

A ENGENHARIA MECÂNICA NA CONCEPÇÃO DE UM SUBMARINO

MECHANICAL ENGINEERING IN THE CONCEPT OF A SUBMARINE

TEIXEIRA, Mauricio Câmara¹
LIMA, Washington Batista de²

Resumo: Este trabalho apresenta o conhecimento inicial sobre submarinos necessário àqueles motivados pelo assunto, que pensam incluí-lo em seu portfólio profissional. Cabe ressaltar que apesar do objeto de estudo ser um meio militar, seu conteúdo pode ser facilmente transportado para submarinos de turismo, pesquisa ou de resgate, uma vez que os sistemas de manobra e segurança, assim como a metodologia de concepção se assemelham. Inicialmente, é contextualizada historicamente a motivação política brasileira, assim como os fatos tocantes ao seu desenvolvimento ao longo das últimas décadas, que resultou em uma Política Estratégica Nacional que posiciona o interesse do Estado, como Nação, de incorporar, construindo, quinze submarinos convencionais e seis submarinos nucleares, gerando dessa forma uma demanda constante de engenheiros capacitados para o cumprimento dessa meta. Após resumir as características básicas de um submarino, distinguindo seus diferentes tipos, apresentam-se os sistemas básicos e fundamentais existentes nesses meios. Na terceira parte, especial atenção é dada ao Sistema de Controle da Profundidade e à Propulsão. Com o conjunto desse trabalho depreende-se não só a complexidade desse meio naval, mas a necessidade de seus engenheiros terem pleno domínio de suas áreas além da capacidade multidisciplinar. Como recompensa, usufrui-se de um mercado relativamente estável e desafiador, pleno de projetos de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia de ponta.

Palavras-chave: Submarino, propulsão, cavitação, sistema de governo e de profundidade.

Abstract: This work presents the initial knowledge about submarines necessary to those motivated by the subject, who think to include it in their professional portfolio. It should be noted that although the object of study is a military medium, its content can be easily transported to tourism, research or rescue submarines, since the maneuver and safety systems as well as the design methodology resemble each other. Initially, the Brazilian political motivation is contextualized, as well as the facts about its development during the last decades, which resulted in a National Strategic Policy that positions the State's interest, as a Nation, to incorporate, constructing, fifteen conventional submarines and six nuclear submarines, generating in this way a constant demand of engineers trained to the accomplishment of this goal. After summarizing the basic characteristics of a submarine, distinguishing its different types, the basic and fundamental systems exist in these means. In the third part, special attention is given to the Depth Control and Propulsion System. With the whole of this work it is clear not only the complexity of this naval environment, but the need of its engineers to have full mastery of their areas beyond the multidisciplinary capacity. As a reward, you enjoy a relatively stable and challenging market, full of state-of-the-art research and development projects.

Keywords: Submarine, propulsion, cavitation, steering system and depth.

¹ Engenheiro Mecânico - Universidade Santa Úrsula - mauricio.camara.teixeira@gmail.com

² Mestre em Engenharia Mecânica - Universidade Federal Fluminense (UFF) - w_blima@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, país com dimensões continentais de 8,5 mil quilômetros de costa, tem o mar como uma forte referência em todo o seu desenvolvimento. Fonte de riquezas minerais, energia e alimentos. É nessa área marítima que os brasileiros desenvolvem as atividades pesqueiras, o comércio exterior e a exploração de recursos biológicos e minerais. O mar é o caminho de 95% de nossas exportações e importações e guarda cerca de 90% do petróleo nacional. A imensa riqueza das águas, do leito e do subsolo marinho nesse território justifica seu nome: Amazônia Azul (BRASIL, 2016).

A Amazônia Azul cobre uma área de 3,5 milhões de quilômetros quadrados. Mas o país pleiteia na Organização das Nações Unidas (ONU) a ampliação dessas fronteiras para os limites da Plataforma Continental, o que deve elevar a área marítima para cerca de 4,5 milhões de quilômetros quadrados – o equivalente à metade do território terrestre brasileiro (BRASIL, 2016).

Para proteger esse patrimônio natural e garantir a soberania brasileira no mar, a Marinha do Brasil investe na expansão da força naval e no desenvolvimento da indústria da defesa. Parte essencial desse investimento é o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB). A Estratégia Nacional de Defesa, lançada em 2008, estabeleceu que o Brasil tivesse "força naval de envergadura", incluindo submarinos com propulsão nuclear. Neste mesmo ano, foi firmado um acordo de transferência de tecnologia entre Brasil e França. O programa viabilizará a produção de quatro submarinos convencionais, que se somarão à frota de cinco submarinos já existentes. E culminará na fabricação do primeiro submarino brasileiro com propulsão nuclear.

O PROSUB vai dotar a indústria brasileira da defesa com tecnologia nuclear de ponta. Ponto em destaque na Estratégia Nacional de Defesa. A concretização do programa fortalece, ainda, setores da indústria nacional de importância estratégica para o desenvolvimento econômico do país. Priorizando a aquisição de componentes fabricados no Brasil para os submarinos, o PROSUB é um forte incentivo ao nosso parque industrial (BRASIL).

Além dos cinco submarinos, o PROSUB contempla a construção de um complexo de infraestrutura industrial e de apoio à operação dos submarinos, que engloba os Estaleiros, a Base Naval e a Unidade de Fabricação de Estruturas Metálicas (UFEM), no Município de Itaguaí. As inaugurações da UFEM e do Prédio Principal do Estaleiro de Construção representam a conclusão das duas primeiras etapas de construção desse complexo e os primeiros passos dessa grande conquista da defesa nacional.

Com o advento do PROSUB, o ramo de concepção de submarinos, antes concentrado nas mãos de poucos países como Estados Unidos, França, Inglaterra, Japão, China, Rússia, Alemanha e Itália, passa a ser uma promissora área, uma vez que não só a construção do Submarino Nuclear Brasileiro demandará uma grande quantidade de engenheiros, mas também, o Brasil passa a ser enxergado como um potencial exportador de produtos e serviços, assim como de capital intelectual.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica tem por objetivo apresentar o contexto político do desenvolvimento de submarinos militares no Brasil, seu conceito, emprego e seus principais sistemas, focando no Sistema de Controle de Profundidade e na Propulsão do Submarino. Espera-se que o benefício à sociedade seja atingido, com a motivação de futuros engenheiros, a partir da desmistificação de uma máquina mítica que é um submarino.

Para isso, inicialmente, são expostas as motivações políticas que levam o Brasil a desenvolver, construir e operar submarinos, pois o conhecimento histórico e da legislação em vigor, é primordial para compreender o mercado, e entende-lo como potencial gerador de empregos no mercado nacional.

Em seguida, será descrito o submarino, seu emprego e características de operação, o que também é de essencial conhecimento para um profissional que venha a atuar nesse nicho.

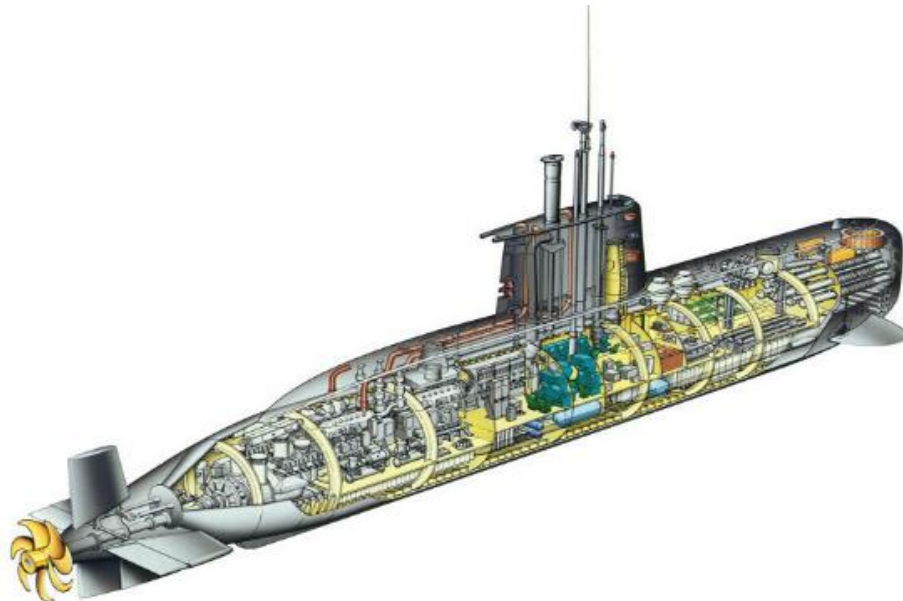
Entre os vários sistemas expostos, especial atenção é dada aos Sistemas de Controle de Profundidade e de Propulsão do Submarino.

Nas considerações finais, será confirmada a necessidade crítica de engenheiros qualificados e motivados para desempenhar tarefas que envolvem desde o projeto, passando pela construção e terminando na manutenção dos meios já em operação, não esquecendo da demanda por materiais e equipamentos sobressalentes necessários à operação ao longo da vida útil de um meio naval tão específico e complexo como este.

2. O SUBMARINO

Os submarinos (figura 1) são meios navais cuja principal característica operacional é a ocultação que lhes dá a capacidade única de operar em águas sob controle de qualquer ator, inclusive do inimigo (BRASIL, 2016).

Figura 1 - Esquema simplificado de um submarino IKL 209 de concepção alemã construído no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro.



Fonte: Arquivo da Força de Submarinos

Estes são alguns dos sistemas que existem a bordo, e que necessitam de um projeto e dimensionamento bastante específico e rigoroso:

- Sistema de Compensação e Esgoto
- Sistema de Ejeção de Lixo
- Sistema de Aguada
- Sistema de Água Potável
- Sistema de Trimagem
- Sistema de Ar Comprimido
- Sistema Hidráulico Principal
- Sistema de Óleo Lubrificante
- Sistema de Óleo Combustível
- Sistema de Água Destilada
- Sistema de Controle de Atmosfera
- Ejetor de Sinais
- Tubos de Torpedos
- Sistema de Esnorquel
- Sistema de Ventilação e Extração
- Sistema de Governo, etc.

Serão apresentados abaixo detalhes mais específicos sobre alguns desses sistemas.

1.1 Sistema de Governo e de Profundidade

Sistema de governo e de profundidade é composto pelos lemes, um mecanismo de controle e outro de atuação. No submarino IKL 209, assim como em demais projetos modernos, existe um Console de Governo e controle de profundidade integrado, que gera uma resposta de saída, que por meio de síncronos atua em pistões hidráulicos responsáveis pelos movimentos dos lemes horizontais a ré e a vante, assim como do leme vertical (Figura 2).

Figura 2 - Timoneiro atuando nos lemes horizontais e verticais no Console de Governo e Controle de Profundidade.



Fonte: Arquivo pessoal

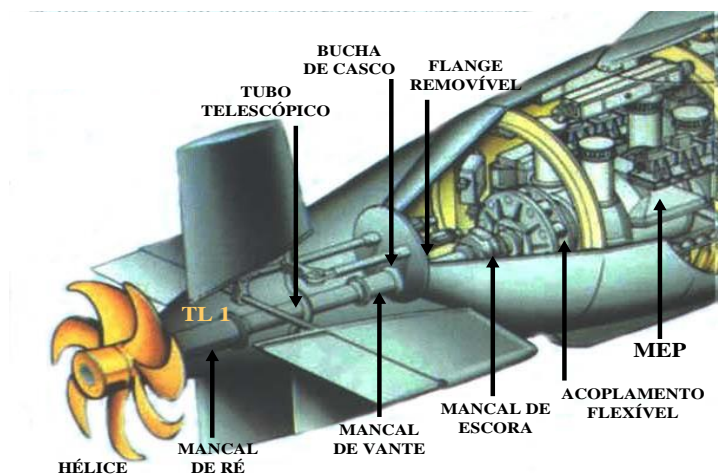
1.2 Linha de Eixo e Propulsor

A linha de eixo é a responsável por transmitir com a mínima perda e com o mínimo de ruído a energia disponibilizada pelo Motor Elétrico Principal ao Propulsor ou Hélice (figura 3).

O sistema da linha de eixo é composto por acoplamentos flexíveis, flanges, mancais e a bucha de casco. Especial atenção é dada à estanqueidade, uma vez que o submarino opera a grandes pressões e como os navios, também está sujeito à colisões.

O propulsor de um submarino é um ponto chave para uma missão eficiente, principalmente quando inserimos esse meio no cenário tático de patrulha e combate, quando a discrição é primordial para que este não seja detectado e destruído (MOURA, 2014).

Figura 3 - Linha de Eixo e seus acessórios, e hélice.



Fonte: arquivo da Força de Submarinos

Dessa forma, o dimensionamento de um propulsor aborda o fenômeno da cavitação de uma forma um pouco diferente.

O fenômeno da cavitação provoca:

- redução da performance;
- vibração;
- erosão; e
- ruído.

Na concepção de embarcações e meios mercantes, o que menos se deseja são os três primeiros itens, pois o objetivo é sempre redução de custos de implantação e manutenção e eficiência.

Em meios militares, onde o submarino está incluído, o ruído é priorizado, pois este expõe o submarino, aumentando o risco de detecção.

Existem diversos tipos de classificação de cavitação, sendo a mais simples a divisão por cavitação nas extremidades da pá e cavitação na superfície da pá (WAITE, 2002), conforme verificado na figura 4.

Figura 4 - Cavitação na extremidade da pá e cavitação na superfície da pá

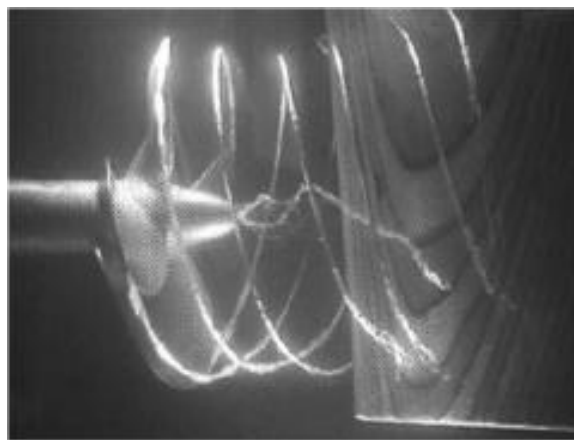


Fonte: Arquivo da Força de Submarinos

A cavitação é um fenômeno de criação e súbito colapso de uma bolha, que gera um ruído de média frequência. Esse ruído é relativamente alto, e a frequência gerada é de média frequência, de 1000 a 5000 Hz, o que é bem percebido por grandes partes dos sonares do mercado.

Não é de menos importância o deslocamento da água em pás da hélice e do eixo (figura 5). Ele não está relacionado à cavitação, mas é a fonte geradora de um ruído de baixa frequência de acordo com WAITE, 2002.

Figura 5 - Exemplo da interação de um propulsor com o fluido.

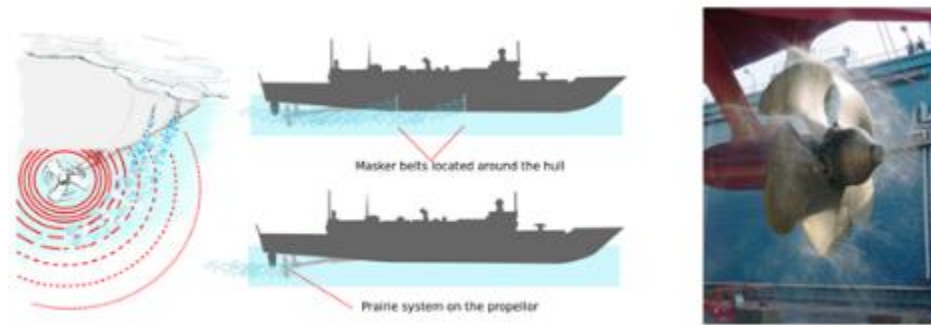


Fonte: Arquivo da Força de Submarinos

O cálculo das frequências corresponde ao cálculo de vibrações utilizado em diagnóstico de máquinas. Por exemplo, um eixo girando a 300 RPM, 300 giros por minuto, seja 300 giros por 60 segundos, e 5 giros por segundo. Ou seja, 5 Hz.

Ao engenheiro responsável pelo dimensionamento cabe a responsabilidade de diminuir a intensidade, e mesmo disfarçar tal frequência alterando o número de pás ou utilizando mecanismos como o de mascaramento, conforme demonstrado na figura 6.

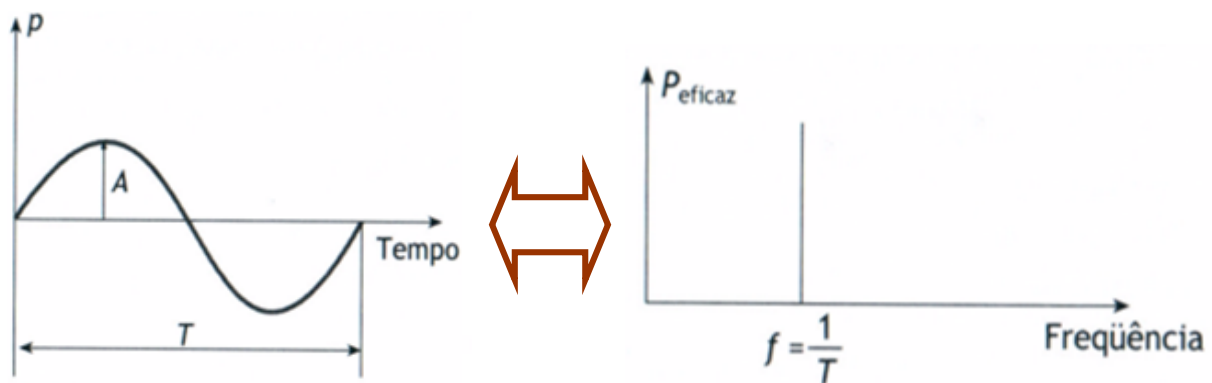
Figura 6 - Mecanismo de mascaramento, composto de água pressurizada no casco, ou no próprio propulsor.



Fonte: Waite, 2002

Com relação às análises acústicas, deve ser utilizada a Transformada de Fourier para a conversão de Pressão da Hélice para frequência, conforme observado na figura 7.

Figura 7 - Conversão pela Transformada de Fourier de Pressão para Frequência.



Fonte: WAITE, 2002.

A conversão de todos os equipamentos mecânicos embarcados, tais como geradores, bombas, conversores, proporciona o que é chamado de assinatura acústica, o que é utilizado para a identificação de um navio ou submarino, somente através do sonar, ou seja, sem confirmação visual.

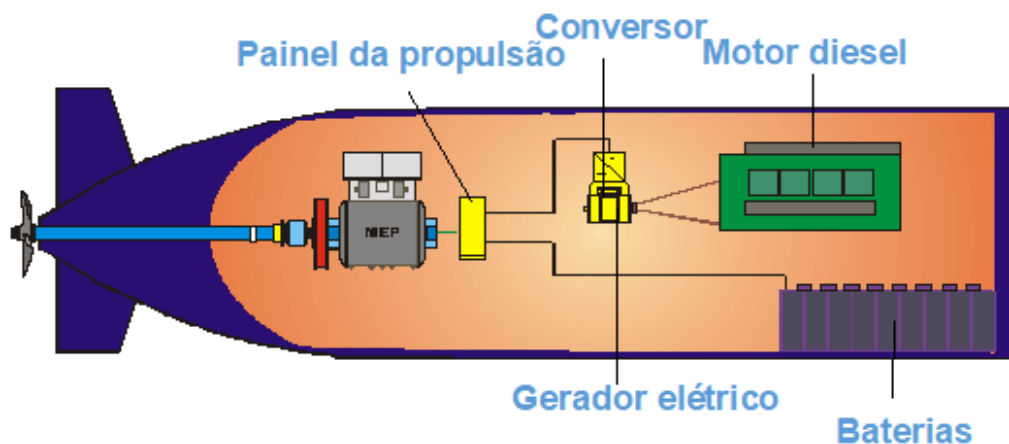
1.3 Sistema de Propulsão

1.3.1 Submarino Convencional

O propulsor ligado à linha de eixo, com seus acessórios, que é acionada pelo Motor Elétrico Principal. Ele pode ser de Corrente Contínua ou Alternada, dependendo da tecnologia empregada. Atualmente há uma tendência no emprego de Motores de Corrente Alternada, que tem como grande vantagem o menor custo e a facilidade de manutenção, quando comparado aos de Corrente Continua. Tal tendência começou após o avanço da tecnologia que permitiu a redução da dimensão desse tipo de motor num tamanho tal que possibilitasse o emprego em submarinos.

A figura 8 representa um sistema propulsão de um submarino convencional.

Figura 8 - Esquema simplificado de Submarino de propulsão convencional.



Fonte Arquivo da Força de Submarinos.

Por sua vez o Motor Elétrico principal é alimentado por um conjunto de Baterias, que geralmente ficam posicionadas na parte inferior do submarino, servindo também como lastro, dadas as dimensões e o peso deste componente (figura 9).

Figura 9 - Praça de Baterias de um submarino convencional à esquerda e Elementos de Bateria à direita.



Fonte: Arquivo pessoal

O correto dimensionamento destes elementos de baterias é essencial para a eficiência energética do meio, o que vai refletir diretamente do comportamento operativo.

Para recarregar estes elementos são empregados geradores, cujos eixos são acionados por motores diesel, ambos controlados por um painel remoto. Os motores diesel embarcados em submarinos devem ter uma excelente razão potência versus dimensão. Por esse motivo observa-se muitos motores da empresa MTU (figura 10), conhecida por esta particularidade.

Figura 10 - Motor MTU 396 utilizado a bordo de submarinos.



Fonte: MTU Submarine Propulsion Technology (July 2009)

É um sistema de grande importância, pois seu correto dimensionamento vai possibilitar usufruir de uma taxa de ocultação adequada, permitindo que o submarino navegue mais tempo mergulhado e um período menor em recarga de baterias.

Salienta-se que o período de recarga de baterias é o período mais crítico deste meio, uma vez que ele necessita de ar para a combustão dos motores, exigindo que ele venha à Cota Periscópica, que é uma profundidade entre 15 e 20 metros que permite içar um mastro dito Esnorquel, que possibilita a admissão de ar, por este duto, da superfície para os Motores. Por consequência também revitaliza o ar confinado da atmosfera interna do submarino.

Estando próximo à superfície e com os Motores em funcionamento, recarregando as baterias, o submarino é um alvo fácil, em virtude da indiscrição acústica e visual, pois os mastros podem ser visualizados por aeronaves com sistemas especiais de vigilância térmica.

Dessa forma, o período de esnorquel é indesejável e deve ser vislumbrado um projeto que reduza ao mínimo este período (MOURA, 2014).

1.3.2 Submarino de Propulsão Nuclear

Dada esta fraqueza do submarino de propulsão convencional, somadas as restrições de mobilidade, com reduzida autonomia e velocidade, alternativas foram desenvolvidas, chegando-se a projetos de propulsão independente do ar, chamadas de AIP (Air Independent Propulsion) de acordo com WHITMAN, 2001.

Existem diversos projetos de AIP, entre os submarinos operativos, destacam-se:

- Sistema M.E.S.M.A. (*Module d'Energie Sous-Marine Autonome*): sistema de turbina em circuito fechado, também conhecido como Módulo Autônomo de energia submarina. É composto por uma turbina a vapor, produzido pela queima de Etanol e Oxigênio líquido. O sistema produz vapor, que por sua vez aciona um alternador, que alimenta o motor elétrico principal. Tem como desvantagens, ser volumoso, ruidoso e de baixa eficiência.

- Células de combustível: visto por muitos como o sistema do futuro para submarinos não nucleares, o sistema de células de combustível, utiliza baterias que são conversores de energia, que

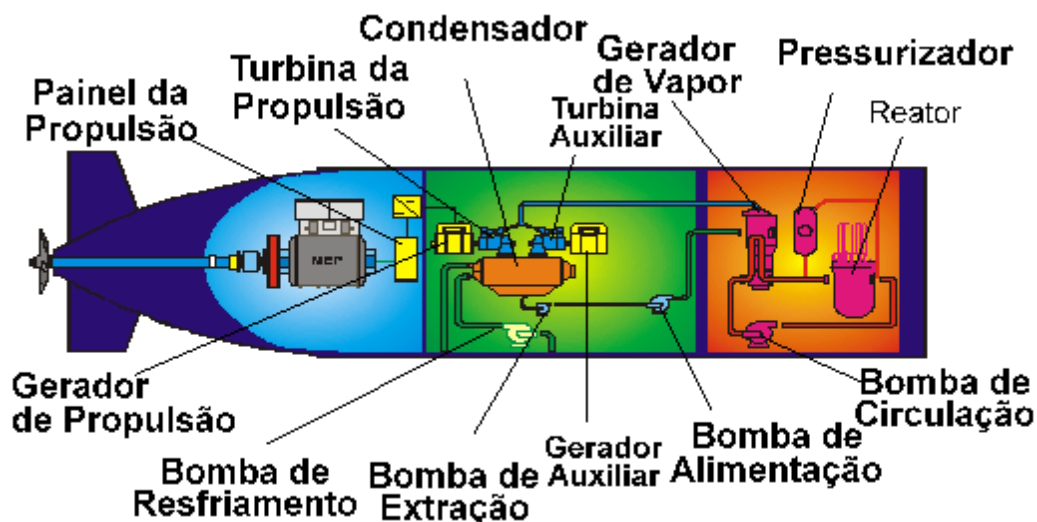
transformam uma reação química em energia elétrica. Esta reação, não tem nenhuma parte móvel, e ainda não ocorre a grande temperatura, não provocando assim a transformação de energia em calor, que se poderia perder por dissipação. De forma simplificada, a energia provém da mistura entre os gases Oxigênio e Hidrogênio. A reação entre estes dois elementos, produz energia elétrica, e, curiosamente, como sub-produto, produz água pura. Tem como desvantagem, a necessidade dos submarinos transportarem Hidrogênio, que é extremamente inflamável e perigoso, e Oxigênio, com características similares, que deve ser mantido a uma temperatura de 200° C negativos.

- Propulsão nuclear.

O sistema de propulsão nuclear é o mais eficiente AIP existente. Por suas características ele permite que o submarino permaneça mergulhado por um período de tempo indeterminado e permite desenvolver velocidades muito superiores a um submarino de propulsão convencional, aumentando a mobilidade e conseqüentemente o raio de ação. Comparado com os demais sistemas AIP, ele diferencia-se operativamente pois permitir um deslocamento a alta velocidade indeterminado, enquanto todos os outros sistemas são restritos no tocante a autonomia e velocidade.

O esquema simplificado de uma propulsão nuclear de um submarino pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Esquema simplificado de um submarino de propulsão nuclear.



Fonte Arquivo da Força de Submarinos.

Em um compartimento especial, revestido por metais como o Chumbo, localiza-se o dito Circuito Primário.

Nele é posicionado o Reator propriamente dito, onde ocorre a reação nuclear, aquecendo o fluido existente no circuito primário. Esse fluido irá para um Gerador de Vapor, onde o calor existente nas redes do Circuito Primário será transportado para o circuito secundário acarretando na

Vaporização deste segundo fluido. Ainda no circuito primário, é instalada uma bomba de circulação, permitindo a recirculação entre o Reator e o Gerador de Vapor, e um Pressurizador, que irá manter a pressão no reator adequada de acordo com a demanda necessária para que o processo inteiro ocorra de maneira segura e eficiente.

Após o superaquecimento do circuito secundário no Gerador de Vapor, o vapor vai diretamente às turbinas. A partir desse momento existem diferentes projetos. Um bastante conhecido, é a separação em turbina de Força Auxiliar e de Propulsão. Dessa forma, havendo uma separação por função.

Após a passagem do vapor pelas Turbinas, cuja auxiliar é acoplada a um gerador, e a de propulsão pode ser acoplada a uma engrenagem redutora ou um gerador, dependendo do projeto, passa-se pelo condensador, onde de novo no estado líquido retorna, por meio de uma bomba de alimentação para o Gerador de Vapor, no Compartimento do Reator, reiniciando o ciclo.

A energia gerada nos geradores acoplados à turbina por sua vez, seguem para os sistemas que alimentam. O da turbina auxiliar, alimentará os quadros de energia, iluminação, sistemas de controle e equipamentos. O da turbina de propulsão, alimentará o Motor Elétrico de Propulsão e seu sistema de controle, com o intuito de acionar o propulsor.

Caso seja um projeto que contemple uma engrenagem redutora conectada à turbina da propulsão, não haverá motor, e a linha de eixo será acionada quando conectada (WHITMAN, 2001).

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo sido apresentado na primeira parte deste trabalho todo o contexto histórico e político-econômico de interesse para o desenvolvimento de Submarinos no Brasil, conclui-se que o mercado para engenheiros especialistas em submarinos tende a ser estável, em virtude da evolução documentada da política e estratégia nacional de defesa, hoje formalizada por meios de documentos formais do Estado. Esta prioriza os valores de independência industrial com a construção de indústria de base de defesa nacional e capacidade de projetos, salientando a necessidade de uma força de submarinos eficiente, independente do cenário político.

A partir da estratificação dos sistemas embarcados em um submarino, depois de seus conceitos básicos, foi verificada a complexidade de tal embarcação. Ao longo do trabalho foi possível realizar prévias do dimensionamento de determinados sistemas e a dificuldade maior foi a interdependência de mesmas variáveis presentes em diversos sistemas simultaneamente. Constata-se também a multidisciplinaridade presente em cada dimensionamento de sistema. Tal fato obriga que o profissional desta área, além do domínio de sua área de competência tenha um conhecimento

generalizado que o possibilite enxergar adaptações e soluções não convencionais, pois seu produto não é convencional.

A partir da apresentação mais profunda nos temas ligados ao governo do submarino e sua propulsão, conclui-se que um projeto está intimamente ligado à tecnologia disponível, e os desafios tecnológicos são crescentes a medida que se busca uma maior eficiência. Depreende-se assim que a pesquisa e desenvolvimento estão intimamente relacionados a esse *métier*, atraindo àqueles que fomentam ser pesquisadores e trabalhar com inovações.

Por fim, espera-se que o objetivo oculto deste trabalho tenha também sido atingido ao motivar os futuros engenheiros ávidos por um desafio de grande porte à atuar em uma área pouco explorada, com potencial e de enorme complexidade e demanda de engenharia que é um meio submarino.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Comando da Marinha. **O Programa de Desenvolvimento de Submarino**. Disponível em <<https://www1.mar.mil.br/prosub/institucional>>. Acesso em 10/09/2016.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Glossário das Forças Armadas. MD 35-G-01**. 2007.

BURCHER, Roy; RYDILL, Louis. **Concepts in Submarine Design, Ocean Technology Series**, Cambridge, 1994.

CASTRO, Vinicius. **Localização da futura 2ª esquadra brasileira**. Defesa Aérea & Naval. Disponível em <http://www.defesaaereanaval.com.br/?p=31147> Acesso em 10/08/2016.

GABLER, Ulrich. **Projetos de Submarinos**. 1ª edição São Paulo, AMRJ/ETCN, 1991. Tradutores Célio Tanigushi, Paulo Carlos Kaminski, Décio Crisol Donha e outros.

GONÇALVES, Williams da Silva; MIYAMOTO, Shiguenoli. **Os militares na política externa brasileira: 1964-1984**. Estudos Históricos, v.6, 1993.

KORMILITSIN, Y.N Khalizev O. **A Theory of Submarine Design**. Riviera Maritime Media. August 1, 2001.

KREPINEVITCH, A. **Cavalry to computer: the pattern of military revolutions**. New York. National Affairs, 1994.

MOURA, José Augusto A. **A estratégia naval brasileiras no pós-guerra fria: uma análise comparativa com foco em submarinos**. Rio de Janeiro: FEMAR, 2014

SAUNDERS, Stephen. **Jane's Fighting Ships 2011-2012**. HIS Global Limited. Surrey. 2011.

TEIXEIRA, Mauricio Câmara; LIMA, Washington Batista. **A Engenharia Mecânica na Concepção de um Submarino**. Trabalho de Conclusão do Curso De Engenharia Mecânica da Universidade Santa Úrsula (USU). Rio De Janeiro, dezembro de 2016.

URICK, R.J., 1983, **Principles of underwater sound**. Los Altos, USA, Peninsula Publishing.

VIDIGAL, Armando A. F. **A evolução do pensamento estratégico naval brasileiro**. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval, 1982.

VIDIGAL, Armando A. F.; FLORES, Mário C. **O Desenvolvimento do Poder Naval Brasileiro: tópicos para debate**. Brasília, DF, 1976.

WAITE, A. D. **Sonar for Practising Engineers**. 3 Edition. John Wiley & Sons LTD. West Sussex, England, 2002.

WHITMAN, Edward C. **Air independent propulsion: AIP Technology creates a NEW Undersea Threat**. Undersea Warfare Fall 2001 Disponível em: <http://www.navy.mil/navydata/cno/n87/usw/issue_13/propulsion.htm>. Acesso em 15/09/2016.