

NOSSA CAPA

ESTUDO COMPARATIVO DOS SUBMARINOS U-75 & U-45 COM EMPREGO DA MESMA TECNOLOGIA



RENÉ VOGT*
Engenheiro

SUMÁRIO

Introdução
Construção Naval
Novos projetos
Ponderações
Dimensionamento dos U-75 e U-45
Propulsão
AIP – Air Independent Propulsion
Bateria
Grupos Diesel-Geradores
Autonomia/Raio de Ação
Assuntos gerais pertinentes aos dois modelos
Custos
Conclusão

INTRODUÇÃO

Há mais de cinco anos estamos nos dedicando ao estudo de submarinos. Muita pesquisa e troca de informações pontuais com engenheiros da base industrial de defesa alemã nos

ajudaram a progredir. Mas, como era de se esperar, há muitas informações que gostaríamos de obter, mas não pudemos, por razões de sigilo militar ou comercial. Isto nos obrigou a algumas práticas de engenharia reversa para embasar nossos argumentos.

* 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.

Chegamos a desenvolver cinco estudos diferentes, e dois foram publicados na *Revista Marítima Brasileira*: U-6800, na edição do 4º t/2021, e U-X65A, na edição do 2º t/2023. Estávamos focados em produzir um submarino o mais compacto possível, segundo a máxima do Professor Ulrich Gabler¹: “O submarino precisa ser tão pequeno quanto possível e tão grande quanto necessário”.

Entretanto, após idas e vindas e muita reflexão, resolvemos estudar um novo modelo de submarino, com deslocamento maior, convencional, com bateria de íons de lítio e Air Independent Propulsion (AIP), chamado de U-75, com dimensões tais que permitam permanência prolongada em missão, tipicamente 90 dias. Mas, à medida que evoluímos nos estudos, surgiu a curiosidade de examinar o extremo oposto, um submarino pequeno para operações em águas rasas e *choke points*², que resultou no U-45, com autonomia de até 40 dias.

Neste artigo, trataremos dos dois submarinos de maneira comparativa. Nossos estudos sempre se baseiam na tecnologia dos modelos alemães, visto ser a Alemanha líder mundial no segmento de submarinos convencionais. Mas a literatura que consultamos é extensa e inclui autores de todas as nacionalidades, que contribuem para a cultura técnica geral.

Seguindo as sugestões do Capitão de Fragata Bernd Arjes³, baseados em sua ampla experiência profissional, no caso do U-75, aumentamos o estoque

de energia AIP a um máximo possível e reduzimos proporcionalmente o tamanho da bateria. Contudo mantivemos quatro diesel-geradores para reduzir a taxa de indiscrição. Essa sugestão é baseada na sua experiência operacional nos mares Báltico e Mediterrâneo, onde a taxa de indiscrição de um submarino é crítica.

No caso do U-45, adotamos os mesmos critérios do U-75, mas o hidrogênio necessário para a propulsão AIP é estocado num novo tipo de hidreto metálico (Ref. 5). Com dois grupos geradores, a taxa de indiscrição resultou num valor muito baixo, o que é ótimo.

O projeto de um submarino convencional moderno não pode dispensar baterias evoluídas como as de íons de lítio, nem a propulsão AIP. A taxa de indiscrição durante a recarga das baterias é um fator crítico. A capacidade de ocultação do submarino é um requisito da maior relevância, utilizando-se formas geométricas inovadoras, projeto hidrodinâmico refinado, revestimentos acústicos e redução de ruídos mecânicos, além do emprego de aço não magnético na fabricação do casco de pressão.

O conceito dos U-75 e U-45 prevê dois cascos: o casco de pressão interno em aço não magnético e, externamente (envoltória), o casco de fibra de carbono reforçada de geometria *stealth* inovadora, chamada *diamond shape*, segundo a ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS), autora do projeto dos novos U-212CD com 2.500 t de deslocamento *standard*,

1 Ulrich Gabler foi oficial engenheiro submarinista durante a Segunda Guerra Mundial, condecorado com a Cruz de Ferro segunda e primeira classes. Fundou o escritório IKL em Lübeck, Alemanha, cujos projetos levaram a Marinha do Brasil a obter os submarinos da classe *Tupi* U-209/1400.

2 Estreitos ou outros pontos geográficos onde a passagem de navios é importante, mas pode ser controlada; acidente geográfico particular.

3 Da Marinha da Alemanha. Foi comandante da classe U-212A, instrutor de aspirantes a comandante de submarino, instrutor do Centro de Treinamento de Submarinos e, atualmente, representa o inspetor geral da Marinha na equipe que desenvolve o novo U-212CD. Seu argumento para os engenheiros: “submarinos com mais AIP e menos bateria”.

que nos serve de inspiração. Este projeto, fruto de um acordo maduro entre dois países de vanguarda, como a Alemanha e a Noruega, vai incorporar as tecnologias mais modernas desenvolvidas até os dias atuais e já se encontra em produção.

Em abril de 2024, a TKMS entregou o quarto e último submarino U-218SG para a Marinha de Singapura, que, entre os diversos modelos, era o maior e mais moderno fabricado na Alemanha até a data da entrega. A Itália iniciou a fabricação de sua nova classe U-212NFS, sucessora evoluída da atual classe U-212A. Os submarinos da TKMS fabricados para Israel estão envoltos em mistério, e pouco ou nada se sabe dos requisitos. Especula-se que tenham a capacidade de embarcar mísseis com ogivas nucleares, pois um dos tubos de torpedo tem diâmetro maior do que os convencionais com 533

mm. A Coreia do Sul, evoluindo com base na tecnologia alemã, a partir da obtenção dos primeiros submarinos da classe U-209, mostrou alta competência técnica no desenvolvimento de submarinos convencionais.

Sem dispor de requisitos operacionais que nos servissem de orientação, resolvemos estipular por conta própria tamanhos de submarinos que atendessem ao perfil de missões distintas, que julgamos ser adequadas para a Marinha do Brasil, como o U-75, e o U-45 para os mares Báltico e Mediterrâneo e outros, como o Estreito de Malaca e acidentes geográficos relevantes, como veremos a seguir.

CONSTRUÇÃO NAVAL

Desenvolver e manter uma tecnologia requer um trabalho contínuo de estudos, pesquisa, experimentação, perseverança, disciplina, investimento e aplicação de cada experiência feita na etapa seguinte. O sucesso não cai no colo de graça, nem com transferência de tecnologia.

Como exemplo de empresas de construção naval, citamos a ThyssenKrupp Marine Systems (TKMS), originalmente conhecida por Howaldtswerke Deutsche Werft (HDW), em Kiel, que, desde 1960, já construiu mais de 200 submarinos para a Marinha da Alemanha e clientes estran-

geiros, sendo inovadora no emprego do aço não magnético e propulsão AIP com células combustíveis desenvolvidas em parceria com a Siemens.

Atualmente várias Marinhas⁴ somam 38 submarinos

com AIP e com as Polymer Exchange Membrane Fuel Cell (PEM-FC) desde 1996, sistema de tecnologia alemã ou derivada desta, como no caso da Coreia do Sul.

A indústria de submarinos alemã conta com uma base industrial de defesa com cerca de 400 indústrias fornecedoras. Tudo é fabricado na Alemanha, e alguns itens em parceria com firmas estrangeiras. Cumpre salientar que itens críticos, como propulsão, armas, eletrônica e sistemas de combate, são todos de fabricação doméstica. Nada disso seria possível sem o compromisso do Governo (Marinha) com sua indústria, além do mercado de exportação. Este processo gera uma

Cada submarino leva em média de cinco a seis anos para ficar pronto, desde o batimento de quilha até a incorporação e operação

4 Alemanha, Coreia do Sul, Grécia, Itália, Israel, Portugal, Singapura e Turquia.

relação simbiótica com riqueza e desenvolvimento, sem os quais não pode haver defesa eficaz de um país.

Cada submarino leva em média de cinco a seis anos para ficar pronto, desde o batimento de quilha até a incorporação e operação. Um país que queira comissionar um submarino por ano precisaria de um estaleiro onde, continuamente, seis submarinos estariam em vários estágios de construção. Tudo começou no início da década de 1960, quando o escritório IKL-Ingenieur Kontor Lübeck, sob a direção do engenheiro Ulrich Gabler, desenvolveu os submarinos classes U-205, U-206, U-206A e U-207 para as Marinhas de Alemanha, Noruega e Dinamarca.

Naquela época, os aliados impuseram à Alemanha limitação de tonelagem para a Marinha – para os submarinos em particular⁵. As restrições foram abolidas em 1980, quando a Marinha da Alemanha já dispunha de 24 submarinos U-206/U-206A de 500 ton de deslocamento, cuja principal missão no âmbito da Organização do Tratado do Atlântico Norte (Otan) era rechazar qualquer tentativa de operações de desembarque anfíbias das forças do Pacto de Varsóvia.

No final da década de 1970, foi desenvolvida a classe U-209, e a Marinha do Brasil entrou na lista de clientes. Entretanto a Alemanha não obteve esta classe para sua própria Marinha. No final da década de 1980, foi desenvolvida a classe U-212 com propulsão AIP, que resolveu em grande medida uma deficiência dos

submarinos convencionais: o tempo de imersão. Foram obtidos quatro submarinos e, no início da década de 2000, um segundo lote de duas unidades. Na mesma época, houve um acordo de parceria da Fincantieri com a TKMS, por meio do qual da Marinha da Itália obteve e passou a operar quatro submarinos da mesma classe, construídos na Itália.

Diante deste breve histórico, ficou clara a opção da Alemanha por não desenvolver, obter ou operar submarinos de propulsão nuclear, por falta de requisitos ou ambiente marítimo que justificassem essa opção (Ref. 21). Foi mais sensato desenvolver a tecnologia e reduzir os custos dos submarinos convencionais do que se lançar numa aventura nuclear. Aliás, houve até a construção de um navio cargueiro alemão com propulsão nuclear, o *Otto Hahn*⁶. Mas não se obteve sucesso comercial devido a problemas de custos operacionais e políticos, ou seja, a proibição para demandar uma série de portos.

O sucesso da indústria naval alemã mostra como são importantes a continuidade da construção industrial, a pesquisa e a evolução permanente da tecnologia. Os hiatos sofridos pela construção naval no Brasil mostram como é elevado o prejuízo devido à perda da competência e experiência entre programas de construção sucessivos.

Há aqueles ingênuos que acham que a tão decantada “transferência de tecnologia” é a solução mágica dos problemas, sem se dar conta de que isto depende da

5 Protocolo do controle do armamento da República Federal da Alemanha de 23 de outubro de 1954, pela União Europeia Ocidental.

6 Otto Hahn foi um químico alemão e pesquisador da energia nuclear. Em 1938 ele teve sucesso na fissão do átomo e abriu, involuntariamente, o caminho para a bomba atômica. Em 1944 foi laureado com o Prêmio Nobel por sua realização, além do Prêmio Enrico Fermi e a Medalha Max Planck. Após o lançamento das duas bombas nucleares em Hiroshima e Nagasaki, Otto Hahn se tornou pacifista e militou contra o armamento nuclear durante a Guerra Fria. Faleceu em 28 de julho de 1968 em Göttingen, aos 89 anos de idade.

capacidade do cliente em absorver a tal tecnologia, sem a qual (capacidade) será apenas um processo de perpetuação do atraso, comprando-se tecnologia obsoleta. Ninguém vende tecnologia de ponta, e, se o fizer, será uma versão degradada.

O mesmo ocorreu (hiatos) há cerca de 25 anos no Reino Unido, quando a BAe Systems foi encarregada de construir a nova classe *Astute* para a Royal Navy, no final da década de 1990, tendo que superar um hiato de mais de dez anos após a entrega do *Triumph*, o último de sete da classe *Trafalgar*. Foi necessária a colaboração da US Navy para avançar no projeto da classe *Astute*, que demandou em média dez anos de construção por unidade, com grandes atrasos, percalços e rombos orçamentários.

Hoje a Alemanha possui seis submarinos classe U-212A, e em breve serão obtidos dois submarinos classe U-212CD. Para 2035 em diante, o objetivo são nove submarinos e seis Ultra Large UUV para operarem no Mar Báltico, em princípio. Atenção para o fato de que as Marinhas dos USA, Reino Unido, Alemanha, França, Coreia do Sul, China e Rússia, principalmente, estão empenhadas no desenvolvimento e obtenção de UUV de vários tamanhos e tipos, para missões de contraminagem, minagem, ataque de destruição e coleta de inteligência.

NOVOS PROJETOS

Novos projetos de submarinos, assim como quaisquer meios navais, devem atender a requisitos operacionais promulgados pelo Estado-Maior da Armada. Novos requisitos devem, primeiro, identificar e avaliar, na medida do possível, que tipos de ameaças poderemos enfrentar no próximos 30 a 40 anos. Segundo, devem-se prever a área marítima que se

pretende ou precisa defender e os tipos de missões. Terceiro, devem ser estimados o tempo e o custo necessário para executar um programa abrangente de construção, operação, manutenção e modernização de novos submarinos ou outros meios navais.

Se um novo programa de construção naval de grande envergadura não for bem avaliado, técnica e financeiramente, ele causará danos de longo prazo à qualidade dos meios navais, com ônus financeiros irrecuperáveis para o erário. E, pior, a interrupção dos trabalhos de unidades inacabadas que, se forem abandonadas por tempo prolongado, serão transformadas em sucata.

Séries de construção longas vão acumulando experiências de toda sorte, levando a uma reavaliação contínua das tecnologias empregadas e de seus resultados. Dependendo da envergadura das modificações, a série pode continuar com alguma diferenciação ou, mesmo, pode ocorrer sua total interrupção, levando à construção de submarinos inteiramente novos e mais evoluídos.

PONDERAÇÕES

Para se ter uma ideia, o U-75 poderia operar a uma distância de 1.700 m.n. (3.100 km) da costa brasileira durante 85 dias (máx.) na área de operações. Patrulha é uma operação tipicamente Anti Acces/Area Denial (AA/AD), negação de acesso e uso de uma área marítima.

Pelo custo unitário de um submarino classe *Astute*, por exemplo, poder-se-iam obter três ou quatro submarinos U-75, que operariam muito mais eficazmente em conjunto numa área de operações AA/AD. Em dados recentes de 2024, a classe *Astute* da Royal Navy tem um custo estimado de +/- US\$ 3,6 bilhões. Comparada com o futuro U-212CD, a

proporção na obtenção de um (*Astute*) ou outro (U-212CD) tipo seria de 1:3. Como costuma-se dizer na Marinha: “Quem tem um, tem nenhum!”. Preferível ter três ou quatro convencionais do que um nuclear.

Se o objetivo é combater a milhares de milhas da base ou mudar frequentemente de teatros de operação distantes, como uma Marinha de águas azuis com interesses mundiais, então a opção é nuclear. Se as missões forem prioritariamente AA/AD, em águas rasas, ou EEZ litorâneas, onde o silêncio é vital, ou áreas confinadas, estreitos ou teatros de operação distantes menos de 2.000 m.n. da base, sem dúvida que o convencional leva vantagem.

Há pelo menos uma dezena de exemplos de submarinos alemães, holandeses e suecos que causaram grande mal-estar à US Navy em exercícios conjuntos, mostrando que as forças-tarefa são vulneráveis a ataques de submarinos convencionais modernos⁷ – estes mais silenciosos e furtivos, possuindo sensores modernos, como os nucleares.

Submarinos convencionais modernos são mais difíceis de detectar do que submarinos nucleares, pois estes são muito maiores, possuem um sistema de propulsão que gera mais ruído e fortes assinaturas térmicas e radiológicas.

Ambos carregam as mesmas armas, exceto mísseis balísticos nucleares.

Entretanto a Coreia do Sul já está construindo a classe KSS-III, que possui silos verticais para lançar mísseis maiores. O mesmo ocorre com a classe mais moderna da Marinha de Israel, onde especula-se haver capacidade nuclear, mas tudo envolto em sigilo.

Vale lembrar aos leitores que o nível de sofisticação na construção de submarinos é igual, sendo as diferenças a componente nuclear e o tamanho. O projeto, a engenharia e os cuidados na construção do casco e instalações mecânicas, elétricas e eletrônicas de um submarino são iguais nos dois casos. A diferença entre os dois é que no nuclear tudo é maior,

porém não necessariamente com tecnologia superior.

Com o advento da AIP, as desvantagens do convencional em relação ao nuclear diminuiram, sendo, portanto,

importante relativizar este fato racionalmente. Mas não nos esqueçamos que, em ambos os casos, existem os tripulantes, que têm um limite físico e psicológico para suportar a vida confinada, sem privacidade alguma e longe das famílias, além do estoque físico de mantimentos.

DIMENSIONAMENTO DOS U-75 E U-45

Tudo o que dissemos acima serve para estabelecer as condições de contorno de

Submarinos convencionais modernos são mais difíceis de detectar do que submarinos nucleares

⁷ Antes da mostra de desarmamento do último U-26A, em 2011, o submarino U-24 desta classe participou de um exercício com a US Navy no Mar do Caribe. O seu comandante logrou disparar (fictício) um leque de torpedos contra o NAe *Enterprise*, emergindo, em seguida, ao través do gigante, furando o cinturão de segurança da força-tarefa. Outro submarino da mesma classe, num exercício com a US Navy, também no Mar do Caribe, logrou sucesso em driblar seguidas vezes um SSN da classe *Los Angeles*, sem ter sequer sido detectado. E eram submarinos anteriores a duas gerações de modelos atuais mais modernos.

um programa de obtenção de submarinos que nós imaginamos para o Brasil. No nosso entender, a missão fundamental da Marinha do Brasil é defender nossos portos, bases navais, estaleiros e indústrias à beira-mar e *offshore* e garantir a segurança das rotas de navegação. Resumindo, seria a Amazônia Azul e uma faixa de cerca de 1.000 m.n. de largura ao longo de nossa costa, que engloba nossa EEZ e plataforma continental, mantendo potenciais agressores a distâncias superiores ao alcance de suas armas.

Há alguns anos o autor teve uma especial oportunidade de consultar e

trocar mensagens com o Dr. Milan Vego, professor do Naval War College, US Navy, que disse ser a defesa da costa do Brasil, necessariamente, tarefa de mis-

sões coordenadas e conjuntas das três Forças Armadas, não exclusivamente da Marinha.

Com essas premissas, passamos a descrever os projetos baseados em nossos estudos, como vemos a necessidade de submarinos convencionais para a Marinha do

Brasil. As literaturas das Ref. 3, 8, 9 e 15 foram utilizadas na elaboração do dimensionamento dos submarinos aqui estudados, como mostramos a seguir:

A missão fundamental da MB é defender nossos portos, bases navais, estaleiros e indústrias à beira-mar e *offshore* e garantir a segurança das rotas de navegação

I) Submarino oceânico U-75:

LOA = 75,0 m, OD = 9,6 m (equivalente geometricamente ao *diamond shape*)

Dia casco de pressão = 7,60 m

Razão L/D = 75/9,6 = 7,81

Coeficiente prismático: $C_p = 0,791$

Volume interno do casco de pressão: 2.550 m³

Dimensionamento segundo Torkelson:

ENVD = 4.400 t

FF = 440 t (10% ENVD) (Volume livremente inundável)

SUBD = 3.960 t (MBT + NSC)

MBT = 424 t (0,12 NSC) – MBT = Main Ballast Tanks

NSC = 3.536 t (Normal Surfaced Condition, flutuando a plena carga)

VL = 711 t (VL = Variable Load, carga variável)

A1 = 2.825 t (A1 = Peso Leve ou deslocamento *standard*)

LB = 225 t (A1 x 0,08) (LB = Lead Ballast, lastro fixo de chumbo)

A-1 = 2.600 t (A-1 = Peso Leve sem lastro fixo de chumbo)

SWBS – Ship Weight Breakedown System (Sistema de Fracionamento dos Pesos)

100: 1.248 t (48,00% A-1). Casco. Aço HY-100/profundidade máx. = 400 m

200: 624 t (24,00% A-1) – Propulsão

300: 130 t (5,00% A-1) – Sistema Elétrico

400: 151 t (5,80% A-1) – Sistemas de sensores e combate

500: 257 t (9,90% A-1) – Sistemas auxiliares⁸

600: 112 t (4,30% A-1) – Acabamentos e instalações

700: 78 t (3,00% A-1) – Sistemas de armamentos

A *Variable Load* foi estimada como segue abaixo:

Depth Control Tanks = 65 t

Trimm Tanks = 13 t

Torpedo Tank = 15 t

Metanol = 160 t

LOX⁹ = 260 t (93% AIP + 7% Atmosfera interna)

Helio = 1,0 t (AIP *pipe* / *valve purging*)

Nitrogênio = 1,0 t (Sistema de incêndio)

Diesel = 120 t

Ar comprimido = 11 t

Óleo lubrificante = 1 t

Óleo hidráulico = 2 t

Torpedos HWT (22) = 33 t

Sea Spider (16) = 2 t

CIRCE (48) = 1 t (*decoys* marca Leonardo)

Cartuchos de hidróxido = 2 t (mesmo com sistema ACRU US Navy)

Tripulação (36 máx.) = 4 t

⁸ Não confundir “sistemas auxiliares” com os “equipamentos auxiliares”, compreendidos no SWBS200.

⁹ LOX: Liquid Oxygen.

Mantimentos (100 dias) = 17 t

Água potável = 2 t (geração por osmose reversa)

Reserva = 1,0 t

Total = 711 t

II) Submarino costeiro U-45:

LOA = 45,0 m; OD = 7,5 m. (mesmo comentário anterior)

Comprimento e diâmetro do casco de pressão: L = 36,0 m/Dia. 5,0 m

Coefficiente prismático = 0,763

Razão L/D = 6,0 resulta numa *relative drag efficiency* = 104%, conforme Arentzen & Mandel

Segundo H. Jackson, temos: L/D - K2 = 4,89 und (1-w) = 0,84 (*drag deduction coefficient*) und (1-t) = 1,01 (*thrust deduction coefficient*). Volume do casco de pressão: 706 m³

Dimensionamento segundo K. Torkelson:

ENVD = 1.555 t

FF (22%) = 340 t

SUBD = 1.215 t

MBT = 145 t (MBT/SUBD = 12%)

NSC = 1.070 t (Normal Surfaced Condition = fully loaded and endure)

VL = 180 t (Variable Load)

A1 = 890 t (Standard)

LB = 60 t (LB/A1 = 6,7%)

A-1 = 830 t

Ship Weight Break-down System:

100: 375 t/45,18% von A-1 (calculado com aço HY-100 para 250 m profundidade, segundo Jackson)

200: 245 t/29,52%

300: 55 t/6,62%

400: 50 t/6,03%

500: 65 t/7,83%

600: 35 t/4,22%

700: 5 t/0,60%

SWBS200 = 245 t estimado:

PMM Permasyn = 50 t

Mancal de empuxo = 3 t

Eixo + Hélice = 10 t

2 Gen-Sets = 30 t

AIP = 9 t

Hidretos metálicos = 65 t

Bateria = 26 t

Máquinas/equipamentos auxiliares = 52 t

A *Variable Load* foi estimada da seguinte maneira:

Depth Control Tanks = 18,5 t

Trimm Tanks = 5,7 t

Torpedo Operation Tank = 9,3 t

Hidrogênio = 8,0 t

LOX = 46,0 t (93% AIP + 7% atmosfera a bordo)

Hélio = 1,0 t (AIP *pipe/valve purging*)

Nitrogênio = 1,0 t (sistema de incêndio)

Óleo diesel = 50,0 t

Druckluft = 8,0 t

Óleo lubrificante = 0,5 t

Óleo hidráulico = 3,0 t

Torpedos (8) = 12,0 t

Sea Spider (24) = 2,6 t

CIRCE decoys (48) = 0,6 t

Cartuchos de hidróxidos = 2,8 t (apesar do ACRU Systems US Navy)

Tripulação máx. (23) = 3,0 t

Mantimentos (42 dias) = 4,5 t (23 tripulantes)

Água potável = 2,0 t (purificador por osmose reversa)

Reserva = 1,5 t

Total = 180 t

PROPULSÃO

Por propulsão entenda-se a potência necessária no hélice para impulsionar o submarino. Entretanto, para calcular a autonomia e o raio de ação, devemos adicionar a *hotel-load*, ou a carga da energia consumida a bordo numa determinada situação. O motor escolhido

para o U-75 é um Siemens Permasyn PMM¹⁰ de 6,0 MW de potência. Atualmente a série Permasyn Evo consta de três diâmetros com três a quatro módulos cada. Todos os componentes são iguais. Isto representa uma economia importante no custo de obtenção e manutenção, quando se tem vários tipos e tamanhos de submarinos.

Velocidade (nós)	Potência propulsão + <i>hotel load</i> (kW)	Rotação do hélice (RPM)	Reserva de potência do motor PMM (%)
NS ¹¹ 5	441	18	97
DS ¹² 5	239	18	96
DS 8	472	28	94
DS 10	754	35	89
DS 12	1.127	42	82
DS 15	2.123	52	64
DS 20	4.722	69	17

Tabela 1 – Potência de propulsão e *hotel-load* do submarino U-75

Velocidade (nós)	Potência propulsão + <i>hotel load</i> (kW)	Rotação do hélice (RPM)	Reserva de potência do motor PMM (%)
NS 5	291	23	91
DS 5	165	23	95
DS 8	267	37	92
DS 10	504	46	84
DS 12	747	55	77
DS 15	1.294	69	60
DS 20	2.798	92	15

Tabela 2 – Potência de propulsão e *hotel-load* do submarino U-45

10 PMM: Permanent Magnet Motor.

11 NS: Near Surface Navigation, esnorquelandando.

12 DS: Deep Submerged Navigation.

No caso do U-45, a escolha recaiu no motor PMM Siemens FR6439/3.300 kW. Nos dois casos, U-75 e U-45, a *hotel-load* foi considerada igual. Em submersão profunda em regime de patrulha, consideramos 140 kW. Quando o submarino está snorquelando, a *hotel-load* é bem maior, mais ou menos 260 kW.

AIP – AIR INDEPENDENT PROPULSION (REF. 18)

O sistema AIP foi um grande avanço para os submarinos convencionais. Os alemães saíram na frente no início da década de 1980, com a PEM-FC da Siemens. Este processo físico-químico é o inverso da hidrólise da água: coloca-se oxigênio e hidrogênio para reagir, produzindo eletricidade e água. O AIP foi aplicado pioneiramente na classe U-212A.

A tecnologia a ser empregada nos U-75 e U-45 é a de quarta geração das PEM-FC¹³ da Siemens. No caso do U-75, arbitramos uma potência instalada 12 x células PEM BZM-Evo de 160 kW ou 1.920 kW. E, no caso do U-45, arbitramos 6 x células de 160 kW com um total de 960 kW. Estas novas células têm o mesmo tamanho e peso das atuais, com 120 kW de potência. As células combustíveis têm uma eficiência de 68% a 20% da potência e, à plena carga, a eficiência se situa em torno de 58%.

No caso do U-75, para a produção do hidrogênio a bordo, seriam empregadas oito unidades de reforma de metanol da TKMS com 240 kW de potência. Um novo projeto evoluído dos reformadores atuais poderia criar unidades duplas com 480 kW, sendo mais eficientes, leves e compactas. A quantidade total de LOX e metanol permite uma energia estocada de aproximadamente 786.500 kWh para a propulsão AIP. (Vide Tabela 3)

Velocidade (nós)	Potência Prop + Hotel Load 160kW(kW)	Carga Parcial % das células 1.920 kW	Eficiência das células (%)	Energia líquida (kWh)	Horas (total)	Dias (total)	Distância percorrida (m.n.)
DS 5	239	12,5	69	488.416	2.043	85	10.215
DS 8	472	24,6	66	467.181	990	41	7.920
DS 10	754	39,3	64	453.024	600	25	6.000
DS 12	1.127	58,7	60	424.710	377	15	4.520

Tabela 3 – Regime exclusivo AIP no U-75 – para o estoque de energia AIP igual a 786.500 kWh, aplicando 10% de reserva

O processo de reforma para obtenção de hidrogênio a bordo emprega três insumos diferentes: metanol (Alemanha), etanol (Espanha) e óleo diesel (França). O mais evoluído e eficiente é a reforma do metanol, que vem sendo desenvolvido há muito mais tempo pela TKMS, antes dos demais.

13 PEM-FC: Proton Exchange Membrane Fuel Cell.

Devido ao seu tamanho reduzido, no U-45 não é viável produzir hidrogênio a bordo. Neste caso, como nos submarinos de origem alemã atuais, o hidrogênio gasoso é estocado em cilindros contendo hidretos metálicos.

A quantidade estocada tradicionalmente é proporcionalmente baixa (1,8% H₂ em peso de hidretos), mas, em pesquisa recente (Ref.5) feita com o hidreto Li₃AlH₆, descobrimos que pode-se estocar cerca de 11% de H₂ em peso dos hidretos. Para liberar hidrogênio desse hidreto, necessita-se de uma temperatura de ≈ 200°C e uma energia igual a 25 kJ/mol (6,94 W/mol) de H₂, parâmetros que determinaram nossa escolha. No caso, temos 65 t de hidretos para estocar 8 t de H₂ (gás).

O abastecimento dos submarinos com LOX e hidrogênio gasoso consiste em operações iguais às corriqueiras em todos os hospitais urbanos, feitas pelas indústrias de gases industriais e medicinais.

Velocidade (nós)	Potência propulsão + hotel load (kW)	Potência parcial (%) das células 960 kW	Eficiência das células (%)	Energia líquida (kWh)	Horas	Dias	Distância percorrida (m.n.)
5	165	17,19	69	113.155	720	30	3.600
8	267	27,81	66	108.235	426	18	3.410
10	504	52,50	62	101.675	202	8	2.020
12	747	77,81	58	95.116	127	5	1.520

Tabela 4 – Regime exclusivo AIP no U-45 – para o estoque de energia AIP igual a 182.214 kWh, aplicando 10% de reserva

Obviamente, estas operações exigem seus cuidados específicos, mas não se ouve falar de acidentes, e nem se tem notícia de sinistros.

A rede elétrica a bordo é um *loop duplo* redundante, controlada por um servidor central. O sistema AIP, a bateria e todos os sistemas elétricos consumidores ficam conectados neste *loop*. Esclarecendo um erro comum nos artigos informativos: o sistema AIP nunca carrega a bateria, somente os *gen-sets*¹⁴ as recarregam, usando o MGFO¹⁵ durante a esnorquelagem, ou seja, a demanda de energia elétrica provém ou da bateria ou do AIP. Mas, tecnicamente, pode-se puxar energia dos dois sistemas simultaneamente.

BATERIA (REF. 19 E 20)

Escolhemos a tecnologia da firma Sakúu, estabelecida no Vale do Silício, Califórnia, fabricante de baterias de íons de lítio no estado sólido por impressão 3D.

Uma célula produzida (*pouch*) pelo fabricante tem dimensões de 227 mm x 160 mm x 7,5 mm (0,2724 litros), com tensão igual a 3,7 Volts e peso aproximado de 0,494 kg. A meta de densidade de energia já atingida pela Sakúu para esta célula foi de 800 Wh/l ou 310 Wh/kg (2022), sendo o próximo objetivo 1.200 Wh/l ou 660 Wh/kg (informação pública do fabricante para 2025).

14 Gen-Set: conjuntos diesel geradores.

15 MGFO: Marine Gas Fuel Oil ou diesel de alta qualidade e baixo teor de enxofre.

A capacidade elétrica da célula atual gira em torno de 59 Ah. Oito camadas de células, cada uma com quatro células ($8 \times 4 = 32$), definem a seção transversal do módulo com 450 mm x 320 mm e 104 mm de altura, inclusive com montagem e refrigeração. Estas 32 células são ligadas em série¹⁶, formando *strings* de células, e 15 *strings* de células são ligados em paralelo¹⁷, formando um módulo de bateria.

Cada módulo de bateria teria então: 156 cm x 45 cm x 32 cm / 237 kg. Um módulo pode ser subdividido em cinco submódulos de 31 x 45 x 32 cm/48 kg, facilitando a montagem e o manuseio. Um módulo é composto de células, sistema de refrigeração e de monitoramento dedicado. Assim o tempo de imobilização do submarino por conta da manutenção das baterias seria muito reduzido.

As baterias LIB¹⁸ no estado sólido da Sakúu devem custar 40% menos do que as baterias similares dos concorrentes, devido ao processo de fabricação por impressão 3D. São muito seguras, pois não sofrem com problemas de *thermal runaway* e/ou curto-circuito. O fabricante informa que suas baterias podem ser recarregadas a 80% em 15 minutos, desde que haja corrente elétrica disponível. A retenção de carga é da ordem de 97%, após 200 ciclos, e 80% depois de 800 ciclos. As LIB modernas duram cerca de 2.500 ciclos. Considera-se como ciclo 100% DOD¹⁹.

No U-75, o peso total da bateria (150 módulos/30 *strings*) seria de 35.550 kg. Aplicando-se a tecnologia da Leydenjar (Eindhoven, Holanda) com anodos de silício poroso, a energia total da bateria

seria: $E = 26.720 \text{ kWh}$. No U-45, o peso total da bateria (110 módulos/22 *strings*) seria de 26.000 kg. Aplicando-se a mesma tecnologia, a energia total da bateria seria: $E = 19.595 \text{ kWh}$.

GRUPOS DIESEL-GERADORES

Adotando a premissa de aumentar a capacidade AIP e reduzir o tamanho da bateria, julgamos adequado manter o número mínimo de grupos geradores para reduzir o tempo de recarga e, consequentemente, a taxa de indiscrição. Os fabricantes de baterias sempre focam na publicidade dos tempos reduzidos de recarga (C-rate) de seus produtos. Mas o tempo de recarga depende da capacidade (Ah) geradora disponível.

Nos dois casos, U-75 e U-45, escolhemos o grupo gerador MAN12PA-4V200VG, em vez do mais popular MTU12V4000U83. O grupo gerador MAN produz mais corrente elétrica e tem uma rotação de 1.200 RPM contra 1.800 RPM do MTU. A rotação 33% mais baixa traz como benefício menos vibração e ruído. Sua potência é de 1.990 kW mecânicos e 1.590kWe. No submarino U-75, instalamos quatro grupos e no U-45 dois grupos geradores.

AUTONOMIA/RAIO DE AÇÃO

Sempre que se fizerem os cálculos da autonomia ou do raio de ação, é recomendável adotar uma reserva de 10% dos diversos combustíveis, respeitando-se, também, a provisão de mantimentos com reserva de maneira compatível. Vamos

¹⁶ Na ligação elétrica em série, somam-se as voltagens e mantém-se inalterado o valor da amperagem.

¹⁷ Na ligação elétrica em paralelo, somam-se as amperagens (ou capacidade em Ah) e mantém-se inalterado o valor da voltagem.

¹⁸ LIB = Lithium Iron Battery.

¹⁹ DOD = Depth of Discharge ou percentual de descarga.

DOD BATERIA	U-75	U-45	U-75	U-45	U-75	U-45
VELOC = 20 nós	25%		50%		75%	
DESCARGA (Ah)	11.284	8.275	22.568	16.550	33.851	24.825
TEMPO NAVEGADO (h)	1,41	2,42	2,83	4,28	4,24	7,25
DISTÂNCIA (M.N.)	28,3	48,3	56,6	85,7	84,9	145,0
TEMPO RECARGA (h)	1,13	1,36	2,26	2,92	3,38	4,44
TAXA DE INDISCR (%)	44,5	36,0	43,8	40,6	44,3	38,0

Tabela 5 – *Sprint speed* 20 kts, inclusive *hotel-load*, exclusivamente com bateria

começar o cálculo da autonomia/raio de ação por um caso particular, a saber, o da evasão a velocidade máxima.

Vamos considerar, simplificada, 1 x evasão com 50% DOD e 2 x com DOD igual a 25%. Somados, representam uma descarga total de 100%.

Para o U-75 são $26.720 \text{ kWh} \div 592 \text{ Volts} = 45.135 \text{ Ah}$. A capacidade geradora é igual a $4 \times 2.686 \text{ Ah}$.

No U-45 teríamos $19.595 \text{ kWh} \div 592 \text{ Volts} = 33.100 \text{ Ah}$. A capacidade geradora é igual a $2 \times 2.686 \text{ Ah}$.

Note-se como a taxa de indiscrição é elevada nestas situações. Este é um argumento contra as baterias excessivamente grandes ou exclusivas, isto é, submarino sem AIP.

Quanto ao estoque de óleo diesel, vamos subtrair a margem de segurança de 10% e o combustível possível de ser consumido nas evasões a alta velocidade. Consideramos três evasões diferentes, somando DOD = 100%.

Portanto, daqui em diante, os estoques líquidos de diesel para cálculo serão: U-75 = $120 - 9.334 - 12 \approx 98 \text{ ton}$ e, no caso do U-45: $50 - 6,5 - 5 = 38 \text{ ton}$. Viagem até a zona de operações e taxa de indiscrição: estipulamos uma velocidade de viagem submersa igual a DS 10 kts e esnorque-lagem NS 5 kts. Cada trajeto (ou ciclo)

submerso deve consumir 50% da bateria, por definição.

U-75 – O tempo de viagem submerso será: $22.568 \text{ Ah} \div 1.274 \text{ Ah} = 17,71 \text{ h}$ x 10 nós = 177 m.n. O tempo de recarga será igual a 2,26 hs, percorrendo 11 m.n. com taxa de indiscrição $2,26 \text{ h} / 2,26 \text{ h} + 17,71 \text{ h} = 11,32\%$, resultado excelente.

O consumo de diesel por ciclo será: $2,26 \text{ h} \times 1.990 \text{ kW} \times 4 \times 0,260 \text{ kg/kWh} = 4.677 \text{ kg diesel}$. Com o estoque disponível de 98 t, chegamos a 21 ciclos x (177 m.n. + 11 m.n.) = 3.948 m.n., tempo total = 419 h (17 dias).

Tempo de missão: 17 dias (viagem) + 85 dias (AIP máx.) = 102 dias (inclusas reservas de 10%); será necessário aumentar os mantimentos para mais oito dias ou mais 2.304 kg de mantimentos.

U-45 – O tempo de viagem submerso será: $16.550 \text{ Ah} \div 851 \text{ Ah} = 19,44 \text{ h}$ x 10 nós = 194 m.n. O tempo de recarga será igual a 2,92 h, percorrendo 15 m.n. com taxa de indiscrição $2,92 / (2,92 + 19,44) = 13,06\%$.

O consumo de diesel por ciclo será: $2,92 \text{ h} \times 1.990 \text{ kW} \times 2 \times 0,270 \text{ kg/kWh} = 3.138 \text{ kg diesel}$. Com o estoque disponível de 38 t, chegamos a 12 ciclos x (194 m.n. + 15 m.n.) = 2.508 m.n., tempo total = 268 h (11 dias).

Total de tempo em missão: 11 dias (viagem) + 30 dias (AIP máx.) = 41 dias (inclusas reservas de 10%); será necessá-

rio aumentar a margem de segurança para 45 dias ou mais 736 kg de mantimentos.

ASSUNTOS GERAIS PERTINENTES AOS DOIS MODELOS

– Sensores: Para os dois modelos devem ser empregados os mesmos sensores, como os diversos tipos sonares, radar, ESM, comunicações etc. Para não penetrar o casco de pressão, serão empregados somente mastros optrônicos, substitutos mais modernos dos periscópios. Os sistemas de combate e controle de plataforma são os mesmos, exceto pelo tamanho ou abrangência.

– Armamento: Os dois submarinos têm 8 x tubos de 533 mm para torpedos pesados e/ou leves, mísseis e minas. No caso do U-75, são transportados armamentos equivalentes a 22 torpedos pesados. No U-45, são apenas aqueles carregados nos oito tubos, municiados no porto.

– UUV: O Unmanned Underwater Vehicle (UUV) deve caber num tubo de torpedo e pode ser fio guiado ou autônomo. As três principais missões seriam a coleta de inteligência, destruição de alvos e reconhecimento topográfico do fundo do oceano da área de interesse.

Citamos aqui apenas um modelo a título de exemplo, o Remus-620 da Huntington Ingalls Industries (HII): L 520 cm x Dia 33 cm / 357 kg; autonomia até 80 h / 200 m.n. Em 2024, a HII anunciou o Remus 620 Next Generation Submarine Deployable UUV.

CUSTOS

A nova classe U-212CD, 2.500 ton fluando/L=73m, Noruega (4x) e Alemanha

(2x), segundo a imprensa especializada, custará cerca de € 7,3 bilhões. Cada submarino, €1,125 bilhões. Temos, então, um custo de €1,125 bi: 2.083 ton std. = €540K/ton. Podemos, então, fazer uma estimativa do custo do U-75 para €540K/ton x 2.825 tons = €1,526 bilhão.

Os quatro submarinos em construção pela TKMS para Singapura, os U-218SG, custaram €774 milhões (2018) ou €475K/ton. aproximadamente. A nova classe italiana em fase de construção e baseada nos U-212A, chamada U-212NFS²⁰, tem uma estimativa de custo (2020) igual a €675 milhões ÷ 1.400 ton std. = €482K/ton.

Para estimar o custo de obtenção do U-45, tomamos a média dos mais modernos U-212NFS e U-218SG, igual a €479/t *standard*. Resulta em 890 t x €479/t = €426K. No trabalho da Ref. 17, tiramos o valor do submarino estudado e extrapolamos o custo em euros para o U-45, resultando em €377K. Tirando uma média, chegamos a €402K.

Numa das poucas informações obtidas pelo autor sobre custos de operação e manutenção, achamos na internet um livro publicado por Philipp Gallhöfer²¹. Consta que os submarinos convencionais da UE têm em média um custo operacional de €211 milhões/ano. Cerca de 28% são despesas com pessoal, 72% com operação (combustíveis, mantimentos etc.).

Um exemplo básico de custo operacional seria:

U-75: uma carga completa de combustíveis para uma missão de 102 dias, base 2024, custaria cerca de US\$ 274.913,00 (dividido por 102 dias = US\$ 2.695,00/dia de missão).

U-45: uma carga completa de combustíveis para uma missão de 41 dias, base

²⁰ NFS: Near Future Submarine.

²¹ *Effizienz und Effektivität durch Verteidigungs Kooperation*, Springer Verlag, 2013.

2024, custaria cerca de US\$ 121.589,00 (dividido por 41 dias = US\$ 2.965,00 / dia de missão).

CONCLUSÃO

Com a evolução das tecnologias na construção de submarinos convencionais, além dos sistemas AIP e baterias, principalmente na Alemanha, Suécia, Coreia do Sul e Japão, a supremacia dos submarinos nucleares precisa ser relativizada, questionada e justificada em função dos requisitos operacionais de uma dada Marinha.

Com o AIP, as desvantagens do convencional em relação ao nuclear diminuíram. Mas não nos esqueçamos de que, em ambos os casos, existem os tripulantes, que têm um limite para suportar a vida confinada, sem privacidade alguma, longe das famílias, e o estoque físico de mantimentos.

Nosso ponto focal como missão deveria ser o de cuidar da segurança da faixa oceânica ao longo da costa brasileira, mantendo potenciais agressores a uma distância tal que o raio de ação das armas do oponente seria neutralizado. Dentro dessa faixa, digamos cerca de 1.200 m.n. de largura, seriam asseguradas a livre navegação e a atividade econômica, com a segurança de bases navais, estaleiros e portos. Com um número suficiente e realista de submarinos oceânicos como o U-75, apoiados por meios de superfície e uma boa rede de comunicações e inteligência, seria possível cumprir essas missões.

A simples suspeita da presença de submarinos numa determinada área marítima já faz o inimigo hesitar em se aproximar e o obriga a agrupar e coordenar um importante número de meios navais e aéreos para se certificar da presença de submarinos. Sem dúvida, trata-se, o submarino, do melhor meio de dissuasão contra potenciais agressores.

Modernamente, as Marinhas mais evoluídas estão engajadas em projetar e construir UUV de grande porte, que serão autônomos ou comandados a partir de bases navais, navios de superfície ou submarinos. Todas as Marinhas de vanguarda já compreenderam que, no futuro, submarinos tripulados serão poupados para missões específicas, relegando operações de maior risco para os UUV, que têm custos de obtenção, operação e manutenção muito inferiores aos dos submarinos e são ágeis, furtivos, sem risco de vidas humanas e tecnologicamente muito avançados.

Estamos convencidos em afirmar que seria muito mais racional concentrar todas as atividades subaquáticas, como submarinos, UUV, minagem e contraminagem, fabricação/manutenção/modernização de armas como torpedos e minas e, também, mergulhadores de combate, numa única OM. Como exemplo, lembramos que na US Navy existe o NUWC – Naval Underwater Warfare Center, que concentra toda a tecnologia de guerra submarina no âmbito do Navsea – Naval Sea Systems Command.

CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:

<ADMINISTRAÇÃO>; Submarino;

<ARTES MILITARES>; Submarino;

<CIÊNCIA & TECNOLOGIA>; Submarino; Submarino Nuclear; Veículo Submarino Não Tripulado;

BIBLIOGRAFIA

- ACRU – Advanced Carbon dioxide Removal Unit; US Navy. *Revista do Instituto de Química da UFRN*, v. 26, n. 4.
- ARJES, Fregatten Kapitän Bernd. Marinha da Alemanha, instrutor de comandantes de submarinos, representante do Inspetor da Marinha na equipe de projeto do novo submarino U-212CD, no BAAINBw.
- BERTRAM, Prof Volker: Submarine Hull Design.
- BUCKINGHAM, John. Submarine Power and Propulsion, BMT Defence Services Ltd. Bath, UK.
- DEMATTEIS, Dra. Erika Michaela: Hydrogen Storage in complex hydrides, University of Torino, Italy. Mais 31 colaboradores/pesquisadores na Alemanha, Dinamarca, Holanda, Japão, USA, Noruega, Coreia e Austrália.
- GABLER, Prof. Ulrich: Submarine Design, Ingenieur Kontor Lübeck, Alemanha.
- HAFENDEN, Wilson: An investigation into the wave making resistance of a submarine travelling below the free surface. Australian Maritime College, BMT Design and Technology, Melbourne, Australia.
- JACKSON, Captain Harry A. (US Navy Rtd.), Massachusetts Institute of Technology.
- JOUBERT, Prof. P.N.: Some Aspects of Submarine Design Part 2: University of Melbourne, Defence Science and Technology Organization.
- LINDSTRÖM, Bård. Development of a Methanol Reformer for Fuel Cell Vehicles, Department of Chemical Engineering and Technology, KTH, Stockholm, 2003.
- MTU – Motoren und Turbinen Union, Friedrichshafen, Alemanha, informações sobre motores e turbinas em geral.
- MAN – Maschinenfabrik Augsburg & Nürnberg, motores, máquinas em geral.
- NAVAL FORCES: Revistas *Subcon* 2003, 2007, 2011 e 2015 com artigos de seminários sobre temas relacionados a submarinos.
- POURMOVAHED, Ahmad. Mechanical Engineering Department, Kettering University, Flint-Michigan, US.
- TORKELSON, Kai Oscar. “Comparative Naval Architecture Analysis of Diesel Submarines”, MIT.
- US NAVAL ACADEMY, Course Objectives chapter 10: Submarines and Submersibles.
- VIRGINIA TECH TEAM. ATLAS – Advanced Tactics Littoral Alternative Submarine, Ocean Engineering Design Project, Littoral Warfare Submarine (SSLW).
- VOGT, René: sobre AIP – RMB 4º t/2017
- VOGT, René: sobre Bateria I – RMB 3º t/2018.
- VOGT, René: sobre Bateria II – RMB 4º t/2023.
- WALLNER, Raimund. Capitão de Mar e Guerra da Reserva da Marinha da Alemanha.