

# BATERIAS DE SUBMARINOS

RENÉ VOGT\*  
Engenheiro

---

## SUMÁRIO

Introdução  
Funcionamento das baterias  
Exemplos reais de baterias de chumbo-ácido  
Baterias modernas atuais e futuras para submarinos  
Baterias de íons de lítio  
Custos  
Operação  
Taxa de indiscrição  
Baterias de lítio e enxofre  
Conclusão  
Apêndice: Cálculo comparativo entre baterias LAB e LIB do Submarino U-214 *Papanikolis*, da Marinha da Grécia

## INTRODUÇÃO

Desde a invenção da primeira pilha por Alexandre Volta, há pouco mais de 200 anos, o progresso da tecnologia de armazenar energia química para transformá-la em energia elétrica demonstra mais uma vez a capacidade do ser humano de evoluir e buscar soluções para seus problemas.

As baterias de chumbo-ácido recarregáveis foram as primeiras a ser inventadas e ainda são as mais empregadas, principalmente em automóveis, mas também em submarinos. Contudo, as pesquisas em curso apontam para o provável fim dessa tecnologia pioneira e longa em poucos anos à frente.

Estamos no limiar de uma substancial mudança tecnológica, com o início da

---

\* Empresário e membro da Sociedade de Amigos da Marinha de São Paulo (Soamar-SP). Colaborador frequente da *RMB*. Recebeu o Prêmio Revista Marítima Brasileira, em 2017, relativa ao triênio 2014-2016, como autor do artigo "Novo estudo de um escolta para a Marinha do Brasil", publicado na *RMB* do 1º trimestre de 2015.

substituição gradual da tecnologia das baterias de chumbo-ácido pelas de íons de lítio, nos próximos cinco anos, em automóveis e submarinos.

Com o gradual aumento da frota mundial de veículos automotores elétricos, baterias mais avançadas são uma necessidade incontornável. Como não poderia deixar de ser, a indústria automotiva com foco nos carros elétricos mais uma vez será a locomotiva do desenvolvimento destas baterias muito mais poderosas.

Todos os países de vanguarda se engajam no desenvolvimento de tecnologias para baterias modernas com vistas a aplicações militares e civis, como automóveis, empilhadeiras, drones, computadores, celulares, ferramentas etc.

A Suécia já decidiu que, a partir da primeira metade dos anos 2020, não serão mais fabricados carros com motores a combustão interna naquele país, e novos veículos a serem licenciados serão obrigatoriamente elétricos. Nas pesquisas realizadas pelo autor, impressiona o número de pesquisadores nas universidades chinesas, talvez até mais do que nos Estados Unidos da América (EUA), onde também um número expressivo de pesquisadores nas universidades é de chineses.

Em aplicações militares, baterias de íons de lítio são a fonte de energia de veículos submarinos não tripulados (*unmanned underwater vehicles*), es-

enciais para a guerra submarina em águas litorâneas no futuro próximo, e já em fase operacional na Marinha dos EUA (USN).

Os japoneses instalarão baterias de íons de lítio dentro de dois ou três anos na classe de submarinos *Soryu*, ora em construção. Serão os pioneiros. Entretanto, as baterias de íons de lítio são nossas conhecidas há muitos anos na aplicação em *notebooks*, telefones celulares, ferramentas elétricas, drones, brinquedos etc.

Os alemães também terão as baterias de íons de lítio comercialmente dispo-

níveis para aplicação em submarinos em curto prazo, porém dependem da encomenda de uma nova classe, que poderá ser o *U-212-CD* para a Noruega (4) e a Alemanha (2); ou mesmo da possibilidade de fazer um *retrofit* de submarinos modernos da classe *U-212-A* das Marinhas alemã e

**Baterias de íons de lítio são a fonte de energia de veículos submarinos não tripulados, essenciais para a guerra submarina em águas litorâneas no futuro próximo, e já em fase operacional na Marinha dos EUA**

italiana, com óbvios interesses militares e comerciais.

Num horizonte um pouco mais distante, talvez de uns 15 anos, as baterias de lítio-enxofre (Li-S) entrarão em cena, possivelmente deslocando as de íons de lítio para um segundo plano, dependendo dos fatores técnicos e comerciais. Na Tabela 1 podemos observar o progresso registrado desde a virada do século XIX para o XX. Levou-se 100 anos para chegar a baterias de chumbo-ácido com uma energia específica de 40 Wh/kg. Em apenas quatro décadas, as de íons de lítio atingiram o triplo desse valor.

Já surgiram os primeiros protótipos das baterias de Li-S, que atingiram o triplo do valor das de íons de lítio. Atualmente os pesquisadores esperam obter, a curto prazo, novas células de Li-S cinco vezes mais potentes do que as de íons de lítio (Ref.18). Porém mais impressionante ainda é o potencial teórico desta química com 2.600 Wh/kg de energia específica, vinte vezes a energia específica de uma bateria atual de íons de lítio com química LFP, que será analisado adiante.

Combinando essas novas baterias com a tecnologia de ponta dos sistemas de propulsão de submarinos independente da atmosfera (AIP<sup>1</sup>) em submarinos convencionais, o poderio militar destes meios navais atingirá um nível digno de nota, que ainda na primeira metade do século XX nem o engenheiro ou cientista mais arrojado ousaria propor.

**O progresso que se alcançará em poucos anos com os submarinos convencionais e seus custos bem inferiores aos submarinos nucleares de ataque (SSN) tornarão o investimento nestes difícil de justificar**

Neste contexto, o autor sugere a leitura do seu artigo sobre AIP na *RMB* do 4º trim./2017.

A combinação de baterias modernas com sistemas AIP para submarinos será o caminho para aumentar a autonomia e a capacidade militar dos submarinos convencionais. Não é exagero prever que em dez anos, ou pouco mais, submarinos convencionais poderão permanecer submersos por 60 dias sem necessidade de recarregar as baterias. Contudo, mesmo utilizando o *snorkel*<sup>4</sup>, as taxas de indiscrição serão muito menores do que as atuais.

Excetuando-se o caso dos submarinos que carregam mísseis intercontinentais, os SSBN ou *Super Boomers*, com suas missões peculiares transcontinentais, o progresso que se alcançará em poucos anos com os submarinos convencionais e seus custos

bem inferiores aos submarinos nucleares de ataque (SSN) tornarão o investimento nestes difícil de justificar.

Voltamos a sugerir a leitura do nosso trabalho mencionado aci-

	Pb-Ácido Moderna	Química LFP Íons de Lítio	Li-S Sion Power	Li-S Fraunhofer
Tensão (V)	2,0 – 2,2	3,2	2,1	2,1
Energia Específica <sup>2</sup> Wh/kg	40	90-130	350	330 / 672 <sup>3</sup>
Dens. Energia Wh/l	116	330	320	n.d.
Potência Esp. W/kg	200	500	Não determinado (n.d.)	n.d.

Tabela 1 – Comparação das tecnologias de baterias nos dias atuais

1 AIP – Air Independent Propulsion.

2 Devemos atentar para o detalhe de que a menção da energia específica normalmente se refere à célula. Mas quando falamos do sistema da bateria com todos os seus elementos de controle, este valor diminui. Para aplicações práticas, sempre devemos considerar a energia específica em relação ao sistema.

Obtido/Próxima meta talvez 2022.

4 Tubo de admissão de ar do submarino para acionar os geradores diesel e renovar a atmosfera interna.

ma, em que artigos (Ref. 19) e reflexões da comunidade de submarinistas da USN referem-se aos custos de obtenção bem maiores, e as vantagens cada vez menores, dos submarinos nucleares de ataque em relação aos convencionais modernos.

## FUNCIONAMENTO DAS BATERIAS

Não é escopo deste trabalho aprofundar-se em detalhes técnicos de química e eletricidade, mas é possível expor o que vem sendo desenvolvido em tempos recentes numa forma de fácil entendimento (Ref. 1 e 2). Importante é mostrar o progresso no campo da tecnologia de baterias, que são instaladas em submarinos junto com sistemas AIP, sistemas tratados no nosso artigo publicado na *RMB* do 4º trim./2017.

A célula é o menor elemento de uma bateria, sendo constituída de dois eletrodos imersos num eletrólito. No caso de baterias de automóveis, uma bateria geralmente é constituída de seis células. Mas no caso de submarinos, células formam módulos e estes formam bancos de baterias.

Em todos os casos os engenheiros devem prever as diversas ligações em série e em paralelo das células e/ou módulos para obter a voltagem e a amperagem desejadas. Químicas diferentes geram voltagens diferentes, e atualmente existem dezenas delas. Para cada tipo de aplicação específica existe uma química mais adequada, embora algumas já tenham se tornado obsoletas.

Quando colocamos uma bateria em carga, ou seja, retirando energia para acender uma lâmpada, por exemplo, o fluxo de elétrons inicia-se no circuito externo com a migração dos elétrons do eletrodo (terminal) negativo para o eletrodo positivo, acendendo a lâmpada.

Quando substituímos a lâmpada por um gerador para recarregar a bateria, as reações químicas se processam no sentido inverso do caso acima. Naturalmente este processo não pode ser repetido indefinidamente porque em todo processo físico-químico há perdas de energia e eficiência a cada ciclo de descarga/recarga. A energia estocável irá diminuir sensivelmente a cada ciclo. No caso de uma descarga ou DOD<sup>5</sup> excessiva a vida útil da bateria será comprometida.

A vida da bateria depende tanto do nível de descarga aplicado como da frequência de descargas, além da forma como ela é recarregada a cada ciclo. Repetições de descargas extremas (*deep discharge*)<sup>6</sup> vão comprometer o número de ciclos de descarga/recarga da bateria, abreviando sua vida útil. Após cada descarga deve-se controlar o estado de carga da bateria, cuja abreviatura é SOC<sup>7</sup>.

Os principais dados que precisamos ter sobre uma bateria são a sua capacidade, medida em Ah (Ampere-hora) e a taxa de descarga “C” (*C-rate*)<sup>8</sup>, valores definidos pelo fabricante. A capacidade da bateria muda em função da intensidade de corrente (A) aplicada aos terminais.

A tensão nominal entre os terminais (*Open Circuit Voltage*) medida em Volts

5 DOD – *Depth of Discharge*, quantidade de energia que foi drenada num intervalo de tempo, medida em porcentagem em relação à carga máxima.

6 *Deep Discharge* – Descarga profunda.

7 SOC – *State of Charge* ou a quantidade de energia que resta na bateria após uma descarga qualquer.

8 *C-rate* – Taxa de descarga de uma corrente, medida em amperes durante um tempo predeterminado. Relaciona a capacidade da bateria com a corrente de descarga e o tempo em que se dá a descarga. A *C-rate* e a capacidade de uma bateria são definidas pelo fabricante.

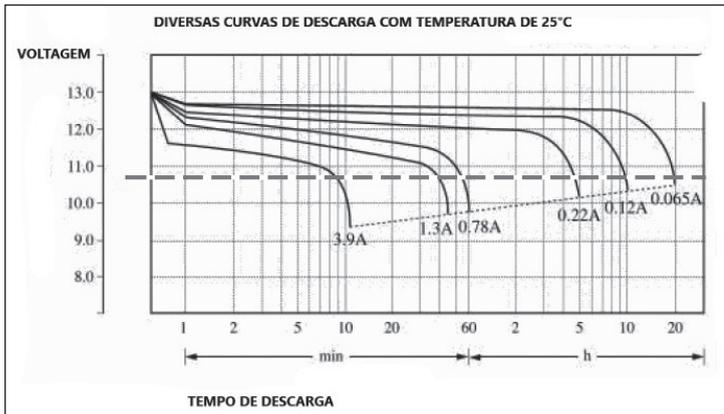


Figura 1 – Curvas de descarga de uma bateria típica de chumbo-ácido

(V) e a tensão mínima também recomendada pelo fabricante (*Cut-Off Voltage*) são outras informações indispensáveis. Para uma bateria de chumbo-ácido típica de 12V, o limite inferior de voltagem é da ordem de 10,5V (*Cut-Off Voltage*), voltagem que define a bateria como descarregada, mas não morta. (Figura 1)

Quanto mais rápido se descarrega uma bateria de chumbo-ácido de qualquer tipo, menos energia se obtém ao final com o esgotamento da bateria. Este efeito pode ser calculado segundo a Lei de Peukert. Este fenômeno se deve basicamente à resistência interna da bateria que dissipa parte da energia em calor, tanto maior quanto maior for a velocidade<sup>9</sup> de descarga.

Por exemplo, se o fabricante especificar uma disponibilidade de 100% da sua capacidade com taxa 20C (20 horas), a mesma bateria, quando descarregada a uma taxa 1C (1 hora), disponibilizará ao usuário aproximadamente 60% de sua capacidade nominal. *C-rates* são taxas de descarga medidas em horas para uma dada corrente medida em A até que a célula (ou bateria) esteja totalmente descarregada, ou

seja, ao atingir a *Cut-Off Voltage*<sup>10</sup>.

Como exemplo simplificado, se a bateria tem uma capacidade de 10Ah e é submetida a uma descarga de corrente de 10Amp durante uma hora, isto define uma *1C-rate*. Se a mesma

bateria for drenada de 5Amp, ela fornecerá essa corrente por duas horas, então teremos uma *2C-rate*. Ao contrário, uma *0,5C-rate* significa drenar 20Amp por 30 minutos.

A maioria das baterias comerciais tem uma capacidade expressa em “Ah” com taxa de descarga igual a 20C. Um dos principais fatores de dimensionamento de uma fonte de energia independente (bateria) é o cálculo da sua capacidade em “Ah” necessária para manter um sistema operando entre duas recargas da bateria.

Nada melhor do que citar um exemplo real, no caso a bateria Trojan L16 de 6V para quatro *C-rates* diferentes (<http://solarhomestead.com/battery-amp-hour-ratings>).

- 5C: 303Ah x 6V = 1,82 kWh/carga de 60,60 A/descarrega 303Ah em 5 horas;
- 10C: 340Ah x 6V = 2,04 kWh/carga de 34,00A/descarrega 340Ah em 10 horas;
- 20C: 370Ah x 6V = 2,22 kWh/carga de 18,50A/descarrega 370Ah em 20 horas.
- 100C: 411Ah x 6V = 2,47 kWh/carga de 4,11A/descarrega 411Ah em 100 horas.

<sup>9</sup> Velocidade maior – drenagem de correntes mais elevadas em intervalos de tempo menores.

<sup>10</sup> *Cut-Off Voltage* – tensão limite para utilização da bateria especificada pelo fabricante.

Comercialmente, esta bateria L16 acima é geralmente especificada e nominalmente conhecida como bateria 370Ah/C20. A *Cutt-Off Voltage* é igual a 5,25V.

Vemos que a energia nominal estocada é de 2,22 kWh e sua disponibilização demanda a limitação da corrente (18,5A) e do tempo de descarga (20 horas). Mesmo assim, ainda há perdas devido à resistência elétrica interna da bateria. Se resolvemos aplicar correntes mais elevadas, o tempo de utilização cai e uma parcela ainda maior da energia é dissipada sob forma de calor.

Entretanto, respeitados os limites de projeto da bateria, uma corrente menor do que 18,5A sofre menos o efeito da resistência elétrica (nominal de projeto) e, desta forma, flui melhor. Com descarga de cem horas, descarga bem mais lenta, pode-se disponibilizar uma corrente de 4,11A e obter um ganho de energia utilizado de 11,3% em relação à sua especificação nominal.

Na Figura 1 estão representadas seis curvas de descarga com correntes diferentes. A barra tracejada representa a *Cut-Off Voltage* igual a 10,5V, valor indicativo de que a bateria é considerada esgotada, necessitando uma recarga. Nota-se que quanto menor for a demanda de corrente, maior será o tempo de utilização da bateria.

Baterias LAB<sup>11</sup> só devem ser descarregadas até 20% de sua capacidade máxima sem correr risco de danificá-la. Descargas profundas e frequentes encurtam sua vida útil. A sua recarga leva entre oito e 16 horas, dependendo do modo, da utilização e do nível de corrente. As baterias de chumbo-ácido são “lerdas”, demandam três fases subsequentes e demoram para armazenar carga.

Na primeira fase de recarga temos a chamada *bulk-charge* com corrente (A) constante e tensão (V) variável, representando cerca de 70% da recarga em cinco a oito horas. A segunda fase é chamada de *topping-charge*, que responde por aproximadamente 30% da recarga, funciona com tensão (V) constante e corrente (A) variável, podendo demandar de sete a dez horas. Esta fase é indispensável para a bateria poder “fixar” a carga.

Aqui se atingiu aproximadamente 80% do SOC máximo, e idealmente há uma terceira fase de recarga chamada de *charging state 3* ou *float-charge*, importante para se atingir o máximo SOC da bateria, mas em submarinos, durante as missões, raramente é possível realizar este terceiro estágio de recarga.

Segundo a experiência do fabricante da bateria mod. L16 do exemplo acima, o gerador bem dimensionado deve ter uma potência igual a 3% da energia armazenável da bateria. Seria  $2.470 \text{ Wh} \times 0,03 = 74,1 \text{ Watts}$  (mín).

Com relação ao processo de descarga e recarga de uma bateria, temos que ter em mente que, durante a descarga, a tensão entre os terminais é menor do que a FEM<sup>12</sup> da bateria. Quando a bateria está fornecendo energia (sendo descarregada), a tensão entre os terminais é menor do que a sua FEM. Analogia hidráulica: abrimos a torneira para esgotar uma caixa d’água, não há resistência ao escoamento.

No sentido oposto, quando recarregamos uma bateria, é preciso vencer a resistência interna dela para inverter as reações químicas, portanto uma tensão maior do que a FEM ou *open circuit vol-*

11 LAB – *Lead Acid Battery* (Bateria de chumbo-ácido).

12 FEM – Força eletromotriz, que vem a ser a *open circuit voltage* ou a voltagem entre os terminais da bateria, plenamente carregada, mas sem ligação com qualquer dispositivo consumidor de energia externo. A FEM é medida em Volts.

*tage* para conseguir “empurrar” a corrente elétrica para dentro da bateria. Analogia hidráulica: ao bombear água de volta para encher a caixa, precisamos vencer a altura entre a bomba e a caixa, além do acréscimo de um diferencial de altura, portanto necessitando de mais potência.

## EXEMPLOS REAIS DE BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO

Nos dias que correm e por um tempo relativamente longo, as baterias de chumbo-ácido ainda serão utilizadas em submarinos convencionais e nucleares. São as mais antigas e ainda as mais confiáveis devido à

experiência acumulada em muitas décadas de operação. Apesar dos progressos neste campo, ainda não podem ser desprezadas.

Entretanto, elas têm deficiências, são caras de manter e demandam grandes cuidados durante a operação, pois podem gerar gases venenosos e hidrogênio gasoso, altamente inflamável. Na Tabela 2 citamos quatro exemplos de baterias de chumbo-ácido, em ordem cronológica de evolução.

Alguns dados foram obtidos, outros calculados com base em literatura ostensiva. Os valores calculados estão bem próximos da realidade. Poderiam vir a ser corrigidos, mas sem relevância para este artigo.

NAVIO	Fleet Subm. WWII – USN	PDX-57 USN	ASB-49 USN	LLL-69 USN	GS YUASA JAPÃO	U-214 GRÉCIA
Nº total de módulos	252	125	125	124	n.d.	648
Nº módulo/ Fila = string	126	125	125	124	n.d.	324
Tensão do módulo (V)	2,75	2,00	2,00	2,00	2,0	2,0
Tensão da rede (V)	347	250	250	247	n.d.	648
Capac.(Ah)/ módulo	7.500	11.436	7.200	8.100	7.370	9.500
Energia total (kWh)/mód.	20,625	22,872	14,400	16,200	14,739	19,000
Ener. Espec. (Wh/kg)	27,8	24,0	24,5	23,9	40,0	40,0
Dens. Energia Wh/litro	74,7	69,1	86,2	67,5	116,1	155,7
Energia Total Bat. (kWh)	5.198	2.859	1.800	2.009	n.d.	12.312
Dimensões módulo (m)	1,37 x 0,53 x 0,38	1,50 x 0,47 x 0,47	1,50 x 0,37 x 0,37	1,50 x 0,40 x 0,40	1,60 x 0,44 x 0,18	1,35 x 0,30 x 0,30
Peso do módulo (kg)	742	953	588	678	369	475
Vol. (litros) / Módulo	276	331	167	240	127	122
Vol. Total Bateria (m <sup>3</sup> )	69,53	41,42	25,67	30,00	n.d.	78,73

Área de Piso (m <sup>2</sup> )	50,75	27,61	17,11	20,00	n.d.	58,32
Peso Total Bateria (kg)	186.984	119.125	73.500	84.072	n.d.	307.800

Tabela 2 – Baterias de chumbo-ácido (LAB)

Nas primeiras quatro colunas da Tabela 2 temos um panorama da evolução das LAB na US Navy desde a Segunda Guerra Mundial até a década de 1980. O dado relevante é a energia específica (Wh/kg) e a densidade de energia (Wh/l), que se manteve num patamar muito regular. Já no século XXI vemos o salto destes valores com os exemplos das baterias japonesas (Yuasa) e gregas (Sunlight).

Comparemos a primeira com a sexta coluna: com 137% mais energia, a bateria mais moderna pesa apenas mais 64,6%, tendo um volume de apenas 13,2% maior. Mesmo com quase 60 anos decorridos entre os *Fleet Submarines WWII*<sup>13</sup> e o U-214, as dimensões dos módulos e os volumes totais dos dois modelos não diferem muito.

## BATERIAS MODERNAS ATUAIS E FUTURAS PARA SUBMARINOS

Diante da importância das baterias de íons de lítio (LIB)<sup>14</sup> nos dias atuais, vamos nos deter um pouco mais na descrição desta tecnologia (Tabela 3). Num intervalo de dois a três anos, a tecnologia de baterias de íons de lítio está prevista para ser aplicada em submarinos no Japão. Este tipo de bateria já existe há tempos e se aplica em computadores portáteis, celulares, ferramentas elétricas e outros aparelhos.

Devemos salientar que este tipo de bateria também é largamente empregado há anos em torpedos, AUVs, UUVs e ROVs em missões militares como guerra de contraminagem, coleta de inteligência e destruição furtiva de alvos, mas também em missões hidrográficas e inspeção de plataformas *offshore* ou paredes e canais de barragens, eclusas e grandes reservatórios de água em geral.

Uma nova tecnologia de baterias à base de lítio e enxofre está em franco desenvolvimento e poderá ser aplicada em submarinos daqui a dez ou 15 anos. Precisaremos aguardar os resultados das pesquisas em curso.

## BATERIAS DE ÍONS DE LÍTIO

As baterias de íons de lítio são recarregáveis e funcionam à base de lítio (Ref. 3 a 10). Caracterizam-se pela alta energia específica (Wh/kg). A vida útil cobre vários anos, por exemplo, cinco anos num *notebook*, mas depende muito da forma de utilização, da temperatura ambiente e das condições de armazenagem quando estão fora de serviço.

	<i>Lithium Ion Battery</i> (LIB)	<i>Lead Acid Battery</i> (LAB)
Voltagem/célula (V)	3,2 a 3,8	2,0
Capacidade (Ah)	100 a 170	36 ( <i>1C-rate</i> )
Energia Espec. (Wh/kg)	120 a 200	24

Tabela 3 – Características de células de baterias de íons de lítio e as da bateria de chumbo-ácido Concorde Sun PVX-560T

13 O *Balao Class* (1943) deslocava 1.450 tons/2.400 tons, com comprimento de 95 m.

14 LIB – *Lithium Ion Battery*.

A temperatura ambiente ideal para este tipo de bateria situa-se entre 18 e 25° C. Contudo, muitos fabricantes especificam uma gama entre 0 e 40° C. As baterias de íons de lítio não sofrem de efeito memória<sup>15</sup>.

A capacidade dessas baterias decai com o tempo quando não estão em uso, cerca de 2% ao mês.

No caso das LAB, o decaimento (*shelf-life*)<sup>16</sup> pode variar de 0,25% a

Química Células	LCO	LMO	NMC	LFP	NCA	LTO
Volt Típica (V)	3,6	3,8	3,7	3,3	3,6	2,40
Gama Ops. (V)	3,00 – 4,20	3,0 – 4,2	3,0 – 4,2	2,50 – 3,65	3,0 – 4,2	1,80 - 2,85
COV <sup>17</sup> (V)	2,50	2,50	2,50	2,50	3,00	1,80
Ener. Espec. Wh/kg	150 – 200	100 – 150	150 – 220	90 – 120	200 – 260	50 - 80
C-rate discharge	1C	10C	5C	35C	5C	1C típico 5C máx
Cycle life (cycles) <sup>18</sup>	500 - 1000	300 – 700	1000 -2000	1000 -2000	500	3K – 7K
Thermal runaway <sup>19</sup>	150°C (1)	250°C (1)	210°C (1)	270°C (2)	150°C (1)	(2)
Segurança Escala 1-10	5,0	5,0	7,5	10,0	5,0	10,0
Custo Escala 1-10	7,5	7,5	7,5	7,5	5,0	2,5
Aplicação	Serve para <i>Energy cell</i>	(+) potênc. (-) capac.	(+) capac. (+) potênc.	Alta corrente e energia	<i>Energy cell</i>	Iluminação pública c/ Ener. solar

Tabela 4 – Químicas de íons de lítio

Químicas:

- LCO: LiCoO<sub>2</sub> (*Lithium Cobalt Oxide*)
- LMO: LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (*Lithium Manganese Oxide*)
- NMC: LiNi<sub>0,33</sub>Co<sub>0,33</sub>Mn<sub>0,33</sub>O<sub>2</sub> (*Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide*)
- LFP: LiFePO<sub>4</sub> (*Lithium Iron Phosphate*)
- NCA: LiNi<sub>0,85</sub>Co<sub>0,1</sub>Al<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub> (*Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide*)
- LTO: Li<sub>4</sub>Ti<sub>5</sub>O<sub>2</sub> (*Lithium Titanate*)

Observações na tabela:

- (1) à plena carga promove o *thermal runaway*;
- (2) célula muito segura mesmo quando plenamente carregada.

15 Efeito memória – Trata-se do fenómeno em que a repetição de recargas insuficientes pode impedir que a bateria conserve sua capacidade máxima originalmente projetada ou, pelo menos, fará com que a capacidade máxima diminua gradualmente com o tempo.

16 *Shelf-life* – vida de prateleira.

17 COV – *Cutt-Off Voltage*.

18 *Cycles – discharge/recharge*.

19 *Thermal runaway*: Fogo inextinguível. A química autoalimenta o fogo com oxigênio da própria substância.

1,0% ao dia a 25° C, ou mesmo mais, dependendo da química dos eletrodos e da idade da bateria.

Em [www.BatteryUniversity.com](http://www.BatteryUniversity.com), na *M.S.Chemical Review*, Vol. 104, nº 10, 2004, encontramos a Tabela 4, que ilustra de forma resumida as características principais para cada tipo de química de íons de lítio empregada:

A bateria de íons de lítio (Figura 2) é constituída de uma grade de carbono como eletrodo negativo e fosfato de lítio e ferro (LFP) como eletrodo positivo. Um eletrólito é dissolvido num solvente orgânico e ocupa todo o volume interno da célula. Entre os dois eletrodos há uma barreira separadora que não permite a reação entre os materiais dos eletrodos, sendo, entretanto, permeável aos íons de lítio.

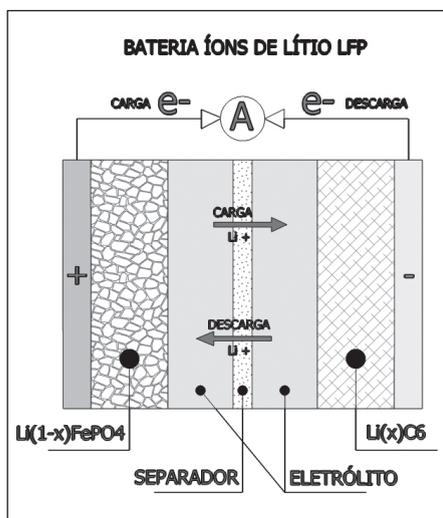


Figura 2 – Desenho esquemático de uma célula de íons de lítio (feito pelo autor)

No início do desenvolvimento da tecnologia de íons de lítio, as baterias não podiam ser recarregadas rapidamente e demandavam no mínimo duas horas para completar a carga. As baterias mais recen-

tes para aparelhos portáteis podem ser recarregadas em 45 minutos ou menos, sendo que alguns tipos podem recuperar um SOC (*State of Charge*) de 90% em dez minutos.

Em 2005 a Toshiba desenvolveu uma bateria de íons de lítio chamada de Quick-Charge, que pode atingir um SOC de 80% em um minuto. Esta conquista foi conseguida mediante o emprego de nanopartículas para acelerar a passagem de íons de lítio através do eletrólito.

Em 2006 pesquisadores do Massachusetts Institute of Technology (MIT) desenvolveram nanoarames que permitem construir baterias finíssimas com o triplo da densidade de energia normalmente disponível. Em 2007, na Universidade de Stanford, os pesquisadores desenvolveram um eletrodo negativo em aço inox com camadas de nanoarames de silício em sua superfície. O silício, sendo ávido de lítio, permite obter células com dez vezes a densidade de energia das células atuais.

Dependendo da escolha da química dos eletrodos e das substâncias dos eletrólitos, as características como voltagem, capacidade e vida útil, traduzidas pelo número de ciclos de descarga/recarga e segurança, podem mudar significativamente.

Baterias de íons de lítio podem incendiar ou explodir quando expostas a altas temperaturas. O mesmo pode ocorrer no caso de um curto-circuito, descargas ou sobrecargas excessivas. As baterias com eletrodos positivos de fosfato de ferro e lítio (LFP) são menos sensíveis a temperaturas mais elevadas.

Portanto, as químicas LFP são mais seguras. Mas a opção por uma segurança maior com química LFP vem em detrimento da energia específica, que é maior com química LCO, por exemplo. O tempo de vida e estocagem da química LFP também é maior, mas tudo depende de como as baterias são

operadas e mantidas. Quando não em uso, precisam ser conservadas dentro da faixa de temperatura recomendada pelo fabricante, idealmente entre 15° C e 25° C, e com recargas ocasionais para recompor a perda espontânea de mais ou menos 2% ao mês.

Não faz sentido falar de durabilidade das baterias em número de anos, pois não se sabe quanto tempo um submarino estará no mar ou no cais. Faz mais sentido falar em número de ciclos de descarga/recarga e suas durações. Uma LAB dura mil ciclos e a LIB com química LFP dura pelo menos 2.500 ciclos.

O *website* deste parágrafo informa que testes exaustivos já demonstraram que a química LFP pode sustentar 5.000+ ciclos operando com DOD bem além de 50% (Ref: [http://gliderpilotshop.com/lfp\\_vs\\_lead\\_acid](http://gliderpilotshop.com/lfp_vs_lead_acid)).

Essas características demandam um conceito de segurança bem elaborado quando baterias de íons de lítio forem utilizadas a bordo de submarinos. Além de uma clara distribuição das tarefas de segurança funcional, vem um conceito geral de segurança baseado em seis passos, a saber:

1. *Hazard and Risk Analysis*;
2. *Safety Goal Determination*;
3. *Functional Safety Concept*;
4. *Technical Safety Concept*;
5. *Quantitative Safety Analysis*; e
6. *Verification and Validation*.

Todos os seis passos acima são inerentemente coerentes, rastreáveis entre si, documentados e processados sob rigorosa

administração de configuração e qualidade, conforme a norma Eucar – European Council for Automotive R&D SIL: Safety Integrity Level acc. to IEC 61508, além do MIL-STD 882E System Safety.

A classe de submarinos *Soryu* teve o primeiro da classe *S-501* comissionado em 2009. A propulsão conta com um motor elétrico. O submarino possui diesel-geradores para recarregar as baterias LAB e um sistema AIP Stirling. O sistema AIP é empregado para navegação silenciosa de patrulha em águas hostis e, uma vez esgotado seu estoque de oxigênio líquido, a propulsão, tanto submersa como na superfície, dependerá

exclusivamente das baterias.

Segundo o jornalista Kosuke Takahashi, da *Jane's Defence Weekly* de 27/2/2017, o fabricante de baterias GS Yuasa Corp., Kyoto, fornecerá baterias de íons de lítio para os

próximos quatro submarinos da classe *Soryu*, sendo que o *SS511* e o *SS512* deverão ser comissionados em 2020 e 2021, seguidos dos *S513* e *S514*.

Esses submarinos estão sendo construídos pela MHI – Mitsubishi Heavy Industries. As novas baterias LIB, como fonte de energia adicional às baterias de chumbo-ácido, substituirão apenas o sistema AIP Stirling. Vale lembrar<sup>20</sup> que o motor Stirling é um ciclo termodinâmico que usa diesel de altíssima pureza e LOX<sup>21</sup> para acionar o motor e o gerador. O módulo completo com a unidade geradora, além do tanque LOX, ocupa muito espaço e tem um rendimento térmico inferior às células PEM<sup>22</sup>.

### **Acreditamos que foram os motivos relativos à confiabilidade e segurança das baterias de chumbo-ácido que determinaram sua manutenção a bordo**

<sup>20</sup> Sugerimos consultar nosso artigo sobre AIP na *RMB* do 4º trim./2017.

<sup>21</sup> LOX – *Liquid Oxygen*.

<sup>22</sup> PEM – *Polymer Exchange Membrane*.

A razão de terem tomado a decisão de substituir apenas o AIP Stirling por LIB é desconhecida. Mas acreditamos que foram os motivos relativos à confiabilidade e segurança das baterias de chumbo-ácido que determinaram sua manutenção a bordo. Com a troca, deverá haver um importante ganho de espaço interno no submarino. Conhecendo a mentalidade japonesa, supomos que o projeto já tenha previsto a fácil e rápida substituição das LAB por LIB em caso de sucesso nesses novos submarinos.

Como não poderia deixar de ser, a TKMS, como o maior e mais importante construtor de submarinos convencionais nos últimos 50 anos, preocupa-se muito com o quesito propulsão e fontes de energia dos submarinos não nucleares. Não somente os sistemas AIP desenvolvidos em parceria com a Siemens merecem atenção; também as baterias vêm ganhando em importância.

Em 2005 a TKMS, em parceria com a Gaia, pesquisou as baterias de íons de lítio com química de NCA – *Nickel Cobalt Aluminium*, passando depois para a química NMC – *Lithium-Manganese-Oxide*. Em 2015 a TKMS encerrou esta parceria e optou pela adoção de células com química LFP – *Lithium-Iron-Phosphate*, em parceria com a francesa Saft, priorizando os critérios rígidos de segurança para emprego de baterias em submarinos. A química LFP não sofre do eventual fenômeno de *thermal runaway*, em que a bateria pode incendiar-se e liberar oxigênio da própria química, tornando o fogo inextinguível, como é o caso das químicas NCA, NMC ou LCO.

Com a antiga química NCA, no caso do projeto do U-214 da TKMS, as duas baterias parciais juntas podiam armazenar uma energia de 15,43MWh; com a nova química, o valor alcançado já é de 14,7MWh, ou seja, 95% daquela com química NCA. A química LFP empata ou supera a LCO em todos os requisitos, exceto no de energia específica (Tabelas 5 e 6). Mas o requisito “segurança” foi o fator decisivo. (Fonte: *Naval Forces, Subcon 2015*, p. 36)

Eletrodo Positivo	LCO	LFP
Segurança	5,0	10,0
Desempenho	7,5	7,5
Vida Útil	5,0	10,0
Custo de Obtenção	7,5	7,5
Energia Específica	10,0	5,0
Potência Específica	5,0	7,5

Tabela 5 – Comparação das características entre duas químicas diferentes de baterias de íons de lítio, numa escala absoluta de “notas” de 0 a 10

Parcerias da TKMS	Gaia – NCA (2005)	Saft – LFP (2015)
Dimensões do Módulo	145 x 50 x 29 cm	148 x 50 x 29 cm
Peso do Módulo	450 kg	456 kg
Dimensões da Célula	21 cm x dia – 17 cm	25 cm x dia – 4,6 cm
Volume da Célula	4,77 litros	0,413 litros
Peso da Célula	12,3 kg	1,07 kg
Nº de Células	23	270
Tensão da Célula	3,6 V	3,3 V
Energia da Célula	1.717 Wh	141,9 Wh
Energia Específica Célula	140 Wh/kg	132,6 Wh/kg
Energia Específica Módulo	87,8 Wh/kg	84,0 Wh/kg

Densidade de Energia Cél.	360 Wh/litro	343,6 Wh/litro
Energia do Módulo	39.491 Wh	38.313 Wh
BMS, barramentos, refrigeração, rack etc.	167 kg	167

Tabela 6 – Quadro com as características principais das células de íons de lítio com químicas, respectivamente, NCA e LFP

Segundo informação do engenheiro Peter Hauschildt, diretor da Subsea Research and Development, obtida pelo autor, a TKMS trabalha com a premissa de poder oferecer comercialmente baterias de íons de lítio para submarinos com química LFP a partir de 2019. Conforme projeto da TKMS-Saft de uma bateria de íons de lítio para o submarino U-214, descrevemos resumidamente a arquitetura da bateria na Figura 3:

– Cada módulo tem seu próprio BMS – *Battery Management System*, que supervisiona suas 270 células.

– Cada *string* de seis módulos tem um Master BMS que administra os dados dos seis módulos individuais.

No Master BMS existe um protetor, o ECL – *Electronic Current Limiter*, que protege o sistema contra curto-circuitos de um *string*.

– Acima do ECL temos o SSE – *String Switching Equipment*, banco de chaveamento de todos os *strings*. Finalmente tudo converge para um EMS – *Energy Management System*, que administra toda a energia disponível a bordo, inclusive as células combustíveis, se houver.

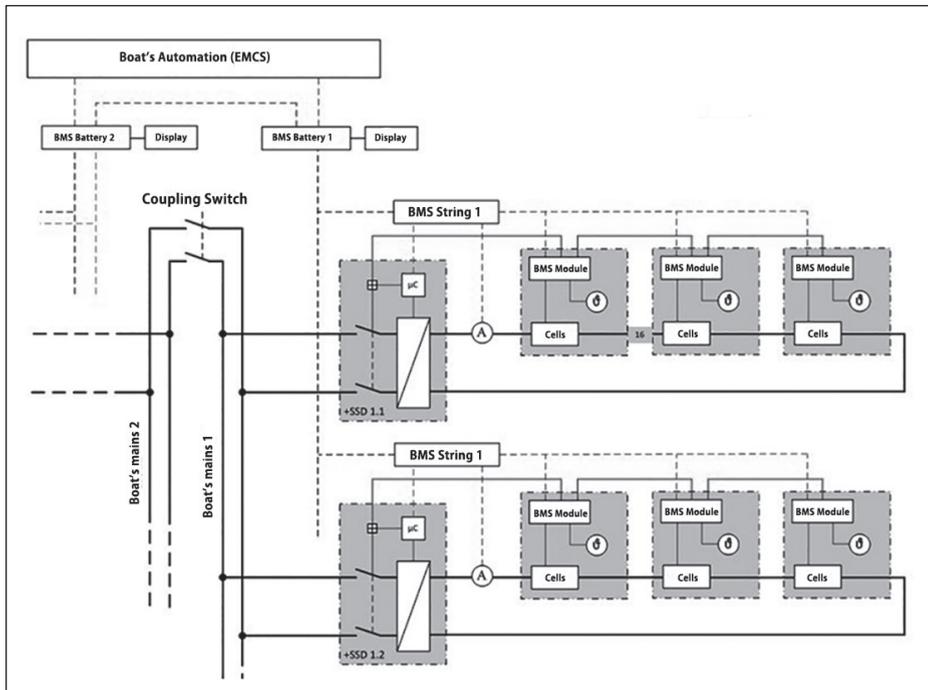


Figura 3 – Configuração esquemática das baterias (Ref. TKMS – publicação autorizada)

## CUSTOS

Outro ponto importantíssimo é a comparação dos custos de serviços de manutenção entre os dois tipos de baterias. Os custos de manutenção a bordo dos submarinos das baterias LIB são 60% mais baixos do que os das LAB. Os serviços na base (cais) zeram em relação às LAB, e os custos de *depot maintenance*<sup>23</sup> das LIB são menos da metade dos custos de manutenção das LAB. (Fonte: TKMS)

A TKMS fornece, ainda, outra informação sobre custos de obtenção. Para as LAB temos um custo de € 200-300/kWh (em nível de sistema, incluindo todos os acessórios) e, no caso dos íons de lítio, € 200-300/kWh (em nível de célula, sem incluir os acessórios). Como exemplo citamos o U-214 *Papanikolis*, equipado com LAB, resultando no seguinte: 12.312 kWh x € 200,00/kWh = € 2,462 milhões (custo específico das LAB em nível de sistema).

Se fôssemos substituir as LAB pela LIB (vide apêndice), teríamos o seguinte: 38.281 kWh/módulo x 480 módulos x € 300,00/kWh = € 5,513 milhões (custo específico das LIB em nível de célula sem acessórios). Na escolha entre os dois tipos de baterias, as LIB tal como calculadas demandariam um investimento inicial 124% maior, sem computar os acessórios que não sabemos a quanto montam. Assim, certamente o investimento inicial é ainda maior.

Segundo a fonte [www.gliderpilotshop/lfp\\_vs\\_lead\\_acid](http://www.gliderpilotshop/lfp_vs_lead_acid), o custo inicial de obtenção para as baterias de chumbo-ácido

perfaz cerca de US\$ 600/kWh, e o das de íons de lítio com química LFP aproximadamente US\$ 3.000/kWh. Resulta numa relação de investimento de mais ou menos 1:5. O custo de ciclo de vida para 2 mil ciclos como denominador comum aos dois tipos de baterias é de US\$ 2.600,00 no caso das de chumbo-ácido e de US\$ 3.000,00 para as LIB, resultando numa relação de custo de ciclo de vida mais ou menos LIB/LAB = 1,15.

Considerando que o tempo médio de vida útil das de chumbo-ácido são mil ciclos e as de íons de lítio cerca de 2.500 ciclos, no caso do exemplo de 2 mil ciclos seria necessário obter dois conjuntos novos de baterias de chumbo-ácido contra apenas um de LIB, sendo que estas ainda teriam um saldo de vida útil de 500 ciclos, ou 20% do número de ciclos previsto.

O *site* <http://medium.com/solar-microgrid/battery-showdown-lead-acid-vs-lithium-ion> cita valores de investimento inicial de US\$ 110,00/kWh para as baterias de chumbo-ácido e US\$ 530,00/kWh para as de íons de lítio, mantendo mais ou menos a relação de investimento 1:5, conforme a fonte acima.

O total *Life Cycle Cost*, referido à energia instalada nos dois casos, respectivamente, seria US\$ 0,18/kWh (LAB) e US\$ 0,20/kWh (LIB). A relação de custo de ciclo de vida = 1,11 é compatível com a informação do parágrafo anterior.

Obter informações precisas e confiáveis é quase impossível devido ao sigilo comercial e militar entre os fornecedores e as diversas Marinhas clientes. O autor

<sup>23</sup> *Depot maintenance* ou “manutenção na base” é a manutenção feita em materiais ou partes ou componentes que requeiram uma reforma com escopo de maior envergadura ou completa substituição de partes, conjuntos, sub-conjuntos ou sub-ítems, incluindo a manufatura de componentes novos, modificações, testes e recuperação de componentes conforme seja necessário. Serve para dar suporte a manutenções de categorias inferiores fornecendo assistência técnica e realizando esta assistência além de suas responsabilidades.

Provê estoques de equipamentos utilizando meios (oficinas e serviços) em maior extensão para reparos do que aqueles disponíveis em atividades de manutenção em níveis mais corriqueiros.

tentou obter informações de diversas fontes, mas sempre esbarrando em negativas. Aqui vemos que as informações colhidas de duas fontes são compatíveis entre si, mas divergem muito das informações da TKMS.

Mas uma conclusão se pode tirar dessas fontes: o investimento inicial, ou custo de obtenção, é menor no caso das LAB. Contudo, computando-se os Custos de Ciclo de Vida (CCV), que englobam obtenção, operação e manutenção, as LIB se mostram mais vantajosas, com CCV quase empatados, mas incontestáveis vantagens técnicas e operacionais para as baterias de íons de lítio.

## OPERAÇÃO

O desenvolvimento de um sistema de baterias para um submarino convencional é impulsionado, primeiramente, pelo requisito de estocar o máximo de energia possível num dado volume e, segundo, pelo requisito de flexibilidade de estocagem desta energia. Alta potência elétrica pode ser necessária num dado momento, independentemente do quadro operacional ou da condição SOC das baterias.

Quando se dispõe de um sistema AIP, este fornece a energia para as demandas a bordo (*hotel load*) e para a propulsão em patrulha, geralmente entre 3 e 5 nós de velocidade. Trata-se de uma demanda de energia de longa duração e baixa potência. As baterias ficam em *stand-by* para o caso de haver necessidade de um pico de velocidade num dado instante, ou seja, alta potência num curto intervalo de tempo.

Atualmente, o modo de operação de um submarino com baterias de chumbo-ácido ainda é fortemente influenciado pela dificuldade de se poder operar com as baterias com SOC próximo do máximo. As LAB devem estar no seu SOC máximo ao chegar à área de operação, depois de suspender. Geralmente elas não passam pelo *charging state 3* durante a missão e, portanto, o SOC das baterias não atinge mais 100%.

Na Figura 4 vemos que, à medida que aumenta o número de ciclos, a energia máxima que se consegue, recarregando as baterias de chumbo-ácido (LAB), vai diminuindo ao longo do tempo ou dos ciclos de descarga e recarga.

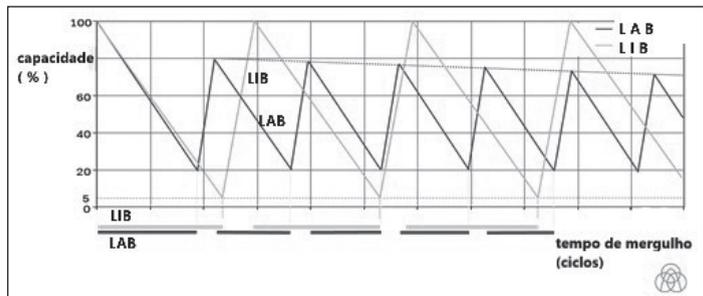


Figura 4 – Tempos de imersão, comparação entre as baterias LAB e LIB

Mesmo que num primeiro ciclo depois de suspender possamos contar com 100% SOC, somente 80% da capacidade pode ser utilizada (manter obrigatoriamente um mínimo de 20% SOC), e isso vem degradando a cada ciclo de recarga. Em termos práticos, somente cerca de 60% da capacidade nominal da bateria de chumbo-ácido pode ser efetivamente utilizada durante uma missão.

Na Figura 5, as duas curvas inferiores mostram a realidade com que os comandantes são confrontados quando utilizam baterias de chumbo-ácido. São comparadas as curvas de desempenho das LAB com SOC igual a 80% (terceira de cima

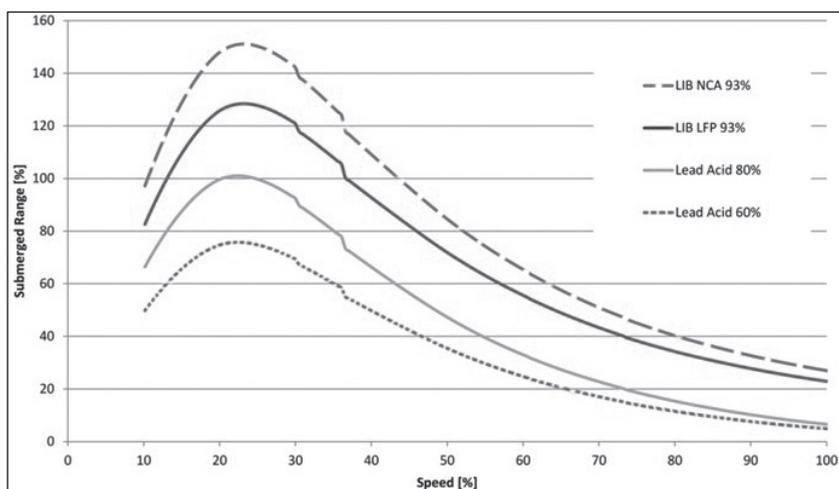


Figura 5 – Curvas de desempenho (Submerged Range over Submerged Speed)

para baixo) e 60% (quarta de cima para baixo), *versus* LIB-NCA (primeira curva) e LIB-LFP (segunda de cima para baixo).

Traçando uma vertical a partir do ponto de aproximadamente 22% da velocidade submersa nas abscissas (mais ou menos 4,5 nós), interceptamos os picos das curvas de desempenho. Nota-se claramente a diferença de raios de ação (em %) para a mesma velocidade, onde a LAB com SOC 80% é a unidade de referência com 100%.<sup>24</sup>

Uma das grandes vantagens das baterias LIB é justamente o fato de se poder “puxar” alta potência num dado instante, independente do SOC. Desta forma, picos de velocidade são possíveis sob qualquer condição SOC. A recarga também depende dessa condição<sup>25</sup>.

Vital para a operação é a disponibilidade de potência de propulsão, bem como uma reduzida taxa de indiscrição. Ambas dependem também do tempo de recarga das baterias. Os processos de recarga

das baterias de chumbo-ácido e íons de lítio são diferentes. As de íons de lítio recarregam-se em muito menos tempo. As baterias de chumbo-ácido têm muita inércia (*sluggish*) e demandam a recarga em três estágios sucessivos. Os dois primeiros são indispensáveis, mas o terceiro pode ser dispensado durante uma missão.

No caso das LAB, não é possível fornecer potência de qualquer maneira, pois o aumento da temperatura e a eletrólise (geração de gases e hidrogênio) do eletrólito são fatores de alto risco. Baterias seladas podem explodir, e as ventiladas desprendem gases altamente perigosos. As grandes LAB estacionárias levam entre 12 e 16 horas para ser carregadas. Respeitando o método de recarga multiestágios, sob certas condições especiais, o tempo pode ser reduzido para 8 a 10 horas.

O primeiro estágio, chamado de *bulk charge*, com corrente constante e incremento da voltagem, leva entre cinco e

24 Fonte: TKMS – publicação autorizada para a RMB.

25 Fonte: TKMS Naval Forces Special Issue, Subcon 2011.

oito horas. Responde por cerca de 70% da energia recarregada, e os 30% restantes são o estágio chamado *topping charge*, entre sete e dez horas, que provê a saturação, sem a qual a carga não é retida pela bateria. A mudança do estágio 1 para o 2 ocorre de forma contínua e quando a bateria atinge a voltagem ajustada ou pre-determinada. A corrente começa a decair quando a bateria começa a ficar saturada.

A carga plena é alcançada quando, ao final do segundo estágio (*topping charge*), que funciona com tensão constante, a corrente decai gradualmente até atingir um valor final correspondente de 3% a 5% da capacidade nominal da bateria em Ah (Ref. [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_the\\_lead\\_acid-Battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_the_lead_acid-Battery)).

As baterias de íons de lítio (LIB) podem ser recarregadas a partir de qualquer SOC acima de 5% para qualquer outro nível de SOC desejado. Basicamente são dois estágios, o primeiro o *constant current charge* e o segundo o *saturation charge*, mantendo-se a tensão (V) máxima constante até o decaimento da corrente para cerca de 10% da corrente nominal.

A recarga se dá entre duas e três horas. Na literatura consultada há um gráfico que mostra a recarga total de uma LIB com química LFP, em que o primeiro estágio leva

cerca de 40 minutos e a plena carga em 120 minutos (Ref. [http://batteryuniversity.com/learn/article/charging\\_lithium\\_ion\\_battery](http://batteryuniversity.com/learn/article/charging_lithium_ion_battery) e <http://radio-electronics.com/info/power-management/battery>).

Na Figura 6 vemos duas curvas de desempenho para um mesmo submarino equipado com: a) baterias LIB com sistema AIP (curva superior); b) somente baterias LIB (curva inferior), ambas as curvas sendo comparadas com o mesmo submarino equipado somente com baterias LAB.

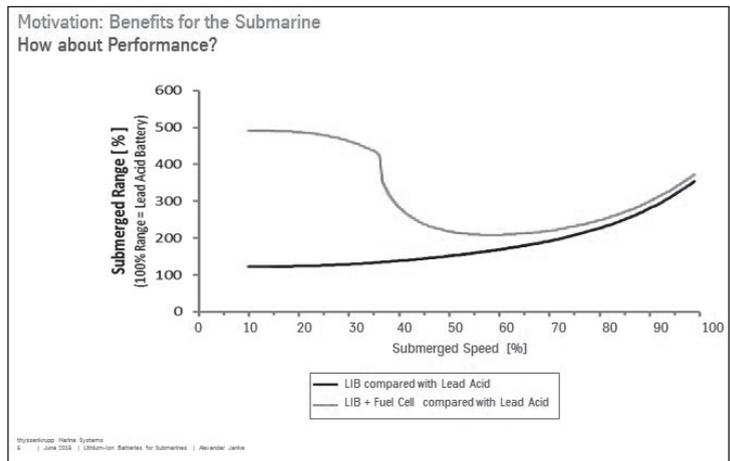


Figura 6 – Curvas de comparação do raio de ação de um submarino utilizando LIB sem AIP (curva inferior) e LIB com AIP (curva superior)<sup>26</sup>

Nas abcissas temos as velocidades em (%) da velocidade máxima submersa. Nas ordenadas temos o raio de ação das duas curvas em percentagens relativas, onde 100% equivale ao raio de ação máximo do mesmo submarino somente com baterias LAB.

## TAXA DE INDISCRICÃO

A Taxa de Indiscrção é a medida do grau de exposição de um submarino na

superfície do mar. Quanto menor, melhor. Na Figura 4 fizemos uma divisão das abscissas num desenho ampliado para definir uma escala de comparação. Para os cinco ciclos das LAB e três das LIB ali indicados, a soma do período de tempo navegando submerso e “esnorqueando” (denominador) é igual nos dois casos:

$$t_{snort} + t_{subm} = 125 \quad \text{unidades de tempo.}$$

para as LAB = 24 unidades de tempo e para as LIB = 20 unidades de tempo. A taxa de indiscrição (TI) é definida como sendo:

$$TI = \frac{t_{snort}}{t_{snort} + t_{subm}}$$

As Taxas de Indiscrição resultantes são as seguintes: LAB = 0,192 e LIB = 0,16. Donde o submarino com baterias de íons de lítio tem uma taxa de indiscrição menor, ou seja, há menos exposição do submarino. As duas curvas tipo dente de serra da Figura 4 têm seus ciclos representados nas abscissas, e as capacidades das baterias (%) nas ordenadas. Vemos claramente as deficiências das LAB quando comparadas com as LIB.<sup>27</sup>

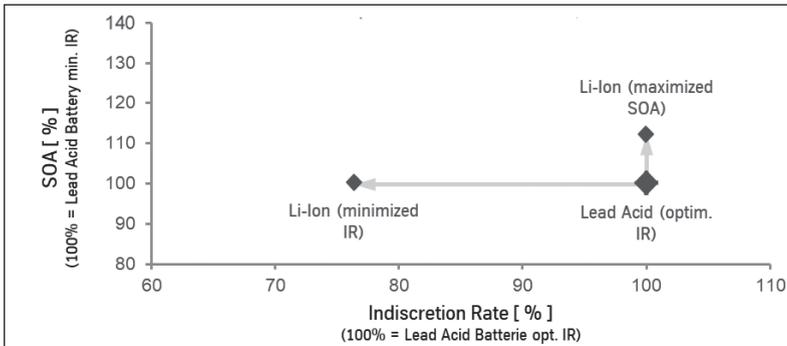


Figura 7A – Relação de SOA com taxa de indiscrição<sup>28</sup>

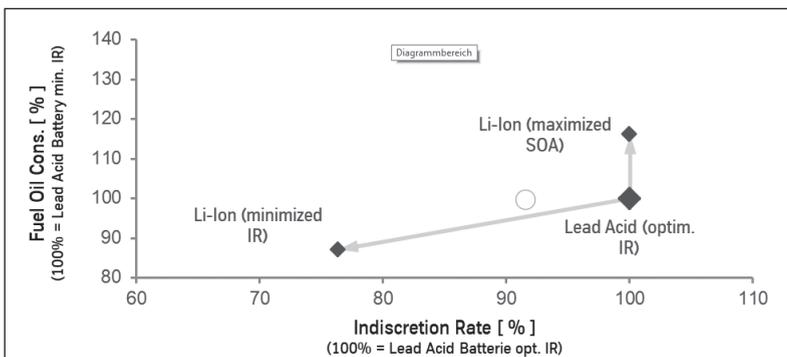


Figura 7B – Relação do consumo de combustível<sup>29</sup>

27 Fonte: TKMS – publicação autorizada para a RMB.

28 Fonte: TKMS – publicação autorizada.

29 Fonte: TKMS – publicação autorizada.

Outras informações importantes são a relação entre a velocidade de avanço (SOA<sup>30</sup>) e a taxa de indiscrição e a relação entre a taxa de indiscrição e o consumo de combustível. Nas Figuras 7A e 7B temos, nas abscissas, os valores da Taxa de Indiscrição em (%), onde 100% correspondem à Taxa de Indiscrição ótima para o submarino com LAB.

Nas ordenadas temos:

a) Figura 7A – SOA em 100% correspondente ao submarino com LAB para sua Taxa de Indiscrição ótima (100% nas abscissas). Resultado: com o mesmo SOA, a Taxa de Indiscrição do submarino com LIB cai para 77%;

b) Figura 7B – Consumo de óleo combustível de 100% correspondente ao submarino com LAB para sua mesma Taxa de Indiscrição ótima (100% nas abscissas). Com a Taxa de Indiscrição do submarino com LIB igual a 77% nas abscissas, como acima, o consumo de óleo do submarino cai para 88% (ordenadas).

Resumo: Para o submarino com LAB, a Taxa de Indiscrição ótima será 1,00 (abscissas) com consumo de óleo igual a 1,00 (ordenadas). Com o emprego das LIB, a Taxa de Indiscrição cai para 0,77 (abscissas) e o consumo de óleo para 0,88 (ordenadas).

Nos dois casos com ambos os tipos de baterias, LAB e LIB, a velocidade de avanço será igual e o tempo navegando submerso em profundidade maior será admitido como sendo igual ao tempo navegando submerso com *snorkel* durante recarga das baterias. Sem dúvida, as LIB representam uma vantagem inequívoca para o submarino no requisito da Taxa de Indiscrição.

## BATERIAS DE LÍLIO E ENXOFRE

A nova tecnologia de baterias à base de Li-S (Lítio e Enxofre), que se descortina como sucessora dos íons de lítio, está evoluindo a passos largos, com perspectivas de avanços tecnológicos ainda mais importantes (Ref. 11 a 18). A passagem de uma tecnologia corrente para outra nova precisa percorrer um longo caminho e depende de fatores relativos comerciais, tais como preço e disponibilidade, ou técnicos, como capacidade, energia específica, vida útil, segurança, peso e dimensões.

As baterias de Li-S<sup>31</sup> são compostas primordialmente dos elementos lítio e enxofre, além do eletrólito e de outras substâncias. Elas têm um eletrodo positivo constituído essencialmente de enxofre numa grade de carbono e um polo negativo de lítio metálico puro (Figura 8).

As reações químicas destes dois elementos, lítio e enxofre, mostram que as baterias Li-S têm uma alta capacidade específica teórica de 1.672 mAh/g, valor dez vezes superior ao das baterias de íons de lítio. O lítio metálico, como eletrodo, tem uma capacidade teórica igual a 3.862 mAh/g. A energia específica de uma célula com 2.600 Wh/kg é a meta teórica.

As baterias de lítio-enxofre ainda demandam a solução ou melhora da questão dos ciclos de vida (descarga/recarga). Esta questão está relacionada com a estabilidade eletroquímica e com a reversibilidade das reações químicas. A tendência de difusão dos polissulfetos no eletrólito líquido durante o processo eletro-químico, o chamado *polysulphide shuttle effect*, ainda precisa ser controlada eficazmente (Ref. 17).

30 SOA = *Speed of Advance*, ou velocidade de avanço em % da velocidade do submarino.

31 Símbolos químicos: Li = Lítio; S = Enxofre.

Atualmente, cientistas, pesquisadores e engenheiros de vários países em diversas instituições, firmas privadas e universidades buscam soluções para as deficiências do processo eletroquímico e focam suas pesquisas nos seguintes tópicos:

- estudar as alternativas para as estruturas dos eletrodos positivos, como, por exemplo, o grafeno<sup>32</sup>, para aprisionar os polissulfetos de enxofre e tolerar a variação de volume do enxofre de até 80% durante os ciclos de descarga/recarga e melhorar a condutividade elétrica;
- tipos de eletrólitos e suas proporções de eletrólito/enxofre;
- materiais para os separadores que bloqueiam a migração dos sulfetos;
- polímeros aglutinantes para aprisionar as partículas de enxofre na estrutura reticulada do eletrodo positivo; e
- aditivos como óxidos metálicos para ajudar a ancorar os átomos de enxofre no eletrodo positivo e melhorar a condutividade.

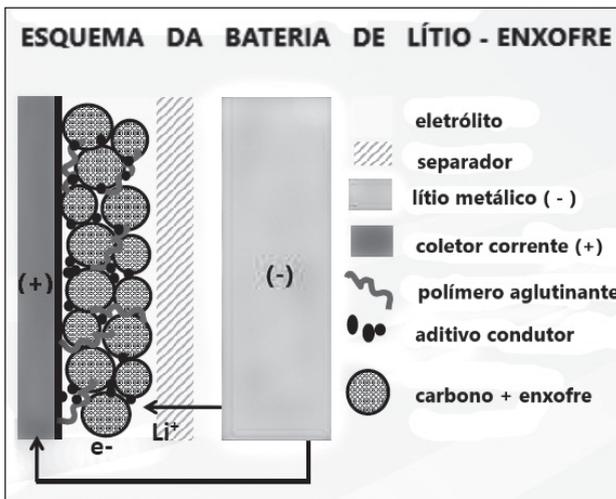


Figura 8 – Representação esquemática de uma célula de LI-S<sup>33</sup>

Atualmente já existem protótipos de células de algumas procedências. Como exemplos, o instituto Fraunhofer IWS (Dresden, Alemanha) elaborou uma célula Li-S com energia específica de 330 Wh/kg; a Oxis Energy (Reino Unido) produziu uma célula com 325 Wh/kg; e a Sion Power (USA), em parceria com a Airbus Defence and Space e a Basf, apresentou um modelo com 350 Wh/kg (Figura 8).

O instituto Fraunhofer IWS trabalha com uma previsão realista para desenvolver o próximo protótipo de célula com energia específica estimada em 672 Wh/kg. Segundo o Professor Doutor S. Kaskel (Ref. 18), os preços dessas células deverão cair drasticamente. Os atuais compostos químicos de íons de lítio, como o NMC<sup>34</sup>, custam € 23,00/kg, e os à base de enxofre poderão custar cerca de € 1,00/kg.

Sobre a segurança de baterias de Li-S, o Fraunhofer IWS produziu uma célula com novo eletrólito, apresentando grande segurança e estabilidade térmica a 130°C. O lítio metálico tem ponto de ignição > 190°C, caso que só poderia ocorrer com fogo por causa externa à bateria.

Esta nova célula não apresentou problemas com simulações de *overcharge* ou curto-circuito interno. A nova química não apresenta risco de *thermal runaway*. O nível de risco máximo avaliado é igual a HL-3, conforme norma Eurocar. São bem mais seguras do que as baterias à base de íons de lítio.

33 Fraunhofer IWS – publicação autorizada (Ref. 18).

34 NMC – *Lithium Nickel Manganese Oxide*.

A inglesa Oxis Energy planejava colocar as primeiras baterias no mercado em 2016. Ela está envolvida com o projeto da Eclipse – European Consortium for Lithium-Sulfur Power for Space Environments, desenvolvendo baterias de Li-S de alta capacidade para satélites. Outra companhia, a Sony, planeja introduzir baterias de Li-S no mercado já a partir de 2020.

## CONCLUSÃO

As Marinhas que estiverem programando ou iniciando a construção de novos submarinos deveriam ficar muito atentas ao momento presente, com a iminência do processo de aplicação de novas baterias de íons de lítio em substituição às de chumbo-ácido.

Entretanto, algumas Marinhas certamente ainda optarão por baterias de chumbo-ácido no curto prazo por tradição ou cautela, mas, dentro de cinco anos aproximadamente, o processo de substituição desta tecnologia pioneira e longa será irreversível. Os japoneses empregarão as LIB em dois anos, e os alemães já as terão disponíveis em aproximadamente um ano.

As LIB já são consideradas no projeto da nova classe *U-212-CD* para a Noruega e a Alemanha. No programa da nova classe de submarinos para a Royal Australian Navy (RAN), os franceses já resolveram trocar as LAB, propostas no projeto, pelas LIB, pois se deram conta que para um submarino de tal porte e com os requisitos promulgados pelos australianos, não há outra opção viável.

Empreender um *retrofit* de submarinos mais modernos existentes é possível, mas demanda um estudo detalhado da reserva de flutuação, estabilidade e lastro, pois, no caso de um volume igual para LAB ou LIB, esta é mais leve, embora tenha o triplo da capacidade de estocar energia.

A Marinha do Brasil, com seu atual programa de construção de novos submarinos, encontra-se no momento preciso em que não poderá deixar de estudar esta questão a fundo. As vantagens inerentes da tecnologia de íons de lítio e sua maturidade de emprego deverão ser bem avaliadas para que possamos incorporar esta nova tecnologia de baterias em tempo hábil nos novos projetos.

 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:  
<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Baterias; Submarinos;

## REFERÊNCIAS

1. A Guide to Understanding Battery Specification: MIT Electric Vehicle Team, December 2008 ; Gears Educational Systems, www.gearseds.com , Battery Basics; Battery Basics : ECEN 4517 Lecture : Lead-Acid Batteries ; A Guide to Lead-Acid Batteries, Electrical Craft Principles, Vol. 1, 4th edition, John Whitfield : The Institute of electrical Engineers.
2. Nuclear Submarine Batteries and Radiation Considered in Shielding, Paul Ditiangkin (03/2013), Stanford University.
3. NAFO SUBCON 2015. Alexander Janke, Boris Nagorny (TKMS): Lithium-Ion Batteries for Submarines.

4. NAFO SUBCON 2007. Klaus Brandt, Stefan Theuerkauf (Gaia Akkumulatoren): Development of High Energy Lithium, Ion Cells.
5. NAFO SUBCON 2007. Andreas Buchen (TKMS): Integration of Lithium-Ion Batteries.
6. Lithium-Ionen Akku: <http://de.wikipedia.org/wiki/lithium-ionen-akkumulator>.
7. Engineering Energy Storage – Elsevier 2017, DOI:10.016/B978-0-12.814.100-7.00007-9.
8. [https://books.google.com.br/books?id=2uUIDwAAQBAJ&pg=PA117&lpg=PA117&q=battery+power+versus+energy&source=bl&ots=FvYmk9M1Ik&sig=NzZ9\\_tk-6oVpM25cfu9dzmrJuqE&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKewiE59Wo-enYAhVEHJAKHbgaAVU4FBD0ATAEegQICRAB#v=onepage&q=battery%20power%20versus%20energy&f=false](https://books.google.com.br/books?id=2uUIDwAAQBAJ&pg=PA117&lpg=PA117&q=battery+power+versus+energy&source=bl&ots=FvYmk9M1Ik&sig=NzZ9_tk-6oVpM25cfu9dzmrJuqE&hl=pt-BR&sa=X&ved=2ahUKewiE59Wo-enYAhVEHJAKHbgaAVU4FBD0ATAEegQICRAB#v=onepage&q=battery%20power%20versus%20energy&f=false).
9. How does Capacity Correlate with Charge Voltage for Lithium-Ion Batteries. Power Stream Technology, Novembro/2017, Orem, Utah 84058.
10. ALSE – Lithium Ion Cell modelo ALF-120H, *website* da empresa.
11. Brochura Oxis Energy, UK, [www.oxisenergy.com](http://www.oxisenergy.com).
12. Patel, Krunal: University of Illinois, Chicago, Lithium-Sulfur Battery: Chemistry, Challenges, Cost and Future, Journal of Undergraduate Research 9, fls. 39-42 (2016).
13. Qie, Long & Manthiram, Arumugam: University of Texas, Austin : High-Energy-Density Lithium-Sulfur Batteries, ACS Energy Letters 2016 – 1 fls. 46-51 (<http://pubs.acs.org/journal/aelccp>).
14. Challenges and current development of sulfur cathode in lithium-sulfur battery, Chengyin Fu & Juchen Guo, Current Opinion in Chemical Engineering 2016.
15. Graphene Oxide as Sulfur Immobilizer in High Performance Lithium-Sulfur Cells, Journal of the American (2011): Liwen Ji, Mumin Rao, Haimei Zeng + nove colaboradores.
16. Direct Observation of sulfur Radicals as Reaction Media in Lithium Sulfur Batteries; Qiang Wang, Jianming Zheng, Eric Walter, Huilin Pan: Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA; Bor Yann Liaw : University of Hawaii, Manoa, Honolulu; Xiao-Qing Yang, Xiqian Yu : Brookhaven National Laboratory, Upton ,NY, USA.
17. Cathode Materials for Lithium Sulfur Batteries: Lianfeng Duan – Key Laboratory of Advanced Structural Materials, Changchun University of Technology, China; Feifei Zhang & Limin Wang – Changchun Institute of Applied Chemistry, China.
18. Fraunhofer IWS, Technische Universität Dresden, Prof. Dr. S.Kaskel: Recent Progress in Lithium-Sulfur-Batteries.
19. Whitman, Dr.; Senior Editor, *Undersea Warfare Magazine*, Washington, revista oficial da SN Submarine Force. Artigos mencionados : a) “The Wrong Submarine for a New Warfare Era” e, b) “Tomorrow’s Submarine Fleet: The Non-Nuclear Option”. Fonte : [www.argee.net/defensewatch](http://www.argee.net/defensewatch).

## APÊNDICE

### CÁLCULO COMPARATIVO ENTRE BATERIAS LAB E LIB DO SUBMARINO U-214 PAPANIKOLIS, DA MARINHA DA GRÉCIA

Vamos citar um exemplo de cálculo comparativo entre baterias LAB e LIB para um submarino moderno existente, para comparar as LAB que o equipam com as LIB que poderiam equipá-lo. Os dados obtidos são de fontes ostensivas e informações obtidas da TKMS pelo

autor. Como sempre, os valores são razoavelmente confiáveis, mas sempre fica uma “brecha”, pois dados exatos são classificados e impossíveis de obter. Neste cálculo expedito estamos desprezando a *hotel-load* para facilitar o entendimento.

O módulo típico da LAB considerada tem tensão nominal = 2,0 Volts com capacidade = 9.500 Ah. São 648 módulos divididos em 2 x *strings*<sup>35</sup> em paralelo. Um módulo pesa cerca de 475 kg com dimensões 1,45 m x 0,38 m x 0,38 aproximadamente. A tensão típica são 2,0 Volts com uma capacidade de 9.500 Ah. Donde a energia máxima de cada módulo será:  $2,0V \times 9.500Ah = 19.000 \text{ Wh}$ .

Cada *string* com 324 módulos ligados em série fornece uma tensão  $V = 324 \times 2,0V = 648V$ . Então, cada *string* armazena uma energia equivalente a:  $E = 648 \text{ V} \times 9.500 \text{ Ah} = 6,156 \text{ MWh}$ . Para baterias de chumbo-ácido modernas, uma energia específica considerada como muito boa é igual a 40 Wh/kg. Então, cada *string* com 324 módulos em série armazena uma energia =  $40 \text{ Wh/kg} \times 324 \times 475 \text{ kg} = 6,156 \text{ MWh}$ , o que confere com o cálculo anterior.

Para a *C-rate* de 20 horas (20C), tem-se uma corrente nominal por *string* de 9.500Ah: 20 hs = 475 A/hora. Consideramos um SOC máx = 80% e mín = 20%, eficiência do *inverter* = 85%. Neste regime, utilizando o total de 648 módulos, o dito submarino pode desenvolver aproximadamente 4 nós durante 40 horas, cobrindo cerca de 160 milhas náuticas submerso.

Agora, suponhamos que no mesmo submarino U-214 fôssemos substituir as LAB por LIB com química LFP. Poderíamos adotar por hipótese a arquitetura preconizada pela TKMS: 2 x 40 *strings* de seis módulos cada, total de 480 módulos com dimensões 1,45 m x 0,50 m x 0,29 m semelhante às LAB acima e peso de 456 kg, segundo informações da TKMS-Saft.

O novo banco de baterias resultaria numa área de piso de 69,6 m<sup>2</sup>, volume de 100,9 m<sup>3</sup> e peso total igual a 216 toneladas. A diferença de peso de 308 tons (LAB) – 219 tons (LIB) = 89 tons teria que ser compensada com lastro de chumbo ou 7,8 m<sup>3</sup> do metal, volume que cabe com folga dentro da diferença de volume de 14,2 m<sup>3</sup> entre os dois tipos de baterias.

Cada módulo TKMS-Saft tem uma energia  $E = 99 \text{ V} \times 387 \text{ Ah} = 38.313 \text{ Wh}$ . A energia total das duas baterias parciais, totalizando 480 módulos, seria:  $E = 480 \times 38.313 \text{ Wh} = 18,39 \text{ MWh}$ . Então, substituindo no mesmo submarino as LAB pelas LIB, teríamos 49,4% mais energia, banco de baterias 29% mais leve e volume total praticamente igual. O trajeto de 160 m.n. calculado acima passaria para:  $160 \text{ m.n.} \times 1,494 \times 1,1^{36} = 263 \text{ m.n.}$  Estes cálculos levaram em conta o estado da tecnologia atual de 2018.

<sup>35</sup> *String* – fileira de baterias ligadas em série.

<sup>36</sup> Adicionamos mais 10% por conta de uma DOD maior nas LIB do que nas LAB.