

PROPULSÃO DE SUBMARINOS INDEPENDENTE DA ATMOSFERA (AIP – *AIR INDEPENDENT PROPULSION*)

RENÉ VOGT*
Engenheiro

SUMÁRIO

Introdução
Células PEM¹
Estoque de hidrogênio
Sistema de reforma do metanol
Balanço de energia e pesos
Emprego e segurança
Custos dos sistemas AIP
Concorrência dos sistemas CCD², *Stirling*³ e *Mesma*⁴
Conclusão
Considerações finais

INTRODUÇÃO

O propósito deste estudo é examinar as opções mais modernas atualmente disponíveis para aumentar a oferta de energia AIP – *Air Independent Propulsion* – a bordo de submarinos convencionais. A maior oferta de energia possibilita o aumento da autonomia do submarino na-

vegando submerso. Além do aumento da oferta de energia a bordo, este progresso técnico precisa estar intimamente ligado a tecnologias que reduzam riscos e custos de operação.

Na Alemanha, as firmas HDW – *Howaldtswerke Deutsche Werft*, do grupo TKMS⁵, e Siemens foram as pioneiras na pesquisa de células combustíveis PEM

* 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 uma escolta para a Marinha do Brasil" publicado na *RMB* do 1º trimestre de 2015.

1 PEM – *Proton Exchange Membrane*.

2 CCD – *Closed Cycle Diesel*.

3 *Stirling* – Ciclo termodinâmico inventado pelo escocês Robert Stirling em 1816.

4 *Mesma* – *Module d'Énergie Sous-Marine Autonome*.

5 TKMS – Thyssen Krupp Marine Systems.

– *Proton Exchange Membrane* – desde meados da década de 1980. As células combustíveis produzem eletricidade pela reação de hidrogênio e oxigênio, gerando apenas água como subproduto.

Na Suécia, a firma Kockums desenvolveu o sistema *Stirling*, um processo termodinâmico que transforma energia termomecânica em energia elétrica. A francesa DCNS⁶ desenvolveu o sistema Mesma, que também é um processo termodinâmico que emprega uma turbina a vapor de ciclo fechado.

Como alternativa viável para aumentar a oferta de energia estocada a bordo de submarinos de maior deslocamento com sistema AIP com células PEM, os pesquisadores desenvolveram o processo de reforma utilizando um combustível (hidrocarboneto) líquido, fornecido e armazenado a bordo de uma forma muito mais segura, simples e barata do que o hidrogênio.

O foco principal deste estudo serão as células combustíveis PEM com hidrogênio estocado em tanques de hidretos metálicos, assim como células PEM funcionando alternativamente com hidrogênio produzido a bordo pela reforma de metanol.

Não vamos nos deter com o funcionamento das células de combustível propriamente ditas, nem dos dois sistemas concorrentes. O objetivo é estudar uma forma de aumentar a oferta de energia para as células PEM mediante o emprego do MRS – *Methanol Reformer System*⁷, utilizando o metanol como combustível para produzir hidrogênio a bordo de submarinos. Mas serão feitos comentários e comparações com os outros dois sistemas AIP citados acima. No final, pretendemos

ter condições de tirar algumas conclusões práticas e verificar qual destes processos é o mais econômico e tecnicamente viável.

Qualquer que seja o sistema AIP, ele é utilizado quando o submarino está submerso em missão que requer máxima discrição. Durante esse regime, as baterias são poupadas. Mas quando se necessita de um *sprint speed*⁸ durante um breve intervalo de tempo, combina-se as energias do AIP e das baterias. Essas duas fontes de energia são independentes, mas podem ser combinadas.

Os nomes, as marcas e os modelos citados são de livre arbítrio do autor, que não tem quaisquer vínculos com as firmas citadas ou suas concorrentes. Os dados obtidos e fatos mencionados estão disponíveis na literatura ostensiva ou foram conseguidos por outros meios de consulta.

CÉLULAS PEM

A adoção do sistema AIP em submarinos convencionais com células combustíveis oferece notáveis vantagens operacionais. Os submarinos equipados com o sistemas AIP em geral podem ficar submersos por períodos mais longos durante uma missão, o que com submarinos mais antigos, utilizando apenas baterias de ácido-chumbo, é muito mais limitado.

Nos dias atuais, os tipos de missões atribuídas a submarinos convencionais requerem um nível de indiscrição acústica o mais baixo possível para poder operar furtivamente em águas inimigas, como plataforma para coleta de informações, realizar operações AA/AD⁹ e patrulhar *choke points*¹⁰ ou desembarcar forças especiais, sem serem detectados.

6 DCNS – Direction de Constructions Navales et Services.

7 MRS – *Methanol Reformer System* (Sistema de reforma do metanol).

8 *Sprint speed* – Velocidade de pico ou máxima.

9 AA/AD – *Anti Access/Area Denial*.

10 *Choke points* – pontos de estrangulamento ou passagens obrigatórias como, por exemplo, estreitos.

Assim, em vez de permanecer submerso e oculto por apenas alguns dias, movido por baterias convencionais de chumbo-ácido, hoje com a adição de um sistema AIP em submarinos da ordem de 1.700 toneladas de deslocamento *standard*, é possível operar submerso por aproximadamente 15 dias, ou pouco mais, sem necessidade de emergir.

Os sistemas AIP não dispensam o uso de baterias, e o cálculo da sua potência instalada é totalmente independente da potência instalada dos bancos de baterias. Os submarinos atuais ainda utilizam as baterias de chumbo-ácido, mas no curto prazo as baterias de íons de lítio serão aplicadas em novos projetos ou na modernização de submarinos em serviço.

A densidade de potência das baterias de íons de lítio é o triplo das de chumbo,

e seu peso é mais ou menos a metade. Isso demanda um novo cálculo de lastro, possivelmente com a adição de lastro fixo de chumbo, no caso de submarinos que passam por uma modernização.

Nos projetos novos, os volumes e pesos de instalações completas de AIP são integrados desde o início dos estudos de exequibilidade. E as baterias, tipos, tecnologia e tamanho dos bancos são igualmente integrados no escopo de um novo projeto.

Mas, no caso de uma modernização de um submarino que não possua AIP e ainda utilize baterias de chumbo, uma seção *plug-in* com o AIP produz um empuxo maior do que seu peso, ou seja, aumenta a flutuabilidade. Tal como na troca de baterias, como mencionado no parágrafo acima, o novo cálculo de lastro fixo é indispensável.

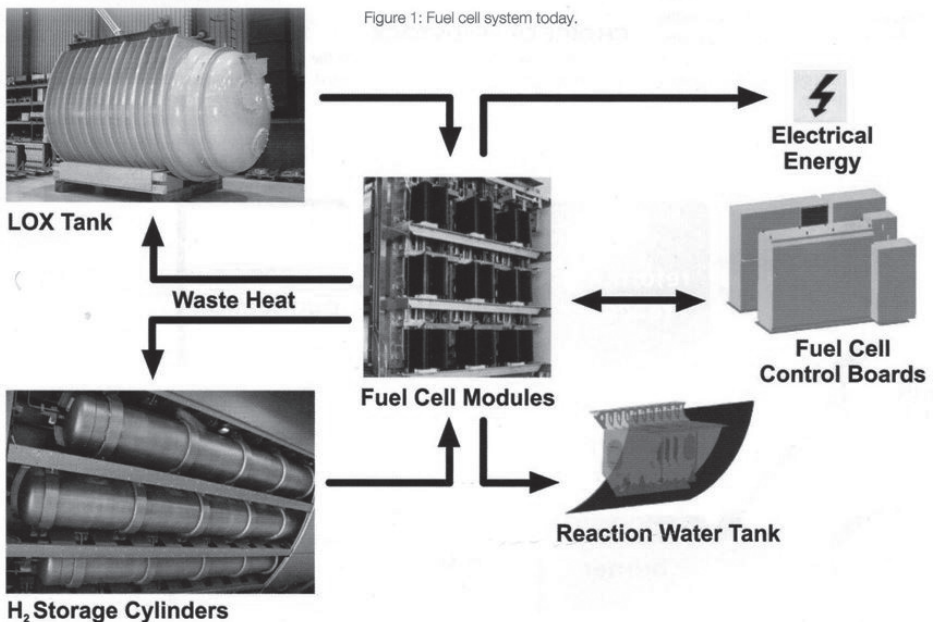


Figura 1 – Esquema detalhado do processo AIP atual com hidrogênio estocado em tanques de hidretos metálicos. Foto cedida com exclusividade para a *Revista Marítima Brasileira* por *Naval Forces* Mönch Publishers, Alemanha

Desde meados da década de 1980, as firmas HDW e Siemens desenvolveram as células combustíveis PEM, em que a reação de hidrogênio e oxigênio produz eletricidade e apenas água como subproduto. Na tecnologia adotada, a reação se processa a uma temperatura de 80°C. As células mais modernas e potentes, utilizadas nos submarinos das classes *U-214* e *U-212-A 2nd. Batch*¹¹, têm 120 kW por módulo. Estas duas classes têm no seu sistema AIP dois módulos de células, totalizando 240 kW de potência instalada. Cada módulo de 120 kW tem uma seção de 50 cm x 53 cm, com comprimento de 176 cm, e pesa 900 kg.

A transferência do calor ou *Waste Heat*¹² para os tanques de hidretos e oxigênio, como mostrado na Figura 1, ocorre mediante a circulação da água de refrigeração das células combustíveis. Essa transferência é necessária para liberar hidrogênio e gaseificar o oxigênio, respectivamente.

Apenas a metade deste calor é suficiente para esse fim, o restante permanecendo no circuito do sistema ou liberado à água do mar. Como a temperatura do sistema é de apenas 80°C, a assinatura térmica do submarino é mínima.

A eficiência¹³ do processo das células PEM é relativamente elevada, com 58% a plena carga e 68% a 20% da carga máxima (Ref. 4). Sem partes móveis, elas não produzem ruídos ou vibrações, donde temos assinaturas acústica e térmica praticamente “zero”. Demandam quase nenhuma manutenção entre as TBO¹⁴ de 5 mil horas e apresentam uma elevada dis-

ponibilidade operacional. A manutenção é feita pelos tripulantes.

Nos submarinos de fabricação alemã atualmente em operação, o oxigênio líquido é estocado dentro do casco de pressão em tanques LOX¹⁵ criogênicos com isolamento térmico a vácuo, sendo todas as unidades testadas contra choques. Suas dimensões são o fator preponderante no dimensionamento do sistema AIP como um todo.

O hidrogênio é estocado em tanques cilíndricos contendo hidretos metálicos que ficam do lado de fora do casco de pressão, entre este e o casco externo, não aparentes. Nestas duas classes, *U-212-A* e *U-214*, a potência instalada das células PEM é de 240 kW (2 x 120 kW). Além das células, existem um conversor DC/DC¹⁶ e o painel de comando. O esquema do sistema correntemente em uso encontra-se na Figura 1.

O processo criogênico para estocar o oxigênio em estado líquido não constitui novidade tecnológica, sendo um processo antigo, seguro e consagrado. No Brasil há pelo menos uma dezena de grandes empresas que produzem gases industriais, sem registros de incidentes significativos. A transferência de oxigênio líquido é feita com caminhões próprios dos fabricantes de gases industriais, tal como é feito corriqueiramente em hospitais.

Não se tem notícia de acidentes com este tipo de instalação em nenhuma Marinha operando submarinos de fabricação alemã com o sistema AIP – Alemanha, Itália, Grécia, Turquia, Coreia do Sul e Portugal. Brevemente a Noruega irá in-

11 *2nd. Batch*: segundo lote.

12 *Waste Heat* = Calor Residual.

13 Eficiência de um sistema é a razão entre a energia efetivamente utilizada e a energia nominal do sistema.

14 TBO – *Time Between Overhaul*.

15 LOX – *Liquid Oxygen*.

16 DC – *Direct Current* = corrente contínua.

tegrar este grupo com seus quatro novos submarinos da classe *U-212A NG*, além de Singapura, com quatro da classe *U-218SG* em construção.

Obtivemos da HDW a informação de que atualmente todos os sistemas em operação somam cerca de 70 mil horas de serviço em regime AIP com células PEM. Relacionamos abaixo os submarinos em questão e seus tempos de incorporação:

– Alemanha: *U31*: 2005, *U32*: 2005, *U33*: 2006, *U34*: 2007, *U35*: 2013 e *U36*: 2014, somando 57 anos-submarino.

– Itália: *Salvatore Todaro*: 2006, *Scirè*: 2008, *Pietro Venuti*: Jul/2016, *Romeo Romei*: Jul/2017, somando 21 anos-submarino.

– Portugal: *Tridente*: 2010, *Arpão*: 2011, somando 13 anos-submarino.

– Coreia do Sul: *Son-Won II*: 2007, *Jeong Ji*: 2009, *An Juong-Geun*: 2009, *Kim Jwa-Jin*: 2014, *Yun Bong-II*: 2016, *Yu Gwansun*: 2017, *Hong Beom-Do*: 2017,

Lee Beom-Seok: 2016, *Shin Dol-Seok*: 2017, somando 25 anos-submarino.

– Grécia: *Papanikolis*: 2010, Pipinos: 2015, Matrozos: 2016, Katsonis: 2016, somando 11 anos-submarino.

– Israel: *Tanin*: 2013, *Rahav*: 2014, somando sete anos-submarino.

Temos um total de 27 submarinos, com 134 anos-submarino de incorporação somados. Resumidamente, temos as seguintes características dos submarinos de origem alemã atualmente ativos e que utilizam o sistema AIP com células combustíveis. (ver tabela abaixo)

A relação típica de densidades de energia entre as três fontes fornecedoras a bordo de um submarino do tipo *U-212-A* ou *U-214* é a seguinte: baterias (chumbo-ácido) = 1, sistema AIP com células PEM = 10 e gerador diesel = 100 (estoque de diesel a bordo).

Como um exemplo operacional com emprego de AIP, tomemos a classe *U-214*,

MODELO	U-212-A (1)	U-214 (2)	DOLPHIN II (3)	U-218 SG (4)
Desloc. <i>Standard</i> .	1.500 T	1.700 T	2.000 T	2.000 T
Comprimento	57,2 m	65,0 m	68,6 m	70,0 m
Boca	6,8 m	6,3 m	6,8 m	6,3 m
Calado	6,4 m	6,0 m	6,2 m	6,1 m
Veloc. Superf. Max.	12 nós	12 nós	12 nós	n.d. (7)
Veloc. Subm. Max.	20 nós	20 nós	25+ nós	n.d.
Veloc. Max.AIP (6)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Autonomia AIP	15dias/4nós/240kW	15dias/4nós/240kW	n.d.	240 kW
Auton. Mantimento	84 dias	84 dias	n.d.	n.d.
Raio de ação Sup.	8.000 mn (8) / 8 nós	12.000 mn / 8 nós	n.d.	n.d.
Potência Propulsão	1.700 kW	2.850 kW	3.164 kW	n.d.
Profundidade	250 m	400 m (5)	350+m	n.d.

1) nº de submarinos: 4 Itália, 6 Alemanha.

2) nº de submarinos: 2 Portugal, 4 Grécia, 9 Coreia do Sul, 6 Turquia (constr).

3) nº de submarinos: 2 Israel + 1 (finalizando).

4) nº de submarinos: 4 Singapura (em construção), *U-218SG* vem a ser uma evolução do *Dolphin II*.

5) reportado.

6) não foi possível obter esta informação, mas presumimos que seja algo entre 6 e 8 nós.

7) n.d.: não divulgado.

8) mn: milhas náuticas.

que tem um raio de ação na superfície de 12 mil n.m. a 8 nós e uma autonomia de mantimentos para 70 dias. Segundo a Ref.10, consideremos uma reserva de 20% de combustível para eventualidades. A utilização dos recursos fica exclusivamente submetida ao critério do comandante do submarino, em função das situações que poderão ocorrer.

O submarino pode se deslocar da base até uma área de operação distante 4.800 mn ((12.000 x 0,8): 2) navegando a 8 nós ((12.000 mn x 0,8): 2) = 4.800 mn, o que perfaz um total de 50 dias somando ida e volta à base (9.600 mn: 8 nós: 24 hs = 50 dias). Estes dois percursos podem ser cobertos navegando na superfície usando os diesel-geradores ou submerso com a energia das baterias esnorquelandando quando necessário.

Chegando à sua área de operações predefinida, o submarino pode permanecer em patrulha submerso por 15 a 18 dias a 4 nós exclusivamente com AIP, cobrindo +/- 1.440 mn Somando o período total de tempo, temos cerca de 65 dias, e no seu retorno à base ainda terá uma margem de mantimentos para cinco dias.

A reserva de combustível de 20% para eventualidades pode ser utilizada, por exemplo, se houver necessidade de deslocamentos rápidos durante a missão, mas poderá demandar uma operação de esnorquel. Este cálculo foi confirmado ao autor pelo engenheiro Peter Hauschildt, da HDW.

Este exemplo considera as baterias de chumbo-ácido. Se o submarino se desloca submerso com energia das baterias, ele precisa esnorquelar aproximadamente a cada dois a três dias, aumentando sua indiscrição. Com baterias de íons de lítio,

a distância percorrida entre recargas das baterias – os intervalos para esnorquelar – aumenta. Com a vantagem que baterias de íons de lítio são recarregadas muito mais rapidamente do que as de chumbo-ácido, reduzindo a indiscrição do submarino.

Como fato relevante a ser mencionado sobre a vantagem da tecnologia AIP com células combustíveis, em abril de 2006 o submarino alemão *U-32* suspendeu em Eckernförde no Báltico e navegou 1.500 mn até a base naval de Rota na Espanha, em 18 dias, sem emergir ou utilizar o esnorquel o que da uma velocidade média de 3,5 nós.

ESTOQUE DE HIDROGÊNIO

Este é um tópico que merece maior atenção. Atualmente o hidrogênio é estocado a bordo em tanques contendo hidretos metálicos¹⁷. Sob certas condições de temperatura e pressão, os hidretos absorvem hidrogênio gasoso em sua malha molecular ou o liberam. Esta armazenagem não é um processo químico, mas físico.

Durante o desenvolvimento da célula combustível propriamente dita, foi necessário resolver em paralelo o problema da armazenagem de hidrogênio a bordo. O armazenamento de hidrogênio com hidretos metálicos, como empregado nos submarinos das classes *U-212-A* e *U-214*, possibilita atingir um alto nível de segurança, mas requer pesos e volumes de hidretos consideráveis para uma quantidade relativamente baixa de hidrogênio contido nos hidretos.

Qualquer aumento pretendido do estoque de hidrogênio a bordo poderia levar a

17 Citamos alguns exemplos de hidretos metálicos: $TiFeH_2$; $CaNi_5H_6$ são hidretos de baixa e média temperatura. MgH_2 ; Mg_2NiH_4 ; TiH_2 são hidretos de alta temperatura. Elementos químicos: Ti = titânio, Fe = ferro, H = hidrogênio, Ca = cálcio, Ni = níquel e Mg = magnésio.

um aumento inviável de peso dos cilindros de hidretos, com reflexos nem sempre aceitáveis nas dimensões de um submarino convencional. Os dois *drivers* principais no dimensionamento do sistema AIP e consequentemente do submarino são o volume do tanque LOX e o peso dos tanques de hidretos para armazenar hidrogênio.

Para a aplicação da tecnologia AIP atual com hidretos metálicos para armazenar hidrogênio, o limite são submarinos da ordem de 2.000-2.200 tons de deslocamento *standard*¹⁸. Acima deste limite, impõe-se o processo de reforma para produzir hidrogênio a bordo (como se verá adiante).

Portanto, o sistema AIP baseado em células combustíveis com armazenagem de hidrogênio em hidretos metálicos tem muitas vantagens do ponto de vista do submarino em si, porém não viabiliza a construção de um submarino com uma autonomia submersa além de aproximadamente duas semanas, como no caso das classes *U-212-A* e *U-214*, por exemplo.

Os hidretos podem ser classificados em função da temperatura de decomposição: hidretos de baixa (-30°C a 50°C), média (100°C a 200°C) e alta (> 200°C) temperaturas. Em função da temperatura de reação das células PEM, que gira em torno dos 80°C, vamos considerar os hidretos de média temperatura.

Dependendo das ligas dos hidretos metálicos, a densidade de energia do hidrogênio armazenada na sua estrutura molecular varia de 2,0 a 8,0 MJ/kg¹⁹ de hidreto, ao passo que um óleo combustível (hidrocarboneto) tem cerca de 42 MJ/kg de energia e o metanol 23 MJ/kg, a 25°C e pressão atmosférica normal de 101,325 kPa²⁰.

Para hidretos de média temperatura, assumimos uma densidade de 4,0 MJ/kg de hidreto, para simplificar. Nos hidretos de baixa e média temperatura, o limite de capacidade de estocagem de hidrogênio em peso é da ordem de 2,5% do peso de hidreto.

O fornecimento e o abastecimento de hidrogênio são feitos por caminhos especiais dos fabricantes de gases industriais, podendo ser estocado na base em tanques apropriados. O detalhe logístico reside no fato de que o hidrogênio não existe para fornecimento em qualquer praça com a mesma facilidade do oxigênio líquido.

A Marinha alemã utiliza barcas dedicadas que são rebocadas até o submarino junto ao cais, para a consecução da faina de abastecimento de hidrogênio. O processo é demorado porque é necessário equilibrar continuamente a pressão durante o abastecimento para que a totalidade do hidreto absorva gradualmente e por igual o volume certo de hidrogênio.

SISTEMA DE REFORMA DO METANOL

A limitação do deslocamento do submarino para empregar os hidretos metálicos fez com que os cientistas saíssem à procura de novas soluções para a armazenagem ou produção de hidrogênio a bordo. A ideia que prevaleceu foi estudar a armazenagem de hidrogênio na forma de certos compostos químicos (hidrocarbonetos), sua desintegração e posterior recuperação do hidrogênio (reforma).

Os sistemas mais amadurecidos são a reforma de metanol, etanol ou óleo diesel.

18 Deslocamento *standard*: submarino, flutuando, pronto para submergir, mas sem autonomia. (Ref.10).

19 MJ = Mega Joules, unidade de trabalho e energia. 1 Joule (trabalho) = 1 Watt (potência) x segundo (tempo) = $\frac{1,0\text{kg} \times \text{m}^2}{\text{seg}^2}$ (sistema MKS).

20 kPa: kilo Pascal. Pressão atmosférica ao nível do mar = 101,3 kPa = 1 kgf/cm² ou uma atmosfera.

A transferência e a estocagem destes líquidos em submarinos são fainas muito mais simples se comparadas àquelas com o hidrogênio, sem comprometer a segurança do submarino diretamente.

O emprego de cada uma das substâncias mencionadas acima tem seus prós e contras. É preciso examinar o resultado de cada substância no processo de reforma, resultados que influem no projeto do submarino como um todo e não apenas sobre o sistema AIP.

No projeto do reformador, em função da substância escolhida, é preciso resolver itens como a armazenagem do combustível e sua compensação com lastro (água do mar), refrigeração da instalação, exaustão do dióxido de carbono etc., em que todos estes aspectos influenciam a taxa de indiscrição do submarino.

O processo de reforma tem por objetivo produzir hidrogênio a bordo para utilização nas células PEM, eliminando o uso dos tanques de hidretos metálicos para estocagem de hidrogênio. Todos os componentes do sistema de reforma ficam dentro do casco de pressão.

Antes de continuar com a explanação do processo de reforma de metanol, temos que chamar a atenção para o custo direto de produção do kWh a bordo entre os dois

sistemas, hidretos *versus* metanol. Segundo dados da Methanex Inc. na internet, obtidos em outubro de 2017, o metanol estava cotado a € 300-350/MT (tonelada métrica) na Europa e a US\$ 450/MT nos Estados Unidos da América (EUA) e na Ásia.

Segundo cotação no mercado internacional na mesma data, o hidrogênio líquido industrial custa cerca de US\$ 5.500/MT, 12 vezes mais caro do que o metanol. Este pode ser outro forte argumento para a adoção do sistema de reforma de metanol onde aplicável, no caso de submarinos com maior demanda de energia.

Em 2003, três pesquisadores (Ref. 9) da Pennsylvania State University publicaram o resultado de uma pesquisa sobre a reforma de metanol. Foi empregado o processo de *steam reforming*, uma mistura de metanol e água. Os resultados obtidos apresentaram uma taxa de conversão de metanol (mol%) acima de 95%, produção de hidrogênio (mol%) acima de 50% e concentração de monóxido de carbono resultante igual a 10-30 ppm²¹, como desejado, sob temperaturas < 230°C.

O reformador é operado com o combustível (hidrocarboneto), oxigênio e água. O oxigênio estocado a bordo atende ao reformador e também, diretamente, à

célula combustível PEM. Consequentemente, o consumo específico de oxigênio é crucial e deve ser mantido no nível mais baixo possível.

Os principais fatores que influenciam na escolha do combustível a ser reformado é a sua disponibilidade no mercado

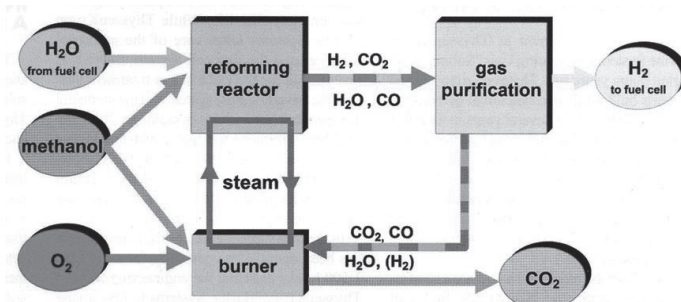


Figura 2 – Esquema simplificado do processo de reforma de metanol. Foto cedida com exclusividade para a *Revista Marítima Brasileira* por *Naval Forces* –Mönch Publishers, Alemanha

21 ppm: partes por milhão.

na refrigeração do sistema combustor/reformador. Desta forma, a água do mar embarcada serve a dois propósitos: refrigeração do sistema e para dissolver e descarregar o dióxido de carbono ao mar. O funcionamento do sistema não limita a profundidade de imersão.

O metanol é solúvel em água, donde não é possível embarcar água de lastro nos tanques de metanol ao mesmo tempo em que ele é consumido (tanque compensado). Para compensar o peso do metanol consumido e o dióxido de carbono expelido ao mar, utiliza-se a água resultante da reação química das células PEM como lastro. Os tanques de metanol deverão ser vários e pequenos. Quando um tanque estiver esgotado, ele então passa a receber água de lastro.

Há mais de 25 anos a HDW trabalha no desenvolvimento de um sistema de reforma de metanol e opera em seu estaleiro em Kiel uma instalação completa de demonstração, que atualmente encontra-se pronta para aplicação real (Figura 4).

BALANÇO DE ENERGIA E PESOS

Para avaliar e comparar os dois sistemas, chamaremos de “A” o sistema com hidretos metálicos e “B” o sistema de reforma do metanol, e no extremo final do processo temos células combustíveis de mesma potência. O sistema “A” atual utiliza cilindros contendo hidretos metálicos para estocar hidrogênio fora do casco de pressão. E no sistema futuro “B” este conjunto será substituído pelo MRS e pelos tanques de metanol, que ficam todos dentro do casco de pressão.

A HDW fez um estudo comparativo para um submarino hipotético com deslocamento *surfaced* de 4 mil tons ($U-216 = 3.950$ tons *surfaced*), simulando a propulsão necessária primeiro com um sistema AIP com tanques contendo hidretos metálicos e, alternativamente, a mesma propulsão empregando um reformador de metanol.

Adotando o sistema “A” com hidretos como referência unitária e comparando-o com o sistema “B”, que emprega um reformador de metanol, foram obtidos os seguintes resultados (vantajosos) para o sistema “B”:

- AIP-Range: +45% (com reforma consegue-se um raio-de-ação 45% maior);

- LOX volume necessário: +75% (volume do tanque de oxigênio 75% maior);

- volume de metanol *versus* volume de hidretos para a mesma oferta de hidrogênio: - 50% (o volume de metanol necessário é a metade do volume dos hidretos);

- peso de metanol *versus* peso de hidretos para a mesma

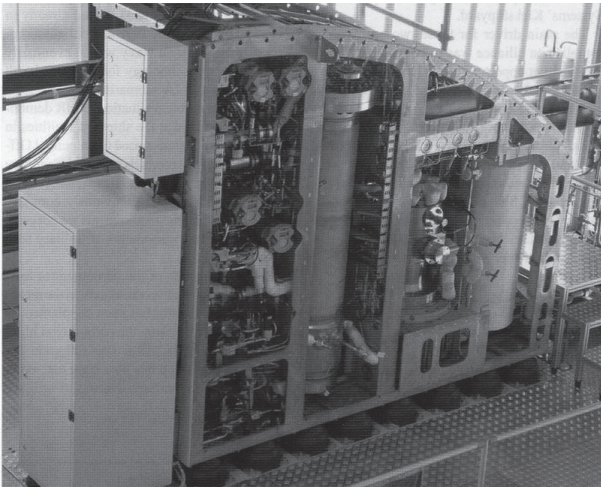


Figura 4 – Foto de uma unidade completa do Sistema de Reforma do Metanol na fábrica da HDW em Kiel, Alemanha. Foto cedida com exclusividade para a *Revista Marítima Brasileira* por *Naval Forces – Mönch Publishers*, Alemanha

oferta de hidrogênio: - 80% (o peso de metanol necessário é igual a 20% do peso de hidretos); e

– *Hotel-Load*²²: igual.

Não obtivemos informações sobre custos de obtenção ou manutenção dos dois sistemas. Tanques de hidreto praticamente não demandam manutenção e têm uma disponibilidade de 99%. A rotina limita-se à lubrificação das válvulas. Entretanto, os reformadores são sistemas com componentes que demandam manutenção e, portanto, são sujeitos a panes. As TBO para o sistema é informada como sendo de 5 mil horas. Mas para submarinos com demandas de energia maiores, o sistema de reforma é indiscutivelmente mais vantajoso.

Para a adoção de um sistema de reforma de metanol, o submarino precisa ter um diâmetro do casco de pressão de

no mínimo 6,8 m a 7,0 m. No projeto do *U-216*, temos dois reformadores alimentando quatro células de 120 kW. O módulo AIP do submarino tem um comprimento entre 8,00 m e 10,0 m, incluindo os tanques LOX e metanol, para um diâmetro do casco de pressão de 8,10 m (Figura 5). A configuração dá ao *U-216* um raio de ação de 10.500 n.m./10 nós na superfície e 30 dias em regime AIP.

Este submarino de 90 m e 4.440 tons de deslocamento submerso reflete nas suas dimensões o nível de exigência dos requisitos do Project SEA 1000 relativos à concorrência recente para o futuro submarino sucessor da classe *Collins*, da Marinha da Austrália.

Apenas para citar dois exemplos reais para melhor compreensão, dois modelos de submarinos atuais que, por suas dimensões, poderiam receber um sistema AIP

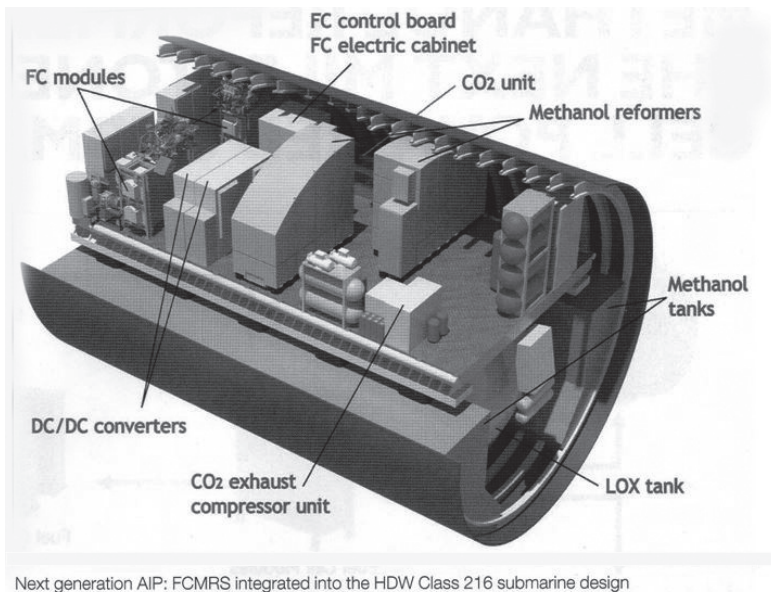


Figura 5 – Módulo integrado completo AIP do U-216 com quatro células PEM com um total de 480 kW, dois reformadores, tanques de metanol e LOX. Foto cedida com exclusividade para a *Revista Marítima Brasileira* por *Naval Forces* – Mönch Publishers, Alemanha

22 *Hotel-Load* – Demanda de energia a bordo, exceto propulsão.

com reforma de metanol, com um módulo de 240 kW, seriam:

– classe *Walrus*²³ (Holanda), com 67 m x 8,4 m x 7,0 m (comprimento, boca e calado) com 2.640 tons submerso; e

– classe *Vickers 2400* classe *Upholder*²⁴, hoje classe *Victoria* (Canadá), com 70,3 m x 7,6 m x 7,5 m / 2.360 tons submerso.

Mas, devido à idade destes submarinos, um *upgrade* de tal monta é totalmente inviável. O exemplo serve apenas para dar uma ideia do volume necessário de um submarino para poder-se instalar um sistema de reforma de metanol de aproximadamente 240 kW de potência.

EMPREGO E SEGURANÇA

Abaixo organizamos uma relação de submarinos que utilizam o AIP da HDW/ Siemens, sem nenhum registro de acidentes ou incidentes relevantes. Note-se que atualmente todas as células PEM são de origem alemã, mas a França, a Espanha, a Índia e a Rússia também estão pesquisando esta solução. A seguir a relação da classe dos submarinos:

Projetos futuros com tecnologia de células próprias: Índia: 5, Rússia: 3, França ?

Total com AIP de células PEM: 27 (operativos) + 32 (planejados + construção)

Em número quase igual, temos uma série de submarinos que operam com o AIP baseado no sistema *Stirling*:

China: 16 submarinos;

Japão: 8 submarinos;

Singapura: 2 submarinos;

Suécia: 2 submarinos;

Total de submarinos com AIP *Stirling*: 28 + 18 (planejados).

Somente a Marinha do Paquistão opera um submarino com sistema Mesma da DCNS (Fonte: www.hisutton.com/WorldsurveyofAIPsubmarines.html).

Em março de 2017 foi incorporado o oitavo submarino da classe *Soryu*, no Japão. A classe está planejada para ter 13 unidades. A partir do décimo primeiro²⁵ a ser incorporado após 2020, o sistema *Stirling* será abolido em favor da utilização exclusiva de baterias de íons de lítio com maior densidade de energia.

Alemanha:	6 <i>212-A</i> (incorporação 2005 a 2014) + 2 <i>212-A NG</i>
Coreia do Sul:	9 <i>214</i> (incorporação 2007 a 2017)
Grécia:	4 <i>214</i> (incorporação 2010 a 2017)
Itália:	4 <i>212-A</i> (incorporação 2006 a 2017)
Noruega:	4 <i>212-A NG</i> (futuro próximo)
Portugal:	2 <i>214</i> (incorporação 2008 a 2009)
Turquia:	6 <i>214</i> (incorporação 2016 em diante)
Israel:	2 <i>Dolphin class</i> (especial) + 1 (<i>out-fitting</i>)
Espanha:	4 <i>S80</i> (células PEM com reforma de etanol)
Singapura:	4 <i>U-218SG</i> (atualmente em construção)

CUSTOS DOS SISTEMAS AIP

Como de costume, estas informações são escassas ou inexistentes, o que é compreensível por se tratarem de informações confidenciais em nível oficial das Marinhas

23 Os quatro submarinos holandeses estão passando por um *upgrade* abrangente, mas não sem severas discussões no meio político da Holanda, devido à idade dos submarinos. Mas, devido à falta de verbas, a opção para manter a capacidade militar foi a modernização. Especula-se que Holanda, Polônia, Portugal e Itália possam aderir ao programa engendrado entre Noruega e Alemanha para a nova classe *U-212NG*.

24 Todos os submarinos desta classe foram transferidos da Royal Navy para a Royal Canadian Navy. Este processo foi pontilhado de inúmeros problemas, atrasos e acidentes, inclusive com um incêndio no *Chicoutimi* em 4/10/2004, durante a travessia de Faslane (Escócia) para o Canadá. A incorporação levou anos e foram até mesmo considerados a devolução e o cancelamento da compra dos submarinos.

25 Informação obtida na revista *Marine Forum*, 5/2016, pelo autor Hans J. Ohff, alemão radicado na Austrália que foi diretor do Estaleiro ASC e responsável pela construção dos submarinos da classe *Collins*.

clientes ou por proteção das indústrias contra os seus concorrentes.

Encontramos apenas uma menção sobre o sistema Mesma da DCNS: cerca de US\$ 50-60 milhões para uma instalação com potência nominal de 200 kW, lembrando que, entre os três sistemas mencionados neste estudo, este é o mais volumoso, mais pesado, menos eficiente e o que mais demanda manutenção especializada (Ref: http://military.wikia.com/wiki/Air-independent_propulsion).

Comparando os dois sistemas AIP com células combustíveis, hidrogênio estocado com hidretos e o reformador de metanol, fica evidente, pela composição dos equipamentos, que o sistema de reforma de metanol é certamente mais caro do que o primeiro em valores absolutos.

Obter informações confiáveis sobre custos de obtenção de equipamentos é quase impossível. Contudo, obtivemos da HDW, através do engenheiro Peter Hauschildt, diretor de pesquisa e desenvolvimento de produtos, uma informação relativa ao exemplo simulado de um submarino de 4 mil tons *standard* citado no título “Balanço de Energia e Pesos”.

Nesse caso particular, contemplando os custos relativos de obtenção entre os dois sistemas, devido à alta demanda de energia, o sistema de reforma de metanol é financeiramente bem mais vantajoso. Neste exemplo específico, estamos falando de duas unidades de reforma alimentando quatro células combustíveis, com um total de 480 kW de potência instalada.

Quanto ao custo de obtenção de submarinos somente com baterias ou com baterias + AIP, não temos nenhuma informação, mas, diante da complexidade do submarino e dos custos de obtenção de submarinos estimados que achamos na internet, além do que conhecemos sobre a instalação AIP, temos fortes razões para

acreditar que a diferença não deve ser muito significativa.

Quanto à manutenção dos sistemas AIP, também não temos nenhuma informação sobre custos. Quanto aos cuidados, a manutenção parece ser bastante simples no caso de armazenagem de hidrogênio em hidretos, sendo naturalmente mais exigente no caso do sistema de reforma de metanol.

CONCORRÊNCIA DOS SISTEMAS CCD, *STIRLING* E MESMA

Diversos sistemas AIP vêm sendo pesquisados em vários países, mas alguns foram praticamente abandonados. A TKMS pesquisou o CCD no estaleiro em Emden e o sistema *Stirling* em sua unidade da Kockums na Suécia. A DCNS produziu o sistema Mesma, com turbina a vapor de ciclo fechado, mas o trabalho foi encerrado em 2003 e a DCNS fez uma parceria com a firma francesa Helion para desenvolver células combustíveis.

Atualmente, o sistema Mesma só foi aplicado num único submarino da classe *Scorpène* de três comprados pela Marinha do Paquistão em 1994 e foi descontinuado em 2003. O sistema *Stirling* rivaliza com as células combustíveis em nível de encomendas, embora o sistema não seja tão eficiente como as células PEM. As opções feitas dependem dos requisitos dos clientes, e não cabe aqui discuti-los.

O sistema CCD da TKMS nunca foi vendido ou aplicado. Portanto, vamos nos concentrar em comentar e comparar apenas os dois sistemas de maior sucesso comercial, células combustíveis PEM e motor/gerador *Stirling*.

O sistema *Stirling* tem um consumo específico de oxigênio igual ao dobro das PEM. Como em qualquer sistema AIP, o maior volume ocupado a bordo

é o tanque LOX, em que o volume do conjunto aumenta bastante. O sistema *Stirling* é composto do motor e combustor integrados, um gerador, painel de controle e conversor, tanque LOX e tanques de nitrogênio e hélio.

Embora o principal combustível seja o diesel de alta pureza (mínimo enxofre), ele não entra na comparação, pois aciona também a propulsão diesel convencional. Todos os componentes do sistema ficam dentro do casco de pressão. Como o *Stirling* é um processo termodinâmico em que energia termomecânica é transformada em energia elétrica, há vibrações, ruído e uma grande quantidade de calor que precisa ser transferida ao meio circundante, o mar. Para funcionar, necessita de óleo diesel de alta pureza (baixo teor de enxofre), oxigênio, hélio (purgar os pistões) e nitrogênio (ciclo *Stirling*). O circuito *Stirling* funciona com uma pressão de 20 atm a uma temperatura de 700°C.

O ciclo *Stirling* necessita de um trocador de calor com água do mar. A quantidade maior de calor a ser transferida ao mar aumenta a assinatura térmica do submarino. A pressão de funcionamento limita sua profundidade de mergulho a 200 metros, pois a exaustão dos gases é feita diretamente ao mar. Além desta profundidade, somente operação com baterias.

As células combustíveis PEM têm o menor consumo específico de oxigênio em kg/kWh, apresentando a melhor eficiência de todos os sistemas AIP conhecidos. Comparando, (Ref. 4) com um *load-factor* = 1,00, a eficiência das células PEM é da ordem de 58% e o *Stirling* cerca de 40%.

Enquanto que a eficiência do *Stirling* melhora com o aumento da demanda de potência, a eficiência das células PEM aumenta com o decréscimo da demanda. Com um *load-factor* = 0,4, a eficiência líquida do

Stirling cai para aproximadamente 31%, e a das células aumenta para cerca de 63%.

Esta característica das células PEM se mostra particularmente vantajosa, pois na maior parte do tempo a demanda de energia é relativamente pequena, devido ao fato de a velocidade de patrulha girar entre 3 e 5 nós, além da *hotel-load*.

As assinaturas acústica e térmica são insignificantes com as células PEM, e a manutenção é mínima por não possuir partes móveis. Mas, no caso do motor *Stirling*, embora digam que sua manutenção possa ser feita pela tripulação, ela é relativamente mais frequente com um TBO de 3 mil horas.

A instalação *Stirling* da Kockums modelo *V4-275R* com potência de 75 kW tem um volume de cerca de 6 m³. Este é o volume da unidade compacta que inclui o motor *Stirling* e o alternador-gerador, que seria o equivalente ao *rack* de duas células combustíveis com cerca de 1,0 m³ e 240 kW de potência e 1.800 kg. Não achamos informações sobre o peso da unidade *Stirling*.

Como referência de volume, mas não de peso, a TKMS (Ref. 1) elaborou dois projetos de seções *plug-in* para modernizações dos submarinos da classe *U-209/1400*, como os da Marinha do Brasil. Uma versão com três motores *Stirling* com potência instalada de 210 kW, incluindo o tanque LOX e outros acessórios, resultou numa seção de 8,4 m. No caso das células PEM com uma potência de 240 kW, incluindo o tanque LOX e acessórios, resultou numa seção de 6,5 m.

Comparando o projeto *U-216* com a classe *Soryu*, este submarino japonês tem quatro módulos *Stirling* a bordo com cerca de 300 kW de potência para seus 3.910 tons de deslocamento submerso. Na Figura 5 vemos a ilustração do módulo AIP do submarino *U-216*, com deslocamento

submerso 13,6% maior do que o *Soryu*, com quatro células PEM somando 480+ kW de potência instalada.

No *U-216*, o volume da seção do casco que abriga o sistema AIP completo tem um volume de aproximadamente 400 m³. O raio de ação cobre cerca de 3.600 n.m. a 5 nós (30 dias x 24 hs x 5 nós). Fazendo um cálculo baseado nos dados do segundo parágrafo anterior (classe *U-209/1400*), os quatro módulos *Stirling* da classe *Soryu* ocupam quase o mesmo volume, cerca de 350 m³. Comparando volumes equivalentes de seções AIP de dois submarinos, uma com reformador de metanol + células PEM e a outra com sistema *Stirling*, a energia produzida com o primeiro sistema é o dobro do segundo.

Embora não existam informações sobre a autonomia ou o raio de ação dos submarinos japoneses, para cobrir a mesma distância de 3.600 n.m. do *U-216*, o tanque LOX do *Soryu* precisa ser o dobro daquele do *U-216*. Lembrando que o tanque LOX é individualmente o maior componente de um sistema AIP, os 350 m³ rapidamente subirão para mais ou menos 500 m³. E, ainda, para uma potência instalada de apenas 63% daquela do *U-216*.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos na prática e expostos acima demonstram que as células combustíveis PEM são atualmente o sistema AIP existente mais eficiente para submarinos convencionais. O principal concorrente é o sistema *Stirling*.

Para o funcionamento das células PEM, é necessário ter a bordo oxigênio e hidrogênio. As técnicas de criogenia para o oxigênio são consagradas e não constituem um problema maior. Para estocar hidrogênio a bordo, atualmente utiliza-se a técnica de armazená-lo na

estrutura molecular de hidretos metálicos. Para facilitar a compreensão, chamaremos este de sistema PEM modelo “A”.

A capacidade de armazenagem de hidrogênio nos hidretos é limitada e a densidade de energia por peso de hidreto muito baixa, quando comparada com a energia contida nos hidrocarbonetos. Este fato levou os pesquisadores a desenvolverem a tecnologia da reforma de hidrocarbonetos. Segundo pesquisas, o hidrocarboneto metanol é a melhor opção.

Porém atualmente este processo ainda depende de um tamanho mínimo do submarino a ser projetado. No processo de reforma, o tanque de oxigênio líquido precisa ser aumentado, pois doravante abastece não somente as células PEM mas também o processo de reforma do metanol. Essa opção denominaremos de PEM modelo “B”.

Para completar o custo de ciclo de vida das instalações completas, “A” e “B”, que inclui os custos de obtenção e operação, devem-se estudar as rotinas de manutenção preventiva, corretiva e modernizações e a disponibilidade operacional dos dois sistemas. Mas esses dados são quase impossíveis de obter para escrever um artigo.

A diferença de custos de ciclo de vida entre os dois sistemas deverá ser avaliada também sob a ótica de uma superior capacidade militar, avaliando-se ao final os ganhos com os raios de ação e a autonomia submersa do submarino. A segurança é outro requisito de primeira ordem, quando comparamos os dois sistemas AIP com células PEM com hidrogênio puro ou metanol.

O processo *Stirling* é mais volumoso e possui partes móveis, com reflexos diretos na manutenção e assinaturas acústica e térmica. Tem um consumo específico de oxigênio muito maior e uma eficiência térmica bem inferior, aproximadamente a metade da eficiência de células PEM.

O sistema com células combustíveis PEM opera com eficiência muito superior, temperatura muito mais baixa, não possui partes móveis – portanto assinaturas acústica e térmica quase nulas –, registra o menor consumo específico de oxigênio entre os sistemas AIP, apresenta a menor demanda de manutenção e tem um volume significativamente menor do que o sistema *Stirling*.

Analisando de forma isenta a engenharia dos dois processos – PEM e *Stirling* –, tudo indica que no futuro a evolução da tecnologia do reformador de metanol poderá ser o fiel da balança nas escolhas. Se o processo de reforma de metanol for empregado de forma eficaz, aumentará expressivamente a oferta de energia a bordo, abrindo ainda mais o campo de aplicação para as células PEM em sistemas AIP de submarinos convencionais.

Se atualmente o sistema de reforma tem seu uso limitado a dimensões mínimas de um submarino, nada impede que a tecnologia evolua e reduza as dimensões dos equipamentos desse processo. Talvez cheguemos ao ponto de não necessitar mais de cilindros de hidretos em submarinos de menor porte.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Focando nas células PEM, que nos parecem ser a opção mais promissora devido às suas tecnologia e eficiência superiores a qualquer outro sistema, a evolução da tecnologia de baterias também contribuirá muito para a autonomia submersa de submarinos convencionais.

A próxima sucessora das baterias de chumbo-ácido serão as de íons de lítio,

com o triplo da densidade de energia²⁶. Já no início da década de 2020, a tecnologia das baterias de sulfetos de lítio seguirá evoluindo rapidamente, prometendo, por sua vez, triplicar a densidade de energia daquelas de íons de lítio.

Se hoje um submarino convencional como o *U-214* já consegue ficar submerso por quase 500 horas a 4 nós de velocidade com AIP com células PEM, com estoque de hidrogênio em hidretos e baterias de chumbo-ácido esta autonomia poderá duplicar ou mesmo triplicar nos próximos dez a 20 anos com a reforma de metanol e baterias de íons de lítio.

Este aumento de autonomia pode permitir o aumento da velocidade submersa por períodos curtos – *sprint speed* –, sem comprometer significativamente o desempenho global durante o período de uma missão.

Mas mantendo 4 nós como parâmetro de comparação, podemos vislumbrar, num futuro não tão distante, cerca de 1.500 hs: 24 hs/dia = 63 dias submerso. Aqui já esbarramos noutra limitação: a autonomia de víveres e a resistência física (fadiga) e psíquica da tripulação.

O submarino nuclear indubitavelmente leva uma vantagem por dispor de uma fonte de energia por assim dizer infinita, permitindo cobrir distâncias bem maiores no mesmo espaço de tempo. Mas a autonomia de víveres ou os tempos típicos de missão dos SSNs²⁷ ou SSBN²⁸ são de 90 dias. E, durante uma patrulha numa área predeterminada, a velocidade de um SSN também é baixa, para melhorar o emprego dos sensores.

Então, levando em conta meramente os fatores humanos, alimentação e moral

26 Densidades de energia: bateria de chumbo-ácido = 90 Wh/litro, bateria de íons de lítio = 270 Wh/litro.

27 SSN: Submarino de Ataque Nuclear.

38 SSBN: Submarino Nuclear Balístico.

da tripulação, os submarinos convencionais com AIP poderão em breve estar empatados com os SSN. E do ponto de vista militar, aproximar-se do alvo, disparar um torpedo e afundar um navio, tanto faz se o torpedo foi lançado por um SSN ou um SSK²⁹. O resultado final é o mesmo.

Relativizando os custos de obtenção, os SSN classe *Los Angeles* custavam US\$ 1,8 bilhão³⁰/unidade em média, e 62 foram obtidos entre 1970 e 1990. Para o FY/2018, a USN encomendou dois SSN classe *Virginia* por US\$ 2,766 bilhões/unidade³¹. Um SSK do tipo *U-214* ou *U-212-A* custa cerca de € 400 a 500 milhões/unidade³²; os *U-218SG* para Singapura são estimados em € 560 milhões por unidade.

Com estes dados, podemos estimar que, pelo custo de obtenção de um submarino de ataque nuclear, pode-se obter, grosso modo, entre cinco e seis submarinos convencionais destas classes. Valores obtidos na internet em artigo do *Der Spiegel*, em <http://archiv.friedenskooperative.de/ff/ff06/1-53.htm>.

O autor encontrou na internet dois artigos do Dr. Whitman, *senior editor* da *Undersea Warfare Magazine*, Washington, a revista oficial da USN Submarine Force, intitulados: “*The Wrong Sub for a New Warfare Era*” e “*Tomorrow’s Submarine Fleet: The Non-Nuclear Option*”,

(Ref. www.argee.net/DefenseWatch). Nesses artigos, o Dr. Whitman compara o estado da arte da tecnologia dos modernos submarinos convencionais com os submarinos nucleares da USN e os custos de obtenção envolvidos.

As vantagens irrestritas dos submarinos nucleares são cada vez mais questionadas diante da evolução tecnológica dos submarinos convencionais, e a eficácia militar entre eles comparada em várias situações operativas. Os sensores e as armas carregados por SSNs ou SSKs hoje são praticamente os mesmos e a vantagem de um submarino nuclear contra um número maior de submarinos convencionais

As vantagens irrestritas dos submarinos nucleares são cada vez mais questionadas diante da evolução tecnológica dos submarinos convencionais

num teatro de operações começa a ser seriamente posta em dúvida pela comunidade de submarinistas da US Navy.

Neste contexto, o Dr. Whitman cita um artigo escrito pelo Vice-Almirante Albert H. Konetzni Jr., do Navy’s Fleet Forces Command, na edição de junho de 2004 do *US Naval Institute Proceedings*: “*The uncontested undersea superiority experienced during recent conflicts is not likely to be repeated against determined and capable adversaries*”.

Em março de 1999, o Submarino *Walrus*, da Marinha da Holanda, participou da Operação JTFEX/TMDJ99 no Mar do Caribe com a US Navy. O *Walrus* penetrou as defesas da força-tarefa sem ser detectado e lançou dois ataques bem-

29 SSK: Submarino de Ataque Convencional.

30 Valor do US\$ atualizado de 1984 ao *Fiscal Year 2010* de um SSN da classe *Los Angeles*, obtida em 1984. Ref. http://www.alternatewars.com/BBOW/Stats/Naval_Combatant_Costs.htm.

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

32 Negociação da TKMS com a Turquia em 2011 – total de € 2 bilhões para seis submarinos U-214 com AIP.

-sucedidos ao CVN-71 *Theodore Roosevelt*, evadindo-se em segurança.

Neste mesmo exercício, o *Walrus* “atacou” o SSN-764 *Boise*, os DDG-61 *Ramage* e DDG-70 *Hopper*, os FFG-29 *Stephen W. Growes* e FFG-32 *John L. Hall*, o cruzador CG-55 *Vella Gulf* e o LF-20 *Mount Whitney*.

No Westlant Deployment 2013³³, o *U-32* alemão da classe *U-212-A* viajou submerso durante 18 dias de Eckernförde até a costa leste dos EUA, para treinamentos táticos com uma força-tarefa. A US Navy queria testar a capacidade de um submarino convencional moderno contra seus meios de defesa e a integração deste submarino numa FT³⁴.

O ponto alto dos exercícios foi uma confrontação do *U-32* com destróieres, fragatas, helicópteros ASW, aviões ASW³⁵ e submarinos nucleares protegendo o porta-aviões. O *U-32* saiu-se bem em todos os confrontos, inclusive no ataque ao núcleo da FT. O *U-32* não foi detectado uma única vez e conseguiu detectar, perseguir e simular ataques a diversos meios navais oponentes.

O *statement* da US Navy foi: *The most daunting threat at sea of the forthcoming*

years: modern low-signature and air-independent submarines operating in confined waters (A ameaça mais aterrozante no mar futuramente serão os modernos submarinos de baixa assinatura e com AIP, operando em águas confinadas).

As tecnologias embarcadas em submarinos convencionais evoluíram muitíssimo nas últimas décadas. Essa evolução não diz respeito apenas aos sensores e armas, mas também aos sistemas de propulsão, autonomia, habitabilidade, controle da atmosfera interna do submarino, sistemas de segurança e salvamento de tripulantes, além de um número enorme de itens técnicos.

A Marinha do Brasil precisará considerar o hiato tecnológico que vem se abrindo rapidamente entre os nossos meios atuais e os mais modernos. O estado da arte dos modernos submarinos convencionais³⁶ certamente nos obrigarão a rever nossos procedimentos operativos e a estratégia de defesa das nossas águas jurisdicionais de interesse econômico e soberania. O panorama atual da tecnologia de submarinos é bem diferente daquele da década de 1980, quando adquirimos os modelos alemães da IKL³⁷.

CLASSIFICAÇÃO PARA ÍNDICE REMISSIVO:

<CIÊNCIA E TECNOLOGIA>; Submarino; Propulsão; Engenharia Naval; Estudo; Sistema de Propulsão;

33 Extraído da revista *Leinen Los* n° 5/2017, do Deutscher Marinebund, Laboe, Alemanha.

34 FT = Força Tarefa.

35 ASW : Anti Submarine Warfare.

36 Por convencional entenda-se não-nuclear.

37 IKL : Ingenieur Kontor Lübeck.

BIBLIOGRAFIA

- BERGANDE, Matthias. HDW; Larsson, Lars, Kockums; “AIP Plug-In sections for Submarines”, *Naval Forces SUBCON* 2003.
- BUCKINGHAM J.; Hodge. C.; Hardy. T.; BMT Defence Services, Bath, UK: “Submarine Power and Propulsion – Trends and Opportunities”.
- KRUMMRICH. Stefan, HDW, “Fuel Cell Methanol Reformer System for Submarines”.
- LEHMANN. Prof. Dr. Eike. Air Systems for Submarines Compared and Assessed“, *Naval Forces* 03/2004.
- METHANOL REFORMER: http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol_reformer
- Method for Supplying Energy to a Submarine, european Patent EP2112707: <http://www.freepatentsonline.com/EP2112707.html>
- METALLHYDRID: <https://de.wikipedia.org/wiki/Metallhydrid>.
- METANOL: <http://en.wikipedia.org/wiki/Methanol> www.mashi.com.br/boletins_ant_016.htm
www.rauter.com.br/produtos_metanol-php. https://en.wikipedia.org/wiki/Flash_point.
- VILNIT. Igor V. Director General Rubin Design Bureau, Russia, “More Stealth Power – Development of the Perfect AIP System Cannot be Complete without Substantial Financial Backing”.
- WEIDONG. Gu, Jian-Ping. Shen, Chunshan Song. The Energy Institute and Department of Energy & Geo-Environmental Engineering, The Pennsylvania State University, “Hydrogen Production from Integrated Methanol Reforming for PEM Fuel Cells”.
- WALLNER. Raimund, (CMG R1, submarinista da Marinha alemã). “*A german perspective on Australia’s new submarines*”, NAFO IV/2015.
- WEYERS FLOTTEN TASCHENBUCH 2013/2015.