

SUBMARINO CONVENCIONAL MODERNO DE ALTA TECNOLOGIA BRASILEIRO *U-6800*

RENÉ VOGT*
Engenheiro

SUMÁRIO

Introdução
Comparações entre submarinos convencionais e nucleares
Fatos que demonstram as novas capacidades de submarinos convencionais
Estudo de um submarino convencional apelidado *U-6800*
Custos de Obtenção, Operação e Manutenção
Conclusão
Considerações Finais
Anexos 1, 2, 3 e 4

INTRODUÇÃO

Em anos recentes ou mesmo em décadas, muito vem sendo discutido sobre as vantagens e desvantagens de submarinos de propulsão nuclear e convencionais não nucleares. Entretanto a maioria das pessoas esquece que os dois tipos de submarinos são coisas inteiramente dife-

rentes, levando muitas vezes a discussões inócuas. O ponto principal que deve definir a escolha por um SSN¹ ou um SSK² (ou SSP³) é a doutrina de defesa de um país – consequentemente, devem ser levados em conta os requisitos operacionais dos submarinos de sua Marinha. Cada tipo de submarino tem suas peculiaridades, que os fazem adequados a missões diferentes e

* 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.

1 SSN: Submarino de propulsão nuclear.

2 SSK: Submarino convencional sem propulsão independente do ar.

3 SSP: Submarino convencional com propulsão independente do ar.

específicas. Não vamos aqui questionar os SSBN⁴, que fogem ao escopo deste artigo. Pelo seu perfil operacional, um *boomer*⁵ precisa ser grande e de propulsão nuclear.

Nos últimos 30 ou 40 anos, os submarinos convencionais experimentaram um enorme progresso tecnológico. Antigamente, quando os SSK eram movidos unicamente por baterias de chumbo-ácido e sem nenhum tipo de AIP⁶, as vantagens dos SSN eram indiscutíveis. Mas o progresso dos SSP com Air Independent Propulsion diminuiu significativamente as vantagens dos SSN sob vários aspectos.

Neste trabalho tentamos conceber e avaliar um modelo de SSP com a maior densidade de energia possível, utilizando a tecnologia de baterias de íons de lítio com química LFP (Lithium Iron Phosphate) e AIP da TKMS, com reforma de metanol para a produção de hidrogênio a bordo e estoque de LOX (Liquid Oxygen) para a alimentação das células combustíveis Siemens PEM-FC (Polymer Exchange Membrane – Fuel Cell). O propósito deste estudo é mostrar as possibilidades técnicas de um SSP moderno.

Outros pontos vitais para a eficiência operacional de um SSK/SSP são a comunicação e a transmissão de dados ou, resumidamente, a *situational awareness*, ou consciência situacional. Ela é fundamental em combinação com as características de autonomia dos SSK/SSP, mas também para os SSN, como comentado por Patton Jr. [16]. Contudo, atualmente os sensores e as armas embarcados tanto em submarinos convencionais como nos nucleares são praticamente os mesmos.

Todos os nomes e marcas de processos, equipamentos, armas etc. são de livre

escolha do autor e baseadas na literatura ostensiva. Este também buscou ajuda e informações com pessoas amigas no exterior, sendo que algumas questões ficaram sem resposta por razões de sigilo militar ou comercial.

COMPARAÇÕES ENTRE SUBMARINOS CONVENCIONAIS E NUCLEARES

Submarinos de ataque com propulsão nuclear são maiores e com deslocamentos submersos acima de 5.000 toneladas (tons): *Virginia*, Estados Unidos da América (EUA) – 7.800 tons; *Astute*, Reino Unido (UK) – 7.400 tons; *Suffren*, França (FR) – 5.300 tons; *Sierra II*, Rússia (RU) – 9.100 tons; e *Akula III*, Rússia – 13.800 tons. Há exceções, como a classe *Rubis* francesa, mais antiga, com 2.700 tons.

Os SSN se deslocam em alta velocidade e em todos os mares, para escoltar forças-tarefa nucleadas em porta-aviões ou forças expedicionárias e missões A2/AD⁷ em áreas de interesse distantes. Eles têm tripulações maiores, duas distintas por submarino (*Gold e Blue*), e as missões podem durar tipicamente até 90 dias, dependendo das condições físicas e psíquicas da tripulação e do estoque de mantimentos.

Para reduzir a taxa de indiscrição, os SSN ficam submersos o tempo todo, sem necessidade de "respirar", só emergindo em ocasiões muito especiais. O reator fornece energia suficiente para produzir oxigênio pela eletrólise da água do mar. Carregam grande quantidade e variedade de sensores e armas. O número de tripulantes, de 100 a 140, e o reator com seus

4 SSBN: Submarino Nuclear Lançador de Mísseis Balísticos.

5 *Boomer*: apelido pelo qual são chamados os SSBN.

6 AIP: Air Independent Propulsion (propulsão independente do ar).

7 A2/AD: Anti-Access/Area Denial.

equipamentos auxiliares também são fatores dimensionantes do casco e, portanto, de seu deslocamento.

Independentemente do tipo de propulsão, o projeto de um SSN ou um SSK/SSP é essencialmente o mesmo, uma questão de engenharia e hidrodinâmica, exceto o quesito propulsão. O nível de sofisticação tecnológica em ambos os casos é elevadíssimo. Os dois devem apresentar bom desempenho, ser eficientes com baixas assinaturas acústicas e térmicas, submergir e emergir com segurança e resistir à mesma gama de solicitações (cargas) estáticas e dinâmicas.

Submarinos convencionais modernos com baterias de íons de lítio e AIP podem permanecer submersos por 30 dias ou mais, transitando ou em patrulha, conforme o modelo. Dependendo dos requisitos e do projeto, podem ficar em missão por cerca de 80 a 90 dias, como mostraremos adiante no caso do *U-6800*.

Um SSK/SSP é mais ágil e manobrável do que um SSN, com menores assinaturas acústicas ou infravermelhas. Apresenta, ainda, elevadas assinaturas térmicas e radiológicas, por motivos óbvios. Apesar das modernas técnicas de projeto *stealth* e do emprego de materiais anecóicos, há certas leis da física relativas ao tamanho do submarino que são incontornáveis. Em qualquer caso, o incremento da velocidade faz aumentar o ruído do fluxo de água no entorno do casco.

A assinatura física do casco, ou *target strength*⁸, aumenta linearmente com o diâmetro do mesmo e ao quadrado de seu comprimento. Vantagem para os SSK/SSP.

Embora capazes de realizar missões de ataque, sozinhos ou em grupos coordenados, os submarinos convencionais são mais adequados para a coleta de inteligência ISR⁹ em águas costeiras rasas, espreitando inimigos como vetores A2/AD. Ou, em outras palavras, os SSK/SSP são mais adequados para missões de defesa.

Os convencionais mais modernos podem carregar praticamente todas as armas de um SSN. Mísseis, torpedos, minas ou UUV¹⁰ podem ser lançados dos tubos de 533 mm. Se um torpedo ou míssil atinge seu alvo, avariando ou destruindo-o, pouca diferença faz qual tipo de submarino lançou a arma. E infiltrar forças especiais em águas costeiras rasas é definitivamente mais viável com um convencional. Um SSN tem dificuldades em manobrar em águas com menos de 100 *fathoms*¹¹ ou cerca de 180 metros.

Com respeito aos sensores, a eletrônica moderna está tornando os equipamentos cada vez mais compactos, mais leves, potentes e eficientes. Mesmo havendo mais energia disponível a bordo de um SSN, os sensores de um SSK/SSP têm um raio de ação suficiente para uma boa consciência situacional até 300 ou mais milhas náuticas (MN) e para guiar suas armas.

Mas qualquer que seja o tipo de submarino, comunicação, transmissão de dados e *links*, NCW¹² são de crucial importância. Um submarino alemão da classe *U-212A* pode se comunicar até 30 metros de profundidade sem precisar de um recurso extra, como antenas flutuantes rebocadas (sistema Calisto da Gabler). Este tópico é muito bem apresentado em [16].

8 *Target Strength* = Potência de eco do alvo.

9 ISR: Intelligence, Surveillance, Reconnaissance.

10 UUV: Unmanned Underwater Vehicle.

11 *Fathom* = braça: 1,83 m.

12 NCW: Network Centric Warfare.

O pai dos submarinos alemães, o professor Ulrich Gabler¹³, fundador do IKL – Ingenieur Kontor Lübeck, muito conhecido pela Marinha do Brasil, tinha uma máxima para submarinos: “Um submarino precisa ser tão grande quanto necessário e tão pequeno quanto possível”.

As maiores ameaças para qualquer submarino são as aeronaves ASW¹⁴ e os LFTAS¹⁵ embarcados em navios e submarinos. Mesmo apresentando baixas assinaturas, se detectado, o submarino convencional terá dificuldades para se evadir e, se for grande demais, será um alvo perfeito.

Aqueles que evocam a vantagem dos SSN de poderem evadir-se em alta velocidade por tempo indefinido se esquecem que helicópteros ASW são

muito mais rápidos usando seus *dipping sonars* e *sono buoys*, localizando o alvo com a técnica *multi static bearing*.

Finalmente, uma comparação que se impõe é a dos custos de obtenção, operação e manutenção. Um SSN da classe *Los Angeles* custava em média US\$ 1,8 bilhão¹⁶, e 62 unidades foram obtidas pela Marinha norte-americana (US Navy) entre 1970 e 1990. No ano fiscal 2018, dois SSN da classe *Virginia* foram encomendados por US\$ 2,766 bilhões¹⁷/unidade.

Os submarinos da TKMS classes *U-214* ou *U-212A* (TKMS) custam em torno de € 600 milhões/unidade, e a classe *U-218SG* com 70 m e 2.200 tons submersas da Marinha de Singapura tem um custo estimado de € 770 milhões. Podemos dizer, grosso modo, que pelo custo de obtenção de um SSN podem-se obter cerca de quatro SSP.

Além disso, uma linha industrial para fabricar submarinos convencionais sofisticados produz mais submarinos em menos tempo e por menos dinheiro do que seus pares nucleares. Esse detalhe preocupa os congressistas norte-americanos e a US Navy no caso de uma guerra diante de seus potenciais maiores oponentes (Vide o item “Custos de obtenção, operação e manutenção de submarinos”).

Mesmo os EUA, com sua imensa e poderosa base industrial de defesa, estão tendo problemas com a cadeia produtiva com dois classe *Virginia* por ano. A situação está piorando ainda mais com a entrada em produção de um SSBN/ano da classe *Columbia*. Nesse contexto, vale a pena ler o artigo “Diesel Submarines: The Game Changer the US Navy Needs”, de autoria de James Holmes, publicado na revista *Proceedings* (September 24, 2018).

Um submarino precisa ser tão grande quanto necessário e tão pequeno quanto possível

Ulrich Gabler

13 Durante a Segunda Guerra Mundial, foi primeiro-tenente engenheiro a bordo de dois submarinos, sob o comando do Capitão Reinhard Suhren, um dos ases alemães. Gabler foi condecorado com a segunda e a primeira classe da Cruz de Ferro, o Mérito de Guerra nas duas classes e a Cruz alemã em ouro. Depois da guerra, fundou o escritório IKL.

14 ASW: Anti-Submarine Warfare.

15 LFTAS: Low Frequency Towed Array Sonar.

16 Valor do dólar de 1984, atualizado ao ano fiscal 2010, de um SSN da classe *Los Angeles*, obtida em 1984.

17 Fonte: Congressional Research Service. “Navy *Virginia* Class Attack Submarine Procurement”, Ronald O’Rourke, September 14, 2017.

FATOS QUE DEMONSTRAM AS NOVAS CAPACIDADES DE SUBMARINOS CONVENCIONAIS

Pesquisando na internet, encontramos dois artigos de Edward Whitman, editor sênior da *Undersea Warfare Magazine* (Washington, EUA), revista oficial da USN Submarine Force (Força de Submarinos da Marinha dos EUA), com os títulos “The Wrong Sub for a New Warfare Era” e “Tomorrow’s Submarine Fleet: The Non-Nuclear Option” (ambos em www.argee.net/DefenseWatch). Nesses textos, Whitman compara o estado da arte da tecnologia de submarinos convencionais modernos com a dos submarinos nucleares da US Navy e os custos de obtenção relacionados, mencionando o artigo “The uncontested undersea superiority experienced during recent conflicts is not likely to be repeated against determined and capable adversaries”, de Albert H. Konetzni Jr., da Navy’s Fleet Forces Command (US Naval Institute Proceedings, June/2004).

A seguir listamos exemplos de submarinos europeus que participaram de exercícios conjuntos com a US Navy e que, com grande sucesso, penetraram as defesas de forças-tarefa, inclusive afundando porta-aviões:

- submarino holandês *Wallrus*, exercício JTFex/TMDJ 99, no Mar do Caribe, em março/1999 (força-tarefa *Theodore Roosevelt*);

- submarino sueco *Gotland*, em 2005 (força-tarefa *Ronald Reagan*);

- submarino alemão *U-32*, do tipo *U-212A*, exercício Westland Deployment 2013, navegando submerso, sem usar o

snorkel, de Eckernförde (Alemanha) até à costa leste americana e afundando vários navios, inclusive o porta-aviões da força-tarefa, sem ser detectado uma única vez.

A declaração da US Navy após os exercícios de 2013 foi a seguinte: “A ameaça mais assustadora no mar nos anos vindouros: modernos submarinos AIP de baixas assinaturas operando em águas confinadas”. Estes são apenas alguns exemplos que levaram a US Navy a se engajar na elaboração de uma doutrina ASW contra submarinos convencionais. Para tal, arrendaram por tempo limitado um submarino sueco.

ESTUDO DE UM SUBMARINO CONVENCIONAL APELIDADO U-6800¹⁸

Como dito acima, o principal propósito deste estudo foi consolidar o que pesquisamos e publicamos sobre baterias de íons de lítio¹⁹ e AIP²⁰. A ideia foi elaborar um esboço ou modelo de um submarino que englobasse essas tecnologias a título de ilustração (desenho do modelo no final deste artigo, no Anexo 2).

O presente estudo serve apenas como uma sugestão, embora o autor tenha se valido de uma bibliografia da mais alta qualidade. Se este estudo servisse de inspiração para uma nova classe, exigiria o trabalho de centenas de engenheiros durante alguns anos para se concluir um estudo de exequibilidade viável.

Foram feitos muitos cálculos, e não é o escopo deste artigo mostrá-los, por não serem do interesse da maioria dos leitores. Importante mencionar a sempre valiosa ajuda do diretor de Pesquisa e Desenvolvi-

18 Em função do comprimento de 68 metros.

19 “Baterias de Submarinos”. *Revista Marítima Brasileira*, 3º trim./2018.

20 “AIP – Propulsão de Submarinos Independente da Atmosfera”. *Revista Marítima Brasileira*, 4º trim./2017.

mento (P&D) da TKMS, engenheiro Peter Hauschildt, e Capitão Raimund Wallner²¹.

Enfatizando, o propósito deste estudo é sugerir e avaliar um submarino convencional com alta concentração de energia e importante capacidade militar em termos de energia, sensores e armas. Os resultados estão resumidos na Tabela 1.

A razão L/D (comprimento/diâmetro) tem um forte efeito na resistência total ao deslocamento do submersível na água. As duas frações principais da resistência da água no casco são o *pressure drag*, ou *form drag* (arraste de pressão), e o *skin friction* (atrito superficial).

O *pressure drag* age normalmente à superfície. O *skin friction* age tangencialmente à superfície e é diretamente proporcional à área molhada do casco. Um casco com formato mais “gordinho”, ou seja, mais curto e com diâmetro maior, tem uma menor área molhada para um dado volume contido.

A combinação das resistências de “arraste de pressão” e “atrito da área molhada” apresenta um mínimo para a relação L/D= 6 a 7²². A variação da resistência submersa do submarino em função do seu coeficiente prismático (C_p), pode ser significativa. A classe *Collins* tem um

Tabela 1 – Cálculos feitos pelo autor com base em [8] e [20]

Comprimento total (m)	68,00	
Diâmetro externo (m)	9,30	
Diâmetro casco de pressão (m)	8,00	dois conveses
Altura quilha/topo torre	16,45	
Vol casco de pressão (m ³)	2.178	
Casco vante (<i>Entrance</i>) (m)	$L_f = 25,20$	Elipsóide de Revolução
Casco central paralelo (m)	17,60	Cilíndrico
Casco de ré (<i>Run</i>) (m)	$L_a = 25,20$	Parabolóide de Revolução
L/D (<i>Finess Ratio</i>)	7,31	<i>Class 2026</i> (RAN) = 7,3 <i>Albacore</i> (US Navy) = 7,723
Coef. Prismático (C_p)	0,736	<i>Collins</i> = 0,8 / <i>Class 2026</i> (RAN) = 0,78
Fatores de forma	$n_f = 3,0$ & $n_a = 3,0$	
Superfície molhada (m ²)	1.682	Submerso
Superfície molhada (m ²)	1.514	Flutuando (NSC) ²³
Calado (m)	7,72	Flutuando (NSC) <i>Collins</i> = 7,0 m
Deslocamento envoltória	3.583 tons / 3.496 m ³	
Potência propulsão (kW)	PMM Permasyn 5+ MW	Siemens

21 Capitão da Reserva da Marinha da Alemanha. Submarinista, comandou submarinos duas vezes, foi comandante da Flotilha de Submarinos e adido naval da Alemanha no Japão e nas Filipinas. Sua missão final foi no Ministério da Defesa, como diretor e supervisor do Programa de Submarinos, Guerra de Minas e Sistemas Subaquáticos. Passou para a reserva em 2010. É graduado na Escola de Comando e Estado-Maior da Alemanha, no US Naval Postgraduate School e no National Institute for Defence Studies of Japan.

22 [9]: Joubert, Fig.1, p. 3.

23 NSC: Normal Surfaced Condition (submarino flutuando carregado para autonomia máxima).

$C_p > 0,8$, enquanto o perfil do novo estudo da “classe 2026” da Marinha da Austrália (Royal Australian Navy – RAN) tem $C_p = 0,78$ ²⁴.

O cálculo do SWBS (Ship Weight Breakdown System) é baseado num exemplo de [20], p.45-46. Na Tabela 2 inserimos nosso estudo para comparação com as classes *Collins* e *U-212A*. Para elaborar nossos cálculos, tivemos que adotar algumas premissas que mostramos na sequência.

Em [8] (Fig. 3, p. 421), escolhemos livremente o aço HY100 para uma profundidade de imersão de 600 m, resultando num SWBS100 = 48% de A-1; na Fig. 4 (p. 421), escolhendo-se o motor de propulsão Siemens Permasyn PMM 5+MW, resulta um SWBS200 = 565 tons, que representa 25,45% de A-1; nos indica, ainda, um SWBS300 = 3,15% de A-1.

A seguir, apresentamos os critérios adotados e que são mais ou menos padronizados. Manteremos as abreviações em inglês.

– LB = Lead Ballast (lastro de chumbo): 6% to 8% de A-1;

– Ratio (razão) FF/ENVD (Free Flood/Envelope Displacement) varia de 0,07 a 0,09;

– A-1 é a soma dos SWBS de 100 a 700;

– A1 = A-1 + LB (Standard Displacement) peso leve flutuando e vazio;

– NSC = A1 + VL²⁵ + RB²⁶;

– Num projeto bem balanceado, RB = MBT, onde MBT = Main Ballast Tanks (tanques de lastro principais), sendo a média considerada como RB = 11,0% de NSC;

– RB = MBT/NSC (razão situa-se normalmente entre 0,10 e 0,15);

– VL estimada livremente pelo autor para este estudo;

– DCT = Depth Control Tanks (tanques de controle de profundidade), que ficam no interior do casco de pressão, usualmente somando 2,5% a 3% do volume interno do casco de pressão = 54,0 m³ ca. 56 tons (água do mar);

– TT = Trim Tanks (tanques de trim), dentro do casco de pressão, normalmente 0,5% do volume do casco de pressão = 10,1 m³ ca. 11,0 tons (água do mar);

– TOT = Torpedo Operation Tank (tanques de operação de torpedos), para seis tubos de 533 mm dentro do casco de pressão, estimamos 11,7 m³ x 1,025 t/m³ = 12,0 tons (água do mar);

– Diesel: 180 tons, tanques conformais entre o casco de pressão e o externo (os dois cascos são concêntricos em seção transversal, sendo o casco externo fabricado em compósitos de fibra de carbono);

– Óleo lubrificante: 0,5 tons;

– LOX: 86 tons, 68 dias/240 kW FC + reformador metanol;

– *Methanol fuel* para AIP : 86 tons, 68 days/240 kW;

(Observação: Os cálculos dos detalhes das quantidades de LOX e metanol não serão reproduzidos neste artigo.)

– 24 x torpedos: 36 tons;

– Tripulação + pertences : 36 x 83 kg (DNV-GL = 70 kg) = 3,0 tons;

– Mantimentos: 36 x 85 dias x 11,0 kg/dia/tripulante = 32,0 tons; e

– Total VL = 503,6 tons + 8,4 tons (reservas) = 512 tons.

24 [9]: Joubert, Fig. 2, p. 4.

25 Variable Load (carga variável).

26 Reserve Buoyancy (reserva de flutuação).

Tabela 2 – Comparação dos SWBS de três submarinos

	ESTUDO <i>U-6800</i>		<i>COLLINS</i>		<i>U-212 A</i>	
	Peso (t)	%	Peso (t)	%	Peso (t)	%
SWBS100	1.098,0	49,46 A-1	1.174,3	49,9 A-1	558,3	46,6 A-1
SWBS200	565,0	25,45 A-1	600,7	25,6 A-1	328,1	27,4 A-1
SWBS300	70,0	3,15 A-1	55,7	2,4 A-1	39,3	3,3 A-1
SWBS400	125,0	5,63 A-1	128,1	5,4 A-1	60,9	5,1 A-1
SWBS500	215,0	9,68 A-1	244,0	10,4 A-1	111,2	9,3 A-1
SWBS600	92,0	4,14 A-1	91,5	3,9 A-1	50,2	4,2 A-1
SWBS700	55,0	2,49 A-1	56,8	2,4 A-1	50,4	4,2 A-1
A-1	2.220,0	100,0%	2.351,1	100,0%	1.193,3	100,0%
LB	155,0	7,0% A-1	146,1	6,2% A-1	83,9	7,0 %A-1
A1 Std. Displ.	2.375,0	SUBD/A1 1,361	2.497,2	SUBD/A1 1,365	1.282,2	1,35
VL	512,0 Incl.Reserv.		335,5		159,5	
NSC	2.887,0		3.145,5		1.456,6	
MBT (RB)	346,0	MBT/NSC 12,0%	263,9	MBT/NSC 11,0%	274,7	MBT/NSC 18,9%
SUBD	3.233,0		3.409,4		1.731,3	
FF	350,0	FF/ENVD 9,8%	256,6	FF/ENVD 7,0%	130,3	FF/ENVD 7,0%
ENVD	3.583,0	ENVD/A1 1,508	3.666,0	ENVD/A1 1,468	1.861,6	1,452

Siglas em inglês – SUBD: Submerged Displacement; FF: Free Flooding Space; ENVD: Envelope²⁷ Displacement; LOA: Length Over All; DIAPH: Diameter Pressure Hull; DIAENV: Diameter Envelope; T: Draft (Surfaced)

Na dissertação de mestrado *Energy Management System in Naval Submarines*, de Byeongdo Jeon (Arizona State University, 2020), sobre submarinos convencionais modernos, a soma de SWBS200 + SWBS300 mais os estoques dos combustíveis (no nosso caso, diesel, metanol e LOX) representa até 35% em peso do deslocamento submerso (tons) e até 49% do volume correspondente (m³).

O *U-6800* tem um deslocamento submerso = 3.583 tons e volume correspondente = 3.496 m³. Portanto, o peso de 1.019 tons que calculamos para os

cinco itens acima corresponde a 28,44% de 3.583 tons (28,44% < 35%), e o volume de 1.616 m³ equivale a 46,22% de 3.493 m³ (46,22% < 49%). Concluímos que nossos resultados estão dentro da realidade técnica.

Bateria²⁸

A bateria de íons de lítio adotada neste estudo foi desenvolvida pela TKMS, Alemanha, numa parceria com a SaffT, França. Ela se baseia na química LFP – Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄). O desenvolvi-

²⁷ Habitualmente, muitos autores traduzem erradamente “envelope”. O significado correto do termo é “envoltória”. Exemplo: calculando-se os esforços estáticos e dinâmicos máximos e mínimos de uma viga, os valores extremos máximos definem uma envoltória dos esforços dimensionantes.
²⁸ Vide [23].

mento anterior da TKMS em parceria com a Gaia, Alemanha, era baseado na química NCA²⁹, que tem maior densidade de energia, mas sofre do severo problema de segurança denominado *thermal runaway*³⁰.

Esse foi o principal motivo de a TKMS ter abandonado a opção NCA para submarinos, embora os japoneses surpreendentemente tenham decidido equipar o 11º e 12º da classe *Soryu* com LIB³¹ com química NCA da Yuasa Batteries. Entretanto a química LFP vem evoluindo e já reduziu substancialmente esta diferença de densidade de energia.

No caso do nosso *U-6800*, após uma série de cálculos e *trade-offs* entre a energia contida no óleo diesel, no sistema AIP e nas baterias, resolvemos dimensionar as duas baterias iguais com três compartimentos cada, com 96 módulos/compartimento, 576 módulos no total. Cada módulo da bateria completo mede 148 x 50 x 29 cm, pesando cerca de 500 kg. O peso total das baterias 1+2 é igual a 288 tons.

Os módulos têm uma tensão de 99V e uma capacidade de 387Ah. Cada seis módulos são ligados em série, formando *strings* com 594V e 387Ah de capacidade. Os 96 *strings* são ligados em paralelo, elevando a capacidade total para 37.152 Ah com os mesmos 594V, resultando numa energia armazenada igual a 22.068 kWh.

Mas uma tecnologia muito promissora e viável está sendo desenvolvida pela Leydenjar Technologies, do Instituto de Pesquisa Aplicada TNA, de Eindhoven, Holanda. A novidade é o desenvolvimento de um anodo de 100% silício poroso para baterias de íons de lítio para qualquer química existente. O silício é aplicado

pelo processo PEVCD – Plasma Vapour Deposition sobre um substrato de cobre.

Um aumento de energia da bateria da ordem de 70% é esperado, mas testes feitos com uma LIB e química NCM (máximo 220Wh/kg com anodos de carbono) já alcançaram uma energia específica de 450Wh/kg, ou 1.200Wh/litro, com os novos anodos de silício poroso, praticamente 100% mais energia. Sendo mais conservadores neste estudo, poderíamos contar, no futuro próximo, com a mesma bateria em tamanho e peso com energia aumentada em 70% para 37.516 kWh.

AIP – Air Independent Propulsion³²

Nossa escolha pelo sistema AIP recai sobre o processo Siemens PEM-FC³³ BZM120 (ver Fig. 1). No *U-6800* preveremos a instalação com quatro células de 120 kW, total de 480 kW. Esta potência e os estoques de LOX e metanol calculados permitem um regime de patrulha por 75 dias de 4 a 5 nós ou 35 dias com velocidade de 8 a 9 nós.

Os módulos PEM-FC mais dois reformadores de metanol de 240 kW cada teriam o mesmo *layout* do *U-216* proposto pela TKMS para a RAN (vide Fig. 2). Para 2023, o grupo Siemens já anunciou o lançamento da quarta geração de PEM, as BZM-Evo, gerando mais energia com maior eficiência.

O módulo AIP do submarino ainda inclui o tanque de LOX com 95 tons e os tanques de metanol com 96 tons. O hidrogênio produzido pela reforma do metanol e o oxigênio líquido são as fontes de energia das células PEM para produzir eletricidade.

29 NCA: $LiNi_{0,85}Co_{0,1}Al_{0,05}O_2$ (Lítio, Níquel, Cobalto, Alumínio e Óxido).

30 Combustão espontânea.

31 LIB: Lithium-Ion Battery.

32 Vide artigo na *RMB* [22].

33 PEM-FC: Polymer Exchange Membrane Fuel Cell.

Comparando a opção de reforma de metanol com a tecnologia de armazenar hidrogênio em hidretos metálicos, para a mesma quantidade de energia produzida, o metanol é três a quatro vezes mais barato

do que o hidrogênio líquido fornecido em caminhões para abastecer os cilindros de hidretos. Naturalmente esta economia se reflete diretamente no custo operacional do submarino.

Figura 1 – Circuito esquemático do sistema AIP com células PEM

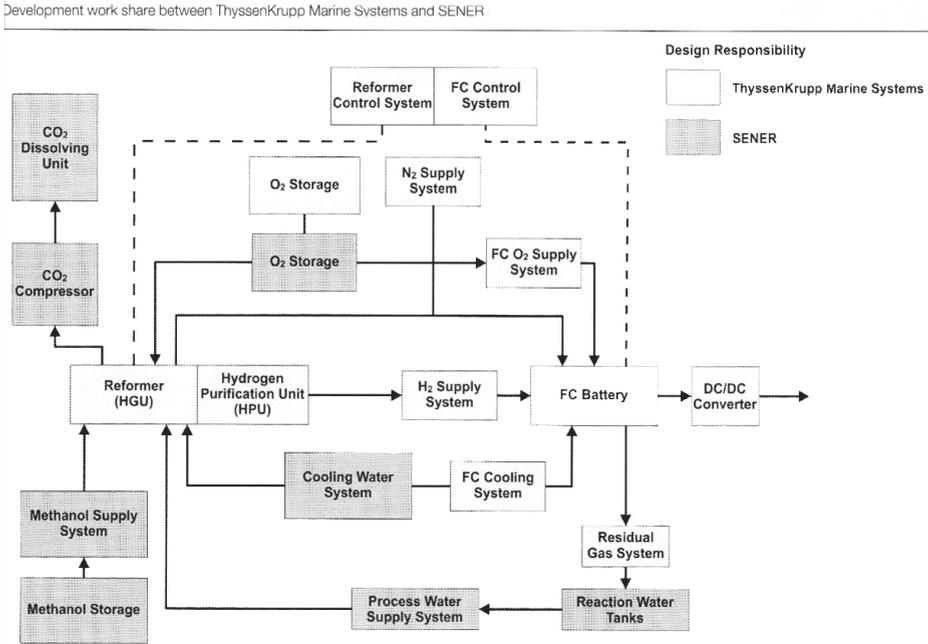
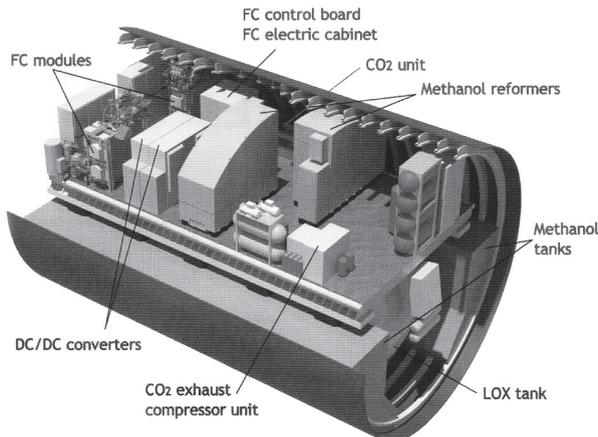


Figura 2 – Módulo AIP de 480 kW do projeto U-216 proposto para a RAN



Next generation AIP: FCMRS integrated into the HDW Class 216 submarine design

Geração de energia com diesel-geradores

Uma bateria grande e poderosa é o que todo comandante de submarino almeja. Contudo, para manter uma taxa de indiscrição a mais baixa possível, necessita-se igualmente de geradores suficientemente potentes para recarregar as baterias no menor intervalo de tempo possível.

As baterias de íons de lítio com química LFP da TKMS-Saft acima descritas têm uma *C-rate* de 0,5C³⁴, ou seja, tempo de recarga de duas horas, sendo este tempo inversamente proporcional à *C-rate*. O tempo de recarga pode ser mais longo, implicando uma *C-rate* < 0,5. Porém, forçando um tempo de recarga mais curto, a *C-rate* não deve ultrapassar 0,8C, sob pena de danificar ou prejudicar a vida útil da bateria.

Pesquisamos alguns diesel-geradores clássicos para emprego em submarinos e obtivemos fartas informações sobre os MTU³⁵; menos, mas ainda suficientes, sobre os MAN³⁶; e pouquíssimas informações sobre os KHI³⁷. Os principais parâmetros de escolha, especialmente no caso de submarinos, são potência, tamanho e peso. Mas há, naturalmente, uma série de outros detalhes técnicos a considerar: *inlet pressure* ou pressão de admissão; *back pressure* ou contrapressão na exaustão, P_{me} ³⁸; e vibração/ruído (RPM/veloc pistão) e tipo de combustível. A *performance*, ou consumo específico, será tanto melhor quanto menor for a

back pressure e maior a *inlet pressure*. Esses fatores estão diretamente sujeitos às condições de mar.

O único grupo diesel-gerador cujas informações necessárias são disponibilizadas é o MTU12V4000U83. Com dimensões 4,58 x 1,50 x 2,60 m, 14 tons, 1.800 RPM, $P_{me} = 27,9$ MPa, gerando 1.300 kW mecânicos/1.040 kWe³⁹, esse modelo foi descartado neste estudo por causa da potência elétrica insuficiente para nossos propósitos.

Os diesel-geradores Kawasaki KHI 12V25/25SB (2.500 kW/2.000 kWe) e KHI 12V25/31S (3.100 kW/2.500 kWe) são incógnitas; nenhuma informação é disponibilizada pelos japoneses. São empregados dois 25SB na classe *Soryu*, sendo os dois últimos desta classe equipados com dois 12V25/31S. Seriam muito adequados, mas, por falta de dados, não podemos considerá-los neste estudo.

Então restou-nos a opção do diesel-geradores MAN. Nossa escolha recaiu em 2 x 16PA4V-200VG e 1 x 8PA4V200VG. As características estão relacionadas na Tabela 3.

Como a tensão da rede de bordo foi calculada em 594 volts, em função da arquitetura das baterias, o motor MAN16V fornece 2.120 kWe (máx.): 594 V = 3.569 Amp, e o MAN8V fornece 1.060 kWe (máx.): 594 V = 1.784 Amp. A escolha de três motores e suas combinações visam à redução da taxa de indiscrição do submarino durante a snorquelagem e a

34 Vide artigo "Baterias de Submarinos" [23].

35 MTU: Maschinen und Turbinen Union, Alemanha.

36 MAN: Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg, Alemanha.

37 KHI: Kawasaki Heavy Industries.

38 P_{me} : *brake mean effective pressure*, medida importante de motores alternativos, quanto mais elevada, melhor.

É a pressão média do cilindro nas diversas posições de seu ciclo. Pode ser vista como a capacidade de realizar trabalho independentemente da cubagem do motor. O motor de quatro tempos Wärtsila W31, considerado ótimo, tem um valor $P_{me} = 30,1$ Mpa.

39 kWe: kilowatt elétrico.

Tabela 3 – Características dos diesel-geradores MAN

	MAN 16PA4V200VG	MAN 8PA4V200VG
Nº cilindros em “V”	16	8
kW mecânicos	2.650	1.325
kW elétricos	2.120	1.060
Frequência (Hz)	60	60
Gama de rotação (RPM)	1.200 a 1.500	1.200 a 1.500
Potência por cilindro (kW)	132 a 166	132 a 166
Diam. do cilindro (mm)	200	200
Curso do cilindro (mm)	210	210
Veloc. cilindro (m/seg)	8,4 a 10,5	8,4 a 10,5
Pme (MPa)	25,8	25,8
Motores		
Comprimento (cm)	350,4	218,5
Largura (cm)	170,4	157,6
Altura (cm)	194	181
Peso (tons)	10,0	5,5
Geradores	(estimados)	(estimados)
Comprimento (cm)	280	210
Peso (tons)	8,6	4,3
Gen-Set completo	(estimado)	(estimado)
Comprimento total (cm)	630	428
Peso total (tons)	19,0	10,0
Largura (cm)	171	158
Altura (cm)	194	181
SFOC <i>surfaced</i> (g/kWh) (*)	205	205
SFOC <i>snorkeling</i> (*)	268	268

(*) Valores fornecidos pela MTU

otimização do regime de trabalho em cada situação, com foco no menor consumo específico de combustível.

Elaboramos a Tabela 4 com as cinco combinações possíveis dos diesel-gera-

dores, definindo um DOD⁴⁰ máximo das baterias igual à capacidade geradora em cada caso, para manter a menor taxa de indiscrição e com *snorkel time* de duas horas (0,5C-rate das baterias).

Tabela 4 – Cinco combinações possíveis dos diesel-geradores

	2 x MANV16 1 x MAN8V	2 x MANV16	1 x MANV16 1 x MAN8V	1 x MAN16V	1 x MAN8V
Amp total	8.922	7.138	5.353	3.569	1.784
Caso	1	2	3	4	5

40 DOD: Depth of Discharge (das baterias). Ou quantidade de energia consumida em % de cima para baixo.

Valores arbitrados e fixos como pontos de partida para elaboração da Tabela 5:

a) $P_{snort} = 358\text{kW}$ (propulsão + *hotel load*);

b) $P_{subm} = 778\text{kW}$ (idem);

c) $t_{snort} = 2,2$ horas; e

d) amperagem total fornecida por cada combinação de geradores e a $0,5C\text{-rate}$ para recarga das baterias segundo a Tabela 4.

Tabela 5 – Bateria com capacidade de 22.068 kWh (caso A) de armazenamento

Caso – Comb. geradores	t_{subm} (hs)	Tx Indiscr. (%)	DOD bat. (%)	Cap.consumida DS (Ah)
1	13,6	13,6	48,0	17.844
2	10,9	16,8	38,4	14.276
3	8,2	21,2	28,8	10.706
4	5,5	28,6	19,2	7.138
5	2,7	44,9	9,6	3.568

Exemplo 1:

Os três geradores juntos fornecem 8.922 A. Fixamos o tempo de snorquelagem em 2,0 horas para recarregar as baterias com $0,5C\text{-rate}$, trajeto de 2 h x 5 kts = 10 MN. Então, é preciso recarregar uma capacidade igual a $8.922\text{A} \times 2\text{h} = 17.844\text{Ah}$, definindo um $\text{DOD} = 17.844/37152 = 48,0\%$, ou seja, a energia a ser reposta.

Em regime DS⁴¹, o consumo é de 778kW ou 1.310A por hora, onde: $17.844\text{Ah}/1.310\text{A} = 13,6$ horas de fornecimento de energia pelas baterias, cobrindo um trajeto de $13,6\text{h} \times 10\text{kts} = 136\text{MN}$.

Além de recarregar as baterias, durante as duas horas os geradores também precisam alimentar a propulsão em regime NS⁴², que consome $358\text{kW} \times 2\text{h} = 716\text{kWh}$ ou 1.206Ah (total), resultando num tempo de snorquelagem efetivo total de $2,14\text{h} \times 5\text{kts} = 10,7\text{MN}$.

A taxa de indiscrição será:

$$TI = t_{snort} / t_{snort} + t_{subm} = \\ = 2,14\text{hs} / 2,14 + 13,60\text{hs} = 13,6\%$$

Aplicamos o mesmo cálculo para os outros quatro casos para montar a Tabela 5.

Notamos, pelos resultados, que não é interessante recarregar pequenas quantidades de energia consumida com maior frequência, a não ser que haja demandas operacionais específicas, pois a taxa de indiscrição aumenta de maneira expressiva.

Autonomia e Raio de Ação

No cálculo da autonomia e do raio de ação em todas as situações seguintes, fixamos as seguintes premissas: serão mantidas reservas de combustível de 10% das 180 toneladas embarcadas, 10% ou oito dias de AIP com demanda de 240 kW e dez dias de reserva de mantimentos dos 95 previstos para 36 tripulantes. Essas reservas são referidas à data prevista de retorno à base ou demanda de algum porto amigo. Os valores dos raios-de-ação são teóricos com correnteza zero, senão seríamos obrigados a considerar inúmeras situações, o que não é o caso no escopo deste trabalho.

No modo AIP ou patrulha com velocidade de 5 nós (240 kW) mais a *hotel-load* de 150 kW, já computada a reserva de 10%, o submarino pode permanecer em patrulha por 68 dias x 24 hs = 1.632 h *on*

41 DS: Deep Submerged (navegação com maior profundidade).

42 NS: Near Surface.

station. As premissas básicas serão um DOD das baterias igual a 50%, velocidade DS de 10 nós e velocidade de *snorkel* ou NS de 5 nós. A propulsão em DS demanda 628 Kw, e a *hotel-load* 150 kWe. Em regime NS, a propulsão demanda 98 kWe, e a *hotel-load* cerca de 260 kWe.

Em regime DS, ao atingir um DOD de 50%, a bateria terá fornecido 22.068: $2 = 11.034$ kWh ou capacidade de 18.576 Ah. A potência de $628 + 150 = 778$ kWe demanda 778 kWe: $594 \text{ V} = 1.310 \text{ A}$. Então, terão sido percorridos 18.576 Ah: $1.310 \text{ A} = 14 \text{ hs} \times 10 \text{ nós} = 140 \text{ MN}$.

Durante a recarga das baterias, será necessário gerar para repor a energia gasta mais a demanda potência de propulsão e *hotel-load* durante a snorquelagem. Os três geradores juntos produzem 8.922 Amp e, alternativamente, somente os dois maiores juntos um total de 7.138 Amp.

Os cálculos mostram que com três geradores o tempo de snorquelagem necessário seria de 2,23 h (11,2 MN) e com os dois geradores maiores seria de 2,84 h (14,2 MN). A demanda de energia do submarino durante a snorquelagem é de 358 kWh e 603 A, além da recarga das baterias. As taxas de indiscrição seriam, respectivamente, 13,74% e 16,86%. Os consumos de combustível seriam, respectivamente: a) $0,270 \text{ kg/kWh} \times 6.625 \text{ kW} \times 2,23 \text{ h} = 3.989 \text{ kg}$; e b) $0,270 \times 5.300 \text{ kW} \times 2,84 \text{ h} = 4.064 \text{ kg} (+ 1,9\%)$.

A primeira opção é melhor. Este consumo gera: $(180 \text{ t} \times 0,90) / 3,989 \text{ t} = 41$ ciclos⁴³ de snorquelagem. Então, o raio de ação (*ferry range*⁴⁴) seria de: $41 \text{ ciclos} \times (140 \text{ MN} + 11 \text{ MN}) = 6.191 \text{ MN}$. Na segunda opção (dois geradores grandes), seria de 6.216

MN, mas com consumo aumentado de 1,9% e taxa de indiscrição 22,71% maior.

Caso a tecnologia da Leydenjar seja viabilizada (caso b), a mesma bateria poderia armazenar 37.516 kWh ou uma capacidade de 63.158 Ah. Então, em regime DS e DOD = 50%, terá sido consumida uma capacidade de 31.579 Ah, que, dividida por 1.310 Amp, resulta em 24 horas de navegação submersa ou 240 MN.

Com três geradores, o tempo de recarga seria 3,8 horas. A taxa de indiscrição resultante é de 13,62%. O consumo de diesel seria: $0,270 \text{ kg/kWh} \times 3,8 \text{ h} \times 6.625 \text{ kW} = 6.797 \text{ kg}$. Resulta em $(180 \text{ t} \times 0,90) / 6,797 = 24$ ciclos. O *ferry range* seria: $24 \text{ ciclos} \times (240 + 19) = 6.216 \text{ MN}$.

A velocidade submersa de 20 nós é uma situação excepcional, quando o submarino precisa se evadir rapidamente, buscando uma nova posição segura. Portanto, nesse caso podemos arbitrar uma DOD maior para navegar o máximo possível em emergência, digamos 75%. Assim, teremos esgotado (caso A) 27.864 Ah ou 16.551 kWh.

No caso, a demanda de potência é 4.968 kW ou 8.364 Amp. O tempo de navegação possível é de $27.864 \text{ Ah} / 8.364 \text{ A} = 3,3 \text{ h}$ ou 66 MN. Atingida a nova posição, o submarino passa a operar em AIP até que o comandante tenha a certeza de que é seguro snorquelar e recarregar as baterias.

O tempo de recarga com três geradores seria de 3,4 h, e a taxa de indiscrição igual a 50,15%. Consumo de diesel: $0,270 \text{ kg/kWh} \times 3,4 \text{ h} \times 6.625 \text{ kW} = 6.082 \text{ kg}$. Número de ciclos: $(180 \text{ t} \times 0,90) / 6,082 \text{ t} = 27$ ciclos. Distância percorrida: $27 \text{ ciclos} \times (66 \text{ MN} + 17 \text{ MN}) = 2.241 \text{ MN}$.

43 Ciclos, neste caso, é o número de vezes que o submarino vai "snorquelar" até esgotar o óleo diesel. Some-se o tempo de "snorquelagem" + intervalo de tempo entre duas "snorquelagens" sucessivas = tempo de um ciclo.

44 *Ferry range* é uma distância percorrida de ponto a ponto sem operações, como um *ferry boat*.

No caso b), a energia fornecida seria de 47.369 Ah ou 28.137 kWh. O tempo de navegação seria de 5,6 h ou 112 MN, e o tempo de recarga igual a 5,7 hs. Taxa de indiscrição: $5,7h / (5,7hs + 5,6hs) = 50,44\%$. Consumo de diesel: $0,270 \text{ kg/kWh} \times 5,7 \text{ h} \times 6.625 \text{ kW} = 10.196 \text{ kg}$. Ciclos: 16, *ferry range*: $16 \times (112 \text{ MN} + 28 \text{ MN}) = 2.240 \text{ MN}$.

Surfaced (SF) at 5 knots: propulsão = $83 \text{ kW} + (\text{hotel-load}) 150 \text{ kW} = 233 \text{ kW}$. Bateria cheia, operação com *gen-set* menor trabalhando a 22% da máxima. O SFOC⁴⁵ seria em torno de 260 g/kWh (61 kg/h), resultando numa autonomia de 2.689 h ou 13.447 MN.

Surfaced (SF) at 10 knots: Propulsão = $671 \text{ kW} + (\text{hotel-load}) 150 \text{ kW} = 821 \text{ kW}$. Bateria cheia, operação com *gen-set* menor trabalhando a 77% da máxima. O SFOC seria em torno de $0,230 \text{ kg/kWh}$ (189 kg/h), resultando numa autonomia 868 h ou 8.680 MN.

a) DS: Deep Submerged, NS: Near Surface, SF: Surfaced.

b) As taxas de indiscrição para 10 nós e 20 nós são ambas combinadas com snorquelagem a 5 nós.

c) No caso de 10 nós DS, o DOD da bateria é 50% e, no caso de 20 nós DS, o DOD é de 75%.

d) O tempo de navegação submerso entre snorquelagens é chamado de *snorkeling interval*. Com a bateria maior (caso B), os intervalos ou distâncias navegadas submersas são maiores para as mesmas taxas de indiscrição.

e) Ciclos é o número de vezes que o submarino precisa snorquelar durante um trajeto.

f) Os valores da tabela contemplam as reservas estipuladas.

g) Nas tabelas computamos apenas a opção dos três geradores funcionando simultaneamente.

Tabela 6 – Resumo da autonomia e do raio de ação com uma bateria de 22.068 kWh (caso A)

Veloc. (Nós)	Prop. (kW)	Hotel (kW)	Fontes de Energia			T.I. (%)	Ciclos	Raio de ação	
			Bateria (kWh)	AIP (kW)	Diesel (tons)			Horas	Milhas Náuticas (MN)
			Bateria : 22.068 kWh AIP (kW) x 0,90 Diesel (193 t x 0,85)						
5 DS	81	150	xxxx	240	xxxx	0,00	0,00	1.632	8.160
9 DS	390	150	xxxx	480	xxxx	0,00	0,00	816	7.344
5 NS	98	260	xxxx	xxxx	164	ver b)			
10 DS	628	150	11.034	xxxx	xxxx	13,74	41	665	6.199
20 DS	4.818	150	16.551	xxxx	xxxx	50,15	27	181	2.241
5 SF	83	150	xxxx	xxxx	164	100,00	0,00	2.689	13.447
10 SF	671	150	xxxx	xxxx	164	100,00	0,00	868	8.680

45 SFOC: Specific Fuel Oil Consumption.

Tabela 7 – Resumo da autonomia e do raio de ação com uma bateria de 37.516 kWh (caso B)

Veloc. (Nós)	Prop. (kW)	Hotel (kW)	Fontes de Energia			T.I. (%)	Ciclos	Raio de ação	
			Bateria (kWh)	AIP (kW)	Diesel (tons)			Horas	MN
			Bateria: 37.516 kWh AIP (kW) x 0,90 Diesel (193 t x 0,85)						
5 DS	81	150	xxxx	240	xxxx	0,00	0,00	1.632	8.160
9 DS	390	150	xxxx	480	xxxx	0,00	0,00	816	7.344
5 NS	98	260	xxxx	xxxx	164	ver b)			
10 DS	628	150	18.758	xxxx	xxxx	13,62	24	667	6.216
20 DS	4.818	150	28.137	xxxx	xxxx	50,13	16	181	2.240
5 SF	83	150	xxxx	xxxx	164	100,00	0,00	2.689	13.447
10 SF	671	150	xxxx	xxxx	164	100,00	0,00	868	8.680

Comparando as tabelas 6 e 7, vemos que, mesmo com uma bateria mais poderosa, os raios de ação são similares. Entretanto uma bateria maior permite maior tempo de trânsito submerso ou intervalos entre snorquelagens mais longos, com os mesmos índices de indiscrição. Esta coincidência se deve aos fatos de o tempo de recarga ser mais longo e os intervalos entre snorquelagens também serem mais longos, para a mesma potência geradora.

Projeto Vidar-36, uma comparação⁴⁶

Queremos salientar que descobrimos o Projeto Vidar-36, do escritório BMT Defense Services, após termos feito os nossos cálculos. O material foi muito útil porque nos permitiu fazer uma comparação com um estudo de fonte altamente especializada. Baseados nos dados do trabalho da BMT, elaboramos um resumo do perfil do submarino *Vidar-36*.

O estudo *Vidar-36* é de um submarino com deslocamento submerso de 3.600

tons, porém não constam informações sobre suas dimensões. O motor de propulsão proposto é um Siemens Permasyn de 5,3MW, similar ao do *U-6800*, que permite atingir uma velocidade de pico de 20 nós submerso. A bateria armazena energia de 13.662 kWh, e o sistema AIP com células combustíveis possui um reformador de metanol para produzir hidrogênio a bordo para autonomia de 21 dias com potência de 240 kW. São previstos dois grupos geradores MTU12V4000U83 de 1.300 kW cada ou 1.040 kWe, que consomem cerca de 268 g/kWh de combustível quando snorquelando.

A bateria de íons de lítio tem química NCA da Gaia Batterien GmbH. São 330 módulos conectados em 33 *strings* em paralelo, cada *string* com dez módulos em série. A capacidade máxima é de 16.500 Ah com 828 V, resultando em 13.662 kWh. Calculamos para o sistema AIP com demanda de 240 kW durante 21 dias um estoque de 28 tons de metanol e 30 tons de LOX. O estoque de diesel definido no

46 [2], [3] e [4].

estudo é de 176 tons, mas sem previsão de uma margem de reserva.

Considerando um DOD de 50% para as baterias e potências de propulsão e *hotel-load* iguais às do U-6800, o submarino navega 97 MN com 11 nós e o tempo de recarga de 3,28 h a 6 nós, resultando numa taxa de indiscrição de 27,2%. Com os dados do estudo da BMT, o raio de ação com diesel é de aproximadamente 6.096 MN para 40 dias de trânsito e 21 dias em missão *on station* com AIP a 5 nós. Os resultados estão resumidos na Tabela 8, que deve ser comparada com as tabelas 6 e 7, do U-6800.

Observe o leitor como geradores e baterias menores influenciam negativamente a taxa de indiscrição do submarino, muito piores do que no U-6800. Os valores da Tabela 8 devem ser comparados aos das tabelas 6 e 7. Os raios de ação do Vidar-36 e do nosso U-6800 se equivalem. Mas o U-6800 supera em mais de três vezes a autonomia AIP.

Atmosfera interna do submarino

Os submarinos diesel-elétricos precisam emergir periodicamente para snorquelar e recarregar as baterias e purificar a atmosfera a bordo. Com o advento da propulsão nuclear em 1957 e, há poucas décadas, da fonte de energia AIP e baterias de íons de lítio, os submarinos convencionais podem permanecer mais tempo submersos; os nucleares, “indefinidamente”⁴⁷.

Esse fato obrigou os engenheiros a repensarem a questão da atmosfera interna. Este item é classificado, no mesmo nível de importância, como a propulsão, as armas e o sistema de combate. Os submarinos são tripulados por seres humanos que precisam respirar, e sem eles não há como operar submarinos.

A composição típica dos principais gases da atmosfera terrestre do ar seco é: $\rho = 0,00122 \text{ g/cm}^3$, $T = 20^\circ\text{C}$ e pressão barométrica de 760 mmHg, mostrada na Tabela 9, desprezando-se outros gases com teores ínfimos.

Tabela 8 – Valores calculados pelo autor para o Vidar-36

<i>VIDAR-36</i>	Snort intervals battery DS	Fuel spent per recharge /tot cyclenumber	Indiscr. rate	Range on diesel fuel	Transit time on diesel fuel	Mission time on station
DS 10 kts NS 5 kts	8,8 h 88 MN	2.766 kg 63,6 ciclos Snort time = 3,97 h	31,09%	6.860 (2) n.m. 2 x 3.430	34 dias	21 dias
DS 11 kts NS 6 kts	7,0 hs 77 MN	2.885 kg 61 ciclos Snort time = 4,14 h	37,13%	6.212 (3) MN 2 x 3.106	28 dias	21 dias
DS 12 kts NS 8 kts	5,6 hs 68 MN	3.526 kg 49,9 ciclos Snort time = 5,06 h	47,30%	5.413 (5) MN 2 x 2.706	22 dias	21 dias

47 Limitados ao fator humano e ao estoque de mantimentos.

Tabela 9 – Composição típica dos principais gases da atmosfera e pressão

Componente	Símbolo	Peso específico g/cm ³	Volume %	Peso específico do ar	Pressão parcial (Torr) ⁴⁸
Nitrogênio	N ₂	0,001178	78,09	0,0009199	593
Oxigênio	O ₂	0,001429	20,95	0,0002994	159
Argônio	Ar	0,001664	0,93	0,0000015	7
Dióxido C	CO ₂	0,001980	0,03	0,0000006	1
Total			100,00	0,0012214	760

Tabela 10 – Composição típica da atmosfera de um submarino convencional⁴⁹

Componente	Limite Max.	Componente	Limite Max.
NO ₂	0,0005%	NH ₃	0,0025%
CO ₂	0,5%	O ₃ (ozônio)	0,00001%
.CO	0,0035%	H ₂	2,0%
SO ₂	0,0002%	Cl ₂	0,00001%
Formaldeídos	0,0002%	H ₂ O ₂ (peróxido H ₂)	0,00001%

A atmosfera no interior do submarino difere daquela da natureza em três aspectos importantes: maior variação dos teores de oxigênio e dióxido de carbono no ar; presença de uma grande gama de contaminantes orgânicos e inorgânicos; e problemas associados à toxicidade de algumas substâncias. Os dois últimos ganham relevância devido ao volume de ar limitado e confinado.

Mais de 50 contaminantes, inclusive materiais altamente reativos, como ácido fluorídrico, monóxido de carbono, dióxido de nitrogênio e ozônio, foram encontrados em quantidades mensuráveis a bordo de submarinos operacionais em geral. Cerca de 40 foram identificados como oriundos de cigarros, tanques sanitários, gases de

baterias, lubrificantes, tintas, adesivos, cozinha, exaustão dos motores, arcos elétricos (centelhas), fluidos de refrigeração, combustíveis em geral e, frustrante, produtos dos próprios sistemas de purificação da atmosfera interna.

Submarinos em missão apresentam flutuações nas pressões parciais de oxigênio e barométrica⁵⁰. As condições de contorno para o controle da atmosfera interna são:

$P_{O_2} = 119$ a 160 Torr (pressão parcial de oxigênio)

$P_B = 700$ a 810 Torr (pressão barométrica)

$\%O_2 = 17,0$ a $21,0\%$ (percentagem de oxigênio no ar interno)

48 Torr: Medida da pressão atmosférica normal ao nível do mar equivalente a 760 mmHg = 1 bar = 1 kgf/cm².

49 Loncar (1997).

50 As pressões barométrica e parciais dos diversos gases são medidas na unidade Torr, que equivale a 760 mm Hg, 1,0 atmosfera ou 1,0 kgf/cm² ao nível do mar e 20°C. A unidade Torr homenageia o cientista italiano Evangelista Torricelli.

A pressão parcial de oxigênio determina quanto oxigênio é carregado por unidade de sanguínea. Em indivíduos saudáveis, o sangue arterial tem uma oxigenação maior do que 90% e, para que isto ocorra, a pressão parcial do oxigênio deve ser maior do que 110 Torr, o que previne a ocorrência de hipóxia.

Os problemas que surgem e agem diretamente no cérebro são a hipóxia, enjoo por descompressão, envenenamento por oxigênio, aumento de dióxido e monóxido de carbono, ozônio e outros. Os sintomas sofridos pelo indivíduo podem ser tontura, visão turva, falta de clareza de raciocínio, falta de coordenação muscular, estupor, dificuldade de respirar e, finalmente, inconsciência.

Os efeitos biológicos de contaminantes são classificados em geral como advindos de produtos irritantes de mucosas, vias aéreas, pele e olhos, principalmente. Os contaminantes asfixiantes interferem no metabolismo do indivíduo.

A atmosfera de um submarino precisa ser constantemente controlada e monitorada. A US Navy utiliza um sistema chamado CAMS MK II (Central Atmosphere Monitoring System), equipado com espectrômetro de massa e espectrofotômetro infravermelho, além de alguns outros recursos.

Sistemas de dosagem de oxigênio e purificadores para extrair, principalmente, o dióxido de carbono do ar são, disparados, os dois itens mais importantes do sistema de controle da atmosfera a bordo. Outros contaminantes, como hidrogênio⁵¹ e monóxido de carbono⁵², entre outros, têm processos de controle específicos, além dos purificadores de VOC (Volatile

Organic Compounds)⁵³ com filtros de carvão ativado.

No U-6800 deste estudo, o volume interno do casco de pressão tem 2.178 m³. Estimamos que 1.000 m³ (aproximadamente 50%) sejam ocupados por motores, equipamentos, instalações, aparelhos e armas, entre outros itens. Sobram então 1.178 m³ de ar respirável para 45 tripulantes (36 + 9). Definimos arbitrariamente como limites inferior e superior de CO₂ no ar, respectivamente, 0,2% e 0,7%. A purificação do ar deve ser constante e contínua.

Temos: limite inferior de teor de CO₂ = 1.178.000 litros de ar x 0,002 = 2.360 litros e limite superior = 1.178.000 litros de ar x 0,007 = 8.246 litros de CO₂. O gradiente é de 5.886 litros de dióxido de carbono, que precisam ser retirados da atmosfera interna num dado intervalo de tempo, calculado a seguir.

No intervalo de uma hora, a tripulação respira, em média, 45 x 8 litros/min x 60 min = 21.600 litros/h de ar. Os tripulantes inalam ar com 21% de oxigênio e o exalam com 15% de O₂, resultando num consumo de 21.600 x 0,06 = 1.296 litros de O₂ /hora, que precisam ser repostos a partir dos tanques de LOX, no caso dos convencionais com AIP.

No mesmo intervalo de tempo de uma hora, os tripulantes produzem a mesma quantidade, ou 1.296 litros CO₂ /hora, ou uma média de 0,48 litros/min/tripulante. Mas existe o fator RQ⁵⁴ = CO₂/O₂ = 0,85, função do metabolismo dos indivíduos, que resulta num consumo efetivo maior de oxigênio do que produção de dióxido de carbono: RQ = CO₂/0,85 = 1.296/0,85 = 1.525 litros O₂/hora (0,57 litros O₂/min/trip.).

51 O hidrogênio é oriundo de vazamento das baterias de chumbo ácido.

52 O monóxido de carbono é oriundo de más vedações nas descargas dos motores diesel-geradores.

53 Compostos Orgânicos Voláteis.

54 RQ: Respiration Quocient.

Considerando a necessidade de retirar continuamente 5.886 litros de CO₂ do ar interno e os tripulantes produzindo 1.296 litros de CO₂ /hora, temos o tempo necessário para esta purificação: 5.886 litros CO₂ /1.296 litros CO₂ /hora = 4,54 horas, intervalo em que ocorreria a saturação de dióxido de carbono e que se repete 5,3 vezes/dia.

Ou trata-se do número de ciclos de reforma completa da atmosfera, dentro dos limites estabelecidos para os teores inferior e superior de dióxido de carbono. Em cada ciclo de purificação o sistema deve circular $1.178 \text{ m}^3 \div 4,54 \text{ h} \approx 260 \text{ m}^3/\text{h}$ de ar.

Calculando a Reserva de Volume segundo o critério alemão⁵⁵, com base nos consumos de oxigênio e produção de dióxido de carbono, temos:

$$R_{\text{R CO}_2} = (1.178.000 \text{ l ar} \times 0,005) / (28,8 \text{ l CO}_2 / \text{hr} \times 45 \text{ trip}) = 4,54 \text{ horas};$$

$$R_{\text{R O}_2} = (1.178.000 \text{ l ar} \times 0,06) / (33,9 \text{ litros O}_2 / \text{h} \times 45 \text{ trip}) = 46,33 \text{ horas};$$

A reserva de volume é o tempo que permite a tripulação respirar antes que seja necessário retirar dióxido de carbono ou acrescentar oxigênio à atmosfera interna do submarino. O volume de ar tem uma reserva de oxigênio suficiente para a tripulação viver 46,33 horas dentro dos limites preconizados pelo Ministério da Defesa da Alemanha (BMVg 485/1). Porém, após apenas 4,54 horas o teor de dióxido de carbono já atinge 1%, valor que não pode ser ultrapassado. Donde, a saturação com dióxido de carbono é o fator limitante.

O volume de LOX no item “carga variável” do U-6800 já contempla um

percentual de oxigênio líquido para uso no controle da atmosfera interna. É muito mais viável e econômico lançar mão desse recurso, pois os processos conhecidos de eletrólise da água para gerar oxigênio (e hidrogênio) a bordo são aplicáveis aos submarinos nucleares em função da energia disponível para esse processo. No caso do nosso estudo, temos a seguinte demanda por oxigênio: 80 dias submerso x 24 h x 1.525 litros O₂/h = 2.928.000 litros oxigênio gasoso nas CNTP⁵⁶: $2.928 \text{ m}^3 : 860 = 3,4 \text{ m}^3$ de LOX x $1.141 \text{ kg/m}^3 = 3,9$ tons de LOX, quantidade necessária para regenerar o teor de O₂ na atmosfera interna.

O processo não regenerativo mais comum de retirada ou filtragem de dióxido de carbono da atmosfera do submarino, utilizado desde os primórdios em submarinos convencionais, exceto nos nucleares, é a filtragem com cartuchos de hidróxido de sódio e cálcio ou hidróxido de lítio. O material filtrante pode assimilar CO₂ em peso igual a ¼ do peso de hidróxidos. Para assimilar o CO₂ são necessários 80 dias x 24 h x 1.296 litros/hora de CO₂ x 1,98 g/litro x 4 = 19.708 kg ou 8.918 litros (8,9 m³) de hidróxido (peso e volume respeitáveis para um submarino desse porte).

Alternativamente, o processo regenerativo mais utilizado em submarinos nucleares e alguns poucos convencionais emprega o MEA (MonoEthanolAmina) na forma líquida em solução aquosa de 30% em peso. Na primeira coluna, ou *scrubber*⁵⁷ ou *absorber*, o ar viciado passa por filtros embebidos com MEA líquido, que retira o CO₂ do ar circulante com temperatura entre 60° a 80°C. O ar, depois de filtrado, retorna à atmosfera interna.

55 Apostila fornecida pelo Comandante Wallner.

56 CNTP: Condições Normais de Temperatura e Pressão. 20°C para pressão atmosférica de 1 kgf/cm².

57 *Scrubber*: lavador.

A solução MEA rica em CO_2 passa à segunda coluna, chamada de *stripper*⁵⁸, ou *desorber*, onde, com temperaturas entre 130°C a 160°C aproximadamente, a reação química da solução se inverte, regenerando o MEA e liberando o CO_2 para ser refrigerado, comprimido e bombeado ao mar. O processo MEA trabalha sob pressão próxima da atmosférica (vide circuito esquemático na Figura 3).

Encontramos em trabalho do I&EC⁵⁹ dados sobre o balanço de energia do processo completo. Para uma temperatura média de 85°C na totalidade do circuito, a energia consumida é de 4,3 GJoules/ton CO_2 .

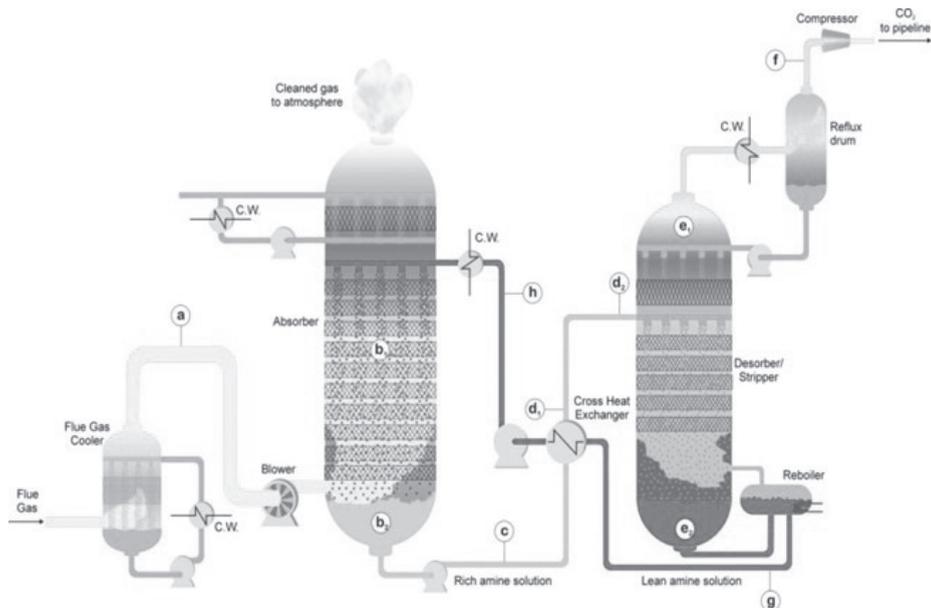
Fazendo as contas para a nossa produção de dióxido de carbono, chegamos a uma demanda de energia da instalação

igual a 3.084 Wh/h. A rede de bordo tem 594V, onde uma corrente elétrica = 5,2 Amp é necessária. Devido à nossa incerteza, além das perdas e demandas de bombas e geradores de calor, vamos exagerar e triplicar estes valores para 9.000 Wh/h e 15 Amp.

No trabalho em questão⁶⁰, temos uma instalação de grande porte com duas colunas iguais, uma de absorção e outra de regeneração, tratando um fluxo de ar de $Q = 0,115 \text{ m}^3/\text{seg}$. Cada coluna tem $H = 6,10 \text{ m}$, volume = $0,874 \text{ m}^3$ e seção reta $S = 0,1432 \text{ m}^2$, o que resulta numa passagem do ar com $v = 0,803 \text{ m/seg}$.

No nosso caso, estamos falando de cerca de 260 m^3 de ar/h ou $0,0722 \text{ m}^3/\text{seg}$. Por regra de três, concluímos que cada coluna, para o nosso processo, deveria

Fig. 3 – Circuito esquemático do processo utilizando MEA sob forma líquida



58 *Stripper*: separador.

59 I&EC – Industrial & Engineering Chemistry Research, Holanda. Trabalho publicado em 18/12/2017, no American Chemical Society Publications.

60 CET – Chemical Engineering Transactions, vol. 32, 2013. Publicado pela AIDIC – The Italian Association of Chemical Engineering.

ter mais ou menos $0,634 \text{ m}^3$, arbitrando uma altura de 200 cm e diâmetro de 60 cm, onde o ar passa com $v = 0,255 \text{ m/seg}$, veloc menor que aumenta a eficiência ou tempo de reação para a absorção do CO_2 . A partir deste valor, estimamos que uma instalação poderia ter cerca de $4,0 \text{ m}^3$, menos do que $9,0 \text{ m}^3$ de hidróxidos. O peso poderia ser algo como 5,0 tons, bem menos do que 19,7 tons de hidróxidos.

A demanda de energia do processo regenerativo calculada acima e as vantagens de peso e volume sobre os hidróxidos justificariam examinar seriamente a opção regenerativa com MEA. Não computamos as perdas do processo, mas queríamos apenas avaliar se as ordens de grandeza e viabilidade de volumes, pesos e demanda de energia são compatíveis com o submarino deste nosso estudo.

Armas

Como já dito antes, todas as armas embarcadas num SSN podem também ser embarcadas por um SSK/SSP, exceto, naturalmente, os SLBM⁶¹ embarcados em *boomers*. Contudo, o mais recente SSP lançado pela Coreia do Sul, classe *Dosan Ahn Chang-ho*, prevê o embarque de mísseis balísticos.

Nosso critério inicial foi considerar uma carga de 30 HWT⁶² de 1,6 ton e até 7,0 m de comprimento, ou seja, uma base de 48 tons para uma carga completa de diversas armas, como relacionado acima no item “Carga Variável”. O submarino seria equipado com seis tubos de 533 mm capazes de lançar qualquer tipo de arma listada abaixo.

Iniciando com a arma mais óbvia, o torpedo, relacionamos os principais

modelos europeus e americanos existentes: Sea Hake (Alemanha), Black Shark (Itália), Adcap Mk-48 (EUA), Spearfish (Reino Unido) e F-21 (França), todos mais ou menos de mesmas dimensões, pesos, velocidade, alcance e letalidade.

Entre os mísseis antinavio e ataque à terra, alguns são menores e mais leves do que os HWT, possibilitando um número maior de mísseis, por exemplo: Exocet SM-39B2Mod.2 (L=6,0 m; M=780 kg) e Harpoon UGM-84L BlockII (L=4,6 m; M=691 kg). Mas o Tomahawk 109E TLAM BlockIV (L=6,25 m ; M=1.600 kg) equivale a um HWT.

Outra arma tradicional para submarinos são as minas de fundo. Citamos aqui a SLMM – Submarine Launched Mobile Mine Mk-67, lançada dos tubos. A mina Mk-67 (US Navy) é acomodada num torpedo Mk-37 mod.2 (total: L = 4,1 m, D = 0,49 m, 754 kg), com ogiva na classe de 1.000 kg com alcance de até 9 MN, *wire guided* ou autonomamente.

A arma mais recente e “inovadora” é o míssil antiaéreo contra helicópteros BGT-Diehl IDAS – Interactive Defense and Attack System. Um contêiner especial com dimensões e peso semelhantes a um HWT acomoda quatro mísseis. O míssil é fio-guiado com fibra óptica e lançado pelo tubo. Já é um produto testado e aprovado, devendo ser incorporado aos submarinos alemães a partir de 2023.

Há muitas opções de defesa antitorpedo nos modos *hard kill*, torpedo antitorpedo de aproximadamente 2,00 m muito rápido, *soft kill* ou *decoys*. Fabricantes como Atlas-Elektronik, Leonardo, Rafael, Naval Group etc. oferecem uma gama de opções em tamanho, peso e modos operacionais.

61 SLBM: Submarine Launched Ballistic Missile.

62 HWT: Heavy Weight Torpedoes.

A novidade mais recente fica por conta das pesquisas para o emprego dos ROV⁶³, que ainda estão sendo testados. Algumas questões estão em aberto, mas logo se tornarão uma realidade. Exemplos atuais que podem ser lançados por tubos de 533 mm: Bluefin Robotics – Bluefin 21 e Knifefish Mk-21 (EUA); Atlas Eletronik – Sea Fox, Sea Wolf e Sea Cat (Alemanha); e Kongsberg – Remus 600 (Noruega). Servirão para vários tipos de missão, como coleta de informação, levantamento topográfico do fundo e destruição de alvos.

Sensores

Este capítulo seria extenso demais se entrássemos em detalhes; caberia um artigo específico. Portanto faremos apenas um resumo dos clássicos sensores de um submarino.

A gama de sonares de um submarino o faz parecer um “porco espinho”. São basicamente oito os tipos: Mine and Obstacle Avoidance, Active Search/Attack, Bottom Navigation, Intercept Passive Low Frequency, Aft Array, Bow Conformal Array, Flank Arrays & Passive Ranging and Towed Array e Submarine-Telephone.

Na torre (*sail*) temos uma gama de mastros com várias finalidades. Temos os não eletrônicos, como o *snorkel*/exaustão e admissão de ar de respiração para a atmosfera interna. Em alguns casos, o mastro do *snorkel* monta uma antena ESM (Electronic Support Measures) para

reduzir a assinatura radar quando snorquelando, utilizando um mastro com dupla finalidade. Mas adicionalmente temos um mastro dedicado de ESM/ECM-Electronic Counter Measures.

Há outro mastro de comunicações, um mastro de radar, geralmente dois periscópios de busca e outro de ataque, que, em muitos casos, são combinados com mastros optrônicos, que não têm penetração no casco de pressão, como é o caso dos periscópios.

A classe *U-212A* pode receber e transmitir dados e mensagens até uma profundidade de 30 metros. Para profundidades maiores, a firma Gabler desenvolveu o sistema Calysto, que nada mais é do que uma boia de comunicações rebocada para mensa-

gens e dados. Opera nas frequências UHF Satcom, UHF LOS, VHF, HF e GPSL1/L2. Como exemplo, a Atlas-Elektronik desenvolveu a antena Gateway e a Babcock International criou a RTBC (Recoverable Tethered Comms Buoy), similares à Calysto.

Especial atenção deve ser dada aos Sistemas de Combate, os verdadeiros cérebros dos submarinos. Sem um moderno e eficiente, o meio naval se torna um alvo

Especial atenção deve ser dada aos CMS (Combat Management Systems), os verdadeiros cérebros dos submarinos ou de qualquer navio de guerra. Sem um sistema de combate moderno e eficiente, o meio naval se torna um alvo. O sistema integrado de combate funde e coordena todas as ações deste tipo, com base nas informações recebidas de sonares, radares, comunicações, sistemas de guerra eletrônica e demais sensores existentes no submarino ou em outro tipo de navio.

63 ROV: Remotely Operated Vehicle.

Entretanto o grande público acha que somente a versão mais moderna de um sistema de combate é o que importa, mas, de fato, o treinamento e o aprestamento dos tripulantes operadores do sistema têm um peso imenso no desempenho do submarino. Operadores bem treinados com um sistema menos sofisticado são capazes de superar um sistema mais moderno que seja operado por tripulantes mal preparados.

No mundo ocidental existem várias firmas (principais), como Raytheon, BAe Systems, Naval Group, Leonardo, Atlas Elektronik, Kongsberg, SAAB etc., que dominam o mercado de sistemas de combate. A P&D e a base industrial para a produção de apenas um número limitado de produtos os tornam caríssimos, inviabilizando muitas iniciativas autóctones em outros países. Muitos dos sistemas de combate são, inclusive, produzidos em parcerias entre os grandes grupos internacionais dos países desenvolvidos.

A grande questão na obtenção de armas, sistemas de combate, radares, guerra eletrônica, sistemas de comunicação, sonares etc. é o fato de os países fornecedores (e suas forças armadas) poderem lançar mão de recursos industriais para neutralizar ou degradar armas e sistemas fornecidos a clientes que eventualmente possam vir a ser seus inimigos no futuro – ou aliados de seus inimigos. Os fabricantes chamam esses recursos de *back doors* ou porta dos fundos. Ou *bugs*, no jargão da informática.

Aos incautos ou ingênuos resta acreditar na falácia da “transferência de

tecnologia” como solução mirabolante. Primeiro, ninguém fornece seus produtos de ponta ou mais recentes, certamente só aqueles que já estão a caminho da obsolescência ou os que o fornecedor está disposto a vender. Segundo, em qualquer situação ou qualquer nível de “transferência de tecnologia”, é fundamental que o cliente tenha conhecimento e competência tecnológica para absorver a nova tecnologia.

Essa prática internacional tem como consequência direta o desestímulo ao desenvolvimento de tecnologias próprias nos países atrasados, onde aqueles que detêm o poder decisório somente querem resultados rápidos e sucesso político.

**O país que almejar
independência e soberania
deve dominar a educação,
a cultura e a ciência e
criar uma mentalidade de
pesquisa e arrojo para criar
e projetar sem medo de errar**

Recomendamos a respeito o artigo “Transferência de Tecnologia”, de autoria do Vice-Almirante (Ref^o-EN) Elcio de Sá Freitas, publicado na revista *Navigator* n. 20, da Diretoria do Patrimônio Histórico e Documentação da Marinha (DPHDM).

Então, se um país não tiver uma base industrial capaz de produzir material bélico, armas e equipamentos eletrônicos sofisticados ou não tiver uma demanda mínima e contínua da parte de suas forças armadas para sustentar sua indústria, a saída é formar profissionais nas áreas de física e engenharia em geral, especialmente eletrônica e informática, mantendo laboratórios, centros de pesquisa e oficinas especializadas sob a égide dos militares (financiamento público).

A iniciativa privada não tem como sustentar tal iniciativa se não houver encomendas contínuas. Esses centros

tecnológicos e laboratórios militares deveriam estar em condições intelectuais e materiais para “destrinchar” os produtos comprados, mantê-los, repará-los, adaptá-los ou modificá-los a ponto de neutralizar os eventuais *bugs* deixados pelos fabricantes fornecedores, como medida de autoproteção.

O país que almejar independência e soberania deve dominar a educação, a cultura e a ciência e criar uma mentalidade de pesquisa e arrojo para criar e projetar sem medo de errar. “Quem não arrisca não petisca”, como aprendemos com nossos pais e avós. Caso contrário, o país continuará a comer na mão dos outros, pagando preços exorbitantes pelos produtos que lhe serão “permitidos” obter.

CUSTOS DE OBTENÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO

Este item é muito difícil de apresentar em função dos sigilos militares e comerciais que envolvem os custos ou valores relativos à obtenção, operação e manutenção de submarinos. Existem dezenas de informações ostensivas das mais variadas fontes, mais ou menos confiáveis, mas que não nos dão uma certeza absoluta. Então, queiram os leitores aceitar os números apresentados com a devida cautela, a rigor mais como orientativos, pois certeza não há como ter.

Segundo informação de Raimund Wallner [26], no caso de submarinos convencionais modernos com AIP, costumava-se estimar um custo inicial de aproximadamente €300K/ton *standard* ou peso leve (A1 = 2.375 tons na tabela 1). Mas os custos aumentaram de forma vertiginosa, como mostraremos adiante. No presente estudo, o custo de série estimado de um submarino *U-6800* seria,

inicialmente, de cerca de € 712,5 milhões. O primeiro da nova classe certamente passaria de €1 bilhão.

O sistema de reforma de metanol para produção de hidrogênio a bordo, proposto para o *U-216* na recente concorrência para a RAN e adotado para o *U-6800*, desenvolvido pela TKMS para alimentar as células PEM, é uma tecnologia madura, mas que ainda não foi empregada por falta de encomenda de um submarino com as dimensões adequadas ou vontade do cliente. Sua instalação a bordo exige um deslocamento acima de 2.500 tons *surfaced* e diâmetro do casco de pressão > 7,0 m.

Novas tecnologias geram incertezas, custos e riscos. Entretanto, como comentado acima e demonstrado em nosso artigo da *RMB* [22], trabalhar com metanol para obter hidrogênio é muito mais seguro e custa entre três a quatro vezes menos do que o hidrogênio gasoso ou líquido estocado em hidretos metálicos, como nos *U-212A* (Alemanha e Itália), resultando numa expressiva economia operacional.

Mas como grandes decisões são tomadas a nível político por pessoas que não têm formação técnica, novas tecnologias enfrentam grandes obstáculos para se impor. Ou, geralmente, se impõem com grandes atrasos, como a história está repleta de exemplos. Estranhamente, a nova classe *U-212CD* não terá, ainda, a tecnologia da reforma de metanol para produção de hidrogênio a bordo.

A nova classe *U-212CD*, 2.500 tons *surfaced* (aproximadamente 2.100 tons *standard*) e L = 73m e B = 10m, Noruega (4x) e Alemanha (2x), segundo a imprensa especializada, custará cerca de €7,3 bilhões. As aprovações parlamentares e os pedidos já foram concluídos neste ano de 2021.

Cada submarino norueguês custará €1,125 bilhão; cada alemão, €1,4 bilhão⁶⁴. Excluindo o IVA⁶⁵, temos um custo de €1,125 bi: 2.083 tons std.= €540K/ton. Podemos, então, rever nossa estimativa do custo em série do *U-6800* para € 499K/ton (média aritmética dos *U-212CD*, *U-218SG* e *U-212NSF*) x 2.375 tons = €1,185 bilhão.

Os submarinos alemães são construídos em aço não magnético (uma liga de níquel-cromo) devido às particularidades do Mar Báltico, raso e ainda com centenas de milhares de toneladas de minas ativas no fundo do mar. Contudo, o Comandante Wallner recomenda que se construam submarinos com este aço devido ao progresso das técnicas magnéticas de detecção ASW. O emprego do aço não magnético eleva o custo de construção do casco de pressão do submarino em cerca de 10%.

Os quatro submarinos da classe *U-212A* do primeiro lote (1994) custaram cerca de €400 milhões, ou €312K/ton. Já os dois submarinos do segundo lote (2006) custaram €600 milhões, ou €468K/ton, um espantoso aumento de 50% num intervalo de 12 anos para uma classe de submarinos existente e aprovada, num país com baixa inflação como no caso da Alemanha.

Os quatro submarinos em construção pela TKMS para Singapura, os *U-218SG*, custam €774 milhões (2018) ou €475K/ton aproximadamente. A nova classe italiana em fase de aprovação e baseada nos *U-212A*, chamada *U-212NFS*⁶⁶, tem uma estimativa de custo (2020) de €675 milhões: 1.400 tons std. = €482K/ton.

Nos EUA, segundo o Congressional Research Service, do Congresso, os

submarinos da classe *Virginia* custam US\$2,800 milhões para serem obtidos, mas, a partir de 2020, os que receberem o VPM- Virginia Payload Module custarão US\$3,45 milhões.

Dividindo os valores acima pelo deslocamento *standard* do *Virginia (Block IV)*, de 5.850 tons, e *Block V*, com 7.555 tons *standard*, teremos, respectivamente, US\$479K/ton (€412K/ton) e US\$457K/ton (€393K/ton).

A classe *Astute*, da Royal Navy, sofreu muitos tropeços desde 1995, quando o grupo GEC-Marconi ganhou a concorrência para projetar e construir a nova classe de submarinos. O grupo foi comprado pela British Aerospace em 1999, dando origem à BAe Systems.

Em 2015, o UK National Audit Office apresentou o Major Projects Report, sobre os custos dos novos submarinos, cujo programa já acumulava cinco anos de atraso naquele momento. Os custos estimados até a conclusão eram os seguintes: 1º ao 3º (*Astute*, *Ambush* e *Artful* – em serviço), £3,536 bilhões; 4º (*Audacious* – em serviço), £1,492 bilhão; 5º (*Anson* – *out fitting*), £1,420 bilhão; 6º (*Agamemnon* – em construção), £1,533 bilhão; e 7º (*Agincourt* – em construção, com incorporação prevista para 2026), £1,640 bilhão. Se fizermos uma mera média aritmética, obteremos um valor médio para os sete submarinos igual a £2,385 bilhões, ou £413K/ton (€491K/ton).

Estes custos específicos relativamente próximos, variando de €393K/ton a €540K/ton em valores mais atuais, convencionais e nucleares confundidos, mostra que os custos de obtenção dos

64 Sobre a produção dos submarinos para a Marinha da Alemanha a TKMS paga o IVA-Imposto de Valor Agregado (Mehr Wert Steuer). Os noruegueses como produto de exportação não são taxados.

65 Imposto sobre Valor Agregado.

66 NFS: Near Future Submarine.

Tabela 11 – Comparação de custos específicos – custo total dividido pelo deslocamento *standard* do submarino

<i>U-212A</i> 1º lote (1994)	<i>U-212A</i> 2º lote (2006)	<i>U-212CD</i> (2020)	<i>U-212NFS</i> (2020)	<i>U-218SG</i> (2020)	<i>U-6800</i> ⁶⁷ estimado	<i>VIRGINIA</i> Block IV (2019)	<i>VIRGINIA</i> Block V (2021)	<i>ASTUTE</i> (2015)
€312K/t	€468K/t	€540K/t	€482K/t	€475K/t	€499K/t	€412K/t	€393K/t	€491K/t

submarinos em valores absolutos são diluídos pelos respectivos deslocamentos *standard*. Explicando: comparando dois modelos distintos, um *U-212CD* com deslocamento *standard* de 2.100 tons e custando €1.125 milhões, excluído o IVA alemão, o *Virginia Block IV* desloca *standard* 5.850 tons (+178%) e custa €2.408 milhões (+114%).

A diferença dos custos absolutos maiores dos nucleares se deve, primeiramente, ao volume maior e aos respectivos equipamentos; em segundo, à maior quantidade de equipamentos e sensores eletrônicos + armamento; e, em terceiro, principalmente, à propulsão nuclear – reator, combustível HEU⁶⁸ e auxiliares específicos para o funcionamento do reator, turbinas, trens de redução e propulsão com *water pump jet*.

O autor recebeu de fonte segura informações sobre os custos do submarino alemão *U-211* desenvolvido pelo BWB⁶⁹ em 1987, nunca construído, cujo projeto foi sucedido sete anos mais tarde, em 1994, pelo atual *U-212A*.

As proporções de cada item de custo do *U-211* elaboradas à época, são as seguintes:

- SWBS100 - casco e apêndices: 12,63, SWBS200; - propulsão: 10,64% ;
- SWBS300 - instalações elétricas: 3,03% ;

- SWBS400 - navegação, Sistema de Combate, Operação, Eletrônica: 15,48% ;
- SWBS500 + SWBS600 - 6,68% ;
- SWBS700 - Armamento: 3,60% ;
- desenvolvimento do Sistema de Combate: 20,92% ;
- instalações de teste em terra, *software* e documentação: 8,31% ; e
- aparelhagens especiais, ferramentas, simuladores de treinamento, assessoria técnica e documentação, sobressalentes e imprevistos: 18,71%.

Esses resultados nos dão uma boa ideia da divisão ou distribuição do custo de obtenção de um submarino convencional. Mesmo sendo de outra época, há 34 anos, essa distribuição pouco deve ter mudado proporcionalmente. Talvez, hoje, haja mais ênfase em eletrônica e sistema AIP. Importante notar que o quesito sistema de combate mais eletrônica perfaz 44,71% do custo total de obtenção.

Numa das raras informações obtidas pelo autor sobre custos de operação e manutenção, encontramos na internet um livro publicado por Philipp Gallhöfer⁷⁰. Nele consta que os 38 submarinos convencionais da União Europeia têm em média um custo operacional de €211 milhões/ano. Resulta em €5,553 milhões/ano/submarino ou, grosso modo, US\$ 6,67 milhões, em que 28% são despesas

67 Valor calculado como média aritmética dos *U-212CD*, *U-212NFS* e *U-218SG*, em valores atuais.

68 HEU: Highly Enriched Uranium.

69 BWB: Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung. Hoje mudou o nome para BAAINBw.

70 *Effizienz und Effektivität durch Verteidigungs Kooperation*. Springer Verlag, 2013.

com o pessoal e 72% custos com operação, como combustíveis, mantimentos, armas etc. Há variações de custos entre os países europeus. No topo da lista está a Alemanha, com os custos mais elevados, e na base, países como Romênia e Bulgária, com os menores custos.

Conforme o *site* Bringing Ingenuity to Life publicou em agosto de 2021, o custo operacional anual da classe *Virginia* monta a US\$50 milhões/submarino. A fonte dessa informação é o Government Accountability Office do Congresso norte-americano. Outro exemplo, com informações do Congressional Budget Office (Congresso dos EUA), mostra que, no período de 2007-2017, no ano fiscal 2018, foram efetuados 33 *overhauls* de submarinos da classe *Los Angeles* em estaleiros públicos e privados, classificados como DSRA (Docking Selected Restricted Availability), por US\$56,9 milhões.

Um mapa do Navsea⁷¹ mostra como os quatro Life Cycle Maintenance Programs mudaram desde 1974. No início, a vida útil da classe *Los Angeles* era de 30 anos, contando com 12 missões (deployments). Atualmente, o ciclo de vida desta classe foi estendido para 33 anos, com 15 missões.

Encontramos na internet um trabalho do ASPI⁷² que estudou e questiona o real custo da capacidade dos submarinos australianos. O *sustainment-cost* dos seis submarinos da classe *Collins* é da ordem de US\$ 493 milhões/ano. Entretanto, segundo Hellyer, estranhamente esta cifra não inclui alguns elementos-chave, como, por exemplo, combustível. Os

submarinos da classe *Collins* têm o mais elevado custo operacional a nível mundial⁷³. O mais espantoso é seu custo operacional anual ser o dobro da classe *Virginia*. Pior, auditorias oficiais (ANAO⁷⁴) questionam a Royal Australian Navy com respeito à baixa disponibilidade operacional de submarinos – segundo os críticos, abaixo do mínimo aceitável. O custo global anual do pessoal da força de submarinos australiana monta a US\$ 165 milhões. Então, somente com operação⁷⁵, temos uma cifra incompleta de US\$ 658 milhões/ano, ou US\$ 110 milhões/ano/submarino.

O que surpreende e causa grande perplexidade é a diferença de custo operacional de um classe *Collins* 16 vezes superior a um classe *U-212A* alemão, embora ambas as fontes sejam confiáveis. Não encontramos denominadores comuns que permitam comparar esses valores tão discrepantes.

Além desses custos operacionais dos *Collins*, há outros custos específicos de modernização, englobando três projetos: SEA 1439 Phase 6 - sonares, SEA 1439 Phase 5B2 - comunicação e guerra eletrônica e Joint Project 9013 – comunicações por satélite, cobrindo o período de 2019 a 2021, que somam US\$ 271 milhões.

A partir de 2026 será iniciado o programa Lote (Life of Type Extension) da classe *Collins*. Ele substituirá os programas de modernização normais e custará cerca de US\$ 220 milhões/ano para os seis submarinos, mas o prazo dos trabalhos não foi informado. Inicialmente, o programa Lote deveria durar até 2036,

71 Navsea: Naval Sea Systems Command.

72 “What’s the real cost of Australia’s submarine capability?”, por Marcus Hellyer. ASPI – Australian Strategic Policy Institute.

73 Hamza Bendemra, engenheiro de pesquisa da Australian National University, 16/01/2012.

74 Australian National Audit Office.

75 No quesito “operação” inclui-se o pessoal militar de terra e de apoio da força de submarinos.

quando o primeiro submarino de ataque *Short Fin Barracuda* francês deveria ser incorporado. Mas agora, com a reviravolta que ocorreu no programa de submarinos da Austrália, ninguém ousa prever coisa alguma. O primeiro-ministro australiano, Scott John Morrison, pediu um prazo de 18 meses para os estudos de viabilidade de construção e obtenção dos oito submarinos nucleares no acordo Aukus.

CONCLUSÃO

O estudo para criar uma força de submarinos minimamente crível deve, antes de mais nada, contemplar a doutrina de defesa de um país e seus objetivos operacionais. Precisamos, primeiro, definir se queremos defender as águas territoriais, a Zona Econômica Exclusiva e a Amazônia Azul ou se queremos operar atacando alvos a grandes distâncias por tempo prolongado.

A discussão sobre qual opção é a melhor, nuclear ou convencional, é completamente inócua ou inútil se, antes de mais nada, não tiver sido definida uma estratégia de defesa, o que e como se quer defender. Portanto é importante definir o perfil de missões dos submarinos para a consecução dos objetivos estratégicos do país e de sua Marinha.

Se uma doutrina de defesa não demandar que seus submarinos operem por tempo prolongado em áreas distantes além de 4.000 MN de suas bases, então a obtenção de um SSN seria difícil de justificar. Além disso, SSN requerem pessoal altamente treinado na área nuclear, infraestrutura industrial especializada e custos pertinentes muito mais elevados.

As atividades e missões de submarinos convencionais são diferentes dos nucleares e voltadas essencialmente à defesa. Mas eles também podem cumprir missões de ataque. Hoje, com a evolução tecnológica, armas e sensores são muito similares nos dois casos e ambos os tipos são muito letais.

Submarinos são armas furtivas. Há vantagens e desvantagens entre um e outro tipo, que precisam ser avaliadas no âmbito da doutrina de defesa e dos perfis de missões. O submarino convencional é menor, mais silencioso e mais ágil, *target strength* muito mais discreta, sendo a melhor opção de defesa de *choque points*, litorais, infiltração de forças especiais e coleta de inteligência ou informações,

principalmente em águas rasas, confinadas ou costeiras. Segundo o Capitão Patton [16], submarinos nucleares não operam de maneira eficiente em profundidades menores do que 100 braças

(*fathoms*), cerca de 180 metros.

Os SSNs apresentam assinaturas acústica e térmica maiores por conta do reator e dos equipamentos auxiliares, além da assinatura radiológica. Os nucleares são bem maiores e, portanto, sua *target strength* é inevitavelmente maior. As maiores ameaças para qualquer submarino são as aeronaves ASW com MAD (Magnetic Anomalies Detector), sonares e *sonobuoys* e os LFTAS rebocados por fragatas e similares. O submarino só saberá se está sendo procurado quando os sensores do inimigo estiverem na água.

Resumindo, qualquer tipo de submarino, durante o desempenho de uma missão específica, deve tomar precauções

**Nuclear ou convencional?
Essa discussão é inócua se
não tiver sido definida uma
estratégia de defesa, o que e
como se quer defender**

para não ser detectado. Se efetivamente ameaçado ou localizado pelo inimigo, pouca diferença fará se o submarino é convencional ou de propulsão nuclear. Argumenta-se que um SSN pode navegar por tempo indeterminado a 30 nós para escapar de um ataque, o que um SSK/SSP só pode fazer de forma muito limitada, com velocidade de aproximadamente 20 nós. Porém, quando localizado, um SSN não conseguirá se evadir facilmente de uma perseguição de helicópteros ASW.

Submarinos são altamente dependentes de informações recebidas de terra, satélites, navios ou aviões, para terem uma consciência situacional (*awareness*) segura do teatro de operações e poderem operar com eficiência. As informações que submarinos podem coletar com seus próprios meios C4&ISR⁷⁶ são relativamente limitadas, e eles, ainda, criam um risco de revelar suas posições quando utilizam sensores ativos. Em função de sua autonomia e mobilidade, os SSN podem desempenhar melhor do que os SSP, mas as limitações em termos de NCW (Network Centric Warfare) persistem caso os submarinos não disponham de canais de transmissão/recepção de voz e dados seguros. Isto é válido para qualquer submarino, e também para navios de superfície e meios aeronavais.

Os meios de comunicação e os sistemas de combate dos submarinos são os quesitos eletrônicos mais importantes e sensíveis. Sem eles o submarino vira um simples alvo. Reiterando, os fornecedores desses sistemas conhecem bem o que

vendem aos clientes e podem neutralizar os submarinos, as armas e os sistemas eletrônicos quando lhes convier⁷⁷— salvo se o cliente tiver conhecimento tecnológico para modificar o produto comprado em itens sensíveis e deixar o fornecedor alheio às modificações. Os custos na obtenção, operação e manutenção são diferentes, bem mais elevados no caso dos nucleares. Ao elaborar a doutrina de defesa que irá definir o número e tipo de submarinos a serem obtidos, é preciso dar especial atenção aos custos de ciclo de vida envolvidos e avaliar o que é desejável e o que é obtível. Sem esquecer que uma Base Industrial de Defesa (BID) necessária ou disponível é de vital importância para qualquer programa de defesa.

Sem uma BID sólida, a força de submarinos não seria soberana, mas, sim, refém de fornecedores estrangeiros, que poderiam imobilizá-la em função de interesses ou acordos políticos com terceiros numa situação de crise de alta intensidade. Lembremo-nos do que aconteceu durante a Guerra das Malvinas.

Se um país não tiver capacidade de projeto de submarinos nacional e independente, será sempre refém dos fornecedores e muito provavelmente não receberá o que o fornecedor tem de mais moderno. Chamamos a atenção para a armadilha enganosa denominada “transferência de tecnologia”⁷⁸.

O mesmo se aplica ao armamento, principalmente torpedos. O que adianta operar submarinos e depender da compra de torpedos de fornecedores estrangeiros?

76 C4&ISR: Command, Control, Communication, Computers & Intelligence, Surveillance, Reconnaissance.

77 No jargão tecnológico militar, estes recursos ocultos dos fornecedores são chamados de *backdoors* ou porta dos fundos. O cliente não tem conhecimento se eles existem ou, se tiver, não saberá resolver o problema sem incorrer em outros. Somente um cliente muito desenvolvido em eletrônica terá recursos para mitigar o problema.

78 Recomendamos a leitura do artigo “Transferência de Tecnologia”, de autoria do Vice-Almirante Elcio de Sá Freitas, na revista *Navigator* nº 20.

O fornecedor poderá bloquear fornecimentos e sempre terá recursos tecnológicos de “degradar” as armas vendidas e neutralizá-las, caso seu cliente futuramente vier enfrentá-lo ou algum aliado (coalisão) do fornecedor.

Submarinos convencionais podem ser obtidos em maior número e em menos tempo, com custo associado bem menor do que os nucleares. A relação entre um classe *Virginia Block IV* e um *U-6800* seria da ordem de 1:2. No caso de um *U-212A*, seria de 1:4.

Nos EUA, há uma grande preocupação no Congresso com relação ao orçamento corrente dos programas dos SSN classe *Virginia* e dos novos SSBN classe *Columbia* [12] e [25]. Apesar do imenso poderio tecnológico, industrial e econômico do país, o Congresso americano vê com preocupação o possível colapso orçamentário e industrial com a construção simultânea de dois SSN *Virginia* e um SSBN *Columbia* por ano. A US Navy está arriscando perder a corrida pela liderança para a Rússia e a China.

Existem vozes no Congresso e na US Navy favoráveis à obtenção de SSP em números adequados, mas o parque industrial ainda não está devidamente preparado [25]. Seriam submarinos complementares para proteção das águas jurisdicionais americanas e de aliados como, por exemplo, o Japão. Seriam submarinos que não precisariam navegar os sete mares, mas somente patrulhar uma determinada região partindo de bases relativamente “próximas” ou a menos de 3.000 MN de distância.

Essas vozes argumentam que, no caso de um conflito, os americanos não poderiam repor a perda de um SSN no curto prazo e que os SSP seriam uma solução mais rápida e viável para fazer face a um eventual inimigo. Porém o

establishment nuclear é tão arraigado na mentalidade americana que dificilmente alguém teria o cacife político para aprovar tal solução alternativa.

Cabe lembrar que o Reino Unido enfrentou grandes dificuldades para concretizar a atual classe *Astute*, viabilizada somente com ajuda americana, apesar da longa tradição de construção naval britânica. No Reino Unido, assim como na França, optou-se por uma frota totalmente nuclear.

A decisão *all-nuclear* não deixa dúvidas quanto aos objetivos estratégicos de atuação global da Royal Navy, incluindo-se os SSBN como armas de dissuasão nuclear. O mesmo comentário pode-se aplicar à Marine Nationale, embora os franceses tenham preservado *know-how* com submarinos convencionais, mesmo não os operando.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação deste estudo foi o focar em novas tecnologias e na questão da energia possível de ser embarcada em um submarino convencional. Não tendo uma fonte de energia nuclear, o SSP deve ser equipado com uma bateria o mais poderosa possível, um sistema AIP e um robusto estoque de óleo diesel. A densidade de energia embarcada é crucial para sua eficácia operacional em termos de autonomia e raio de ação (vide resultados dos cálculos resumidos nas tabelas 6 e 7).

Sem colocar em questão a fonte de energia ilimitada oferecida por um reator nuclear, a diferença operacional entre os SSN e SSP diminuiu bastante em certos aspectos e, dependendo do perfil de missões, até mesmo com vantagens para os convencionais. Hoje, o fator humano está equilibrado e pode ser decisivo, pois um convencional como o *U-6800* pode

permanecer o mesmo tempo em missão que um SSN, em função dos mantimentos embarcados e da fadiga da tripulação. As maiores diferenças entre os dois permanecem sendo o tamanho, a velocidade e, conseqüentemente, o raio de ação.

Se o propósito é a defesa do País e preservar as rotas marítimas e controlar os ilícitos e os interesses econômicos do Brasil, o autor entende que o objetivo militar é manter um potencial agressor à distância, neutralizando o raio de ação de suas armas de ataque.

Na figura do Anexo 1, temos um mapa do Atlântico Sul, em que traçamos uma linha à meia distância entre alguns pontos arbitrários da América do Sul e da África. Essa faixa marítima entre a costa brasileira e a “linha média do Atlântico” poderia ser patrulhada eficazmente por submarinos como o *U-6800*.

A autonomia de deslocamento diesel-elétrica do *U-6800* é mais do que suficiente para ir submerso (snorquelando) em poucos dias até essa linha e voltar, ou seja, de Natal a Dakar e vice-versa. O *U-6800* poderia se deslocar submerso até uma área de missão distante 3.000 MN de sua base em cerca de 12 dias. Na área da missão ou patrulha, pode permanecer por até 70 dias em regime AIP e navegar cerca de 8.000 MN com velocidade de 5 nós.

O número de submarinos necessários para cobrir essa vasta área marítima fica a critério dos estrategistas, e não cabe discuti-lo no escopo deste artigo, mas,

certamente, um número maior de convencionais como o *U-6800* seria uma opção melhor do que uns poucos nucleares, respectivamente, numa proporção de 2:1. Isso sem mencionar a crucial questão da disponibilidade operacional dos meios, ou seja, quando estes não estão em treinamento, manutenção de rotina, reparos ou docagens.

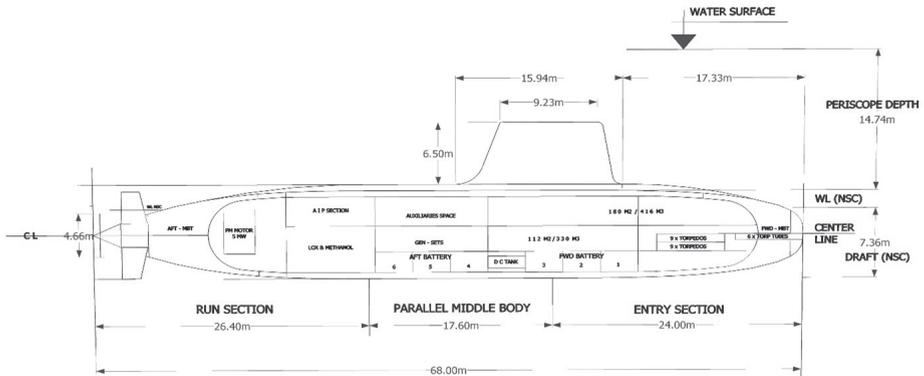
A presença ou a simples suspeita da presença de submarinos convencionais numa determinada área (A2/AD – Anti Access/Area Denial) já é suficiente para desencorajar o agressor ou obrigá-lo a mobilizar um grande número de meios navais e aéreos para localizar os supostos submarinos, frustrando o agressor ou atrasando-o em seu objetivo principal. Vide a grande preocupação da US Navy em lidar com esta questão diante dos fatos ocorridos durante um bom número de exercícios conjuntos com Marinhas amigas. Essa preocupação levou a US Navy a arrendar um submarino sueco da classe *Göotland* por um ano para desenvolver novas técnicas antissubmarino contra SSP.

Na figura do Anexo 2, temos um *croquis* do que seria a proposta do *U-6800*. Evidentemente, não há a pretensão de ser uma solução definitiva. Embora sendo um estudo baseado em fontes de informação da melhor qualidade, fica naturalmente sujeito a comentários e críticas de especialistas. O presente estudo é especulativo e visa apenas estimular a discussão em torno do tema.

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

ANEXO 2

Croquis do U-6800, objeto deste estudo. Por comparações, informações, analogias e estimativas, elaboramos o desenho e o comparamos com outros de construtores navais de renome



ANEXO 3

Existe uma regra fácil para esclarecer os leitores sobre a questão do deslocamento da maioria dos submarinos. Chamemos de *standard displacement* (submarino vazio, pronto para submergir, mas sem autonomia – ou peso leve) como sendo 100%; *surfaced displacement* (submarino pronto para submergir, carregado com combustíveis, mantimentos e armamento com autonomia – deslocamento a plena carga)¹ como sendo 120%; *submerged displacement* (deslocamento flutuando a plena carga + tanques de lastro plenamente cheios) como sendo 135%.

Adicionalmente, os arquitetos navais introduziram um quarto termo, o *form displacement* (deslocamento submerso + *free flooded spaces*) como sendo 145%. Na Tabela abaixo temos três comparações:

	Standard (100%)	Surfaced (120%)	Submerged (135%)	Form (145%)
<i>COLLINS</i>	2.580 tons	3.100 tons	3.480 tons	3.740 tons
<i>SORYU</i>	2.900 tons	3.480 tons	3.910 tons	4.200 tons
<i>U-216</i>	3.290 tons	3.950 tons	4.440 tons	4.770 tons

Observação: Como *surfaced displacement* é a norma internacional, deve-se adotar este valor para comparações entre submarinos (comentário pelo Capitão Raimund Wallner – [26]).

¹ Neste artigo, chamamos esta condição de NSC (Normal Surfaced Condition), flutuando a plena carga (*full load*).

ANEXO 4

Tabela comparativa dos principais dados sobre os submarinos mencionados neste trabalho

	<i>Astute</i> (UK)	<i>Virginia</i> Block IV (USA)	<i>Suffren</i> (FR)	<i>Collins</i> (AU)	<i>U-212A</i> 1º lote (DE)	<i>U-212CD</i> ¹ (DE) & (NO)	<i>U-212</i> <i>NSF</i> ² (IT)	<i>U-218SG</i> (Singapura)
L (m)	97,0	115,0	99,5	77,4	56,0	73,0	58,3	70,0
B (m)	11,3	10,0	8,8	7,8	6,8	10,0	n.d.	6,3
T (m)	10,0	n.d.	7,3	7,0	6,4	7,0	n.d.	n.d.
D sub (t)	7.800	7.900	6.300	3.407	1.830	2.800	n.d.	2.200
Dsuperf (t)	7.400	7.100	4.770	3.100	1.524	2.500	n.d.	2.000
Prop(kW)	n.d.	210K	150K	5.400	2.850	n.d.	n.d.	n.d.
Veloc sub (kts)	30	30	25+	20	20	20	20	15
Vel superf (kts)	10	10	14	10	12	12	12	10
Raio de ação superf (MN)	Ilimit.	Ilimit.	Ilimit.	11.500/10 kts	8.000/8 kts	n.d.	n.d.	n.d.
Raio de ação subm (MN) bateria	Ilimit.	Ilimit.	Ilimit.	480/4 kts (<i>snort</i> <i>interval</i>)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Raio de ação AIP (MN)	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx	1.728	n.d.	n.d.	n.d.
Autonomia (dias)	90 (food)	90	70	70	84	84	n.d.	n.d.
Autonomia AIP (dias)	xxxxx	xxxxx	xxxxx	xxxxx	20/ 240kW	20/ 240kW	n.d.	n.d.
T Tubos	6	4	n.d.	6	6	8	8	8
Torpedos	38	25 & 12 VLS	n.d.	22	13	n.d.	n.d.	n.d.
Prof (m)	300+	240+	350+	180+	250+	n.d.	n.d.	n.d.
Tripulação	98/109	135	63	58	28	28	28	28

1 A ser equipado com LIB.

2 Idem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BERTRAM, Prof. Volker. “Submarine Hull Design”.
- [2] BUCKINGHAM, John. “Submarine Power and Propulsion: Balancing the Energy Elements”. BMT Defence Services Ltd.
- [3] BUCKINGHAM, John; HODGE, Christopher; HARDY, Timothy. “Submarine Power and Propulsion – Trends and Opportunities”. BMT Defence Services Ltd.
- [4] BUCKINGHAM, John. “Multi Engine Submarine Power Supplies: The Operating Case”. BMT Defence Services Ltd.
- [5] CHAKRABORTY, Soumaya. “Submarine Design: Unique Tanks On a Submarine”.
- [6] DAWSON, Edward. “An Investigation into the Effects of Submarine Submergence Depth, Speed and Hull Length-to-Diameter Ratio on the Near-Surface Operation of Conventional Submarines”. University of Tasmania.
- [7] DONG-WOO PARK, Prof. Dept. Naval Architecture, Tongmyong University, South Korea. “A Study on the Effect of Flat Plate Friction Resistance on Speed Performance Prediction of Full Scale”.
- [8] JACKSON, Harry A., Capt Ret. USN. “Fundamentals of Submarine Concept Design”.
- [9] JOUBERT, P. N. “Some Aspects of Submarine Design: Part 2 – Shape of a Submarine”.
- [10] LINDSTRÖM, Bård: “Development of a Methanol Reformer for Fuel Cell Vehicles”. Department of Chemical Engineering and Technology, KTH (Real Escola Técnica Superior), Stockholm, 2003.
- [11] MANN, J. W. “Twin- Turbocharged Diesel Performance Under Snorkelling Conditions”. BMT Defence Services UK.
- [12] MINNEHAN, Ensign John. US Navy: “Non-nuclear submarines? Choose fuel cells”. USNI *Proceedings*, June/2019 .
- [13] MOONESUN, Mohammad; GHASEMZADEH, Firouz; KOROL, Yuri; NIKRASOW, Valeri. “Effective Depth of Regular Wave on Submerged Submarines and AUVs”.
- [14] MOONESUN, Mohammad. “Wave Profile and Deck Wettness of Submarine at Surface Condition”.
- [15] OHFF, Hans J. “Nuclear versus diesel-electric: the case for conventional submarines for the RAN”. *The Straategist*, 11th July/2017.
- [16] PATTON JR., James H. Cpt. USN Rtd. “Run silent, run shallow”. USNI *Proceedings*, October/2018.
- [17] POURMOVAHED, Prof. Ahmad. “Performance of a PEM FC”. Mechanical Engineering Department, Kettering University, Flint-Michigan, USA.
- [18] SANDROCK, Dr. Gary. “State-of-the-Art Review of Hydrogen Storage in Reversible Metal Hydrides for Military Fuel Cell Applications”, Suna Tech Inc. Ringwood, NJ, on behalf the Office of Naval Research – US Navy, Arlington, Virginia.
- [19] SINAVY – Siemens PEM Fuel Cells.
- [20] TORKELOSON, Kai Oscar. “Comparative Naval Architecture Analysis of Diesel Submarines”. MIT June 2005.
- [21] USNA – United States Naval Academy. “Course Objectives. Chapter 10 – Submarines And Submersibles”.
- [22] VOGT, René. “AIP – Propulsão de Submarinos Independente da Atmosfera”. *Revista Marítima Brasileira*, 4º trim./2017. Marinha do Brasil.
- [23] VOGT, René. “Baterias de Submarinos”. *Revista Marítima Brasileira*, 3º trim./2018. Marinha do Brasil.
- [24] 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.
- [25] WALKER, Michael; KRUSZ, Austin. “There’s a case for Diesel”. USNI *Proceedings*, June/2018.