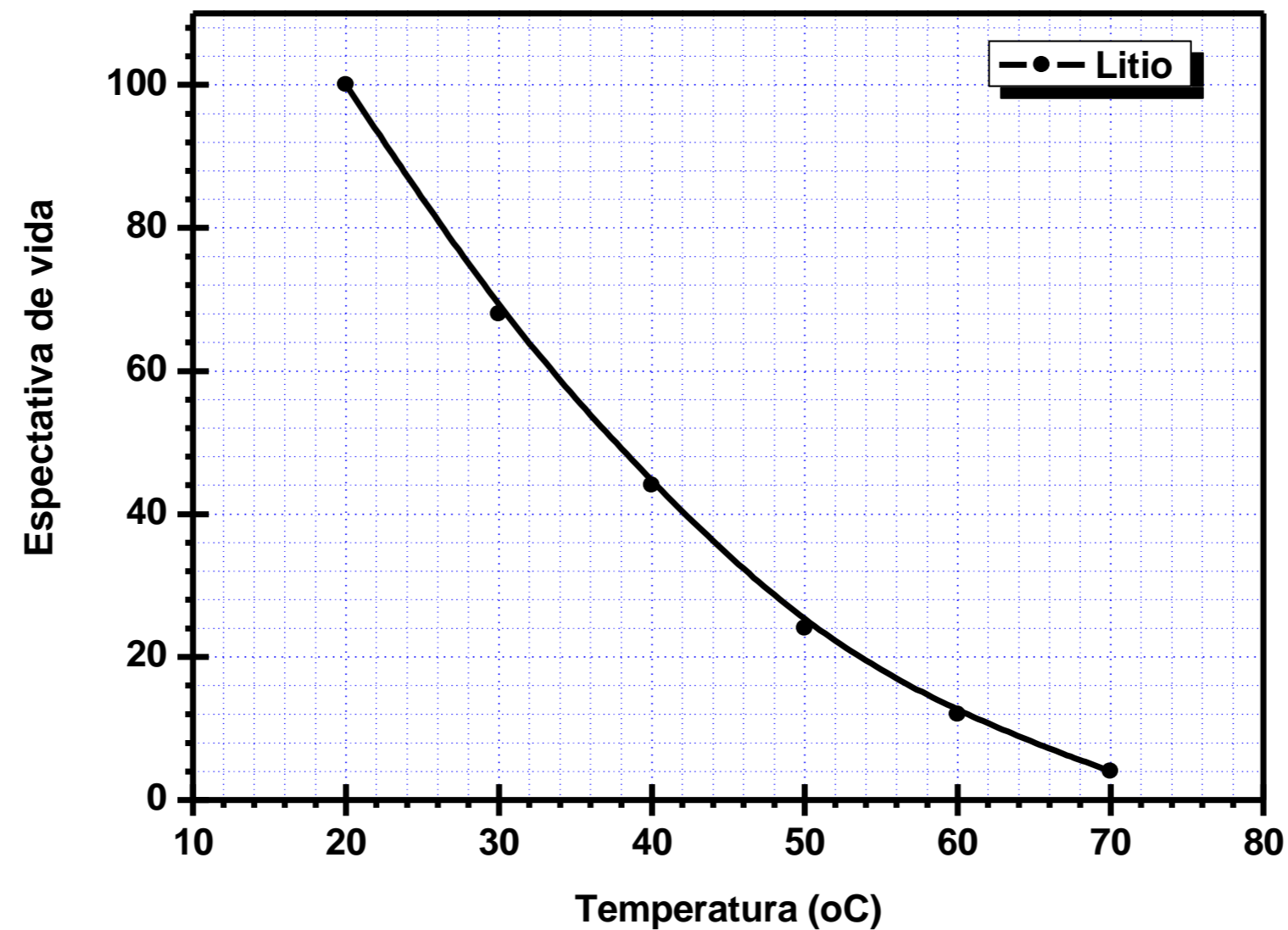
É preciso ajustar a conta....



Tecnologia	Capacidade	Tensão	DoD	Células em série	Tensão	Ciclos (25 °C)	Tempo de vida (25 °C)	Ciclos a 40 °C	Tempo de vida a 40 °C
NMC	40 Ah (C ₅)	3.2 V	55%	43	137.6 V	6200	17 years	2480 (40%)	6.8 anos
LFP	45 Ah (C ₅)	3.2 V	55%	38	121.6 V	8000	22 years	3200 (40%)	8.8 anos
Lead-acid	180 Ah (C ₅)	12 V	17%	9	108.0 V	2500	6.9 years	2250 (90%)	6.2 anos

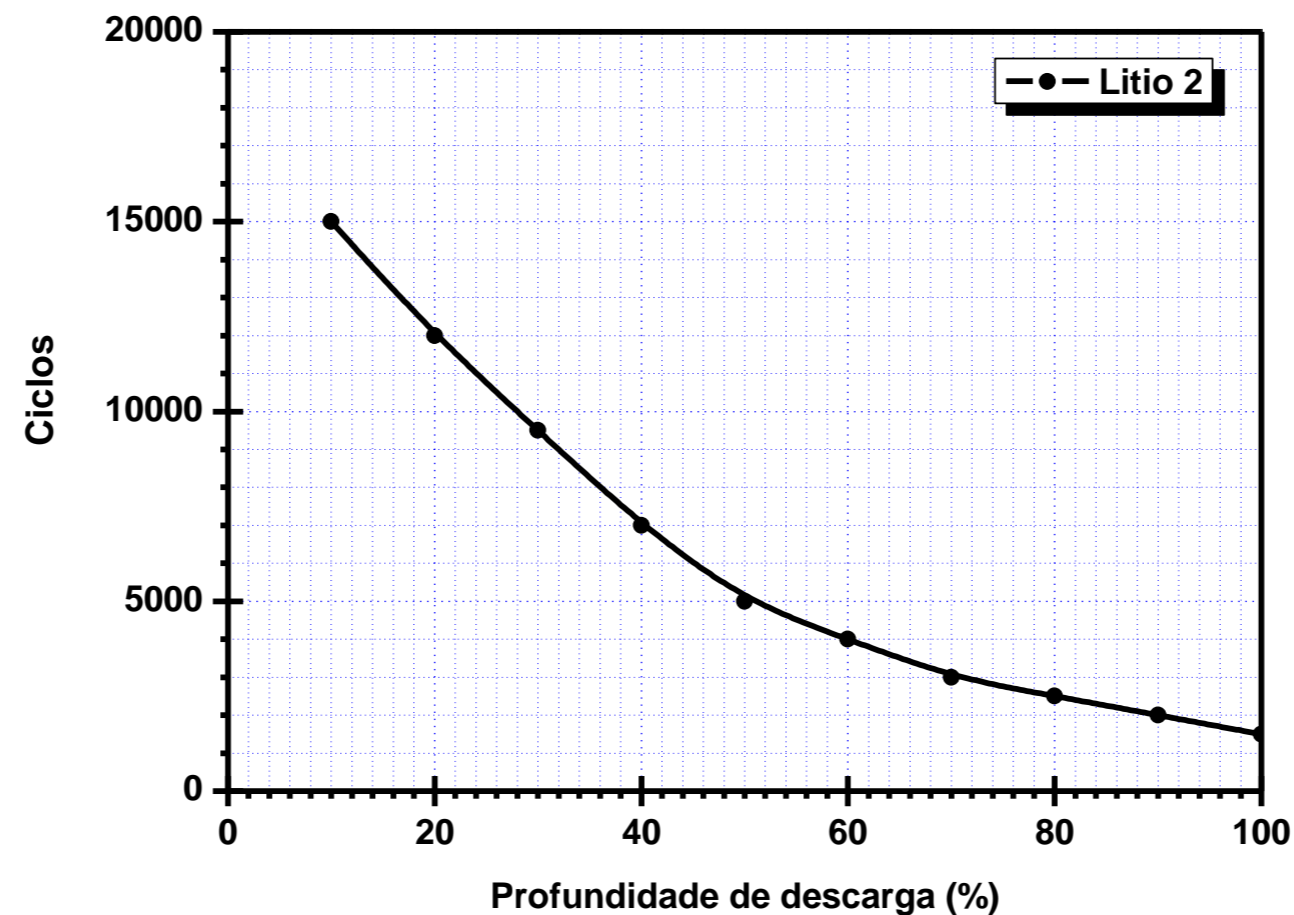
EXERCÍCIOS

Exercício 1. A figura abaixo determina a expectativa de vida de uma bateria de íons de lítio em função da temperatura . Se a bateria foi projetada para operar a 20 °C e nestas condições a expectativa de vida é de 5 anos, qual será sua durabilidade operando a 50 °C?



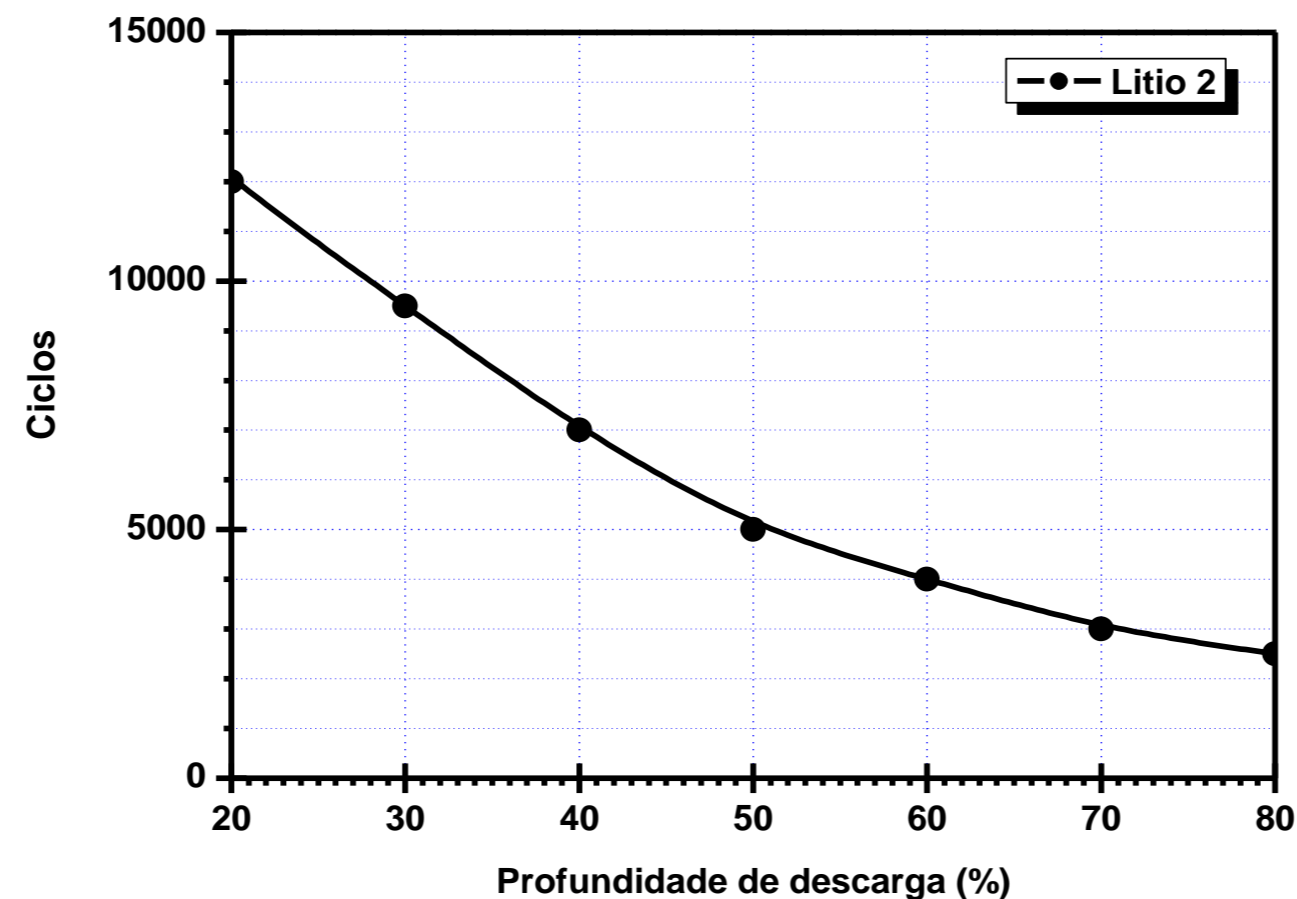
EXERCÍCIOS

Exercício 2. A figura abaixo determina o número de ciclos que uma bateria de íons de lítio pode fornecer em função da profundidade de descarga. Se a bateria foi projetada para durar 12.000 ciclos atendendo uma carga de 1 Wh qual é a energia máxima (em Wh) que esta bateria armazena? Se sua tensão nominal é 4,0 V qual é sua capacidade em Ah? Se esta mesma bateria fosse utilizada para atender uma carga de 3 Wh qual seria sua durabilidade em número de ciclos? Qual deveria ser o tamanho (em Ah) da bateria para atender esta carga de 3 Wh e manter sua durabilidade em 12.000 ciclos?



EXERCÍCIOS

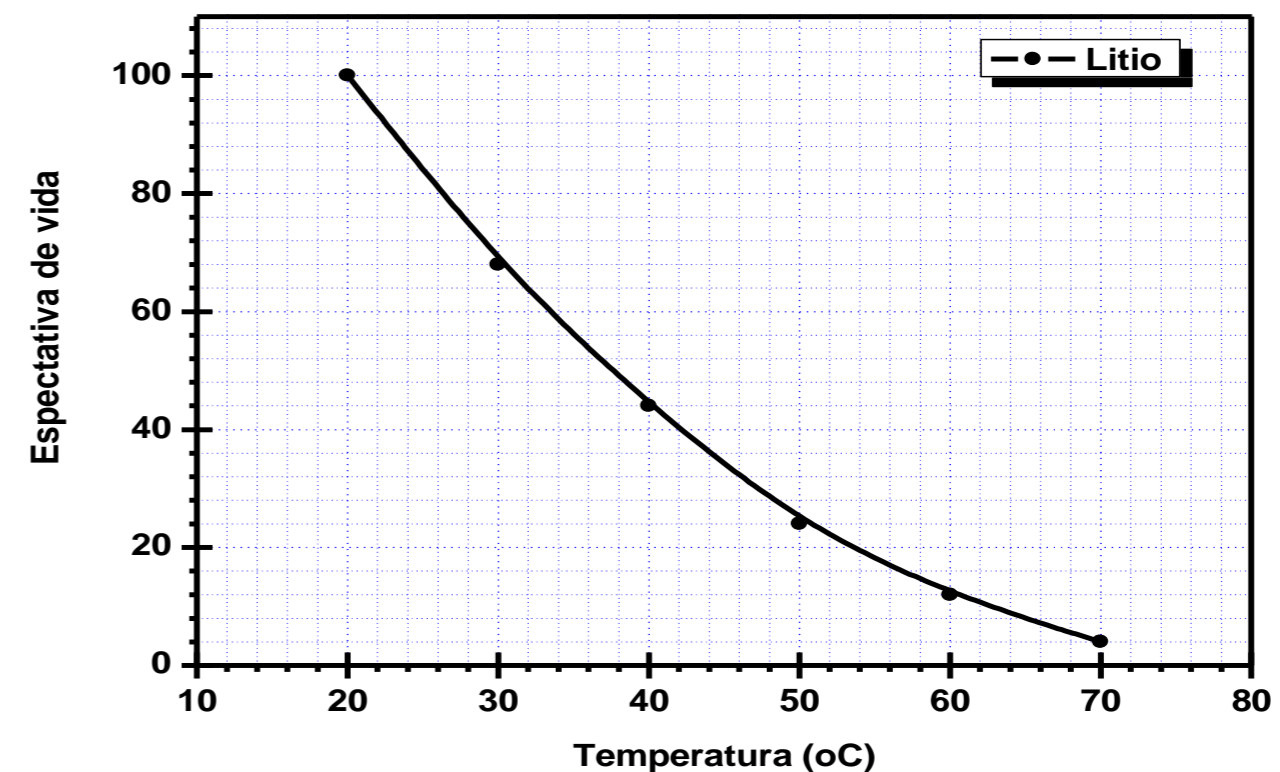
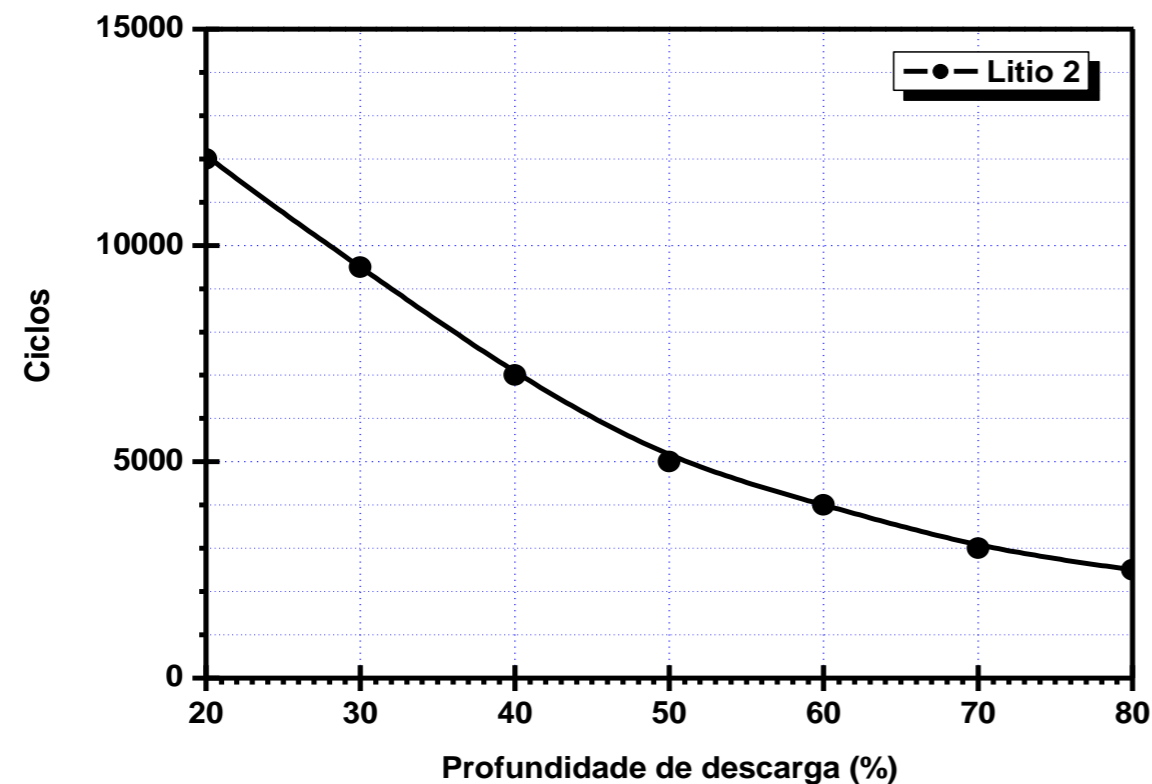
Exercício 3. A figura abaixo determina o numero de ciclos que uma bateria de íons de lítio pode fornecer em função da profundidade de descarga. Se a bateria foi projetada para durar 7.000 ciclos atendendo uma carga de 10 Wh qual é a energia máxima (em Wh) que esta bateria armazena? Se sua tensão nominal é 4,0 V qual é sua capacidade em Ah? Se esta mesma bateria fosse utilizada para atender uma carga de 15 Wh qual seria sua durabilidade aproximada em número de ciclos? Qual deveria ser o tamanho mínimo (em Ah) da bateria para atender esta carga de 15 Wh e manter sua durabilidade em 7.000 ciclos?



EXERCÍCIOS

Exercício 4. A primeira figura abaixo determina a percentagem da expectativa de vida de uma bateria de íons de lítio em função da temperatura. Nesta figura o 100% corresponde a uma operação a 20 °C. A segunda figura representa a expectativa de vida em ciclos (para operação a 20 °C) em função da profundidade de descarga.

- Calcular a capacidade de uma bateria secundária de lítio (tensão de operação 4 V) para atender uma carga de 7,2 kW durante 2 horas diárias (opera uma vez por dia) se é necessário que dure 960 ciclos operando a 50 °C;
- Se a carga diária fosse de 16,8 kW durante 1 hora diária (ainda operando na mesma temperatura de 50 °C) quantos ciclos duraria a bateria já dimensionada no item a)?



COMENTÁRIOS

1. O que aconteceria se a **corrente de descarga não é constante** ou você muda ela?

É necessário utilizar a capacidade correspondente á corrente utilizada (e calcular a percentagem de vida perdida nesse ciclo com essa corrente). Este efeito é diferente para diferentes tecnologias de baterias. É significativo para as baterias de chumbo-ácido e é quase irrelevante para as baterias de lítio.

COMENTÁRIOS

2. E se a temperatura **não é constante**?

Caso típico em sistemas fotovoltaicos. Neste caso se faz uma média ponderada

Por exemplo: Se a vida útil da bateria a 40 °C é 10 anos e você utiliza ela por 2 horas por dia a essa temperatura e 22 horas por dia a 25 °C, então você terá perdido $(2/8760)$ da vida útil a 40 °C e $22/87600$ da vida útil a 25 °C. Quando a soma destes valores chega ao EoL sua baterias deverá ser descartada.



institutos lactec

CONTACT

PATRICIO RODOLFO IMPINNISI

rodolfo@lactec.org.br

+55 41 3361- 6266

www.institutoslactec.org.br

THANK YOU