

U-X 65A: A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DAS BATERIAS

RENÉ VOGT*
Engenheiro

SUMÁRIO

Introdução
Foco Evolutivo
Nova Bateria 1
Nova Bateria 2
Conclusão

INTRODUÇÃO

No artigo anterior, publicado na RMB 2^aT/2023, estudamos a viabilidade de um submarino com mais AIP¹ e menos bateria, intitulado *U-X 65A*. A sugestão nos foi feita pelo submarinista alemão Capitão de Fragata Bernd Arjes, comandante de submarino e da Flotilha de Submarinos, engenheiro e professor dos novos comandantes de submarinos.

Naquele estudo, continuamos adotando a bateria de íons de lítio com

química LFP², tal como elaborada pela TKMS-Saft e que deverá ser utilizada nos novos submarinos classe *U-212CD* para as Marinhas da Noruega (4X) e Alemanha (2X). No nosso caso, previmos dois compartimentos de baterias com um peso total de 156 toneladas. São 312 módulos de baterias, formando 52 *strings* de seis módulos cada, ligados em série, e os 52 *strings* ligados em paralelo, resultando numa energia armazenada igual a: 594V x 387Ah x 52 *strings* = 11.954 Wh.

* Empresário e membro da Sociedade de Amigos da Marinha de São Paulo (Soamar-SP). Colaborador frequente da RMB. Recebeu a Medalha 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 1^o trimestre de 2015.

1 AIP: Air Independent Propulsion.

2 LFP: Lithium Iron Phosphate.

Visando à melhoria da Taxa de Indiscrição e a um melhor arranjo da praça de máquinas, sugerimos o desenvolvimento do Gen-Set MTU16V4000U83, em vez do atual grupo gerador com um motor 12V. A Taxa de Indiscrição média calculada é de 17,3%. Para este novo estudo de bateria, manteremos essa configuração dos estudos anteriores (2ºT/2023 e 3ºT/2018).

Todos os nomes, marcas, modelos e dados foram obtidos de informações públicas e ostensivas, algumas poucas diretamente de pessoas que trabalham no ramo e não sujeitas a sigilo militar ou comercial. O autor assegura que não tem relações comerciais com firmas do mercado de defesa ou do ramo de baterias.

FOCO EVOLUTIVO

Com as novas tecnologias, as baterias vão ficando cada vez mais poderosas. Mas, se mantivermos a mesma capacidade geradora para recarregá-las, mesmo que a nova bateria tenha uma *C rate* maior, teremos um aumento do tempo de recarga e, consequentemente, maior Taxa de Indiscrição.

Como consequência direta, se fixarmos uma capacidade da bateria considerada como adequada (requisito), a nova bateria poderá se tornar menor e mais leve do que a anterior. Disto resultaria mais espaço interno disponível e um saldo de peso a ser distribuído entre SWBS200/300/400/500/600.

Resumo, com o progresso e o aumento da capacidade da bateria e a mesma potência geradora, ou se mantém o tamanho

anterior com maior estoque de energia ou se mantém a capacidade anterior e se diminui o tamanho e o peso da nova bateria. Tudo dependerá dos requisitos operacionais do submarino.

Os principais itens nas pesquisas de melhoria das baterias podem ser resumidos da seguinte forma:

a) Obter maior densidade de energia expressa em Wh/litro e energia específica expressa em Wh/kg. Aqui deve se observar que há sempre dois valores: um referido às células propriamente ditas, e outro referido ao módulo de bateria completo montado com as células, estrutura mecânica (*rack*), unidades de controle eletrônico, ligações/conexões e refrigeração.

b) Obter maior velocidade de recarga ou *C rate*. A *C rate* é inversamente proporcional ao tempo: $1C = 1$ hora, $0,5C = 2$ horas, $2C = 30$ min e assim sucessivamente.

A *C rate* mais alta propicia melhora na Taxa de Indiscrição porque recarrega uma bateria mais rapidamente. Para preservar o bom estado de uma bateria, pode-se recarregá-la com uma *C rate* menor do que a especificada pelo fabricante, mas evitar o contrário.

c) Melhoria do sistema de refrigeração das células com controles de temperatura mais precisos, que tem como consequência melhor eficiência e vida útil prolongada, além de reduzir riscos de acidentes, embora a química LFP apresente grande segurança ao fenômeno do *thermal run away*³.

d) Com células menores e mais leves, otimizam-se o tamanho e o peso dos mó-

**Com as novas tecnologias,
as baterias vão ficando
cada vez mais poderosas**

3 *Thermal run away*: risco de incêndio ou explosão das células. A temperatura crítica das LFP é a mais alta de todas, mas novas composições de baterias, como, por exemplo, da Sakuú, no Vale do Silício, Califórnia, trabalham com eletrólito sólido, zerando este risco.

dulos que serão instalados nos compartimentos de baterias, com vantagens óbvias. Os módulos de bateria são formados pelas células agrupadas em *strings*, sistema de refrigeração, estrutura e módulos eletrônicos de controle dos *strings* de células e do módulo como um todo.

e) Redução do custo de fabricação e do risco político-estratégico ao eliminar-se a utilização de certos minerais caros e/ou raros, como o níquel e o cobalto. Como exemplos, sejam citadas apenas três das químicas mais utilizadas: NCA (*lithium nickel cobalt aluminum oxide*), NMC (*lithium nickel manganese cobalt oxide*) e LCO (*lithium cobalt oxide*).

f) Maior vida útil expressa em maior número de ciclos sem efeito memória. A vida útil das baterias é função direta dos cuidados com a manutenção, como o controle da temperatura, cuidados na estocagem quando atracado no cais, a DOD⁴ durante as operações e sua frequência.

g) Estão sendo pesquisados eletrólitos sólidos e anodos de silício poroso. Estes eletrólitos reduzem a zero o risco de fogo ou explosão, e os novos anodos exploram a capacidade elétrica muito superior do silício.

NOVA BATERIA 1

Pesquisamos a firma chinesa Svolt, cuja fatia do mercado automotivo mundial gira em torno de 10%. Tomamos como exemplo sua nova bateria, denominada L600 Short Blade 2nd Generation.

Esta bateria (no caso uma célula) apresenta uma capacidade de 196Ah, densidade de energia volumétrica 430Wh/litro, voltagem 3,3Volts, uma *C rate* = 1,6

fast-charging, dimensões 575 mm x 118 mm x 22 mm e peso = 3,5 kg.

Para a construção de um módulo, aproximadamente igual ao da TKMS-Saft com química LFP (148 x 50 x 29 cm/500 kg)⁵, arranjamos camadas com três células L600, resultando numa seção transversal de 575 mm x 354 mm. Formamos um *string* de 36 células ligadas em série, organizadas em 12 camadas x 3 cm = 36 cm a altura, incluindo refrigeração e montagem, resultando numa tensão igual a 118,8 Volts e uma capacidade de 196 Ah.

Nosso novo módulo Svolt com quatro *strings* de células teria as seguintes dimensões e peso: aproximadamente 57,5 cm x 35,4 cm x (36 x 4) 144 cm e peso de 504 kg⁶. A energia armazenada por um módulo de bateria Svolt Short Blade L-600 2nd Gen seria: 118,8 V x 4 (*strings* de células) x 196 Ah = 93.139 Wh >> 38.313 Wh (TKMS-Saft).

No caso do U-X 65A, verificamos que um compartimento de bateria (U-X 65A tem dois) pode comportar 20 *strings* de módulos ligados em paralelo, cada um composto de cinco módulos, resultando em: 118,8V x 5 módulos x 196 Ah x 4 *strings* de células x 20 *strings* de módulos = 9.314 Wh (+55,83%) > 5.977 Wh (TKMS-Saft do U-X 65A).

A tensão da rede de bordo seria, portanto, a mesma de 594 Volts, como antes, com TKMS-Saft. O novo peso da bateria por compartimento seria de 20 *strings* x 5 módulos x 507 kg = 50.700 kg contra os 78.000 kg anteriores TKMS-Saft, por compartimento.

A nova energia armazenada (dois compartimentos) seria de 18.628 Wh, ou

4 DOD: Depth Of Discharge, ou Taxa de Descarga. Durante os períodos de porto, elas sempre devem ficar carregadas e, durante uma operação normal, descargas superiores a 50% devem ser evitadas quando possível.

5 A TKMS escolheu estas medidas de um módulo por sua semelhança com as baterias de chumbo-ácido tradicionais, facilitando um eventual *retrofit*.

6 TKMS-Saft: 148 cm x 50 cm x 29 cm/456 kg.

91,7% dos 11.954 kWh $\times 1,7 = 20.322$ kWh da TKMS-Saft, com a tecnologia de anodos de silício da Leydenjar. Aplicando-se esta tecnologia de anodos de silício poroso nas L600, a energia aumentaria ainda mais, para 18.628 kWh $\times 1,7 = 31.668$ kWh.

Quanto à vida útil da bateria, o fabricante cita um desempenho de 3.500 ciclos com 100% de DOD ou 5.000 ciclos com 80% de DOD. Supondo que o submarino faça cinco viagens/ano e descarregue/re-carregue a bateria, digamos, 20 vezes por viagem, a bateria teria uma vida útil de aproximadamente 35 anos.

Contudo a bateria perde capacidade ao longo do tempo, e este valor poderia ser multiplicado por 0,8, resultando em 28 anos. Seria admissível supor uma troca

preventiva de baterias a cada 20 anos (reforma de meia-vida). Somente para termos uma ideia da ordem de grandeza, a Marinha da Alemanha estipula um número de horas de operação em que, quando atingido, as baterias são trocadas por novas, não importando o estado das antigas.

Aproveitando as tabelas do estudo anterior, vamos verificar o desempenho

do submarino para cada caso, ou seja, uma bateria com capacidade de 18.628 kWh e outra com 31.668 kWh. E vamos comparar os dois resultados com o estudo anterior da bateria LFP da TKMS-Saft. A escolha da bateria teria por parâmetros

**A Marinha da Alemanha
estipula um número de
horas de operação em que,
quando atingido, as baterias
são trocadas por novas,
não importando o estado
das antigas**

os requisitos operacionais e as eventuais vantagens de redução do peso próprio, com o saldo sendo aproveitado nos SWBS do submarino.

Bateria DOD (%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 nós / Snorquelando: 5 nós ⁷		
Potência (kW)	Regime ⁸ : DS = 670 kW / Snorquelando: 330 kW		
Bat. 20.321 kWh	5.080 kWh	10.160 kWh	15.240 kWh
Tempo DS10kt (hs)	7,58	15,16	22,75
Tempo NS ⁹ 5kt (hs)	1,62	3,15	4,68
IR (%)	17,6	17,2	17,1
Nº de ciclos ¹⁰	37	19	13
Tempo total (hs)	340	348	357
Trajeto (m.n.)	3.105	3.180	3.262

Tabela 1 – 2 x Gen-Sets MTU16V4000U83 – Operação exclusiva com bateria, geradores e *snorquel*.
Bateria LFP da TKMS-Saft do estudo original, publicado na RMB 2ª T/2023

7 O Comandante Wallner privilegia uma velocidade de snorquelagem de 5 nós, em vez de 3 nós.

8 Inclusive Hotel-Load = 140 kW.

9 NS: Near Surface, snorquelando.

10 Nº de ciclos = número total de snorquelagens. O estoque de diesel igual a 56 tons é totalmente consumido cobrindo o raio de ação.

	DOD 25%	DOD 50%	DOD 75%
Bat. 20.321 kWh	5.080 kWh	10.160 kWh	15.240 kWh
Tempo de navegação	1,21 hs	2,42 hs	3,64 hs
Percurso	24,2 m.n.	48,4 m.n.	72,8 m.n.

Tabela 2 – DS – Deep Submerged com 20 nós. Precisando evadir-se, mudando de rumo e de profundidade a toda velocidade, a demanda de potência máxima = 4.191 kW para desenvolver 20 nós

Bateria DOD (%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 nós / Snorquelando: 5 nós		
Potência (kW)	Regime: DS = 670 kW / Snorquelando: 330 kW		
Bat. 18.628 kWh	4.657 kWh	9.314 kWh	13.971 kWh
Tempo DS10kt (hs)	7,00	13,90	20,90
Tempo NS 5kt (hs)	1,50	2,90	4,30
I R (%)	17,65	17,26	17,06
Nº de ciclos	40	20	14
Tempo total (hs)	340	336	357
Trajetos (m.n.)	3.100	3.080	3.227

Tabela 3 – 2 x Gen-Sets MTU16V4000U83 – Operação exclusiva com bateria, geradores e *snorquel*

	DOD 25%	DOD 50%	DOD 75%
Bat. 18.628 kWh	4.657 kWh	9.314 kWh	13.971 kWh
Tempo navegação	1,11 hs	2,22 hs	3,33hs
Percurso	22,2 m.n.	44,4 m.n.	66,7m.n.

Tabela 4 – DS – Deep Submerged com 20 nós. Precisando evadir-se, mudando de rumo e de profundidade a toda velocidade, a demanda de potência máxima é 4.191 kW para desenvolver 20 nós

Bateria DOD (%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 nós / Snorquelando: 5 nós		
Potência (kW)	Regime: DS = 670 kW / Snorquelando: 330 kW		
Bat. 31.668 kWh	7.917 kWh	15.834 kWh	23.751 kWh
Tempo DS10kt (hs)	11,8	23,63	35,45
Tempo NS 5kt (hs)	2,50	4,85	7,23
IR (%)	17,48	17,03	16,94
Nº de ciclos	24	12	8
Tempo total (hs)	343	342	341
Trajetos (m.n.)	3.132	3.123	3.124

Tabela 5 – 2 x Gen-Sets MTU16V4000U83 – Operação exclusiva com bateria, geradores e *snorquel*

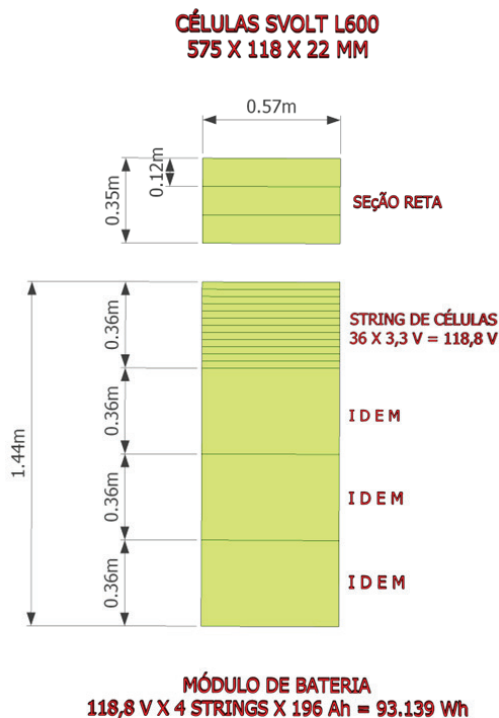
	DOD 25%	DOD 50%	DOD 75%
Bat. 31.668 kWh	7.917 kWh	15.834 kWh	23.751 kWh
Tempo navegação	1,89 hs	3,78 hs	5,67 hs
Percurso	37,8 m.n.	75,6 m.n.	113,3 m.n.

Tabela 6 – DS – Deep Submerged com 20 nós. Precisando evadir-se, mudando de rumo e de profundidade a toda velocidade, a demanda de potência máxima é 4.191 kW para desenvolver 20 nós

Observando as tabelas de 1 a 6 acima, constatamos que as distâncias, os tempos totais navegados e as taxas de indiscrição se equivalem. Entretanto, quanto maior for a capacidade da bateria, maior será o tempo absoluto de exposição, considerando a mesma taxa de descarga nos três casos, porque mantivemos sempre a mesma capacidade geradora.

Para o caso de uma evasão a 20 kts com taxa de descarga de 75%, 72,8m.n. (TKMS-Saft) de percurso, é considerada

uma distância segura, segundo o Capitão de Mar e Guerra (RM-1) R. Wallner. Então, 67 m.n. não estão longe desta meta. Aparentemente, a bateria de 18.638 kWh seria a escolha mais lógica, porque: resultaria num menor tempo de exposição, mantendo o mesmo raio de ação e a mesma Taxa de Indiscrição, e ainda haveria um ganho (saldo positivo) de peso de 54 tons a serem distribuídas nos SWBS100 a 600. Os volumes dos dois compartimentos de bateria seriam mantidos.



NOVA BATERIA 2

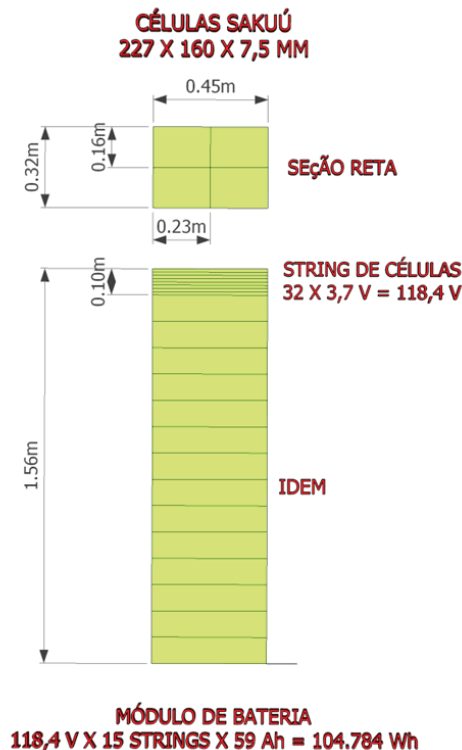
A Sakuú, estabelecida no Vale do Silício, está engajada na produção de baterias de íons de lítio no estado sólido, pelo processo de impressão 3D, resultando num custo 40% menor e em células 30% mais leves do que as baterias LFP tradicionais.

Comparando com um módulo da TKMS-Saft, que tem, em relação à célula, um volume de 112 litros, ou 289 kg, a Sakuú, já tendo atingido um nível de capacidade igual a 800 Wh/litro, resultaria numa energia 112 litros x 800 Wh/litro = 89.600 Wh, bem superior à TKMS-Saft original, mas 96,2% da Svolt chinesa. O peso do módulo seria aproximadamente

$289 \text{ kg} \times 0,7 \times 1,15 = 233 \text{ kg} \ll 507 \text{ kg}$ da Svolt ou TKMS-Saft.

A célula LFP da TKMS-Saft é cilíndrica e tem um volume de 0,413 litros, com 1,07 kg. Uma amostra comercial de célula da Sakuú (em inglês, *pouch*) tem 227 mm x 160 mm x 7,5 mm (0,2724 litros) com 3,7 Volts e 26 Ah. Disto resulta uma energia de 96,2 Wh (353 Wh/litro). Como é dito ser esta bateria 30% mais leve do que as LIB¹¹ normais, esta célula então pesa aproximadamente 0,494 kg.

Tendo a Sakuú atingido nova meta em 2022, com uma nova célula de 800 Wh/litro ou 310 Wh/kg, Para a célula acima, calculamos: $800 \text{ Wh/litro} \times 0,2724 \text{ litros} = 217,92 \text{ Wh} \div 3,7 \text{ V} = 59 \text{ Ah}$ de capacidade. Estipulamos uma camada com quatro



¹¹ LIB: Lithium Ion Battery.

destas células, resultando numa seção reta para um módulo com 45,4 cm x 32,0 cm.

Consideramos duas camadas com um total de 32 células em série (*string* de células), resultando em $32 \times 3,7 \text{ V} = 118,4 \text{ Volts}$. O *string* de células teria uma altura de 10,4 cm, incluindo montagem e refrigeração. Quinze *strings* de células em paralelo (formando um módulo) teriam a capacidade de 118,4 Volts e $59 \text{ Ah} \times 15 = 885 \text{ Ah}$. A energia de um módulo seria: $885 \text{ Ah} \times 118,4 \text{ V} = 104.784 \text{ Wh}$. O módulo teria 156 cm x 45,4 cm x 32,0 cm, pesando $32 \text{ células} \times 15 \text{ strings} \times 0,494 \text{ kg} \times 1,15 \text{ (acessórios)} = 273 \text{ kg}$.

O desenho feito pelo autor admite 24 *strings* de seis módulos cada por compartimento de bateria do U-X 65A.

A voltagem da rede de bordo teria seis módulos x 118,4 V = 710,4 Volts, e a energia armazenada por bateria/compartimento seria $710,4 \text{ V} \times 24 \text{ strings} \times 885 \text{ Ah} = 15.088.896 \text{ Wh}$. Os dois compartimentos do U-X 65A

teriam, juntos, 30.178 kWh, sem considerar o recurso da tecnologia de anodos de silício poroso da Leydenjar, mantida como uma eventualidade futura.

A economia de peso em relação à bateria original TKMS-Saft seria de: $(500 \text{ kg} \times 312 \text{ módulos}) - (273 \text{ kg} \times 288 \text{ módulos}) = 156 - 79 = 77 \text{ tons}$, que reverteriam para SWBS200/300/400/500/600. Entretanto optamos por reconfigurar uma única bateria/compartimento com 30 *strings* de módulos. Assim, a energia armazenada passa a ser: $710,4 \text{ V} \times 30 \text{ strings} \times 885 \text{ Ah} = 18.861 \text{ kWh}$ ($18.861 \times 1,7 = 32.064 \text{ kWh}$ – Leydenjar). A nova economia de

peso será: $156 \text{ t} - (273 \text{ kg} \times 180 \text{ módulos}) = 107 \text{ tons}$. O saldo de volume interno disponível seria de cerca 19 m^3 .

CONCLUSÃO

A bateria Sakuú com 18.861 kWh seria, possivelmente, a melhor opção, com melhor saldo de peso e volume interno a ser redistribuído e bateria no estado sólido (eletrólito sólido) com o maior índice de segurança e vida útil. Mantém-se, ainda, a opção para futura inserção da tecnologia Leydenjar. As tabelas 3 e 4 se aplicam.

Esta opção de baterias LIB em estado sólido produzidas por impressão 3D pela Sakuú deve merecer máxima aten-

ção. Pelos cálculos acima, vemos que seria a bateria mais leve para um mesmo volume e com a maior capacidade de armazenar energia. O fabricante anuncia uma redução de custos da ordem de 40% com este processo de fabricação,

As baterias LIB em estado sólido produzidas pela Sakuú seriam as mais leves para um mesmo volume e com a maior capacidade de armazenar energia

larga vantagem sobre a concorrência. Outra vantagem deste processo é a possibilidade de criar células e módulos de bateria com formas geométricas específicas ou otimizadas para facilitar/otimizar a instalação da(s) bateria(s) no submarino.

Embora se diga que o papel aceita tudo, alguns itens publicitários podem ser críveis, posto que uma empresa desta importância nos EUA não pode se expor a processos por informações fraudulentas. A empresa propaga que as baterias Sakuú têm 100% mais capacidade do que as baterias de ponta em geral e que podem ser recarregadas a 80% em 15 minutos

(claro, desde que haja corrente elétrica suficiente disponível), com capacidade de retenção de energia de 97% depois de 200 ciclos e 80% depois de 800 ciclos. O fabricante anuncia um ciclo de vida mais longo que os dos concorrentes, mas não especifica. Pelo que se sabe, em geral, as baterias de íons de lítio modernas têm uma vida útil de pelo menos 2.500 ciclos (100% DOD). Essas baterias Sakuú não são inflamáveis, são estáveis e atendem às

normas industriais e certificações internacionais. Materiais sólidos dos eletrólitos não são tóxicos.

Os engenheiros da Marinha do Brasil teriam a possibilidade de projetar a configuração de uma bateria na medida das nossas necessidades. Dever-se-iam criar protótipos e colocá-los em teste de laboratório para familiarização com o produto e confirmação das informações técnicas do fabricante.

 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:
<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Baterias; Submarino; Tecnologia;