

# SUBMARINO *U-X 65A* – Um novo conceito com resultados inéditos\*

RENÉ VOGT\*\*  
Engenheiro

---

## SUMÁRIO

Introdução  
Análise da nova opção  
Dimensionamento do *U-X 65A*  
Bateria, Grupos Geradores & Raio de Ação  
Air Independent Propulsion & Autonomia  
*Stealth*  
Armamento  
Sistemas & CMS  
Tripulação  
Atmosfera a bordo  
Custos  
Conclusão

## INTRODUÇÃO

É interessante como na vida ficamos apegados ou mesmo presos a velhos conceitos e incapazes de enxergar um palmo à frente do nariz. Portanto, precisamos ficar sempre atentos e receptivos

a novas ideias, mesmo que elas nos deixem céticos a princípio. Elas podem vir de várias fontes, muitas vezes de onde menos se espera. Lição: “nunca devemos nos empolgar demais com as nossas ideias porque sempre haverá alguém com uma melhor”.

---

\*Artigo publicado na Revista *Auftauchen!*, n. 295, ano 65, nov/dez.2022, pp. 28-31.

\*\*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 1º trimestre de 2015.

Para este artigo, o autor fez contato com o Capitão de Fragata (CF) Bernd Arjes, da Marinha da Alemanha<sup>1</sup>. Experiente submarinista, Arjes comandou o *U-32* da classe *U-212A*, foi instrutor de oficiais, de aspirantes a comandantes, e possui graduação em Engenharia pela Universidade da Bundeswehr<sup>2</sup>. Atualmente, o CF Arjes é o representante do inspetor da Marinha no Integrated Project Team no BAAINBw<sup>3</sup>, na equipe encarregada do desenvolvimento do projeto do novo submarino classe *U-212CD* para as Marinhas da Noruega e da Alemanha.

Baseado em sua experiência prática e focado em áreas críticas de operação, como os mares Báltico, Mediterrâneo e do Norte, Arjes sugeriu ao autor estudar um submarino convencional com mais AIP<sup>4</sup> e menos bateria, que possa ficar muito mais tempo submerso e operativo, sem necessidade de snorquelar.

Como o CF Arjes salienta, em mares “confinados”<sup>5</sup> com muito tráfego, os sensores de busca modernos (radares, infravermelho, satélites etc.) têm alta probabilidade de detectar um periscópio ou um mastro de *snorkel*, sem mencionar a turbulência e a esteira provocadas na superfície durante a snorquelagem. A proposta do Comandante Arjes é examinar uma opção de submarino que possa operar o máximo de tempo possível em regime AIP, sendo a bateria usada só para *sprint speeds* a 20 nós para escapar de uma eventual localização.

Há rumores de que os submarinos 3 e 4, da atual classe espanhola de 4 x S-80 *Isaac Peral*, vão operar 100% com AIP de células combustíveis, estoque de LOX<sup>6</sup> e reforma de etanol<sup>7</sup> a bordo, produzindo o hidrogênio necessário para as células-combustíveis. Os 1 e 2 têm bateria e AIP.

Depois da publicação do estudo do autor sobre o Submarino *U-6800*, na *RMB* 4ºT/2021, foi-nos sugerido um estudo de uma versão menor mais exequível. Estávamos trabalhando na versão *U-63*, quando as sugestões do CF Arjes nos fizeram dar meia-volta e criar outra alternativa realmente inovadora. Nasceu a ideia do *U-X65A* aqui apresentado, obrigando-nos, efetivamente, a rever os conceitos tradicionais.

Este estudo examina a exequibilidade da proposta do CF Arjes, e já ficou claro que a ideia de aumentar a capacidade AIP e diminuir a bateria – e estoque de diesel – é perfeitamente viável. Permitiria ao *U-X65A* navegar submerso por muito mais tempo. Os resultados surpreenderam e nos encorajam a aperfeiçoar esta opção no futuro. Trata-se de um típico exemplo de um resultado emanado da colaboração entre o setor operativo e a engenharia.

## ANÁLISE DA NOVA OPÇÃO

A principal vantagem do submarino nuclear sobre o convencional é a sua

1 Contato feito por meio da revista *Auftauchen (Emergir)*, em português, da Associação dos Submarinistas alemães, da qual o autor é assinante.

2 Forças Armadas da Alemanha.

3 Bundes Amt für Ausrüstung, Informationstechnik, Nutzung der Bundeswehr – Órgão Federal do Ministério da Defesa para programas de Obtenção, TI e Utilização. Inclui todas as Forças Armadas alemãs.

4 Air Independent Propulsion – propulsão independente da atmosfera, aqui utilizando as PEM-FC Evo da Siemens.

5 Mares com extensões menores do que os grandes oceanos e cercados de vários países e suas Marinhas à volta.

6 Liquid Oxygen – oxigênio líquido estocado em tanque criogênico.

7 Os alemães da Thyssen Krupp Marine Systems (TKMS) foram os pioneiros nesse processo e optaram pela reforma de metanol, bem mais eficiente do que o etanol (espanhóis) ou o diesel adotado pelos franceses.

fonte de energia “inesgotável”. Ele pode navegar longas distâncias na velocidade máxima (>20 nós), sem preocupação com combustível. Mas, como tudo na vida, há os dois lados da mesma moeda: a vantagem da energia “infinita” torna o submarino grande demais para operar efetivamente em águas rasas (<100 *fathoms* ou  $\cong 180$  m)<sup>8</sup> e aumenta sua *target-strength*<sup>9</sup>. Apesar da energia “ilimitada” do reator, sua autonomia operacional fica inexoravelmente restrita ao estoque de mantimentos a bordo e à fadiga da tripulação em missões típicas de até 90 dias, quando precisa retornar à base para reabastecer os mantimentos, trocar a tripulação e fazer a manutenção preventiva.

Durante as patrulhas, tal como os submarinos convencionais, o nuclear também precisa navegar lentamente entre 5 e 8 nós, para reduzir o ruído hidrodinâmico do casco e melhorar a eficiência dos seus sonares passivos. Contudo o reator produz uma assinatura radiológica, e o seu resfriamento necessita de um grande volume de água do mar, produzindo uma assinatura térmica acentuada no seu entorno, facilmente detectável por sensores infravermelhos, situação piorada quando opera em águas mais quentes ou “rasas”.

Nos dias atuais, os projetistas de submarinos convencionais e, principalmente, seus potenciais clientes (Marinhas) ainda estão presos à ideia de implantar uma megabateria e uma célula AIP mais modesta. E, apesar do progresso das baterias<sup>10</sup>, vemos novos submarinos sendo ainda equipados com baterias de chumbo ácido, na contramão da história. Os mais recentes submarinos japoneses, nº 11 e nº 12 da classe *Soryu*, já iniciaram uma nova era com baterias de íons de lítio, assim como a nova classe sucessora *Taigei* e os novos *U-212CD*, que também serão equipados com essas baterias, tal como os novos submarinos sul-coreanos.

Os submarinos convencionais modernos têm baixa assinatura acústica, mas precisam subir periodicamente

próximos à superfície para snorquelar e recarregar as baterias, situação em que ficam mais vulneráveis, graças aos modernos sensores ópticos, térmicos e eletrônicos de busca e vigilância. Seria desejável o submarino convencional poder permanecer mais tempo submerso, dependendo o mínimo possível da bateria ou da necessidade de snorquelar.

A solução está na implantação de uma fonte AIP<sup>11</sup> de desempenho incrementado. Existem dois sistemas em uso corrente: o PEM-FC<sup>12</sup> da Siemens e o Stirling<sup>13</sup> da

## Projetistas de submarinos convencionais e seus potenciais clientes ainda estão presos à ideia de implantar megabateria e célula AIP modesta

8 Vide Ref. 12.

9 *Target strength*: Potência dos ecos de retorno de um sonar de busca ativo.

10 Vide Ref. 18.

11 Vide Ref. 17.

12 Proton Exchange Membrane Fuel Cell. Utilizadores: Alemanha, Itália, Portugal, Grécia, Turquia, Coreia do Sul, Israel, Egito e Singapura.

13 Em uso oficial na Suécia e no Japão e, provavelmente, na China, mas sem licença.

SAAB. O desempenho do sistema da Siemens é muito superior ao da SAAB. Os japoneses, que ainda utilizam o Stirling em alguns submarinos mais antigos, deixaram de aplicá-lo nos dois últimos da classe *Soryu* e na nova classe *Taigei* devido às suas deficiências. Os novos submarinos japoneses ficarão 100% dependentes de suas baterias de íons de lítio de química NCA<sup>14</sup> da fabricante Yuasa Batteries.

Resolvemos repensar antigos conceitos e ousar. Os resultados foram surpreendentes e mostraram que é possível estocar LOX e metanol suficientes para uma energia AIP total calculada de 532.000 kWh, no caso do *U-X65A*.

Para a geração de energia elétrica com AIP, foram adotadas 12 células PEM-FC Evo Siemens de 160 kW e oito reformadores de metanol da TKMS de 240 kW. Os resultados mostram que é possível operar um submarino convencional, como o *U-X65A*, por até 70 dias submerso, sem snorquelar e sem usar a bateria, dependendo da combinação de velocidades. A bateria permanece como um *back-up*, por segurança ou necessidade, no caso de evasão a velocidade máxima. Com AIP, podem-se atingir 15 nós de velocidade submersa e 20 nós com a bateria. O resultado obtido pode alterar a doutrina operacional de submarinos convencionais.

Tomando como denominador comum, entre o *U-X65A* e um nuclear tipo SSN, o mesmo tempo de missão, função da autonomia de mantimentos, a diferença fundamental entre os dois tipos continua sendo a velocidade e, conseqüentemente,

o raio de ação, além do estoque de armas até 90% maior, no caso do nuclear (por exemplo, o *Astute*, com 97 m/7.800 t/38 torpedos >> *U-X65A* 65 m/2.714 t/22 torpedos). Mas há uma megadiferença entre os dois: relativizando nuclear/convencional, os nucleares têm custos superiores aos dos convencionais, sendo o custo de obtenção quatro vezes maior e o de operação oito vezes.

Numa área de operação AA/AD<sup>15</sup> (*choke-point*) é preferível ter quatro *U-X65A* em vez de apenas um SSN<sup>16</sup>. Os submarinos convencionais de alta tecnologia são motivo de grande preocupação da US Navy, que reconhece neles adversários muito perigosos. Os convencionais são mais apropriados para missões de patrulha e operações AA/AD, mas também podem empreender ataques, infiltrar forças especiais, minar pontos de interesse (bases, portos etc.) e coletar inteligência junto às costas dos oponentes.

Já os nucleares podem se deslocar rapidamente a grandes distâncias para patrulhas em áreas de interesse distantes e ações ofensivas ou escolta de forças-tarefa. Mas, em todos os casos, a consciência situacional do teatro de operações e uma eficiente rede de comunicação do submarino com meios navais e bases em terra são indispensáveis. Qualquer que seja a opção, a obtenção e o emprego de um determinado tipo de submarino dependem fundamentalmente da doutrina de defesa de um país e dos requisitos operacionais promulgados por sua Marinha.

Se os convencionais já são uma arma sofisticada, no caso de submari-

14 Nickel Cobalt Aluminum.

15 Anti Access & Area Denial: Anti-Acesso & Negação do mar. *Choke-point* = gargalo, estreito, área de passagem crítica.

16 Sigla abreviada para Submarinos de Ataque Nucleares. São opiniões de oficiais da US Navy (Ref.12).

nos nucleares, devem ser acrescidos os seguintes tópicos: custos elevadíssimos, necessidade de mão de obra especializada na área nuclear e aspectos políticos – submarinos de propulsão nuclear não têm acesso franqueado a qualquer porto e há possibilidade de ocorrerem boicotes ou sanções políticas, o que não é o caso dos convencionais.

Uma recarga do reator deve ser feita a cada X anos (docagem e indisponibilidade elevada > 12 meses), além da indispensável independência e soberania no quesito do combustível nuclear. O descarte final do submarino é um problema ambiental gigantesco, do qual ninguém gosta de falar.

Atualmente, no Reino Unido, há 21 submarinos desativados, aguardando o desmanche, programa com mais de 15 anos de atraso. Ainda há dez submarinos com combustível nuclear em seus reatores. O custo de manutenção dos submarinos atracados nas bases é de £30 milhões/ano e tende a aumentar, pois os trabalhos dependem do orçamento da Royal Navy e de regulamentos ambientais cada vez mais rigorosos à medida que o tempo passa. Estima-se que os trabalhos adentrem bem na década de 2040, pois frequentemente são postergados em detrimento de outras prioridades operacionais ou de investimento da Royal Navy.

Seja qual for a escolha do tipo de submarino, ainda restará o problema de obtenção e disponibilidade de torpedos,

mísseis e minas. Mesmo dominando-se a tecnologia de construção de submarinos, precisa ser resolvida a questão de projeto e fabricação destes vetores. Não adianta fabricar uma arma sem fabricar a munição. Basta estar do lado errado num dado momento de crise internacional para eventualmente ser boicotado pelos fornecedores tradicionais.

## DIMENSIONAMENTO DO U-X65A

Baseados na literatura listada no final deste trabalho e já utilizada anteriormente, fixamos um comprimento de 65,0 m e um diâmetro do casco externo igual a 8,40 m. O casco de pressão tem 7,60 m na sua parte mais larga. A preocupação com estas

dimensões básicas é a hidrodinâmica, pois um submarino mais “gordinho” apresenta melhores qualidades náuticas do que um submarino “esbelto”, considerando-se o mesmo desloca-

mento ou volume de ar contido, como denominador comum.

Com a razão L/D (esbeltez) = 7,738, usada como entrada nas abscissas do gráfico elaborado por Arentzen & Mandel<sup>17</sup>, o corte na curva:  $C_p = 0,774$  nos leva a uma (ordenada) Relative Drag Scale<sup>18</sup> de 108%, em que 100% são considerados ótimos. Ficamos em cerca de 8% aquém do ótimo, ainda assim um resultado muito bom se comparado a outros submarinos da atualidade (dados do mesmo gráfico).

**Escolhido o tipo de submarino, restará o problema de obtenção e disponibilidade de torpedos, mísseis e minas**

17 Vide Ref. 8.

18 Escala de arraste relativo.

Dados	U-X65	Comentários
Comprimento total (m)	65,00	
Diâmetro Externo (m)	8,40	
Calado (m) (condição NSC)	ca. 6,80	Collins = 7,0 m
Dia. Casco de pressão (m)	7,60	Dois deques
Altura quilha/topo (m)	14,30	
Vol.Casco de pressão ( $m^3$ )	1.900	
CascoVante ( <i>Entrance</i> ) (m)	$L_f = 20,16$	Elipsóide de revolução
PMB <sup>19</sup> Comprimento (m)	14,60	Cilíndrico
Casco de Ré ( <i>Run</i> ) (m)	$L_a = 30,24$	Parabolóide de revolução
L/D ( <i>Fineness Ratio</i> )	7,738	New 2026 RAN = 7,3 Albacore (US Navy) = 7,723
Coef. Prismático ( $C_p$ )	0,774	Collins = 0,8/2026 = 0,78
Fatores de forma	$n_f = 3,0 \wedge n_a = 3,0$	
Área molhada ( $m^2$ )	ca. 1.620	Submerso
Área molhada ( $m^2$ )	ca. 1.236	Flutuando condição (NSC)
Prof. de mergulho (m)	400	Colapso = ca. 700 m
Potência propulsão (kW)	4,2 MW	Siemens PMM Permasyn
Tubos de Torpedos	8	Dia. 533 mm

Tabela 1 – Resumo dos dados principais calculados segundo os Capt. (Reserva-USN) Harry Jackson (MIT) e Kai-Oscar Torkelson (MIT)

VL – Variable Load (carga útil variável), dimensionada a critério do autor:

- a) DCT = Depth Control Tanks: ca. 40 tons água do mar;
- b) TT = Trim Tanks: ca. 12,0 tons água do mar;
- c) TOT = Torpedo Operation Tank: 16,0 tons água do mar;
- d) Diesel: 56 tons, tanques conformais localizados entre os dois cascos concêntricos ;
- e) Óleo lubrificante: 0,5 tons;
- f) Óleo hidráulico: 1,5 tons;
- g) Ar comprimido 250 bar: 8,0 tons, 31 m<sup>3</sup> (0,260t/m<sup>3</sup>)/250 bar (6.580 Nm<sup>3</sup>);
- h) LOX (Liquid Oxygen): 177 tons;
- i) Methanol fuel for AIP : 116 tons;
- j) (8 + 14) x torpedos: 33 tons;
- k) Decoys Leonardo C303/S (64X) & Sea Spider torp anti-torp (10X): 2,0 tons;
- l) Cartuchos de hidróxidos (purificação da atmosfera) p/10 dias: 2,0 tons;

19 Parallel Middle Body.

- m) Tripulantes + pertences:  $36 (28 + 8) \times 83 \text{ kg}$  (DNV-GL = 70 kg) = 3,0 tons;  
 n) Mantimentos:  $36 \times 70 \text{ days} \times 8,0 \text{ kg/dia/tripulante}$  = 20,0 tons;  
 o) TOTAL VL = 587,0 tons + 3,0 tons (*Reservas*) = 490 tons.

	ESTUDO U-X65A (atual)		ESTUDO U-63 (anterior)	
	Weight (tons)	% of A-1	Weight (tons)	% of A-1
SWBS100 <sup>20</sup>	955	54,08	864	53,64
SWBS200	390	22,08	346	21,53
SWBS300	68	3,85	61	3,80
SWBS400	95	5,38	92	5,70
SWBS500	155	8,77	140	8,68
SWBS600	63	3,57	56	3,48
SWBS700	40	2,27	51	3,17
A-1 (t)	1.766	100,00	1.610	100,00
LB (t)	132	LB/A-1=7,5%	121	LB/A-1=7,5%
A1 Std.Displ. (t)	1.898		1.731	
VAR LOAD (t)	490		420	
NSC (t)	2.388	MBT/NSC 13,65%	2.151	MBT/NSC 13,7%
MBT (RB) (t)	326	MBT/SUBD 12,0%	294	MBT/SUBD 12,0%
SUBD (t)	2.714		2.445	
FF (ton)	143	FF/ENVD = 5,0%	184	FF/ENVD = 7,0%
ENVD (t)	2.857		2.629	
V PR HULL (m3)	1.944	Croquis anexo 3	1.836	Croquis

Tabela 2 – Resumo dos diversos deslocamentos, SWBS e cargas<sup>21</sup>

Segundo Torkelson, num projeto bem balanceado, temos:

$$\Delta = \Delta_{\epsilon b} + MBT \rightarrow 2.714t = \Delta_{\epsilon b} + 326t \rightarrow \Delta_{\epsilon b} = 2.388t$$

$$\Delta_{\epsilon b} = 2.388t = NSC, \text{ tal como sugerido; } \Delta_{\epsilon b} = (\text{everbuoyant displacement}).$$

No presente caso, esta premissa foi atendida.

<sup>20</sup> 40% de NSC = 955 tons/Aço amagnético HY-100.

<sup>21</sup> Siglas: SUBD: Submerged Displacement; FF: Free Flooding Space; ENVD: Envelope Displacement; LOA: Length Over All; DIAPH: Diameter Pressure Hull; DIAENV: Diameter Envelope; T: Draft (Surface NSC); MBT: Main Ballast Tank; NSC: Normal Surfaced Condition, fully loaded and endure; e LB: Lead Ballast (lastro de chumbo).

Conforme dissertação de mestrado do autor Byeongdo Jeon, sobre “Energy Management System in Naval Submarines”, da Arizona State University 2020, nos submarinos convencionais modernos, a soma de SWBS200 + SWBS300 (458 tons) mais os estoques dos combustíveis (no nosso caso, diesel, metanol e LOX) (349 tons) pode representar até 35% em peso do deslocamento submerso (tons) e até 49% do volume correspondente ( $m^3$ ).

O *U-X65A* tem um deslocamento submerso = 2.714 tons, e o volume correspondente = 2.648  $m^3$ . Portanto, o peso de 807 tons, que calculamos para os cinco itens acima, corresponde a 29,7% de 2.714 tons < 35%, e o volume correspondente de 880  $m^3$  aproximadamente equivale a 33,3% de 2.648  $m^3$  < 49%, valores que satisfazem à tese.

Por semelhança e cálculos específicos, elaboramos os desenhos nas figuras 3 e 4 do Anexo 2. Os compartimentos do motor de propulsão, AIP, auxiliares, tanques, baterias e compartimento de torpedos foram todos calculados. Quanto aos compartimentos de máquinas (Fig. 4) e os espaços habitáveis (Fig. 4<sup>22</sup>), tivemos que avaliar por semelhança com os dados sobre a classe *U-212A*. Esta é uma tarefa difícil, somente possível de ser realizada por comparação, estimativas e bom senso, pois informações precisas são impossíveis de serem obtidas.

## BATERIA, GRUPOS GERADORES & RAIOS DE AÇÃO

A bateria considerada neste estudo é de íons de lítio com química LFP<sup>23</sup>. Os dados obtidos da TKMS foram objeto de

estudo de um artigo do autor publicado na *RMB* 3<sup>o</sup>T/2018. No início dos anos 2000, a TKMS trabalhou em parceria com a alemã Gaia Batterien com a química NCA, que apresenta uma das maiores densidades de energia. Tempos mais tarde, a TKMS rescindiu o contrato com a Gaia, fechando nova parceria com a Saft da França, usando a química LFP. Embora com densidade de energia menor, o fator decisivo foi a segurança, o custo mais baixo e uma vida útil (número de ciclos) maior.

A firma pesquisada, LeydenJar, uma *spin-off* estabelecida em Eindhoven, Holanda, trabalha com um projeto de novo tipo de anodo para baterias de íons de lítio. Segundo o CEO da empresa, Christian Rood, o novo produto deve estar disponível em 2023 e aumentará a capacidade das baterias de íons de lítio em geral em no mínimo 70%.

O novo anodo é feito em silício poroso atomizado com vapor de plasma sobre um substrato de cobre. O silício tem dez vezes a capacidade elétrica do carbono, utilizado na maioria dos anodos da atualidade. Primeiro, projetamos uma bateria com a tecnologia convencional corrente e, com esta informação da LeydenJar, elaboramos um segundo modelo de bateria mais potente que será utilizada adiante neste estudo. Como este artigo é apenas um estudo de viabilidade especulativo, qualquer novidade de fonte confiável deve ser examinada.

A bateria do *U-X65A* é formada por dois compartimentos iguais, abrigando um total de 312 módulos. Segundo o critério da TKMS, cada seis módulos são ligados em série formando um *string* com

22 O espaço habitável bruto com 36 tripulantes resulta em 18  $m^3$ /tripulante ou 23  $m^3$ /tripulante, com tripulação normal padrão de 28 militares.

23 Lithium Iron Phosphate.

594 Volts e uma capacidade de 387 Ah. Os 52 *strings* da bateria são ligados em paralelo, resultando numa energia total igual a 52 *strings* x 594 V x 387 Ah = 11.954 kWh. Se a tecnologia da LeydenJar for bem sucedida, esta mesma bateria poderia armazenar 20.321 kWh. O peso total<sup>24</sup> da bateria seria de 312 módulos x 0,5 t = 156 tons.

Para recarregar a bateria, adotamos primeiro dois *gen-sets*<sup>25</sup> MTU12V4000U83 (vamos considerar também a opção com três *gen-sets*, Tab. 4), com potência mecânica de 1.300 kW e elétrica 1.250 kW

cada. Os resultados de autonomia e raio de ação para a nova bateria com estes *gen-sets* constam na Tabela 3.

Definimos uma velocidade de viagem submersa de 10 nós, com uma bateria de tecnologia LeydenJar, em três casos: DOD<sup>26</sup> = 25%, 50% e 75%. Em cada ciclo de snorquelagem, as baterias são recarregadas para repor a energia consumida.

E, finalmente, navegando na superfície com 5 nós ou 10 nós (Tabela 3), durante a snorquelagem, também se aproveita para recompletar o estoque de ar comprimido e ventilar a atmosfera a bordo.

Bateria DOD (%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 nós/snorquelando: 5 nós		
Potência (kW)	Regime: DS = 670 kW/snorquelando: 284 kW		
Bat. 20.321 kWh	5.080 kWh	10.160 kWh	15.240 kWh
Tempo DS <sup>27</sup> 10kt (hs)	7,58	15,16	22,75
Tempo NS <sup>28</sup> 3kt (hs)	2,16	4,20	6,23
Taxa Indiscrição (%)	22,2	21,7	21,5
Número ciclos <sup>29</sup>	37	19	13
Tempo total (hs)	360	369	377
Percurso (s.m.)	3.205	3.279	3.362
SF <sup>30</sup> (5 nós)/20 RPM	Potência = 185 kW, 1.316 hs/6.580 m.n.		
SF (10 nós)/40 RPM	Potência = 529 kW, 504 hs/5.041 m.n.		

Tabela 3 – (2 x *gen-sets* MTU12V4000U83) Operação exclusiva com bateria e *gen-sets* durante a snorquelagem. As potências somam: propulsão + *hotel-load* = 140 kW

24 O peso da bateria (módulos) inclui os *racks* de montagem dos módulos, seus sistemas eletrônicos de administração da bateria (módulos) e o sistema de refrigeração.

25 Grupo diesel-gerador.

26 Depth of Discharge ou taxa de descarga da bateria.

27 Deep Submerged, veloc de viagem entre as snorquelagens = 10 nós.

28 Near Surface, snorquelando a 5 nós.

29 Número de ciclos = estoque de diesel dividido pelo consumo de combustível durante cada snorquelagem. O combustível é esgotado.

30 Surfaced.

Bateria DOD(%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 knoten / snorkelando: 5 nós		
Potência (kW)	Regime: DS = 670 kW / snorkelando: 284 kW		
Bat. 20.321 kWh	5.080 kWh	10.160 kWh	15.240 kWh
Tempo DS10kt (hs)	7,58	15,16	22,75
Tempo NS3kt (hs)	1,44	2,80	4,15
Taxa Indiscrição (%)	16,0	15,6	15,4
Número de ciclos	37	19	13
Tempo total (hs)	334	342	350
Percurso (m.n.)	3.071	3.146	3.228

Tabela 4 – (3 x *gen-sets* MTU12V4000U83 em paralelo<sup>31</sup>): Operação exclusiva com bateria e *gen-sets* durante a snorkelagem. As potências totais somam: propulsão + *hotel-load* = 140 kW

Analisando os resultados das tabelas 3 e 4, percebemos que, usando três geradores, a taxa de indiscrição fica 28,2% menor do que com dois. A distância percorrida fica 2,5% menor. Com três geradores, o tempo de exposição é muito menor, o que é um fator crítico e justificaria aceitar uma redução do raio de ação em 2,5%.

Contudo, examinamos uma alternativa que seria mais racional. Embora a MTU não disponha de um *gen-set* versão MTU-

16V4000U83, mas sendo este um motor da mesma família 4000, calculamos que o mesmo, na versão U83, teria possivelmente uma potência mecânica de 1.733 kW e elétrica de 1.666 kWe. Dois grupos geradores maiores produziriam juntos 3.330 kWe, ca. 88,9% da energia elétrica produzida pelos 3 x MTU12V4000U83 menores. Com a tensão a bordo igual a 594 V teríamos, então, uma corrente de 5.606 Amp. Os resultados constam na Tabela 5.

Bateria DOD (%)	25%	50%	75%
V (nós)	Submerso: 10 nós / Snorkelando: 5 nós <sup>32</sup>		
Potência (kW)	Regime <sup>33</sup> : DS = 670 kW / Snorkelando: 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 <sup>34</sup> 5kt (hs)	1,62	3,15	4,68
I R (%)	17,6	17,2	17,1
Nº de ciclos <sup>35</sup>	37	19	13
Tempo total (hs)	340	348	357
Trajeto (m.n.)	3.105	3.180	3.262

Tabela 5 – (Opção: 2 x *gen-sets* MTU16V4000U83) Operação exclusiva com bateria, geradores e snorkel

31 Além da classe *Collins*, também a classe *Walrus*, da Marinha da Holanda, possui três grupos geradores, no caso holandês os MAN12PA4V200SMDs. Os geradores da classe *Collins* são suecos, da firma Hedemora. A observação cabe, pois o arranjo com três geradores é incomum; na imensa maioria, são arranjos de dois geradores.

32 O Comantete Wallner privilegia uma velocidade de snorkelagem de 5 nós em vez de 3 nós.

33 Inclusive *hotel-load* = 140 kW.

34 Near Surface, snorkelando.

35 N° de ciclos = número total de snorkelagens. O estoque de diesel igual a 56 tons é totalmente consumido, cobrindo o raio de ação.

Comparando as tabelas 4 e 5, notamos que, com 2 X MTU16V4000U83, a taxa de indiscrição é 10,3% mais alta do que com 3 X MTU12V, mas, ainda assim, com uma IR = 17,2% muito boa. O raio de ação é sensivelmente maior, e o arranjo interno da praça de máquinas ficaria muitíssimo melhor (Figura 3, Anexo 3), opinião compartilhada por nossos colegas alemães.

Se num dado instante o submarino perceber que foi localizado pelos sonares do inimigo ou sofrer um ataque de torpedos, ele precisa se evadir, mudando de rumo e de profundidade a toda velocidade. Nesse caso, seria demandada a potência máxima de 4.191 kW para desenvolver 20 nós. Os parâmetros estão ilustrados na Tabela 6.

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

Tabela 6 – DS – Deep Submerged com 20 nós

## AIR INDEPENDENT PROPULSION & AUTONOMIA

Para calcular as quantidades de oxigênio líquido (LOX) e metanol do processo de reforma de metanol aqui estudado, além da quantidade de hidrogênio e oxigênio demandada pelas PEM-FC, tivemos que lançar mão do recurso de engenharia reversa, com auxílio das literaturas Ref. 9 e 13, além de outros documentos de vários autores encontrados na internet e no Office of Naval Research – USN Ref.14.

Embora tenhamos bons contatos com alguns oficiais da Marinha da Alemanha e com o diretor de P&D da TKMS, as

informações relativas a estes dois tópicos estão sob sigilo militar e comercial. Assim, tivemos que elaborar nossas próprias hipóteses e cálculos, que podem desviar dos valores reais. Mas uma das pessoas de nossas relações deixou entender, discretamente, que os resultados não estão longe do alvo.

Este é o tópico que constitui a verdadeira inovação em relação a tudo que tem sido feito até os dias atuais e o foco principal deste estudo. Como os critérios (pesquisa) são livres, adotamos 12 X PEM-FC<sup>36</sup> modelo Evo (4ª geração de células combustível), células que a Siemens disponibilizará no mercado a partir de 2023. Com o mesmo tamanho e peso das células atuais de 120 kW (176 x 53 x 50 cm/900 kg), as novas células combustíveis terão potência de 160 kW, com melhor desempenho/eficiência em cargas parciais. O total de potência AIP instalada no *U-X65A* seria, então, igual a 12 x 160 kW = 1.920 kW.

O oxigênio a bordo é utilizado diretamente nas PEM-FC, no processo de reforma do metanol e na renovação da atmosfera a bordo. O estoque sob forma líquida fica num tanque criogênico<sup>37</sup> com aproximadamente  $D = 4,40 \text{ m} \times L = 10,7 \text{ m}$ . Lateralmente ao tanque LOX, ficam os tanques de metanol, com cerca de  $147 \text{ m}^3$ , tudo acondicionado dentro do módulo AIP do submarino. Acima dos tanques, fica o deque que abriga a seção AIP propriamente dita. Para a produção do hidrogênio das PEM-FC, seriam necessários oito reformadores (Fig.2) do modelo-protótipo atual de 240 kW da

36 Proton Exchange Membrane Fuel Cell.

37 Tal como vemos corriqueiramente em hospitais.

TKMS. Acreditamos ser tecnicamente viável reprojeta-los aos pares, ficando cada novo reformador com 480 kW de potência, talvez até um pouco menor e mais leve do que 2 x 240 kW conjugados e com melhor eficiência.

Fixamos em 70 dias a autonomia de mantimentos para 36 tripulantes, como base de cálculo da autonomia e raio de ação AIP. A quantidade de metanol e

LOX estocada contém uma energia de aproximadamente 532.000 kWh. As duas condições de contorno para autonomia AIP<sup>38</sup> são: a) 68 dias x 24 hs x 327 kW  $\cong$  532.000 kWh (7 nós) ou b) 12 dias x 24 hs x 1.884 kW  $\cong$  532.000 kWh (15 nós). A equação a seguir serve para compor aleatoriamente diversas velocidades (energias consumidas), que no final devem somar a energia total:

$$Xhs \times 1.884kW(15kt) + Yhs \times 1.044kW(12kt) + Zhs \times 670kW(10kt) + Uhs \times 417kW(8kt) + Vhs \times 327kW(7kt) + Whs \times 210kW(5kt) = 532.000kWh$$

A Tabela 7 mostra valores navegados em linha reta, sem interrupções ou operações, somente para efeitos comparativos.

Por exemplo, admitamos que um submarino suspenda da base para demandar sua área de operações distante 2.000 m.n., navegando a 10 nós. Seriam 200 hs ( $\cong$  8 dias de ida e outras tantas de volta, num total de 400 hs de viagem). Teria consumido: 400 hs x 670 kW = 268.000 kWh. O saldo seria de 264.000 kWh, a serem gastos na área de operações.

Patrulhando na área de operações a 5 nós, resultaria numa autonomia de 1.257

horas (52 dias), a 7 nós seriam 807 horas (33 dias) ou a 12 nós seriam 253 horas (10 dias), ou uma composição de todas as velocidades (equação anterior), descontados os 16 dias de viagem de ida/volta. Na soma das diferentes velocidades e dias submerso, deve-se lembrar que os mantimentos são previstos para 70 dias.

Resta, ainda, o estoque de combustível (diesel) intocado e, então, eventualmente poderiam faltar mantimentos ou estes teriam que ser providos para mais 15 dias (+21%), como segurança para 36 tripulantes. Com a tripulação normal de

V (nós)	Potência <sup>39</sup> Rot. Hélice	Horas	Dias	Distância <sup>40</sup> percorrida
DS 05	210/20 RPM	2.533	105	12.665
DS 06	260/24 RPM	2.046	85	12.276
DS 07	327/28 RPM	1.627	68	11.389
DS 08	417/32 RPM	1.276	53	10.208
DS 10	670/40 RPM	794	33	7.940
DS 12	1.044/47 RPM	510	21	6.120
DS 15	1.884/59 RPM	282	12	4.230

Tabela 7 – Regime exclusivo AIP

38 As potências de propulsão mencionadas incluem uma *hotel-load* de 140 kW.

39 Potência kW: Propulsão + *hotel load* 140 kW.

40 Distância navegada em m.n.

28 tripulantes, as 20 tons de mantimentos seriam suficientes para 85 dias.

As potências de propulsão + *hotel load* e as respectivas velocidades e rotações do hélice (Tabela 7) são as mesmas quando o

submarino estiver se deslocando submerso, usando apenas a energia da bateria. O hélice escolhido seria de sete pás *skewed back* da série Wageningen, provavelmente em material composto de fibra de carbono.

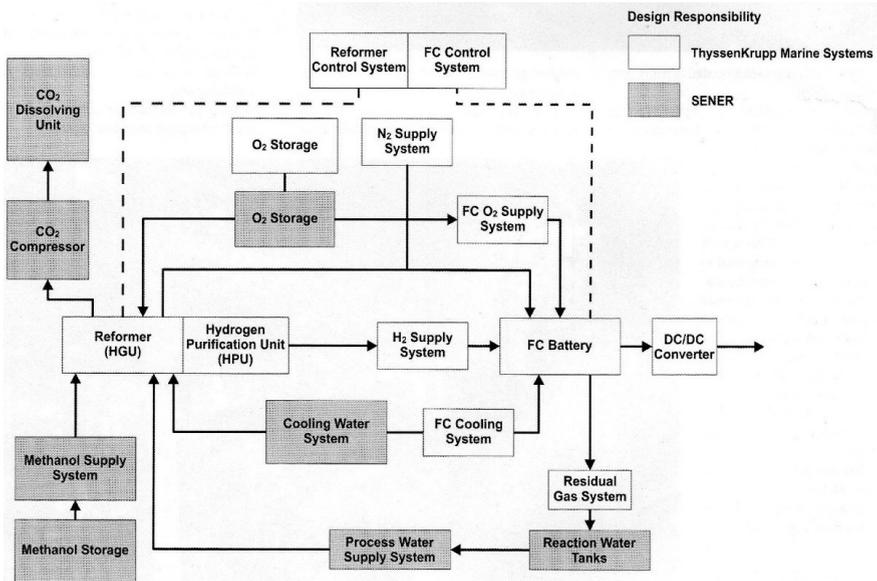


Figura 1 – Esquema do funcionamento da reforma de metanol e das PEM-FC, segundo projeto da TKMS e seu parceiro espanhol Sener

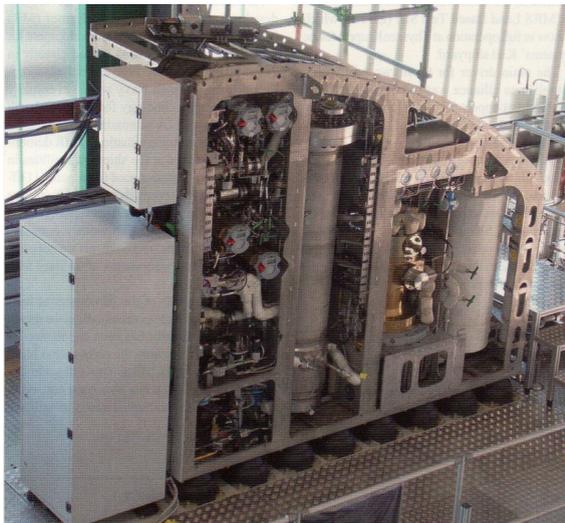


Figura 2 – Reformador de metanol de 240 kW projetado e construído pela TKMS

A planta piloto da Figura 2 encontra-se na fábrica da TKMS, em Kiel, Alemanha. Possui tecnologia madura e testada, mas ainda não foi encontrado um cliente disposto a investir nesse projeto. Para seu emprego, um submarino precisa deslocar no mínimo 2.200 ton submerso e ter um casco de pressão com diâmetro > 6,80 m.

## STEALTH

Não apenas o fato de ficar mais tempo submerso sem snorquelar garante maior indetectabilidade. As dimensões gerais, o projeto hidrodinâmico e o aço amagnético do casco de pressão contribuem para a camuflagem do submarino. A soma de todos os ruídos irradiados pelo submarino definem a sua assinatura acústica.

Quanto menor e mais discreto o submarino for, maior será sua indetectabilidade por sonares passivos do oponente. E com o aço amagnético, a eficácia das medidas ASW-MAD<sup>41</sup> ficará muito diminuída, além da maior segurança contra minas de ativação magnética. Como dizem os submarinistas: *keep silent and stay alive*.

Para não refletir as ondas de sonares ativos, ou refleti-las o mínimo possível, o submarino deve ser revestido de materiais chamados absorventes acústicos. Existem duas abordagens básicas: *decoupling*, materiais para minimizar a irradiação dos ruídos próprios do submarino, e *anechoic*, materiais para absorver e refletir o mínimo possível as ondas irradiadas de sonar que atingem o casco. Esta é uma matéria de alta complexidade, e não vamos aprofundá-la neste artigo.

O U-X65A tem o casco de pressão em aço amagnético e o casco externo con-

cêntrico, fabricado em fibra de carbono reforçada. Há especialistas que sugerem que os dois cascos devem ter as duas faces revestidas e não necessariamente com materiais iguais. Os tanques de combustível, cilindros de ar comprimido etc. que ficam alojados entre os dois cascos no espaço inundável, devem ser revestidos individualmente.

Os revestimentos acústicos devem resistir à pressão hidrostática, que aumenta com a profundidade. A deformação dos revestimentos, pela ação da pressão hidrostática, altera (piora) suas características, sendo a maioria fabricada com polímeros viscoelásticos, combinados com várias qualidades de borracha.

Os chamados *passive acoustic coatings*, ou *acoustic cavity design*, existem em grande variedade, com inclusões de bolhas esféricas ou cilíndricas de ar, ou inclusões rígidas conhecidas como *scatterers*<sup>42</sup>. Podem e até devem ser sobrepostos em duas ou mais camadas. Ainda há estruturas na forma de colmeia de abelha, estruturas híbridas e metamateriais<sup>43</sup>. Na Universidade Paris Diderot, foi feito um teste com um polímero de 4 mm de espessura, recheado de bolhas de 2 mm de diâmetro. Segundo o professor Leroy, o material pode absorver mais de 90% da energia sonora, dependendo da frequência do sonar emissor.

Uma solução mais sofisticada trata dos *semi-active acoustic coatings* com compostos piezoelétricos. A resistência elétrica inerente ao material transforma uma parte da energia sonora em calor. Outra parcela é transformada em corrente elétrica pelo efeito piezoelétrico e, em seguida, em calor devido ao controle passivo piezoelétrico.

41 Anti-Submarine Warfare – Magnetic Anomalies Detection.

42 Em português, o verbo *to scatter* significa “espalhar”.

43 São materiais artificiais com *scatterers* dentro da matriz de outro material, cujo arranjo pode bloquear totalmente ondas sonoras.

O emprego de mais de uma camada (sobrepostas) desse material melhora ainda mais a absorção da energia sonora. Um teste realizado com material piezo-elétrico permitiu plotar um gráfico em que, nas ordenadas, temos o coeficiente de absorção  $\alpha = E/E_0$ , com  $E$  = energia absorvida pelo revestimento e  $E_0$  = energia total que atinge a superfície do material acústico. Nas abscissas temos as frequências do sonar emissor, e entre 500 Hz e 10.000 Hz, o valor de  $\alpha > 0,63$ . Especificamente, ao redor das frequências de 1.000 e 6.000 Hz ocorrem picos com  $\alpha = 0,90$ , ou seja, absorção de 90% da energia irradiada pelo sonar.

Novas formas do casco externo com geometria não convencional estão sendo estudadas, como nos casos do *A-26* sueco e *U-212CD* alemão/norueguês. Lembremos das formas estranhas de aviões *stealth*. O princípio de absorver e refletir ondas sonoras ou eletromagnéticas é o mesmo: espalhar e desorientar.

O revestimento da face interna do casco de pressão também deve levar em conta o isolamento térmico. Em média, em profundidades (prof)  $< 50$  m, as temperaturas (temp) caem para  $< 15^\circ\text{C}$ , em prof  $< 80$  m caem para temp  $< 10^\circ\text{C}$  e para prof  $< 200$ m diminuem para temp  $< 4^\circ\text{C}$ . Ou seja, navegando em profundidades entre 80 m e 100 m, o submarino já seria uma geladeira.

No processo de reforma do metanol para produção de hidrogênio, ocorre como subproduto o dióxido de carbono, que precisa ser resfriado, comprimido e estocado para ser bombeado ao mar. O processo regenerativo Mono Ethanol Amina (MEA) do ar viciado a bordo extrai e acumula  $\text{CO}_2$ , que deve ser igualmente bombeado ao mar. Esse procedimento deve ser avaliado pelo comandante, em como, quando e

quanto tempo pode levar a faina, pois ruído e bolhas podem ser traíçoeiros.

Os diesel-geradores, compressores e equipamentos auxiliares, que trabalham com movimento rotativo/alternativo, são montados em apoios (resilientes) elásticos duplos. O compartimento de máquinas principal deve ser hermético e protegido acusticamente, a exemplo da classe *U-212A*, na qual esse compartimento de máquinas fica, inclusive, sob subpressão atmosférica em relação ao restante do submarino.

## ARMAMENTO

O nosso critério inicial foi considerar uma carga básica de 22 x HWT<sup>44</sup> (8 TT + 14 recargas) de 1,5 ton e até 6,50 m de comprimento, ou seja, uma base de 33 ton para uma carga completa de diversas armas, como relacionado anteriormente em carga variável. O submarino seria equipado com oito tubos de 533 mm (como as classes *IKL-209* e *U-214*) capazes de lançar qualquer tipo de arma listada a seguir.

A maioria dos torpedos disponíveis no mercado tem  $< 6,5$  m de comprimento e  $\approx 1,5$  t de peso máximo. Mas a escolha do modelo precisa ser feita na fase de projeto, com a definição do sistema de combate. Na média, os HWT desenvolvem uma velocidade até 50 nós e um alcance em torno de 50 km (27 mn), dependendo da velocidade.

A maioria dos mísseis antinavio ou de ataque a alvos em terra disponível é similar aos torpedos. Por exemplo, o Exocet SM-39, Block 2, Mod.2 possui  $L = 4,69$  m, envergadura = 1,35 m, peso = 655 kg, cabeça de combate = 165 kg, alcance = 27 m.n. e velocidade Mach 0,95, mais curto e com metade do peso de um HWT.

44 Heavy Weight Torpedoes.

Outra arma tradicional para submarinos são as minas de fundo da US Navy, citando aqui a Submarine Launched Mobile Mine (SLMM) Mk-67, lançada dos tubos, com autonomia de 10 m.n., programável ou fio guiada. A mina Mk-67 é integrada num torpedo Mk-37 mod. 2, com dimensões: L = 4,1 m; D = 0,49 m; massa = 754 kg; e explosivo = 230 kg. Alternativamente, pode-se transportar apenas *bottom mine*<sup>45</sup> Mk-52 mod.6, para minagem convencional por gravidade, lançada pelos tubos, com dimensões: D = 48 cm x L = 178 cm; massa = 560 kg ; e explosivo = 284 kg.

Para a autodefesa contra ataques de torpedos, seria considerado o sistema C303/S da firma Leonardo, para procedimentos chamados de *soft kill*. No momento de um ataque, dois *jammers* são lançados, produzindo um ruído numa frequência adequada para obliterar o sonar de busca do torpedo e mascarar o submarino. Na sequência, dois Mobile Target Emulator (MTE) são lançados para atrair e desviar o torpedo atacante.

Para o modo *hard kill*, consideramos torpedos antitorpedo Sea Spider da Atlas-Elektronik. Com o Sea Spider, o propósito é destruir o torpedo atacante a uma boa distância, para não sofrer excessivamente com a onda de choque da explosão.

A arma mais recente e “inovadora” é o míssil anti-aéreo contra helicópteros da BGT-Diehl Idas – Interactive Defense and Attack System. Um contêiner especial com

dimensões e peso semelhantes a um HWT acomoda quatro mísseis antiaeronave. O míssil é fio guiado com fibra óptica e lançado por um tubo de torpedos, como defesa contra helicópteros ASW, no momento em que baixam os sonares ativos.

A novidade mais recente fica por conta das pesquisas para o emprego de drones ROVs<sup>46</sup>, que ainda estão sendo testados. Há várias questões em aberto, principalmente sua recuperação para bordo pelos tubos de torpedos, mas seu emprego logo se tornará uma realidade, sendo ideal para coleta de inteligência na costa inimiga.

## SENSORES & CMS<sup>47</sup>

Os sensores que atuam quando o submarino está submerso são essencialmente os sonares. Aqui ainda incluímos o sistema de comunicações que funciona com antena flutuante e rebocada. Quando em profundidade periscópica ou na superfície, são empregados os sensores montados em mastros situados na torre: periscópios ou mastros optrônicos<sup>48</sup>, radar, ESM/ECM<sup>49</sup>, comunicações: VLF, LF, HF, VHF, UHF-Satcom<sup>50</sup>, Inmarsat-C, IFF, GPS, GMS<sup>51</sup>, Link-16 (Otan) etc.

Tipicamente, empregam-se sete mastros: um *snorkel*, um radar, dois para comunicações, um dedicado a ESM/ECM e dois periscópios e/ou mastros optrônicos. Quando submerso, há a opção de empregar-se uma antena de comunicações flutuante e rebocada, com vários modelos

45 Mina de fundo.

46 Remotely Operated Vehicle.

47 Combat Management System.

48 O Comandante (RM-1) Raimund Wallner, da Marinha da Alemanha, recomenda o uso dos mastros optrônicos. Estes têm mais recursos do que os periscópios e não necessitam penetrar no casco de pressão.

49 Electronic Support Measures/Electronic Counter Measures: Guerra Eletrônica.

50 Very Low Frequency, Low Frequency, High Frequency, Very High Frequency, Ultra High Frequency-SATellite COMMunication.

51 Broad Band Sattelite Comms, Interrogation Friend or foe, Global Positioning System, Global System for Mobile Communications 2G.

de muitos fabricantes. Há modelos de mastros optrônicos que incorporam também sensores/antenas IR, COMMS e ESM.

O conjunto de sonares é amplo e torna o submarino um verdadeiro “porco-espinho”. Temos os sonares de alta (ativo), média (ativo-passivo) e baixa (ativo-passivo) frequências na proa; sonar contra obstáculos/minas (proa); sonares de flanco (laterais); sonares laterais de *ranging*; *bottom navigation*; telefone submarino; sensor sonar a ré; sensores de medição e controle do ruído próprio do submarino; e sonar rebocado ativo/passivo de baixa frequência.

Para controlar e coordenar toda essa miríade de sensores, existe o sistema de combate centralizado, em que as várias estações de consoles multifuncionais podem ser guarnecidas com várias finalidades. No centro de combate, ficam comandante, imediato, chefe de máquinas, operadores de sonar, radar, inteligência eletrônica, comunicações, navegador e piloto (timoneiro).

## TRIPULAÇÃO

Dentro das limitações de espaço do submarino, alguns tópicos relativos ao conforto dos tripulantes devem ser considerados. Seria desejável que cada tripulante tivesse sua cama privativa e que houvesse pelo menos três sanitários, dois chuveiros para 28 (36) tripulantes e um miniespaço de *fitness*<sup>52</sup>. Importantíssimo: a alimentação deve ser balanceada, variada, gostosa e nutritiva, pois o confinamento e a rotina podem ser amenizados

com um bom rancho. Para termos uma ideia, a bordo de um *U-212A* (28 tripulantes), o cozinheiro prepara, sozinho, 136 refeições por dia. Obviamente que outros tripulantes dão uma mãozinha no preparo, com a louça e a limpeza em geral, quando não estiverem descansando ou de serviço.

A tripulação típica seria de 28 homens, como na classe *U-212A*. Acrescentamos uma reserva de oito tripulantes para extras, *trainees* ou Grumec (8X). Segundo o CF Arjes, o regime é de turnos de 6 x 6 horas, e não há manifestação de fadiga. Para a tripulação padrão, de 28 + 8, a organização seria a seguinte: 27 a 29 (7 oficiais) + 7 a 9 extras (reforço, *trainees* ou Grumec).

Turma de serviço permanente:

1 oficial comandante  
1 oficial engenheiro-chefe  
1 oficial 1º *specialist comm*s  
1 médico (técnico médico tipo 1º SG)  
1 cozinheiro

---

Total = 5

1º turno:

1 oficial 1st WO<sup>53</sup>  
1 oficial navegação  
4 especialistas de sensores<sup>54</sup>  
1 especialista máquinas  
1 especialista elétrica  
1 especialista eletrônica/IT  
3 auxiliares gerais<sup>55</sup>

---

Total = 12

52 Os equipamentos mais fáceis de serem instalados em vão apertados seriam uma esteira e uma ou duas bicicletas. Durante missões de patrulha haveria restrições ao seu uso.

53 Watch Officer ou imediato.

54 Operadores de sonar, radar e comunicação, ESM/ECM (Guerra Eletrônica) nos consoles multifuncionais.

55 Os tripulantes aqui mencionados como auxiliares gerais seriam marujos com especialização: máquinas auxiliares, sistema de incêndio, sistema de ar comprimido (manobras), armamento, controle de avarias, sistemas de comando e navegação etc.

2º turno:

- 1 oficial 2nd WO
- 1 oficial 2º *specialist comms*
- 4 especialistas de sensores
- 1 especialista máquinas
- 1 especialista elétrica
- 1 especialista eletrônica/IT
- 3 auxiliares gerais

---

Total = 12

## ATMOSFERA A BORDO

O volume do corpo de pressão é de aproximadamente  $1.900 \text{ m}^3$ . Descontando o espaço ocupado por todos os componentes a bordo, estimamos o volume de ar respirável em  $1.000 \text{ m}^3$  ou 54,47% para  $28 + 8 = 36$  tripulantes. Definimos os limites de teor de  $\text{CO}_2$  entre 0,2% e 0,7%. Em uma hora, a tripulação inspira 1.220 litros de  $\text{O}_2$  e expira 1.037 litros de  $\text{CO}_2$ .

No caso do limite máximo de 80 dias submerso com 36 tripulantes, o consumo de oxigênio será de 2.342.000 litros, que demandam um estoque de 3,10 tons de LOX. No mesmo intervalo de tempo, a tripulação produz 1.991.040 litros de  $\text{CO}_2$ , que precisam ser retirados do ar viciado, demandando uma recirculação de ar pelos purificadores igual a  $208 \text{ m}^3/\text{hora}$ .

O método tradicional não regenerativo de purificação em submarinos convencionais (menores) é o uso de cartuchos de hidróxidos de sódio/cálcio/lítio. No presente caso, seriam necessários cerca de 15,7 tons ou  $8,3 \text{ m}^3$  de cartuchos, volume e peso, nada desprezíveis para um submarino desse porte.

Entretanto estudamos a viabilidade da aplicação do processo regenerativo utili-

zado em submarinos nucleares, chamado de MEA, concluindo que tal instalação teria cerca de  $3,0 \text{ m}^3/2,0 \text{ tons}$  e o consumo de energia igual a 4.180 Wh/hora (594V/7 Amp). Em termos de peso, volume e consumo de energia, seria muito vantajoso. Contudo uma pequena quantidade de cartuchos de hidróxidos, para cerca de dez dias, seria levada por medida de segurança em caso de pane.

## CUSTOS

No quesito reabastecimento e segurança militar, é necessário avaliar a disponibilidade de cada insumo ao redor do mundo. O metanol está disponível mundialmente em qualquer porto, mas isso não se aplica, com certeza, ao hidrogênio sob alta pressão.

Esse é um ponto de importância estratégica. No caso do *U-X65*, os cilindros de hidretos para estocar hidrogênio, como nas classes *U-212A*, *U-214* e *U-218*, e outras, não podem ser considerados, pois o volume e o peso necessários seriam absurdamente grandes. Além disso, para uma mesma quantidade de energia gerada, o custo do metanol é bem menor do que o hidrogênio gasoso comprimido.

Nos dias atuais em (maio/2022), temos os seguintes preços médios:

Metanol: € 400,00 ≈ € 500,00/metric ton – US\$ 550,00 x 116 ton = US\$ 63.800,00;

MGO<sup>56</sup>: US\$ 1.169,00/ton (mercados USA, Europa e Ásia);

VLSFO<sup>57</sup>: US\$ 917,00/ton (idem) – US\$ 917,00 x 56 ton = US\$ 51.352,00, e

LOX: (mercado da Índia) – US\$ 0,182/kg - 177.000 kg = US\$ 32.214,00.

O abastecimento completo para uma missão de 80 dias do *U-X65* com LOX

56 Marine Gas Oil.

57 Very Low Sulfur Fuel Oil.

(177 t), Methanol (116 t) e VLSFO (56 t) custaria cerca de US\$ 147.366,00.

Os custos de obtenção estimados são baseados no deslocamento *standard* (peso leve): os *U-212A* do primeiro lote (1994) custaram €400 milhões ou € 312K/ton. Os *U-212A* do segundo lote (2006) custaram € 600 milhões ou € 468K/ton. Mais modernos, os *U-218SG* (Singapura) estão estimados em € 774 milhões ou € 475K/ton e os *U-212NFS* (Itália) cerca de € 675 milhões ou € 482K/ton.

Tomando-se os valores mais elevados e fazendo uma média aritmética entre o *U-218SG* e o *U-212NFS*, chegamos a € 479/ton/unidade. Concluindo: o *U-X65* de série poderia custar em torno de € 479K/ton x 1.898 tons = € 909 milhões. O primeiro da classe poderia chegar a  $1,3X = € 1.180$  milhões. Como exemplo, na média histórica, a classe *Astute* está custando na ordem de £ 2,385 bilhões/unidade em valores de 2015<sup>58</sup>. O custo da classe *Virginia* até o bloco IV é cerca de US\$ 2,7 bilhões e do bloco V em diante chegam a US\$ 3,6 bilhões por unidade<sup>59</sup>.

Numa rara informação sobre custos operacionais, do autor Philipp Gallhöfer<sup>60</sup>, consta que o *U-212A* custa anualmente € 5,6 milhões. O pessoal responde por 28% e operação 72% – combustíveis, armas, mantimentos etc.

Entretanto Gallhöfer (2013) não cita valores relativos a reparos e manutenções de rotina. Comparando, o custo operacional anual estimado da classe *Virginia* é igual a US\$ 50 milhões, segundo o United States Congressional Budget Office.

## CONCLUSÃO

Os resultados obtidos são bem interessantes e nos remetem sempre à máxima do professor Ulrich Gabler, fundador do escritório IKL e considerado o pai dos submarinos alemães: “O submarino deve ser tão grande quanto necessário, e tão pequeno quanto possível”. O nosso estudo mostra como um submarino relativamente “pequeno” pode ser capaz, em termos de autonomia, raio de ação, sensores e armas.

O submarino convencional não pode ser grande demais, senão se torna um *sitting duck*<sup>61</sup> ou alvo fácil. Os tamanhos das classes *Soryu* e *Taigui* são intrigantes, se analisados à luz dos nossos resultados. Segundo opiniões de oficiais da US Navy, quando se trata de defesa de um país ou operação AA/AD em *choke points* e da não necessidade de operações prolongadas a mais de 5.000 m.n. da base, é preferível ter um número maior de SSP<sup>62</sup> do que alguns poucos SSN.

Submarinos têm custos de obtenção, manutenção e operacionais. No final, deve-se somar tudo para chegar ao real valor do custo de ciclo de vida do meio naval. Todos esses custos já devem ser estimados na fase de projeto do submarino para avaliar sua viabilidade econômica. Durante a vida útil do meio, esses custos devem ser verificados continuamente e comparados com os desvios de projeto, que fatalmente ocorrem. Servem, também, na previsão de custos mais realistas de novos submarinos da mesma classe ou de uma nova classe evoluída a serem obtidos.

58 Fonte: en.wikipedia.org/wiki/Astute-Class-Submarine.

59 Fonte: Congressional Budget Office USA – United States Congress.

60 Buch “Effizienz und Effektivität durch Verteidigungs Kooperation”, Springer Verlag, 2013.

61 “Pato inerte”. Refere-se àqueles patos que funcionam de alvo nos parques de diversão americanos, levando boladas e tiros de todos os lados.

62 Submarino convencional com AIP.

Voltando ao foco deste estudo, concluímos que a ideia do CF Bernd Arjes, de conceber um submarino com mais AIP e menos bateria, é perfeitamente viável. Mas trata-se de um primeiro estudo especulativo que deveria ser avaliado mais profundamente por especialistas. Entretanto tomadores de decisões são avessos a riscos, mesmo quando aconselhados por seus engenheiros mais experientes, devido ao alto nível de incertezas diante de novas opções.

Mas a autonomia e o raio de ação que resultaram dos cálculos são surpreendentes. O sistema AIP, com células PEM-FC, reforma de metanol para obtenção de hidrogênio a bordo e estoque criogênico de LOX, permite um tempo prolongado submerso em patrulha. Os resultados sugerem que uma revisão dos conceitos operacionais atuais de submarinos convencionais seria inevitável.

Esses cálculos preliminares mostram que é possível um submarino convencional navegar exclusivamente com AIP, salvo se necessitar de uma *sprint speed* por tempo limitado, quando a bateria é empregada. O U-X65A pode ficar até 70 dias submerso em missão, combinando várias velocidades. Os cálculos deste estudo podem ser questionados porque não é possível obter informações sensí-

veis. Mas, segundo um comentário do Comandante R. Wallner, o conjunto do trabalho faz sentido, e não estamos num ponto muito fora da curva.

Embora este estudo seja bem embasado em literatura e fontes de primeira qualidade, ele está a anos-luz de uma solução definitiva. O propósito aqui foi demonstrar a existência de um potencial ainda inexplorado dos submarinos convencionais. Para dar um passo na direção de um submarino classe U-X65A ou algo parecido, é preciso muita inteligência e coragem, mas sem ser leviano. Toda mudança de paradigmas leva tempo, o que é compreensível.

Em função da capacidade militar resultante do estudo do U-X65A, percebemos que vale muito a pena refletir sobre a máxima do oficial-engenheiro, veterano de guerra e experiente professor Ulrich Gabler, mencionada no primeiro parágrafo desta seção.

Sua carreira no escritório IKL<sup>63</sup>, por ele fundado e do qual usufruiu a Marinha do Brasil (classe *Tupi*), é um exemplo de como é importante estudar, pesquisar e inovar continuamente para dominar soberanamente uma tecnologia. Como o professor Albert Einstein costumava dizer: “Aquele que nunca errou, nunca criou algo novo”. Ou, no nosso popular: “Quem não arrisca, não petisca”.

📁 CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:  
<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Submarino; Submarino Nuclear;

63 Ingenieur Kontor Lübeck, escritório de projetos com o qual a Marinha do Brasil trabalhou na obtenção da classe *Tupi*.

## BIBLIOGRAFIA

- BERTRAM, Prof. Volker. “Submarine Hull Design”.
- BUCKINGHAM, John. BMT Defence Services Ltd. “Submarine Power and Propulsion: Balancing the Energy Elements”.
- BUCKINGHAM, John. HODGE, Christophe; HARDY, Timothy. BMT Defence Services Ltd. “Submarine Power and Propulsion – Trends and Opportunities”.
- BUCKINGHAM, John. BMT Defence Services Ltd. “Multi Engine Submarine Power Supplies: The Operating Case”.
- CHAKRABORTY, Soumaya. “Submarine Design: Unique Tanks On a Submarine”.
- GABLER, Ulrich. *Submarine Design*. Editora Bernard & Graefe, 1986.
- JACKSON, Harry A. “Fundamentals of Submarine Concept Design”.
- JOUBERT, P.N. “Some Aspects of Submarine Design – Part 2: Shape of a Submarine” . University of Melbourne.
- LINDSTRÖM, Bård. “Development of a Methanol Reformer for Fuel Cell Vehicles”. Department of Chemical Engineering and Technology, KTH (Königliche Technische Hochschule), Stockholm, 2003.
- MANN, J.W. BMT Defence Services UK “Twin – Turbocharged Diesel Performance Under Snorkelling Conditions”.
- MINNEHAN, Ensign John. US Navy: “Non-nuclear submarines? Choose fuel cells”. USNI *Proceedings*, june/2019.
- PATTON JR., James H. “Run silent, run shallow”. USNI *Proceedings*, october/2018.
- POURMOVAHED, Ahmad. “Performance of a PEM FC”. Mechanical Engineering Department, Kettering University, Flint-Michigan, USA.
- SANDROCK, Gary. “State of the Art Review of Hydrogen Storage in Reversible Metal Hydrides for Military Fuel Cell Application”. Suna Tech Inc., Ringwood, NJ, on behalf of the *Office of Naval Research*, US Navy, Arlington, Virginia.
- SINAVY – Siemens PEM Fuel Cells.
- TORKELSON, Kai Oscar. MIT, june 2005: “Comparative Naval Architecture Analysis of Diesel Submarines”.
- VOGT, René. “AIP – Propulsão de Submarinos Independente da Atmosfera”. *Revista Marítima Brasileira*, 4<sup>o</sup>T/2017.
- VOGT, René. “Baterias de Submarinos”. *Revista Marítima Brasileira*, 3<sup>o</sup>T/2018.
- WILSON, Haffenden; RENISLON, M.; DAWSON, E. “An Investigation into the Wavemaking Resistance of a Submarine Traveling Below The Free Surface”. Australian Maritime College & BMT Design and Technology, Melbourne, Australia.
- WALKER, Michael & KRUSZ, Austin, “There’s a case for Diesel”. Ensigns USNavy. USNI *Proceedings*, june/2018.
- WALLNER, Raimund; KzS a.D. Deutsche Marine. Conselheiro técnico do autor.

## ANEXO 1

## Comparação dos atuais submarinos convencionais modernos

Tipo	Comprimento	Peso Leve	Deslocamento Submerso
<i>U-212A</i> (TKMS) Alemanha/Itália	56,0 m	1.520 t	1.830 t
<i>GÖTLAND</i> (SAAB) Suécia	60,4 m	1.494 t	1.599 t
<b><i>U-X 63</i></b>	63,0 m	1.731 t	2.445 t
<i>BLEKINGE</i> (SAAB) Suécia	63,0 m	1.930 t	2.180 t
<b><i>U-X65A</i></b>	65,0 m	1.898 t	2.714 t
<i>U-214</i> (TKMS) Grécia, Turquia, Coreia Sul, Portugal	65,0 m	1.690 t	1.860 t
<i>DOLPHINII</i> (TKMS) Israel	68,6 m	2.050 t	2.460 t
<i>U-218SG</i> (TKMS) Singapura	70,0 m	1.830 t	2.200 t
<i>SCORPÈNE (NG)</i> Chile, Índia, Malásia	70,0 m	1.565 t	1.870 t
<i>U-212CD</i> (TKMS) Noruega/Alemanha	73,0 m	2.500 t	3.000 t
<i>SCORPÈNE</i> (NG) Brasil	75,0 m	1.670 t	2.000 t
<i>S-80</i> (NAVANTIA) Espanha	81,0 m	3.200 t	3.426 t
<i>SORYU</i> (Japão)	84,0 m	2.900 t	4.200 t
<i>TAIGEI</i> (Japão)	84,0 m	3.000 t	4.345 t

Interessante seria ainda comparar o *U-X65A* com os submarinos da classe *Walrus*, da Marinha da Holanda (o primeiro da classe incorporado/1992), devido à semelhança entre estes dois modelos. *Walrus*: L = 67,7m (+2,7m), D = 8,40m (igual), calado = 6,60m (-0,20m), potência de propulsão = 5.150kW (+950kW), total 20 torpedos pesados (-2), deslocamento = 2.350t/2.650t, espaço (*Walrus*) do CMS + habitações = 553 m<sup>3</sup><581m<sup>3</sup> do *U-X65A*. Volume interno do casco de pressão (*Walrus*) cerca de 1.480 m<sup>3</sup><1.900m<sup>3</sup> (*U-X65A*). Embora não tenhamos utilizado o *Walrus* como modelo nos nossos estudos, comparamos resultado bem similar, o que sugere que nossos cálculos devem estar coerentes com a realidade.

ANEXO 2

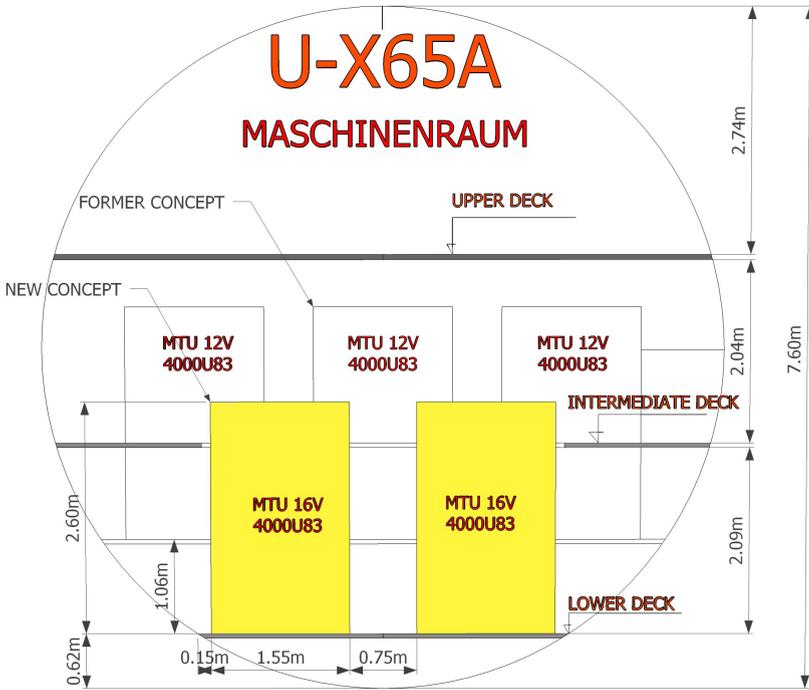


Figura 3 – Croquis da Seção da Praça de Máquinas

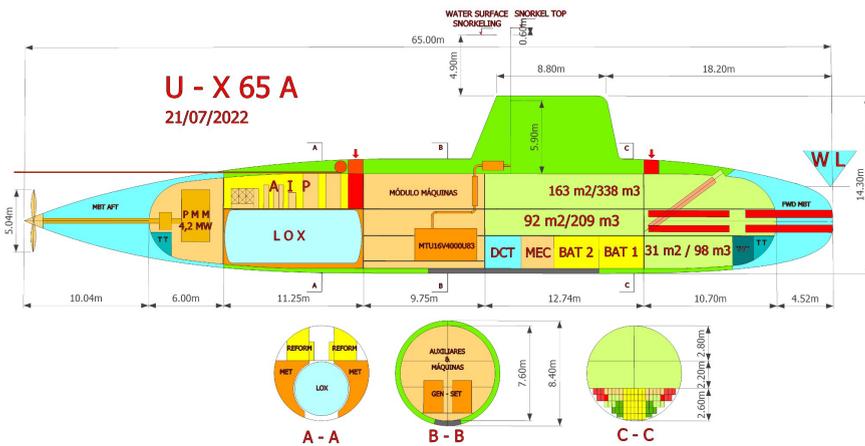


Figura 4 – Corte pelo Eixo Longitudinal do Submarino