

LEONAM DOS SANTOS GUIMARÃES

BACHAREL EM CIÊNCIAS NAVAIS PELA ESCOLA NAVAL - RIO DE

JANEIRO EM 1960

ENGENHEIRO NAVAL PELA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE

SÃO PAULO EM 1966

MODERNAS TENDÊNCIAS NO PROJETO DE SUBMARIÑOS:  
DOS SISTEMAS DIESEL-ELETRICOS E NUCLEARES ATUAIS AOS SISTEMAS  
HÍBRIDOS E AOS MONO-SUBMARIÑOS DO FUTURO

DISSERTAÇÃO APRESENTADA A FUSP EM  
CUMPRIMENTO AOS REQUISITOS PARA  
OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM  
ENGENHARIA NAVAL

OUTUBRO DE 1991

FD-1285

BC

MODERNAS TENDÊNCIAS NO PROJETO DE SUBMARINOS:

DOS SISTEMAS DIESEL-ELÉTRICOS E NUCLEARES ATUAIS AOS SISTEMAS HÍBRIDOS E AOS MONO-SUBMARINOS DO FUTURO

LEONAM DOS SANTOS GUIMARÃES

## RESUMO

Ao longo do corrente século, as Marinhas de Guerra do mundo viram a evolução do conceito de "navio capital" deslocar-se dos encouraçados para os navios-aeródromos e destes para os submarinos. Sem dúvida alguma, estas três classes de navios constituem-se nos mais sofisticados e complexos produtos da Engenharia Naval.

A primazia do submarino, hoje uma tendência clara, certamente estará plenamente consolidada no século XXI. A Engenharia Naval deverá então estar preparada para satisfazer, sob os aspectos tecnológicos, as demandas de desempenho operacional destes navios para as próximas décadas, que serão extremamente exigentes.

O presente trabalho visa então, apresentar e discutir estas demandas e identificar, através de uma análise de tendências, as soluções técnicas na área de projeto e construção, que virão a satisfazê-las.

---

# MODERN TRENDS IN SUBMARINE DESIGN:

---

FROM CONTEMPORARY CONVENTIONAL AND NUCLEAR SYSTEMS TO HYBRID AND HOMO-  
SUBMARINES OF THE FUTURE

---

L E O N A R D O S A N T O S G U I M A R E S

## ABSTRACT

During the XX century, the world Navies has seen an evolution of the "capital ship" concept, moving from the battleship to the aircraft carrier and from this last one to the submarine. We have no doubts that this three warship classes are the most sophisticated and complex products of Naval Engineering.

Submarine supremacy, today a clear trend, will be completely consolidated during the XXI century. Naval Engineering would be prepared to cope, on technological aspects, with the growing operational performance demands for this warship class along next decades.

This work aims to introduce and discuss that demands and identify, through a analysis of trends, the technical solutions, in design and construction fields, will satisfy the future requirements.



• THE DESIGN ENGINEER MUST DEVELOP MORE OF A GENERALIST  
ATTITUDE WHEN TRYING TO SOLVE PROBLEMS. HE MUST HAVE A FEEL FOR  
HISTORY, POLITICS, LITERATURE AND CURRENT EVENTS. HE SHOULD BE  
THINKING IN MANAGEMENT TERMS WITH KNOWLEDGE OF MARKETING, FINANCE,  
MANUFACTURING, AND A FEELING FOR PUBLIC OPINION. 'OCCUPATIONAL  
HAZARDS' - WORKING WITH BLINDERS AND LOOKING AT THE WORLD AND  
PROJECTS WITH TUNNEL VISION - MUST BE DISCARDED IN FAVOR OF A  
BROADER VIEW. •

A word for design engineers, by Richard J. Jacob, Design  
News, April 5, 1982, pg. 11.



# INDICE

## CAPITULO 1

## INTRODUÇÃO

1 . 1	- DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS.....	7
1 . 2	- METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO.....	9
1 . 3	- BREVE HISTORICO.....	10

## CAPITULO 2

## A SITUAÇÃO ATUAL

2 . 1	- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	17
2 . 2	- SUBMARINOS NÃO-NUCLEARES,CONVENCIONAIS E HIBRIDOS..	25
2 . 3	- SUBMARINOS NUCLEARES, "Puros", HIBRIDOS E MONO.....	36
2 . 4	- O CONTEXTO BRASILEIRO.....	42

## CAPITULO 3

## MODERNAS TENDENCIAS

3 . 1	- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	45
3 . 2	- TENDENCIAS GERAIS.....	49
3 . 2 . 1	- Comando e Controle de Armas.....	50
3 . 2 . 2	- Armamento.....	51
3 . 2 . 3	- Automação/Tripulação/Ergonomia/Conforto.....	53
3 . 2 . 4	- Redução das Assinaturas.....	54
3 . 2 . 5	- Profundidade de Operação/Estruturas/Materiais..	58
3 . 2 . 6	- Segurança/Salvamento.....	63
3 . 2 . 7	- Instalação Propulsora e Auxiliares.....	66

3 . 2 . 8	- Condições Ambientais.....	68
3 . 2 . 9	- Resistência a Choque.....	69
3 . 3	- REDUÇÃO DE RUÍDO.....	71
3 . 3 . 1	- Estabelecimento de Requisitos.....	71
3 . 3 . 2	- Dimensões Principais.....	73
3 . 3 . 3	- Formas Externas.....	74
3 . 3 . 4	- Arranjo Geral.....	75
3 . 3 . 5	- Projeto do Casco Resistente.....	76
3 . 3 . 6	- Projeto de Sistemas, Máquinas e Equipamentos.....	77
3 . 3 . 7	- Equilíbrio Geral do Projeto: Pesos e Volumes.....	78
3 . 3 . 8	- Segurança contra Falhas.....	79
3 . 4	- SISTEMAS DE PROPULSÃO CONVENCIONAL.....	84
3 . 4 . 1	- Conceitos dos Anos 70.....	85
3 . 4 . 2	- Conceitos dos Anos 80.....	86
3 . 4 . 3	- Conceitos dos Anos 90.....	88
3 . 5	- SISTEMAS DE PROPULSÃO NUCLEAR.....	92
3 . 5 . 1	- Combustível e Núcleo.....	97
3 . 5 . 2	- Vaso de Pressão do Reator.....	99
3 . 5 . 3	- Geradores de Vapor.....	99
3 . 5 . 4	- Bombas de Circulação.....	100
3 . 5 . 5	- Válvulas.....	100
3 . 5 . 6	- Pressurização.....	101
3 . 5 . 7	- Flexibilidade do Projeto e Manutenção.....	101
3 . 5 . 8	- Circuito Secundário.....	102
3 . 5 . 9	- Aacionamento do Eixo Propulsor.....	103
3 . 5 . 10	- Controle da Instalação Propulsora.....	105
3 . 5 . 11	- Segurança Passiva e Segurança Intrínseca.....	111

3 . 5 . 12	- Circulação Natural.....	112
3 . 6	- SISTEMAS DE PROPULSÃO INDEPENDENTES DO AR (SPIA).....	114
3 . 6 . 1	- Sistema Walter.....	115
3 . 6 . 2	- Motor Stirling.....	118
3 . 6 . 3	- Células de Combustível.....	122
3 . 6 . 4	- Motor Diesel em Ciclo Fechado.....	127
3 . 6 . 5	- Turbina a Gás em Ciclo Fechado.....	132
3 . 6 . 6	- Turbina a Vapor com Combustão a Alta Pressão.....	133
3 . 6 . 7	- Acumuladores Eletroquímicos.....	134
3 . 6 . 8	- Análise Comparativa.....	135

# C A P Í T U L O 4

## I M P A C T O D A S M O D E R N A S T E N D E N C I A S

4 . 1	- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	137
4 . 2	- METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO.....	139
4 . 3	- CRITÉRIOS DE SELEÇÃO.....	141
4 . 4	- CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO.....	143
4 . 5	- DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO.....	148
4 . 5 . 1	- Requisitos de Desempenho.....	150
4 . 5 . 2	- Requisitos Ambientais Externos.....	164
4 . 5 . 3	- Requisitos Ambientais Internos.....	168
4 . 5 . 4	- Requisitos de Segurança.....	172
4 . 5 . 5	- Requisitos de Operação.....	176
4 . 5 . 6	- Requisitos de Infraestrutura.....	180
4 . 5 . 7	- Rquisitos de Arquitetura Naval.....	181
4 . 5 . 8	- Requisitos de Custo.....	183
4 . 6	- SUBMARINOS NÃO-NUCLEARES.....	185



4 . 6 . 1	- Submarinos Convencionais.....	185
4 . 6 . 2	- Submarinos Híbridos.....	186
4 . 6 . 3	- Mono-Submarinos.....	188
4 . 7	- SUBMARINOS NUCLEARES.....	190
4 . 7 . 1	- Submarinos Lancadores de Mísseis Balísticos..	190
4 . 7 . 2	- Submarinos Lancadores de Mísseis de Cruzeiro..	190
4 . 7 . 3	- Submarinos de Ataque.....	191
4 . 7 . 4	- Submarinos Híbridos Nuclear/Convencional.....	191
4 . 7 . 5	- Mono-Submarinos.....	193
4 . 8	- O CONCEITO DE "SSn".....	195

## C A P Í T U L O S

## C O N C L U S Õ E S

5 . 1	- CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES.....	196
5 . 2	- A PERSPECTIVA HISTÓRICA.....	197
5 . 3	- REQUISITOS FUTUROS.....	204
5 . 4	- DESENVOLVIMENTO PARA O SÉCULO XXI.....	205
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	208

C A P I T U L O 2

- 2.1 - Distribuição de idade das forças de submarinos: países exportadores + países importadores
- 2.2 - Distribuição de idade das forças de submarinos: países exportadores
- 2.3 - Distribuição de idade das forças de submarinos: países importadores
- 2.4 - Totais de submarinos convencionais em operação
- 2.5 - Distribuição de idade das forças de submarinos
- 2.6 - Número de submarinos construídos
- 2.7 - Submarinos nucleares por país e por tipo
- 2.8 - Aquisição de competência em projeto/construção de navios de guerra pelo Brasil
- 2.9 - Evolução da construção de navios de guerra no Brasil
- 2.10 - Desenvolvimento do Poder Naval através do exercício do reaparelhamento da Marinha

C A P I T U L O 3

- 3.1 - Emprego dos meios de escape e salvamento
- 3.2 - Submarino sujeito a carregamento de choque
- 3.3 - Elaboração de curvas limite de NRI
- 3.4 - Valores do NRI em banda larga para alguns submarinos
- 3.5 - Funções de transferência de ruído à água
- 3.6 - Variação da área útil de convézes com o diâmetro
- 3.7 - Influência da redução de ruído no diâmetro
- 3.8 - Localização relativa de sensores acústicos
- 3.9 - Sistema de água salgada típico
- 3.10 - Arranjos para sistemas de água salgada
- 3.11 - Arranjo de tubulação flexível com 3 rötulas
- 3.12 - Arranjo Z e U das rötulas
- 3.13 - Junta flexível tipo rötula
- 3.14 - Diagrama de blocos da propulsão convencional
- 3.15 - Diagrama elétrico da propulsão (anos 70)
- 3.16 - Diagrama elétrico da propulsão (anos 80)
- 3.17 - Diagrama de blocos dos conversores tipo "chopper"
- 3.18 - Características construtivas do MSPHM
- 3.19 - Diagrama elétrico da propulsão (anos 90)
- 3.20 - Reatores a água leve para propulsão naval
- 3.21 - Diagrama esquemático de um BWR
- 3.22 - Diagrama esquemático do PWR da classe "Rubis"
- 3.23 - Diagrama esquemático do PWR do NH "Otto Hahn"
- 3.24 - Diagrama esquemático de PWR integral inglês
- 3.25 - Diagrama esquemático do PWR integral SCORE
- 3.26 - Compostos de urânio
- 3.27 - Combustíveis de urânio
- 3.28 - Vaso de pressão de PWR segregado
- 3.29 - Gerador de vapor com recirculação forçada
- 3.30 - Programação de temperatura média constante

3.31	-	Programação de pressão de vapor constante
3.32	-	Diagrama de blocos do controle de reatores
3.33	-	Diagrama de blocos do controle de reatores navais
3.34	-	Diagrama de blocos do sistema Walter direto
3.35	-	Diagrama de blocos do sistema Walter indireto
3.36	-	Ciclo padrão de ar Stirling
3.37	-	Dispositivo que realiza o ciclo Stirling
3.38	-	Tipos de motores Stirling
3.39	-	Motor Stirling sueco (Kockums AB.)
3.40	-	Perfil de missão de um submarino com motor Stirling
3.41	-	Diagrama de blocos de uma célula de combustível
3.42	-	Perdas elétricas na célula de combustível
3.43	-	Eficiência da célula de combustível
3.44	-	Circulação de eletrólito na célula de combustível
3.45	-	Sistemas eletroquímicos usuais
3.46	-	Sistemas eletroquímicos avançados
3.47	-	Combustíveis para as células
3.48	-	Diagrama de blocos de instalação de CC
3.49	-	Diagrama de blocos de instalação de DCC
3.50	-	Gerenciamento de água no DCC
3.51	-	Sistema de TGCC para navios de superfície
3.52	-	Sistema de TGCC para submarinos
3.53	-	Diagrama de blocos do sistema MESMA
3.54	-	Características principais do módulo de 200 kWe
3.55	-	Comparação entre SPJA's não-nucleares

#### C A P Í T U L O 4

4.1	-	Evolução do deslocamento de submarinos convencionais
4.2	-	Evolução do deslocamento de SSN
4.3	-	Evolução do deslocamento de SSBN
4.4	-	Arranjo geral de submarinos convencionais de médio porte do futuro
4.5	-	Arranjo geral de submarinos convencionais de grande porte do futuro
4.6	-	Conceito de submarino híbrido
4.7	-	Arranjo geral de submarinos híbridos com CC e DCC
4.8	-	Diagrama esquemático da instalação AMP5
4.9	-	Pequeno submersível civil dotado de AMP5 100
4.10	-	Parâmetros principais do AMP5 400
4.11	-	Arranjo geral do AMP5 400
4.12	-	Parâmetros principais do AMP5 1000
4.13	-	Arranjo geral do AMP5 1000
4.14	-	Diagrama esquemático da instalação SCORE
4.15	-	Arranjo geral do submarino dotado do SCORE
4.16	-	Parâmetros principais do submarino nuclear costeiro
4.17	-	Arranjo geral do submarino convencional TR-1700 convertido em híbrido (AMP5 1000)
4.18	-	Reator AMP5 1000



## CAPÍTULO 5

- 5.1 - Evolução do Submarino
- 5.2 - Análise de Mérito de Submarinos
- 5.3 - Perspectivas para os Submarinos no Século XXI

AS FIGURAS, GRÁFICOS E TABELAS ENCONTRAM-SE COLOCADAS NO FINAL DE  
CADA CAPÍTULO

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

#### 1. 1 - DEFINIÇÃO DE OBJETIVOS

As impressionantes dimensões e capacidades dos submarinos nucleares mais modernos tais como a classe "Ohio" americana e "Typhoon" soviética representam um nível de desenvolvimento da tecnologia de submarinos dificilmente imaginável pela geração passada. Nos anos posteriores à II Guerra Mundial, o navio-aeródromo era o navio capital das principais Marinhas do mundo.

Os avanços tecnológicos na área de detecção e armamento tendem entretanto a mudar dramaticamente este quadro, tornando o submarino, com suas características únicas de ocultamento e possibilidade de utilizar o ambiente oceânico na sua plenitude tridimensional, o navio capital para as Marinhas do futuro.

Hoje pode-se prever que, ao longo dos próximos anos, os submarinos, certamente com propulsão independente do ar atmosférico, passarão a assumir a maior parte das tarefas e missões que têm sido desempenhadas por outros tipos de plataformas navais. A ausência de submarinos modernos e de alto desempenho tornará obsoletas as marinhas no próximo século.

Adicionalmente, considerando os aspectos associados à propulsão nuclear, simultaneamente temos certeza de que a energia nuclear é forte candidata a complementar as necessidades de nossa matriz energética em futuro não muito distante, face ao esgotamento de nosso potencial hidroelétrico e ao custo e problemas técnicos associados às outras alternativas, GOLDENBERG [3], VCUA [4]. Assim sendo, seria fundamental que o Brasil se capacite para exercer a opção nuclear, quando e se ela se fizer necessária, sem dependência e tutela externas no tocante à tecnologia e aos fornecimentos.

Dentro, então, desse contexto, o autor do presente trabalho, engenheiro naval e oficial da Marinha do Brasil, escolheu para tema de sua dissertação de mestrado em engenharia naval pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, executar estudos exploratórios sobre estas "Modernas Tendências no Projeto de Submarinos", com ênfase nos seus sistemas de propulsão e, em especial, naqueles sistemas baseados no aproveitamento da energia nuclear.

A presente dissertação visa então apresentar a situação tecnológica da atual arma submarina, identificar as tendências e serem consideradas para os projetos do futuro, levando em conta o impacto dessas tendências e concluir, sob o ponto de vista da engenharia naval, as características gerais dos submarinos do próximo século.

É uma pretensão do autor que este trabalho venha a ser útil como uma referência geral para aqueles profissionais que direta ou indiretamente estejam envolvidos no projeto e desenvolvimento de tais navios de guerra e também introduzir no meio técnico naval nacional aquele conceito de submarino julgado como de maior potencial para desenvolvimentos futuros, denominado de 55n, dotado de sistema de propulsão híbrido nuclear/convençãoal.

Não é nossa intenção propor soluções quantitativas fechadas para problemas específicos de projeto e sim compilar, organizar e analisar um grande volume de informações técnicas dispersas por numerosa bibliografia, nem sempre de fácil acesso, visando subsidiar aqueles que têm interesse em obter uma ampla visão horizontal da complexa gama de assuntos que envolvem os sistemas de propulsão de submarinos e sua integração ao projeto do navio.

A filosofia que nos orienta é aquela tão bem caracterizada por JACOB [7], que preconiza que antes de mergulhar em profundidade nos cálculos específicos de projeto, o engenheiro deve ter uma percepção muito clara das diversas condicionantes gerais que tem influência direta ou indireta no seu trabalho.

Os principais objetivos que nos propomos a atingir com a presente dissertação podem, então, ser resumidos como:

a) discutir os conceitos de emprego de submarinos militares adotados pelas diversas Marinhãs do mundo, ao longo da história, no presente e as possibilidades futuras, ressaltando as características de desempenho de seus diversos sistemas de propulsão e as limitações inerentes a cada conceito;

b) apresentar e analisar as características técnicas dos diversos sistemas de propulsão para submarinos, ressaltando as modernas tendências e, dentre essas, identificando aquelas de maior potencial de desenvolvimento futuro;

c) introduzir o conceito de 55n, submarino de ataque com pequeno deslocamento, da ordem de 2.000 toneladas, dotado de um sistema de propulsão híbrido nuclear/convençãoal, com raio de ação limitado a baixas e moderadas velocidades, restando, entretanto, a capacidade de desenvolver altas velocidades por intervalos de tempo limitados, associado a mínima exposição a superfície.



## 1. 2 - METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Ainda neste Capítulo 1, apresentaremos um breve histórico dos submarinos, enfatizando a evolução de seus sistemas de propulsão.

No Capítulo 2, analisaremos os diversos condicionantes que afetam o projeto de submarinos, e seu estágio atual de desenvolvimento.

No Capítulo 3, discutiremos as várias tendências que tem influido e que se prevê que influirão em futuro breve no projeto de submarinos. Inicialmente abordaremos tendências gerais para os seguintes tratamos separadamente aquelas de maior interesse para os sistemas de propulsão, com especial ênfase na redução de ruído irradiado e na operação independente do ar atmosférico.

Com base nas tendências identificadas no Capítulo 3, o Capítulo 4 buscará apresentar o impacto objetivo destas tendências no projeto dos futuros submarinos, apresentando previamente um sumário de orientação para o estabelecimento de requisitos para tais navios, bem como critérios para seleção e avaliação das diversas opções que se apresentam como tecnicamente viáveis.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho procurando identificar aquelas áreas de maior interesse para desenvolvimentos futuros.

Um dos problemas centrais no desenvolvimento do submarino no início do século XX, era a disponibilidade de uma fonte de potência confiável para operação submersa COMPTON-HALL [9], GUERRA [40]. A primeira solução foi o motor elétrico alimentado por baterias de acumuladores, cujo maior inconveniente era o raio de ação extremamente limitado, problema este que permanece até nossos dias para os submarinos com propulsão convencional. Como consequência, surge a necessidade de operação na superfície, na qual o submarino é movido por motores a combustível fóssil, capazes de recarregar as baterias, de grande raio de ação, porém dependentes do ar.

Esta solução foi inicialmente proposta por John Holland em 1900, combinando um motor a gasolina com baterias, criando deste modo a configuração básica do submarino convencional moderno SPEAR [41].

A combinação de sistemas de propulsão separados para operação submersa e na superfície foi a chave para a solução do problema de ampliar a mobilidade estratégica dos submarinos. A tática típica de submarinos até o final da II Guerra Mundial era navegar na superfície até atingir distância visual do alvo e então submergir para atacar.

Até 1940, a integração entre os dois sistemas era feita através de complicados arranjos de embreagens que possibilitavam aos motores Diesel serem alternativamente conectados ao eixo propulsor ou aos geradores elétricos, visando com isto garantir a operação de recarga de baterias, U.S.NAVY [42]. Com o objetivo de se maximizar a velocidade na superfície, chegaram a ser tentados sistemas de propulsão utilizando instalações a vapor, que em geral possuem relação peso/potência mais favorável que os motores Diesel.

A classe K-26 inglesa, de 1919, representa um exemplo desta aplicação. Entretanto, esta solução apresentava dois grandes inconvenientes: requeria aberturas no casco resistente em maior número e dimensões, sendo um perigo em potencial e os tempos envolvidos nas operações de partida e parada da planta eram muito longos, incompatíveis com o emprego tático do navio. É interessante ressaltar que sua instalação propulsora, de 10500 SHP, foi arranjada numa praça de máquinas com 270 m<sup>3</sup> de volume - as instalações a vapor nucleares modernas têm uma relação HP/m<sup>3</sup> bem mais desfavorável.

Voltou-se a tentar esta solução logo após a II Guerra Mundial, objetivando o projeto de submarinos piquete radar - as caldeiras compactas de alta pressão e temperatura que equipam modernos contra torpedeiros americanos (classe "GARCIA", da qual 4 unidades foram recentemente adquiridas pela Marinha do Brasil) são frutos desta tentativa, U.S.NAVY [43], PESCE [44]. Entretanto, o

próprio conceito de submarino piquete-radar foi superado pelas aeronaves de alarme aéreo antecipado, bem como a caldeira foi superada pelo reator nuclear, não chegando a ser construído nenhum submarino deste tipo.

O conceito de utilizar dois sistemas de propulsão separados tem um custo muito elevado para um navio com grandes restrições de volume como o submarino - mas não havia opção: somente os combustíveis fósseis poderiam armazenar suficiente energia para desenvolver altas potências, num volume limitado. Por sua vez, exigem oxigênio para a combustão e os submarinos não tinham condições de transportá-lo em volume suficiente para longos períodos de operação em submersão.

Houve tentativas de se utilizar sistemas anaeróbicos de alta potência, sendo os mais notáveis os sistemas Walter (turbina) e Kreislauf (motor diesel) alemães, mas eram todos limitados em raio de ação pelo volume de oxidação a ser transportado, GABLER [45]. O submarino protótipo de demonstração V-80 representa um exemplo da aplicação do sistema Walter, datado de 1940 (2000 SHP, 26 nós).

Os anos entre 1940 e 1980 viram mudanças radicais no projeto e nas características operacionais dos submarinos militares. Esta classe de navio, como a conhecemos hoje, iniciou sua evolução através dos desenvolvimentos alemães ao fim da II Guerra Mundial, quando os primeiros passos para a transição do submersível para o submarino foram dados. Até então estes navios eram essencialmente de superfície, que podiam submergir por tempo limitado para atacar ou evadir-se do inimigo.

Esta transição é claramente refletida na velocidade e raio de ação submerso: enquanto o famoso submarino tipo VIIC, do qual foram construídas pela Alemanha várias centenas de unidades durante o período de 1939-1945, desenvolvia 17 nós na superfície e somente 7,6 nós submerso, o tipo XXI, de muito maior deslocamento, construído em 1944-1945, desenvolvia velocidades máximas da ordem de 16,8 nós submerso e 15,6 nós na superfície, sendo o primeiro submarino operativo a navegar mais rápido submerso do que na superfície e o tipo XXIV, projeto de grande deslocamento dotado de sistema Walter, que não chegou a ser construído, atingiria velocidades ainda maiores (144 milhas a 24 nós), WESTWOOD [46], GABLER [45], RÖSSLER [13].

Quando consideramos também o advento do esnorquel em 1944, que reduziu drasticamente o tempo que o submarino dispunha na superfície, torna-se claro que um novo leque de possibilidades operacionais estava aberto para os submarinos ao final da última grande guerra.

Estas novas possibilidades, representadas pelo Tipo XXI e o Tipo XXVI, geraram uma grande corrida tecnológica entre as potências vencedoras da guerra, em duas linhas distintas:



- aperfeiçoamento da propulsão convencional dentro da filosofia do Tipo XXI e

- viabilização de Sistemas de Propulsão Independentes do Ar (SPIA), dentro da filosofia do Tipo XXVI, utilizando-se o princípio Walter e buscando-se outros princípios alternativos.

Os resultados práticos atuais desta corrida são, dentro da primeira linha, os modernos e altamente poderosos submarinos convencionais, MILLER e JORDAN [47]. Dentro da segunda linha de desenvolvimento, foi dado o enorme passo representado pelo aproveitamento da energia nuclear, materializado em 1954 pelo comissionamento do SSN (Submarino Nuclear de Ataque) Nautilus, pela Marinha Americana e subsequentemente, em 1957, do SNA Seawolf e em 1958, do SSN classe November, este último pela Marinha Soviética, RODIS, SIMPSON [111], BREEMER[48], MOORE e BERG [49].

Grandes submarinos tornaram-se capazes de permanecer submersos por períodos de tempo praticamente indefinidos e alcançar velocidades máximas mantidas superiores a 30 nós.

Não há dúvida que a fonte de energia ótima para submarinos de grande deslocamento e velocidade é a nuclear. Apesar da eficiência da conversão de energia termo-nuclear em potência útil para propulsão e alimentação das demais cargas elétricas do navio, ditas "carga hotel", ser relativamente baixa, este fato não compromete sua aplicação, em vistas da fantástica densidade de energia do combustível nuclear. Com esta propulsão é atingida a total independência do ar atmosférico, objetivo almejado desde os primórdios da evolução do submarino.

As instalações de propulsão convencionais diesel elétricas para submarinos, desde seus primórdios, objetivaram eficiências na conversão e consumo de energia as mais altas possíveis, devido à limitada disponibilidade de energia a bordo, especialmente quando em submersão, U.S.NAVY [42].

As mais notáveis mudanças na configuração dos sistemas de propulsão diesel-elétrica a partir de 1940 dizem respeito à transmissão de potência ao eixo propulsor e ao peso das baterias em proporção ao deslocamento total do navio. Os projetos de pós guerra abandonaram o acoplamento mecânico direto dos motores diesel ao eixo propulsor, tornando-se as baterias e o motor elétrico as fontes imediatas de potência de propulsão, sacrificando-se deste modo a velocidade na superfície, pois a transmissão diesel-elétrica eficiência e relação HP/m<sup>3</sup> significativamente inferior a propulsão direta.

Ainda mais importante é o aumento do peso das baterias em relação ao deslocamento na superfície. O peso relativo das baterias é, obviamente influenciado pelos requisitos operacionais do navio, entretanto, podemos considerar valores acima de 20% como usuais atualmente, SAEGER [17]. Comparando este valor com os típicos até 1940, da ordem de 10%, depreendemos o grande aumento

no raio de ação submerso durante o período.

O aumento na quantidade de energia armazenada a bordo foi também afetado pela qualidade e desempenho das baterias, que cresceu consideravelmente. O aumento da capacidade específica das baterias chumbo-ácido foi igualmente significativo atingindo hoje valores de Wh/kg e Wh/dm<sup>3</sup> cerca de 50% maiores do que os usuais em 1940, (25 e 70 para descarga de 3 horas, 40 e 110 para descarga de 100 horas, respectivamente), SAEGER [17].

Paralelamente a este desenvolvimento, a eficiência dos consumidores de energia elétrica, entre eles, e principalmente, o motor elétrico de propulsão (MEP) tem aumentado consideravelmente. Valores da ordem de 65% a 95% ao longo de toda a faixa de rotações operacionais são usuais para os MEP modernos, tornando obsoleto o uso de motores adicionais de baixa potência para cruzeiro submerso silencioso ("creeping devices"), frequentemente empregados até a II Guerra Mundial, RITTERHOFF [50].

A soma total destes desenvolvimentos, entre os quais obviamente também se incluem outras áreas do projeto do navio, como a hidrodinâmica, são claramente refletidos em termos operacionais pelo aumento do raio de ação submerso: em 1940 a faixa atingida era de 80-130 milhas, enquanto os projetos modernos alcançam de 400 a 600 milhas, SAEGER [17].

O moderno submarino convencional é particularmente bem adaptado para missões tais como defesa costeira, negação do controle de área marítima ao inimigo e penetração clandestina para lançamento de minas ou tropas especiais, além de possuir uma formidável capacidade de atacar tanto navios de superfície como outros submarinos.

Como exemplos do estado-da-arte em submarinos convencionais, podemos citar, os submarinos TR 1700 (Alemanha/Argentina), Walrus (Holanda), Type 2400/Upholder (Grã-Bretanha), Type 471 (Suécia/Austrália), Harushio (Japão) e "Kilo" (URSS), MILLER e JORDAN [47].

O interesse pela aplicação da energia nuclear surge com a verificação experimental do fenômeno da fissão do núcleo de urânio, pelos cientistas alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann, em janeiro de 1939, MURRAY [52].

Em 1941, Glenn Seaborg descobre o plutônio e constata suas propriedades de fissão. Nos EUA, a 2 de dezembro de 1942, Enrico Fermi e seus colaboradores conseguiram, com sua "pilha atômica", a primeira reação nuclear auto-sustentada.

Tendo-se em vista que esses fatos ocorreram durante a II Guerra Mundial, o potencial militar do processo de fissão aplicado a explosivos foi imediatamente identificado, e este emprego passou a ser prioritário.

O codinome "Manhattan District" (ou "Project") foi idealizado, consistindo de uma série de esforços visando a obtenção de um artefato explosivo nuclear, a dita "bomba atômica".

Por volta de 1944, os reatores de produção de plutônio em Hanford (EUA) foram postos em operação, fornecendo o novo elemento em escala semi-industrial. Na Universidade da Califórnia, em Berkeley, o processo de separação eletro-magnética "calutron" para isolar o U-235 foi aperfeiçoado, e as usinas de produção, em Oak Ridge, Tennessee, foram construídas em 1943. Na Universidade de Columbia, o processo de difusão gasosa para separação isotópica foi estudado, formando a base para o atual sistema de produção, cujas primeiras unidades foram construídas também em Oak Ridge.

Em Los Alamos, Novo México (EUA), a teoria e a experiência levaram ao desenvolvimento da bomba atômica, testada a primeira vez em Alamogordo, Novo México, a 16 de julho de 1945, e depois usada contra o Japão, em Hiroshima e Nagasaki.

O interesse da Marinha Americana na energia nuclear para propulsão de navios e, principalmente, submarinos, remonta aos experimentos de Fermi, HEWLETT e DUNCAN [53]. As possibilidades de raio de ação ilimitado e independência do ar atmosférico foram logo percebidas. Graças a determinação energética do então Capitão de-Mar-e-Guerra Hyman George Rickover, dois projetos iniciais foram implantados: na empresa Westinghouse e seu Laboratório Bettis ("Submarine Thermal Reactor" - S1R) e na empresa General Electric e seu Laboratório Knolls ("Submarine Intermediate Reactor" - S1R).

No curto período de 1948 a 1953, numerosos problemas técnicos foram resolvidos e um reator protótipo em terra para submarinos foi construído e testado, RICKOVER et alii [54] e PEPPIER [55]. A 30 de março de 1953, o S1R Mark I atingiu a criticidade. Em 30 de setembro de 1954, o "Nautilus", com seu reator S1R Mark II, foi comissionado. A 30 de março de 1957, o "Seawolf", com seu reator S1R Mark B, foi comissionado.

Em 1958 a URSS comissionou seu primeiro submarino nuclear, "Leninski Komsomolsk", da classe "November", aparentemente sem desenvolvimento anterior de um protótipo em terra, BREEMER [48].

Destes precursores até os nossos dias, outros países foram se capacitando a projetar, construir e operar essa classe de navios (Grã-Bretanha em 1963, França em 1971, China em 1974 e Índia em 1988, esta última somente operação e uma série de desenvolvimentos foram introduzidos, visando maiores potências instaladas e minimização do ruído gerado, SHARPE [15]).

Todos os submarinos nucleares modernos ingleses, americanos, chineses e franceses utilizam reatores a água pressurizada (PWR: "Pressurized Water Reactor"), nos quais a água leve (comum) é o refrigerante e o moderador, uma técnica já amplamente experimentada e testada, que provou ser

excepcionalmente confiável e segura em serviço, CROUCH [57], DUDERSTADT e HAMILTON [58], GLASSSTONE e SESONSKE [59], TONG e WEISMAN [60].

A operação do PWR requer considerável potência elétrica auxiliar, principalmente para acionar as bombas de circulação de refrigerante do reator e os aquecedores do pressurizador do circuito de resfriamento do reator (circuito primário). O sistema pode ser projetado para utilizar-se de circulação por convecção natural resultante do gradiente de temperatura estabelecido no interior do reator, mas as bombas são indispensáveis para as altas potências. Alguns sistemas, visando a redução de ruído e vibração, usam várias bombas que podem ser seletivamente ativadas de acordo com o nível de potência requerido. Entretanto, essas bombas sempre geram um nível de ruído detectável pelos sensores modernos.

Várias alternativas de refrigerantes do reator têm sido propostas, CROUCH [57]. O SNA Seawolf (EUA) tinha instalado um reator resfriado a sódio líquido, permitindo uma transferência de calor muito mais eficiente, operando a alta temperatura e baixa pressão, mas demonstrou-se extremamente problemático, HEWLETT e DUNCAN [53]. Havia dois problemas particulares: o mais difícil de ser tratado referia-se ao fato de que o sódio teria que ser mantido líquido todo o tempo, pois sua solidificação arruinaria a tubulação do primário; o segundo eram os persistentes vazamentos de vapor a alta pressão no superaquecedor do gerador de vapor.

Após dois anos de operação, o S2G foi substituído por um PWR S2Wa, praticamente idêntico ao do SNA Nautilus. Entretanto, o resfriamento por metal líquido aparenta ser o único modo de se obter instalações menores e mais leves, tendo a marinha soviética voltado a esta solução na década de 70 com o SNA classe Alfa, com uma instalação compacta, designada e altamente automatizada, conseguindo com isto grande redução no peso da blindagem biológica do reator, BREEMER [48].

Recentemente os problemas das instalações resfriadas a metal líquido voltaram a ser realçados pelo afundamento do SNA "Mike" (UR55) em 1989, HANDLER e ARKIN [61].

Um problema particular aos submarinos nucleares é o ruído gerado por engrenagens redutoras e máquinas rotativas, como as bombas já citadas, indispensáveis ao seu funcionamento, especialmente nos sistemas PWR. A maioria dos submarinos ocidentais tem suas máquinas montadas em bases resistentes num esforço de redução do ruído transmitido ao casco, FRIEDMAN [14].

O sistema de transmissão turbo-elétrico (similar ao diesel-elétrico convencional) foi tentado nos SNA americanos Lippcomb e Tullibee e é atualmente padrão nos submarinos nucleares franceses, porém não foi repetido pela marinha americana, elevadas possivelmente devido a seu baixo rendimento global, apesar relações peso/potência, volume/potência e custo/potência, apesar de seu nível de ruído ser potencialmente mais baixo, SHARPE [15].



Acionamento direto do eixo, sem redutora foi tentado utilizando-se hélices contrarrotativas de tamanhos diferentes movidos por turbina de baixa rotação, no SNA Jack (classe Sturgeon), porém sem sucesso, tendo sido substituído, FRIEDMAN [14].

O projeto de reatores operando em circulação natural foi utilizada no SNA Narwhal e aparentemente foi um sucesso, tendo sido outra vez utilizado no reator 506 que foi instalado na classe Ohio (EUA), SHARPE [15].

## CAPÍTULO 2

## A SITUAÇÃO ATUAL

## 2.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Nenhum engenheiro naval com interesse na área militar pode deixar de impressionar-se com a grande diversidade de submarinos atualmente em serviço ou em construção, bem como com as inúmeras propostas de inovações em desenvolvimento ou em projeto. Estas representam diferentes abordagens, cada uma associada a um conjunto particular de restrições, visando a satisfação, em variadas medidas, de uma mesma necessidade geradora - a obtenção de um Poder Naval efetivo e confiável:

- nos EUA inicia-se, após duas décadas e polémicas discussões tático-estratégicas, técnicas e orçamentárias, a construção de uma classe de submarinos nucleares de ataque totalmente nova (SSN-21 SEAWOLF), visando a futura substituição da numerosa e não menos polémica classe LOS ANGELES;

- na URSS surge, para espanto dos Estados-Maiores da OTAN, a classe de submarinos nucleares lançadores de mísseis balísticos (SSBN) "TYPHOON", com uma configuração totalmente não usual e proliferam novas classes de submarinos nucleares, estratégicos e de ataque, com figuras de desempenho (profundidade de operação, velocidade máxima, etc.) bem superiores às atingidas pela engenharia naval militar ocidental;

- na Alemanha, Suécia, Itália e França desenvolvem-se soluções técnicas diferentes para o projeto de sistemas de Propulsão Independentes do Ar atmosférico (SPIA) não nucleares;

- no Canadá, e também na França, desenvolvem-se os chamados SSN ("small n"), alternativas de baixo custo aos atuais submarinos nucleares de ataque (SSN).

Para compreendermos esta grande diversidade e poderemos avaliar as inúmeras propostas de inovações, devemos ter em mente que os submarinos modernos são projetados com base numa variada gama de condicionantes específicos de cada nação, que podem ser classificados como técnicos (de engenharia e tático-operativos), tais quais:

- diferentes conceitos de emprego e doutrinas tático-operativas;

- diferentes tipos de armamento embarcado;  
- diferentes características das ameaças a se opor;  
- diferentes áreas de operação;  
- diferentes "estados-da-arte" empregados para cada área técnica associada ao desenvolvimento do projeto;  
e também numa não menos variada gama de outros condicionantes, que poderíamos chamar de "não-técnicos", derivados do "mundo real" onde tais navios de guerra deverão estar inseridos, tais como:

- diferentes características sócio-culturais dos operadores;
- diferentes experiências históricas de operação;
- diferentes padrões tecnológicos, parques industriais e infra-estruturas de apoio à construção, operação e manutenção;
- diferentes interesses comerciais, tais como possibilidade de exportação;
- diferentes políticas de nacionalização, padronização e normalização;
- diferentes disponibilidades de recursos financeiros;
- diferentes horizontes de planejamento;
- diferentes necessidades de prazos de obtenção;
- diferentes restrições políticas e econômicas e diferentes objetivos nacionais (macro-estratégia) e, consequentemente, de expectativas de projeção do Poder Nacional em zonas de influência político-econômica.

Todos esses condicionantes conjugados geram um amplo espectro de requisitos táticos-operativos e especificações de engenharia, que por sua vez determinam a configuração de cada projeto de submarino.

Quanto aos diferentes conceitos de emprego, podemos distinguir quatro categorias:

- submarinos para emprego estratégico, capazes de efetuar ataques a alvos de grande porte, militares ou civis, de vital importância estratégica ou logística para o Poder Nacional do inimigo, a longas distâncias e com grande poder de destruição;

- submarinos para controle de área marítima, capazes de efetuar ataques a unidades de superfície (navios de guerra ou mercantes) ou a outros submarinos, negando o uso do mar pelo inimigo e/ou garantindo-o para as forças amigas;

- submarinos para missões especiais, de caráter peculiar e mais ou menos esporádico, tais como minagem, lançamento clandestino de pessoal em território inimigo, coleta de informações (inteligência) e vigilância, transporte de tropas, reabastecimento no mar, alarme antecipado ("piquete"), plataforma de comunicações, socorro e salvamento, apoio a mini-submarinos, etc.;

- mini-submarinos ou submarinos-âncoras, empregados nas chamadas "operações especiais", de sabotagem, infiltração, ataques dentro de portos ou bases navais inimigas, etc. (ações de "comando"), para coleta de dados oceanográficos, para trabalhos especiais ou de busca e salvamento de outros submarinos, navios ou itens especiais, pousados no fundo do mar.

Quanto aos diferentes tipos de armamento embarcado, podemos distinguir cinco categorias:

- submarinos lançadores de mísseis balísticos, de alcance inter-continental (1000-5000 milhas náuticas), voo a altas altitudes (parte de sua trajetória fora da atmosfera), dotados de carga explosiva nuclear, distribuída em múltiplas ogivas independentemente orientadas para diferentes alvos ("MIRV Multiple Independent Re-entry Vehicles");

- submarinos lançadores de mísseis de cruzeiro, de grande alcance (100-1000 milhas náuticas), voo a baixa altitude e carga explosiva nuclear ou convencional, porém com poder de destruição significativamente inferior a dos mísseis balísticos;

- submarinos lançadores de mísseis anti-navio, de médio alcance (50-100 milhas náuticas), voo a muito baixa altitude ("sea skimmers") e carga explosiva convencional;

- submarinos lançadores de torpedos, que são o armamento anti-navio e anti-submarino típico, de alcance relativamente curto (até 20 milhas náuticas) e carga explosiva convencional;

- submarinos lançadores de minas, artefatos explosivos convencionais, fundeados através de dispositivos de anarração ou simplesmente pousados no leito do oceano, detonados por contato ou influencia (acústica, magnética, pressão, etc.).

Quanto às diferentes áreas de operação, podemos distinguir cinco categorias:

- submarinos oceânicos, projetados para operar por longos períodos (50-90 dias) em alto mar (profundidades superiores a 100 m) e a grandes distâncias das bases de apoio;

- submarinos costeiros, projetados para operar por períodos curtos (até 45 dias) em águas restritas, próximas ao litoral e a distâncias relativamente curtas das bases de apoio;

- submarinos para emprego sob as calotas de gelo polar, com capacidade de operação independente da superfície por longos períodos e de romper camadas relativamente finas de gelo superficial (banquisas) para emergência;

- submarinos para emprego em águas interiores, baías, lagos, portos e bases navais, por períodos muito curtos (poucos dias), que requerem apoio de navios de superfície ou submarinos



- submarinos para emprego em imersão profunda, de pequeno porte, em geral com fins de busca e salvamento, coleta de dados oceanográficos ou trabalhos especiais no fundo do mar, também requerendo "navios-mãe".

Quanto aos tipos de ameaça a se opor, podemos identificar:

- outros submarinos, que são, de fato, a mais significativa ameaça;

- navios de superfície, lançadores de torpedos pesados através de reparos de convés ou de torpedos leves através de mísseis anti-submarino, foguetes anti-submarino e cargas de profundidade (em desuso), dotados de sensores acústicos (sonares ativo/passivo e "arrays" de hidrofones) de casco ou rebocáveis a profundidades variáveis e sensores eletromagnéticos (radar e MAGB) de mastro;

- aeronaves de asa móvel (helicópteros), lançadoras de torpedos leves, dotadas de sonares de mergulho ativo/passivo, sono-bóias, radar e detectores de anomalias magnéticas (MAD);

- aeronaves de asa fixa (aviões), lançadoras de torpedos leves e cargas de profundidade, dotadas de sono-bóias, radares, detectores de anomalias magnéticas e outros sensores, menos comuns, que se encontram atualmente em desenvolvimento tais como:

- sensores infravermelho (detecção da esteira térmica);
- sensores óticos (detecção por reflexão de feixes de laser verde-azul);
- detectores de campos eletro-magnéticos gerados pelo submarino ("electrochemical contact series");
- detectores de luminescência biológica (emissão de luz por micro-organismos marinhos quando a água é perturbada pelo movimento do submarino);
- radar de abertura sintética (detecção de ondas capilares geradas na superfície pelas ondas internas devidas ao deslocamento do submarino e submerso); e
- magnetômetros SQUID (Superconductive Interference Device).

- minas de fundo e de fundo acionadas por influência acústica, magnética ou pelo campo de pressões gerado pelo movimento do submarino;

- sistemas automáticos de detecção e lançamento de torpedos fixados no fundo dos oceanos, tais como os CAPTOR ("CAPTIVE TORPEDO") associados às redes fixas de "arrays" de hidrofones SOSUS ("Sonar Surveillance System") ou móveis, rebocados por navios de superfície auxiliares dotados de sistemas rebocadores;

- sistemas de sensoramento remoto, baseados em satélites ou em aeronaves em vôo a grandes altitudes;

- barreiras de proteção física de águas interiores (portos e bases navais) tais como redes anti-torpedo.

Quanto ao "estado-da-arte" empregado na área de propulsão (que é a de maior interesse para o presente trabalho), podemos identificar:

- submarinos de propulsão convencional diesel-elétrica, sistema combinado no qual o navio, quando submerso, é propelido por motor elétrico alimentado por baterias, as quais, quando descarregadas até um certo percentual, devem ser recarregadas por grupos diesel-geradores, obrigando o submarino a operar, durante este período de carga, na superfície ou muito próximo dela (fazendo uso do "esnorquel")!

- submarinos de propulsão nuclear baseada em reatores térmicos resfriados e moderados por água pressurizada ("Pressurized Water Reactors - PWR"), cuja operação é totalmente independente do ar atmosférico, nos quais a energia térmica gerada pelo combustível nuclear aquece a água de resfriamento do reator, que por sua vez gera vapor saturado num trocador de calor, vapor este que alimenta uma instalação propulsora em ciclo Rankine, muito semelhante àquelas empregadas em navios de superfície; as turbinas deste ciclo poderão acionar diretamente o eixo propulsor, via engrenagens redutoras, ou acionar turbo-geradores, que por sua vez acionarão motor elétrico ligado ao eixo do navio (transmissão turbo-elétrica)!

- submarinos de propulsão nuclear baseada em reatores resfriados a liga metálica chumbo-bismuto líquida ("Liquid Metal Cooled Reactor - LMCR"), cuja instalação, a exceção do reator, é semelhante às baseadas em PWR; neste caso, entretanto, suas características específicas permitem a geração de vapor super-aquecido, o que eleva significativamente a eficiência do ciclo Rankine;

- submarinos de propulsão nuclear baseada em reatores intermediários resfriados a metal líquido ("Sodium Cooled Intermediate Reactor - SIR"), nos quais a energia térmica gerada pelo combustível nuclear aquece o fluido de resfriamento do reator, que por sua vez aquece o fluido de um circuito intermediário, que então gera vapor num trocador de calor, vapor este que alimenta uma instalação propulsora em ciclo Rankine, tal como no sistema PWR; a necessidade de um circuito intermediário prende-se ao fato do sódio tornar-se altamente radioativo ao circular pelo núcleo do reator; este sistema foi empregado exclusivamente no SSN Seawolf, da Marinha Americana (1956) e posteriormente abandonado!

- submarinos de propulsão híbrida, sistema no qual associa-

se à instalação diesel-elétrica um "carregador de baterias" (de baixa/média potência) baseado em fonte de geração de energia independente do ar atmosférico (não-nuclear ou nuclear, porém de configuração radicalmente diferente das instalações PWR e LMCFR usuais), de forma que, para as altas velocidades, empregasse a propulsão convencional, periodicamente dependente do ar e, para as baixas e moderadas velocidades, empregasse o Sistema de Propulsão Independente do Ar (SPIA):

- "mono-submarinos", navios de relativamente pequeno deslocamento e potência instalada, dotados exclusivamente de SPIA baseado em fonte de energia não-nuclear ou nuclear, similares aquelas consideradas para os submarinos de propulsão híbrida;

- submarinos convencionais (diesel-elétricos), dotados de "pacotes de potência" ("power packs") que visam aumentar seu raio de ação submerso ou aumentar sua velocidade máxima (por períodos curtos);

- submarinos de propulsão puramente elétrica, de pequeno raio de ação, dotados de baterias primárias, não recarregáveis, de muito alta capacidade de acumulação de energia.

Quanto às outras áreas técnicas não diretamente relacionadas à propulsão, citaremos alguns aspectos referentes ao "estado-da-arte" que têm significativa influência na configuração do submarino:

- tecnologia de lançamento de torpedos, que pode ser por descarga positiva, de ar comprimido ou de própria água do mar, e saída do tubo por meios próprio ("swim-out");

- tecnologia de guiação de torpedos, que podem ser guiados a fio ou de corrida reta (ou pré-programada), durante a fase inicial da corrida, assumindo ou não a busca automática nas fases posteriores;

- tecnologia de detecção acústica, que pode empregar sonares passivos/ativos de proa, "arrays" de hidrofones laterais ("flank arrays") e "arrays" de hidrofones rebocáveis em diferentes faixas de frequência (quanto mais baixas as frequências, mais eficiente a detecção, porém maiores são os transdutores e mais complexos e portanto volumosos os equipamentos para processamento de sinais);

- tecnologia de detecção ótica, que pode utilizar-se de mastros penetrantes ou não penetrantes (óptrônicos) no casco resistente, combinados ou de uso dedicado;

- tecnologia dos sistemas de comunicação, que podem utilizar-se de ampla faixa do espectro de frequências, desde aquelas mais baixas (e mais favoráveis à propagação submarina), o que requer numerosos tipos de antenas, inclusive flutuantes e rebocáveis, além das comuns posicionadas em mastros retráteis;

- grau de automação dos sistemas de combate, propulsão e auxiliares, que influí de forma significativa no número de tripulantes (até certo ponto, porque a partir de determinado grau, a tripulação passa a ser definida pelas situações de emergência e controle de avarias);

- diferentes técnicas empregadas para redução das "assinaturas" do submarino, tais como ruído irradiado (assinatura acústica), intensidade de alvo sonar e radar, esteira térmica (assinatura infravermelha) e campos magnéticos induzidos (assinatura magnética);

- tecnologia de materiais empregados na construção do casco resistente (aços ferríticos temperados e revenidos, aços austeníticos, titânio, etc.), influenciando na profundidade de operação, na lâmina d'água (envolpe profundidade x velocidade) de segurança e no balançamento peso/empuxo do navio;

- arranjo estrutural do casco resistente, que pode ser simples, com cavernas internas ou duplo, com cavernas externas ou mesmo soluções combinadas (simples na sua maior extensão e duplo na região dos tanques de lastro);

- meios de salvamento previstos, tais como escape livre (até 80m), subida livre (até 180m), esfera de salvamento (associada a uma antepara estanque), sistema de esgoto em emergência dos tanques de lastro por hidrazina (ou outra substância similar) e escotilha para acoplamento de submarinos de salvamento a imersão profunda (tipo DSRV);

- tecnologia empregada nas interfaces homem-máquina (vídeos, painéis mínimos, painéis de chaveamento simples, consoles de governo e profundidade, consoles de controles de máquinas, etc.);

- padrões de habitabilidade e conforto da tripulação e filosofia de operação (número e duração dos períodos alternados de trabalho e descanso);

- tecnologia e padrões de qualidade do ar aplicados aos sistemas de regeneração da atmosfera interna;

- tecnologia e critérios adotados para processamento e descarga para o mar de rejeitos das instalações de máquinas e sanitários.

Por outro lado, o engenheiro naval com atuação no projeto e construção de submarinos militares deve ter em mente que este é um campo extremamente condicionado por diferentes interesses políticos, estratégicos e comerciais, como pode ser demonstrado por alguns acontecimentos recentes:

- o anúncio da intenção do Canadá de criar uma força de submarinos nucleares de ataque gerou uma violenta competição entre



a Grã-Bretanha e a França, como potenciais fornecedores, e variadas pressões políticas, externas e internas, sobre o governo daquele país!

- a decisão da Austrália de desenvolver uma nova classe de submarinos convencionais de grande porte, visando a substituição de seus velhos classe Oberon, em parceria com a Suécia, após acirrada disputa comercial envolvendo a Grã-Bretanha e a Alemanha, a qual não faltaram denúncias de corrupção e acusações mútuas, agitou o mercado de exportação de produtos militares!

- a operação de "leasing" de submarinos nucleares lançadores de mísseis de cruzeiro (SSGN) classe "CHARLIE" soviéticos à Índia, associada ao desenvolvimento de projetos autóctones de submarinos nucleares levados a cabo por diversos países do chamado "Terceiro Mundo" tem preocupado de forma acentuada as grandes potências navais mundiais, devido à significativa ameaça que essas armas representam para sua estratégia militar global, e tal preocupação consubstancia-se sob a forma de pressões políticas e econômicas.

Sem dúvida alguma, a posse da tecnologia de submarinos por nações consideradas "periféricas" constitui-se em significativa ameaça aos interesses geo-políticos e econômicos das grandes potências, pois são armas extremamente eficazes devido a sua invisibilidade e mobilidade, que podem por em cheque forças navais desproporcionalmente maiores, eventualmente causando-lhes sérios danos, constituindo-se assim, em eficazes meios de dissuasão.

## 2. 2 - SUBMARINOS NAO-NUCLEARES, CONVENCIONAIS E HIBRIDOS

No ano de 1991, 42 marinhas nacionais operam 577 submarinos nao-nucleares (quantidades individuais entre parenteses):

AFRICA DO SUL (3), ALBANIA (2), ALEMANHA (24), ARGELIA (2), ARGENTINA (4), AUSTRIA (6), BRASIL (5), BULGARIA (8), CANADA (3), CHILE (4), CHINA (110), COLOMBIA (2), COREIA DO NORTE (22), CUBA (3), DINAMARCA (7), EGITO (8), EQUADOR (2), ESPANHA (8), ESTADOS UNIDOS (1), FRANCA (10), GRX-BRETANHA (11), GRECIA (10), HOLANDA (5), INDIA (17), INDONEZIA (2), ISRAEL (3), ITALIA (10), IUGOSLAVIA (5), JAPAO (15), LIBIA (6), NORUEGA (13), PAQUISTAO (6), PERU (6), POLONIA (3), PORTUGAL (3), ROMENIA (1), SIRIA (3), SUECIA (12), TAIWAN (4), TURQUIA (15), UNIAO SOVIETICA (191) E VENEZUELA (2).

Além destes, três países têm demonstrado forte interesse na criação, em futuro próximo, de força de submarinos, tendo o primeiro já iniciado seu processo de obtenção:

COREIA DO SUL, MALASIA E TAILANDIA

Dois países declararam sua intenção de abandonar a operação de submarinos nao-nucleares, sendo o primeiro só opera hoje uma unidade (nao dotada de armamento) com objetivos experimentais, e o segundo nao tem nenhum programa de construção em andamento:

ESTADOS UNIDOS E FRANCA

O projeto e desenvolvimento de submarinos nao-nucleares e, entretanto, feito atualmente somente por dez países no mundo, representados por seus estaleiros e escritórios de projeto, estatais ou privados:

CHINA, ALEMANHA, FRANCA, GRX-BRETANHA, ITALIA, JAPAO, HOLANDA, SUECIA, UNIAO SOVIETICA E IUGOSLAVIA

Destes, somente os europeus podem ser considerados como exportadores de submarinos e sua tecnologia, apesar da China e da UR55 transferirem submarinos para "nações amigas" em bases comerciais não divulgadas (a China iniciou-se na tecnologia de submarinos através de transferência soviética). Não ha notícias de transferências de submarinos, nem de sua tecnologia, do Japao e Iugoslavia para outros países (exceção feita aos mini-submarinos vendidos pela Iugoslavia para o Paquistão, Ira e Libia).

Os vendedores ocidentais de submarinos e de tecnologia de submarinos servem, primariamente as necessidades de suas próprias marinhas nacionais mas, seguindo as regras da dita "livre iniciativa", tentam, ao mesmo tempo, aumentar o retorno do

investimento feito no desenvolvimento de novos navios, sistemas e equipamentos. A aplicação de novas tecnologias e a melhoria do desempenho das tecnologias atuais para submarinos não-nucleares requerem intensivos investimentos públicos e privados para serem levadas a cabo.

Os seguintes projetos podem ser identificados como principais "sucessos" de exportação:

- AGOSTA, francês, com 11 unidades construídas - 5 para a marinha nacional e 6 para marinhas estrangeiras (Paquistão e Espanha);
- DAPHNÉ, francês, com 18 unidades construídas - 4 para a marinha nacional e 14 para marinhas estrangeiras (Paquistão, Portugal, África do Sul e Espanha);
- TR1700, alemão, com 2 unidades construídas e 2 unidades em construção - as 4 para a Marinha Argentina;
- Tipo 205, alemão, com 8 unidades construídas - 6 para a marinha nacional e 2 para a Marinha Dinamarquesa;
- Tipo 207, alemão, com 13 unidades construídas - 10 para a marinha nacional e 3 para marinhas estrangeiras (Dinamarca e Noruega);
- Tipo 209, alemão, com 39 unidades construídas e 13 unidades em construção - todas para marinhas estrangeiras (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Equador, Grécia, Índia, Indonésia, Peru, Coreia do Sul, Turquia, Venezuela e Israel)
- Tipo 210, alemão, com 3 unidades construídas e 3 unidades em construção - todas para a Marinha Norueguesa;
- Tipo 471 "Collins", sueco, com 6 unidades em construção - todas para a Marinha Australiana;
- OBERON, britânico, com 25 unidades construídas - 10 para a marinha nacional e 15 para marinhas estrangeiras (Austrália, Brasil, Canadá, Chile e Egito)
- WALRUS, holandês, com 3 unidades construídas e 1 unidade em construção - 2 para a marinha nacional e 2 para a Marinha de Taiwan;
- "KIL0", soviético, com 27 unidades construídas e número desconhecido em construção - 15 para a marinha nacional e 12 para marinhas estrangeiras (Argélia, Polónia, Índia e Roménia)

Até o final dos anos 70, o mercado mundial de submarinos era extremamente limitado e sua tecnologia se desenvolvia muito lentamente. Ao início dos anos 80 e, em particular, após o

primeiro verdadeiro simposio internacional sobre submarinos militares, ocorrido em Londres em 1963, este cenario comecou a mudar rapidamente. A tecnologia de projeto e construçao de submarinos passou a parecer acessivel e passivel de obtenção também para as marinhas de pequeno e médio porte.

Os requisitos politicos de nacionalização e independência tecnológica foram e continuam a ser o grande impulso internacional para os planos de aquisição de submarinos. A aquisição destes navios tem sido condicionada a obtenção dos respectivos conhecimentos de projeto e construçao, sendo as primeiras unidades construidas nas instalações do vendedor e as unidades subsequentes construidas em instalações do comprador, num indice crescente de nacionalização ("follow-on construction - FOC").

A crescente demanda enfatiza a transferência de tecnologia e confere precedência as ofertas que incluem transferência de "know-how" de projeto. O surgimento, na Grã-Bretanha, de programas abertos de treinamento em projeto de submarinos e, nos EUA, de publicações técnicas sobre o mesmo tema, são claras indicações de que a tendência do mercado foi entendida e é seguida pelas companhias e organizações que comercializam sua experiência acumulada no setor.

Os países compradores no mercado mundial de submarinos não-nucleares e de sua tecnologia podem ser divididos em diversos grupos:

- aqueles que importaram submarinos construidos no estrangeiro para suas marinhas:

CHILE, COLOMBIA, EQUADOR, GRÉCIA, INDONÉSIA, ISRAEL, NORUEGA, PERU, PAQUISTÃO, TAIWAN, VENEZUELA E AFRICA DO SUL

- aqueles que estabeleceram, ou pelo menos iniciaram a implantação de capacidade de construçao local:

AUSTRÁLIA, ARGENTINA, BRASIL, DINAMARCA, ESPANHA, INDIA, COREIA DO SUL E TURQUIA

- aqueles que anunciaram e/ou estão empreendendo a capacitação em projeto de submarinos:

BRASIL, ESPANHA, INDIA E COREIA DO SUL

Uma análise detalhada dos participantes nesse limitado mercado de submarinos e sua tecnologia também deve considerar o status da base industrial cada país em particular. Uma ampla base de fabricantes e sub-contraçatados altamente especializados e qualificados, coordenada e orquestrada dentro de uma variável faixa de eficiências por órgãos de projeto governamentais, estaleiros, órgãos técnicos de armamento e organizações industriais, incluindo o líder do contrato de projeto e



construção, é um pré-requisito para a independência técnica (e algumas vezes política) alcançada pelos países importadores.

O pequeno número de unidades a serem construídas (seja de submarinos completos, equipamento especializado, um ato específico, etc.) e a flutuação das prioridades nacionais fazem com que o estabelecimento de tal capacidade seja um empreendimento caro e, do ponto de vista empresarial, arriscado. Encontra-se ainda por ser demonstrada a hipótese de que os custos adicionais para obtenção desta capacidade serão compensados pelo aumento da capacidade industrial e da arrecadação de impostos nesses países.

Os fatos e tendências supra-citados, associados ao mercado exportador, são também válidos para os projetos "nacionais" desenvolvidos pelo país exportador. A base industrial nacional dos países projetistas e construtores de submarinos já não tem sido capaz de cobrir o amplo espectro de capacidades especializadas - a qual constituiria a auto-confiança individual na tecnologia de submarinos - requerida por um estaleiro para a composição de um submarino comercialmente competitivo ou para atender ao desempenho especificado pelo comprador. Os equipamentos, componentes e subsistemas são adquiridos pelo líder do contrato de projeto/construção sem levar em consideração os países de origem, mas avaliando o risco industrial, relação custo/benefício e, caso definido, os requisitos do contratante.

Não somente a base industrial de fabricantes e subcontratados especializados parece estar reduzindo-se, como também a capacidade de construção de submarinos dos tradicionais países exportadores tem demonstrado estar super-dimensionada. A situação geral do mercado parece estar forçando uma redução nas atuais capacidades de desenvolvimento, projeto e construção de submarinos e seus componentes nesses países, dado que os projetos nacionais não têm sido suficientes para manter a infra-estrutura associada. Consequentemente ocorre um aumento na competição por uma fatia do incerto mercado de exportação, desenvolvendo-se aceleradamente o conceito da "tecnologia para venda".

Os resultados políticos das discussões ora em curso sobre exportações de sistemas de armas e sua tecnologia podem levar a impactos ainda mais severos nas capacidades tecnológicas e de construção e, consequentemente, na frequência de introdução de inovações.

A situação dos vendedores, conforme apresentada acima, não é desconhecida dos compradores. Estes têm estruturado seus projetos para suas marinhas, em geral de médio porte, de acordo com as tendências de:

- "transferência de tecnologia", que permite ao comprador acumular relevantes conhecimentos a baixo custo e num grau somente limitado pela legislação dos países vendedores;

- "construção nacional", a qual, em geral, é dirigida pelas

políticas nacionais internas do comprador, apesar do aumento de custos devido aos investimentos requeridos e a outros, típicos desse procedimento de compra.

Os gráficos 2.1 a 2.6, levantados com base em dados referentes aos países exportadores europeus (em número de 6) e seus respectivos países importadores (em número de 22), nos dão uma base estatística para as seguintes conclusões:

- nos últimos 15 anos, o número total de submarinos operados por aqueles 28 países atingiu um nível que não tem mudado muito desde então; o número de submarinos construídos a cada período de 5 anos desde 1970 tem declinado continuamente; a idade média de 50% dos submarinos em operação é maior que 20 anos;

- o número total de submarinos nos países importadores é ainda crescente, porém num ritmo bem mais lento; melhorias na confiabilidade dos submarinos, aumento das capacidades técnicas e industriais, maior experiência e disciplina nas atividades de reparo e manutenção e, "last but not the least", menores orçamentos de defesa, têm levado a um aumento na idade média dos submarinos;

- a frequência de comissionamento de submarinos nos anos 60-70 chegava a 7-8 unidades por ano; na década passada era menor que 3 unidades por ano; o número de unidades "follow-on construction" comissionadas variou, desde seu surgimento na segunda metade dos anos 60, entre 0.2 e 1 por ano;

- a situação ao início dos anos 90 mostra 35 submarinos contratados, sendo somente 8 para as marinhas nacionais dos países exportadores e 20 unidades "follow-on construction" para as marinhas dos países importadores;

- quando comparamos estes submarinos contratados e consideramos seu comissionamento no período de 5 anos subseqüentes, a tendência em direção a "follow-on construction" e a crescente diferença entre os números de submarinos dos países exportadores e importadores tornam-se evidentes;

Atualmente, o mais importante desafio para o submarino convencional é a resposta para a antiga questão dos alcances submarinos "ilimitados", com mínimo ruído, obtida através dos comumente chamados Sistemas de Propulsão Independente do Ar (SPIA), o qual deveriam ser referidos, de forma mais precisa, como sistemas de geração de energia independente do ar atmosférico.

Um largo espectro de conceitos para submarinos de propulsão híbrida não-nuclear, combinando o sistema convencional de conversão e acumulação de energia (diesel-geradores carregando baterias chumbo-ácido) com um respectivo SPIA, têm sido apresentados à discussão nacional e internacional por diferentes estaleiros/escritórios de projeto.

Os numerosos caminhos em direção aos SPIA não-nucleares, alguns baseados em princípios antigos e bem estabelecidos, podem ser classificados em duas categorias básicas:

- máquinas térmicas, baseadas em combustão;
- dispositivos eletroquímicos;

os quais têm por objetivo equipar:

- mono-submarinos, com propulsão totalmente IA;
- submarinos híbridos, com propulsão parcialmente IA;
- submarinos convencionais, cujo raio de ação submerso (independente do ar) é estendido por "pacotes de potência" ("power packs").

Dentro da categoria de "máquinas térmicas" poderíamos identificar as seguintes possibilidades técnicas:

- Princípio Walter:
  - processo direto;
  - processo indireto, utilizando-se os seguintes métodos de troca de calor:
    - . em circuito separado;
    - . em circuito acoplado;
    - . sistema "frio";
- Motores de Combustão Interna:
  - motor diesel com circuito de gás de exaustão/oxigênio em alta pressão;
  - motor diesel em circuito fechado:
    - . injeção indireta;
    - . injeção direta;

- Motores de Combustão Externa:
  - motor Stirling com fonte de calor externa proveniente dos seguintes processos:
    - . processo de combustão com ou sem reaproveitamento do calor rejeitado;
    - . acumulador de calor;
    - . geração química de calor (combustão metálica);
    - . combustão em ciclo fechado;

- com transferência de calor da fonte quente para o motor através de:
  - . tubos de calor;
  - . câmara de combustão montada sobre a câmara de expansão;

- Turbinas a Gás:
  - ciclo fechado Brayton com fonte de calor externa proveniente de:
    - . processo de combustão;
    - . acumulador de calor;
    - . geração química de calor;

- ciclo fechado com combustão interna e extração de produtos de combustão (H<sub>2</sub>O, cinzas);

- Turbinas a Vapor:  
- ciclo Rankine com fonte de calor externa proveniente de câmara de combustão em alta pressão, resfriada pela recirculação dos gases de combustão.

Dentro da categoria de "dispositivos eletroquímicos" poderíamos identificar as seguintes possibilidades técnicas:

- Baterias Primárias:  
- baterias não recarregáveis com alta capacidade específica, incluindo:  
- acumulador lítio-cloro de tionala;  
- acumulador lítio-peróxido;

- Baterias Secundárias:

- acumulador lítio/alumínio - sulfato de ferro (LAIS);  
- acumulador chumbo-ácido com recominação catalítica de gases (H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>);  
- acumulador chumbo-ácido regulado por válvulas;  
- acumulador selado níquel-cádmio;  
- acumulador prata-zinco;  
- acumulador sódio-enxofre;  
- acumulador sódio-cloro de níquel (ZEBRA);  
- acumulador zinco-bromo;  
- acumulador carbono/lítio - tetróxido de manganês (SWING);

- Células de Combustível:  
- hidrogênio/oxigênio;  
- com eletrólito ácido;  
- com eletrólito alcalino;  
- metanol;  
- hidrazina;  
- lítio - água do mar;  
- lítio - peróxido de hidrogênio;  
- amônia - peróxido de hidrogênio;

com suprimento de hidrogênio através de:  
- regeneração de gasolina;  
- regeneração de metanol;  
- decomposição do hidreto de boro;  
- hidrólise metálica;  
- armazenagem criogênica;  
- armazenagem a alta pressão;  
- armazenagem em hidretos metálicos;

com suprimento de oxigênio através de:  
- decomposição de peróxido de hidrogênio;  
- armazenagem criogênica;



. armazenagem a alta pressão.

Todos estes sistemas de propulsão, bem como os agregados (auxiliares e periféricos) necessários ao seu funcionamento, devem ser avaliados levando-se em conta diversos aspectos:

- estágio de desenvolvimento técnico;
- dificuldades tecnológicas a serem superadas;
- redução das "assinaturas" associadas;
- razão dos tempos de operação independente/dependente do ar (para submarinos híbridos) e razão de ação independente do ar (para mono-submarinos e "power packs");
- requisitos de infra-estrutura;
- custos do ciclo de vida útil;
- custos iniciais (investimento);
- logística dos produtos químicos requeridos (combustível, comburentes, etc.).

Seis países em particular têm dispendido substanciais esforços na investigação de algumas destas alternativas técnicas:

ALEMANHA, SUÉCIA, ITÁLIA, HOLANDA, GRã-BREITANHA e FRANÇA

O governo sueco desenvolve o motor anaeróbico Stirling, que difere dos motores convencionais pelo fato de que o calor é suprido por uma fonte externa, de forma contínua, a um fluido de trabalho em ciclo fechado (em oposição a fonte interna e forma descontínua dos motores Diesel e Otto), PERSON [31], BRATT [32]. Um regenerador recupera energia, retornando ao ciclo o calor contido no gás de trabalho após a expansão. O motor é alimentado com oxigênio líquido, transportado em tanques criogênicos.

Um submarino convencional, classe "Nacken" (1000 ton) teve instalado um sistema de propulsão deste tipo, composto por dois geradores elétricos de 70 KW acionados por motores Stirling, atendendo as cargas elétricas do navio para as baixas e moderadas velocidades (+/- 4 nós), permitindo assim que os grupos de baterias permaneçam carregados, ficando assim disponíveis para situações em que maiores velocidades sejam necessárias.

O grupo de empresas alemãs IKL/HDW/FERROSTAL e SIEMENS desenvolvem o conceito baseado em células de combustível, que combinam oxigênio e hidrogênio para produzir eletricidade diretamente, usando o princípio da hidrólise reversa, IKL [33] e KNAAK [34].

Este tipo de célula H2-O2, com eletrólito alcalino, foi instalada no submarino alemão U-1, classe IKL-205 (800 ton), sendo capaz de alimentar suas cargas elétricas até velocidades da ordem de 7-8 nós.

O hidrogênio e o oxigênio alimentam diretamente os dois eletrodos, onde um dos gases perde elétrons e o outro os recolhe.

O fluxo de elétrons em um circuito produz então corrente elétrica para alimentar o motor de propulsão e auxiliares. O produto da reação química e água, que pode ser descarregada para o mar ou aproveitada a bordo. Os grupos de baterias fornecem a energia adicional para se atingir velocidades mais altas.

Também na Alemanha, as empresas Thyssen Nordseeverke e MAN, associadas à empresa inglesa Cosworth, desenvolvem um motor diesel de ciclo fechado, já existindo um protótipo em terra de 100 kW em operação, WITTEKIND e WÜBBELS [35]. Este projeto visa primordialmente o emprego na indústria "offshore" implantada no mar do Norte, sendo entretanto, também previsto o seu emprego em submarinos militares.

A empresa alemã MTU desenvolve ainda um sistema baseado em turbina a gás em ciclo fechado.

As empresas italianas Maritalia e Fincantieri desenvolvem atualmente um projeto extremamente promissor, baseado na adaptação de motores diesel comerciais para funcionamento em ciclo fechado. O aspecto revolucionário deste projeto reside na técnica adotada para armazenamento do oxigênio a alta pressão, TUFANO e SANI [36].

Nas tecnologias anteriormente citadas (stirling, células de combustível, diesel em ciclo fechado), a grande limitação provém da dificuldade de armazenar oxigênio em grandes quantidades num submarino, quantidades estas compatíveis com o raio de ação requerido, dadas as inerentes restrições de volume interno, além do risco de acidente com o manuseio deste combustível. O conceito italiano consiste em armazenar o oxigênio a alta pressão (350 atm) no próprio casco, substituindo a tradicional estrutura de chapas e reforçadores por uma série de tubos circulares ou toróides, unidos entre si e com um chapamento externo (não resistente) para criar uma forma hidrodinâmica. Esta solução permite armazenar as quantidades do oxigênio requeridas para uma missão usual.

O oxigênio pode ser combinado com o combustível e alimentar um motor diesel adaptado para operação em ciclo fechado. Os gases de exaustão podem ser separados, neutralizados e armazenados (nos próprios toróides) antes de serem descarregados para o mar, evitando assim os problemas de ter que descarregá-los contra a pressão externa e da esteira térmica resultante.

Neste conceito, chamado GST ("Gas Storage Thoroids"), já existe um protótipo de mini-submarino (29 tons) e estudos avançados para sua aplicação em unidades maiores (até 2800 tons). Este projeto pretende ser uma alternativa que eventualmente possa vir a rivalizar com o desempenho das instalações nucleares na maioria dos empregos tático-operativos.

O estaleiro holandês RDM desenvolve dois projetos de submarinos dotados de propulsão híbrida baseada na tecnologia dos motores diesel em ciclo fechado ("Walrus MK 2" e a série

"Moray"), cujo principal objetivo seria o de atender os requisitos do programa de aquisição de submarinos pelo Canadá. O sistema foi instalado no antigo submarino "Zeeshound" para testes de protótipo. Em 1982, a empresa francesa Bertin & Compagnie iniciou o estudo de um "Module d'Energie Sous Marine" - MESMA - baseado no acoplamento de um circuito de geração de energia, através de combustão a alta pressão, com um ciclo Rankine (turbina a vapor).

Os equipamentos do ciclo a vapor seriam "convencionais", ou seja, similares aos atualmente empregados na propulsão de navios de superfície e submarinos nucleares e as características do circuito de combustão a alta pressão permitiriam a condensação e armazenagem dos gases de combustão sob a forma líquida, a 60 bar, não sendo necessária, portanto, a inconveniente rejeição destes produtos para o mar. A operação do sistema não ficaria então limitada pela profundidade.

Até o presente, entretanto, nenhum país anunciou um projeto concluído de um novo submarino dotado de SPIA não-nuclear e nenhuma marinha nacional colocou os correspondentes planos de aquisição - exceto a Alemanha, que planeja adquirir até sete unidades da classe 212, baseada em projeto do consórcio HDW/IKL (células de combustível H2-O2), para sua Marinha de Guerra ao fim do corrente ano.

O status atual do desenvolvimento da tecnologia de sistemas de propulsão independentes do ar não-nucleares, para aplicação em submarinos híbridos, mono-submarinos e "power packs" pode ser bem descrito como "pronto para ser construído no momento que os possíveis operadores confirmem seu desejo de adquiri-los e sejam capazes de pagá-los".

Um fator que influencia decisivamente as decisões de aquisição é a usual hesitação em comprar uma tecnologia que ainda não foi amadurecida em pelo menos dez anos de serviço operacional em outra marinha. Ocorre também uma certa relutância em participar no desenvolvimento técnico (e seus riscos) de outro país, mas a desvantagem de não acelerar/encurtar o desenvolvimento de uma das opções apresentadas pode ser encarada pelos Estados-Maiores navais como sendo compensada pela crescente competição, que tem produzido várias soluções prontas para aplicação e capazes de satisfazer uma ampla gama de requisitos.

Um outro segmento na área de submarinos não-nucleares, com limitação, porém crescente, importância, é o mercado para conversão e modernização de submarinos após decorrida cerca de metade de sua vida útil. A idade média dos submarinos convencionais ocidentais tem aumentado continuamente (como vimos, mais de 50% dos submarinos em serviço hoje têm mais de 20 anos). Dado que a cada 7-10 anos uma nova geração de sensores e armas surge, a modernização dos submarinos mais antigos é de grande interesse para muitas marinhas - desde que estes mereçam tal investimento.

A modernização de submarinos é um campo extremamente promissor para os SPIA não nucleares, dado que estes podem ser projetados (e na realidade o são), visando sua introdução em submarinos convencionais existentes, dentro do conceito chamado "tin-tin", ou seja, constrói-se uma seção de casco com mesmo diâmetro e arranjo estrutural de um submarino convencional já existente, na qual é instalado o SPIA e todos os seus sistemas auxiliares. O casco original é então literalmente cortado e esta seção é interligada aos demais sistemas do submarino convencional, numa operação semelhante ao "jumboising" de navios mercantes. Restaria assim apenas algumas adaptações de pequena monta nos sistemas do submarino original, basicamente melhorias nos sistemas de regeneração de ar ambiental e controle de gases gerados pelas baterias (hidrogênio, arsina, estibina, etc.) e eventuais aumentos no número de acomodações.

Deste modo obter-se-ia, a um custo relativamente baixo, um submarino de propulsão híbrida, com desempenho muito superior ao submarino diesel-elétrico original.

BRITISH CHINA  
INSTITUTE OF COMMERCE  
BRITISH LEGATION  
HONG KONG



## 2 . 3 - SUBMARINOS NUCLEARES, "Puros", HIBRIDOS E MONO

No ano de 1991, seis marinhas nacionais operam 331 submarinos nucleares (quantidades entre parênteses):

ESTADOS UNIDOS (132), UNIÃO SOVIÉTICA (160), FRANÇA (10),  
GRã-BREITANHA (21), CHINA (6) E INDIA (2)

Destes, 112 são submarinos nucleares lançadores de mísseis balísticos (SSBN), 201 são submarinos nucleares de ataque (SSN) e 18 são submarinos nucleares lançadores de mísseis de cruzeiro (SSGN). Sua distribuição por país é apresentada pelas figuras 2.7a, b e c.

O projeto e o desenvolvimento de submarinos exclusivamente nucleares atualmente são feitos basicamente pelos mesmos países operadores, à exceção da Índia.

Quatro países, entretanto, declararam oficialmente estarem desenvolvendo projetos nacionais de submarinos nucleares de ataque:

BRASIL, ARGENTINA, INDIA E PAQUISTÃO

Os submarinos nucleares não têm, como no caso dos nucleares, um mercado internacional, dado que a sua tecnologia é considerada pelos países projetistas/construtores como "sensível", e portanto não exportável, salvo raríssimas exceções, tais como:

- o programa de construção de submarinos nucleares ingleses baseou-se, no seu início (1958-62), num contrato de venda de um reator PWR tipo 55W, fabricado pela Westinghouse americana, associado a um pacote de transferência de tecnologia extremamente amplo; este contrato, entretanto, não foi dirigido por interesses comerciais usuais e sim pela vontade política do governo americano de acelerar a capacitação de seu tradicional aliado, que estava encontrando sérias dificuldades para cumprir o cronograma originalmente assumido;

- em 1988 a União Soviética cedeu, a preço simbólico, um SSBN classe "CHARLIE" para a Índia, fato que se repetiu, com outro submarino da mesma classe, em 1991; as motivações e objetivos desta transação, bem como as condições técnicas e comerciais sob quais teria sido baseada, não estão de modo algum esclarecidos, porém o fato é que a Índia é o sexto e mais recente membro do restritíssimo grupo de nações que operam submarinos nucleares;

- em 1987 o Canadá, após acirrada polémica interna, colocou no mercado internacional uma concorrência para aquisição de uma classe de dez SSN, baseada, tal como no caso anteriormente citado dos submarinos não-nucleares, nos preceitos de "transferência de tecnologia" e de "construção nacional"; pelo volume de recursos financeiros envolvidos, pode-se imaginar o clima de acirrada

competição que se criou entre os dois únicos potenciais fornecedores qualificados, a França e a Grã-Bretanha; esta transação foi, entretanto, cancelada devido, principalmente às pressões políticas internas sofridas pelo governo canadense, bem como pelas pressões políticas e económicas exercidas pelo governo dos EUA, que era contrário a tal negociação.

Em contrapartida, aos submarinos nucleares lançadores de mísseis balísticos (SSBN), submarinos nucleares de ataque (SSN) e submarinos nucleares lançadores de mísseis de cruzeiro (SSGN), de grandes dimensões e altíssimo desempenho, dois países têm apresentado a discussão nacional e internacional, soluções nucleares para a propulsão de submarinos híbridos e até mesmo de mono-submarinos (note-se que a propulsão nuclear é independente do ar "par excellence"):

## FRANÇA E CANADA

Estas soluções têm como característica fundamental serem significativamente diferentes das soluções adotadas para as classes de submarinos nucleares atualmente em operação e em construção. Estas diferenças provêm, basicamente, do objetivo de eliminar, se não reduzir significativamente, as diversas dificuldades de ordem técnica e económica que têm impedido o acesso das marinhas de médio porte de desfrutar das indiscutíveis vantagens da propulsão nuclear para submarinos, tais quais:

- custos de obtenção muito elevados;
- custos de operação muito elevados;
- investimentos em capacidade técnica muito elevados;
- investimentos em infra-estrutura para construção, operação e manutenção muito elevados;
- requisitos de formação, instrução e adestramento de operadores e mantenedores extremamente restritivos;
- complexidade dos sistemas associados à segurança da instalação;
- grande volume e peso da instalação.

Sem dúvida alguma, a eliminação, ou redução, do grau destas dificuldades só pode ser feita através de significativa redução nas figuras de desempenho apresentadas pelas instalações atuais dos SSN, SSBN e SSGN, tais como potência máxima (e consequentemente velocidades máximas mantidas), relação peso/potência e volume/potência, rendimento, etc.

Existem algumas possibilidades técnicas de sistemas de propulsão, baseados em reatores nucleares especiais, alternativos aos usuais reatores a água pressurizada e aos complexos reatores resfriados a metal líquido anteriormente apresentados, CROUCH [57], GOSLING et al [37], BOISRAYON [38], DANIELS [79]:

- PWR com gerador de vapor, pressurizador e bombas de circulação integrados ao vaso de pressão do reator;

- PWR de baixa pressão e temperatura:
  - . circulação forçada e gerador de vapor independente; ao
  - . circulação natural e gerador de vapor integrado ao
  - . vaso de pressão do reator;
  - . com fluido de resfriamento/moderador:
    - . água leve;
    - . água pesada (D2O);
    - . fluido orgânico;
    - . com fluido de trabalho do ciclo a vapor:
      - . água comum;
      - . compostos halogenados (R-113);

- HTGR ("High Temperature Gas Reactor") e turbina a gás em ciclo fechado Brayton:
  - . circuito simples a hélio;
  - . circuito simples a CO<sub>2</sub>;
  - . circuito duplo com fluido primário hélio e fluido secundário ar, nitrogênio ou hélio.
- As alternativas propostas são baseadas em modernos conceitos da engenharia nuclear que não se encontram ainda suficientemente consolidados no meio naval, tais como:

- reatores inerentemente (ou intrinsecamente) seguros, TAKETANI [62] [63], HEWITT [64];

um processo A é inerente ou intrínseco a um processo B se a ocorrência de B implica necessariamente na ocorrência de A; no campo de segurança de reatores, isto significa que o processo de desligamento do reator é inerente ao processo de elevação da temperatura do combustível e que o processo de operação do sistema de resfriamento do reator após seu desligamento é inerente ao processo de convecção natural, logo reatores cujo projeto se baseia nestes princípios de segurança intrínseca são ditos "inerentemente seguros".

- reator de circulação natural, MACMILLAN et alii [65], GREIF [66], ZVIRIN [67];

Para retirar o calor gerado por um reator e com ele gerar vapor num trocador de calor, é necessário circular um fluido de resfriamento através do núcleo e deste para um gerador de vapor; esta circulação é produzida, em geral, por bombas, que são inerentemente ruidosas; entretanto, o distanciamento vertical entre a fonte fria (gerador de vapor) acima da fonte quente (núcleo) propicia o efeito de termo-sifão (convecção natural), que estabelece naturalmente, num determinado grau, esta circulação; otimizando esta distância vertical e a perda de carga no circuito primário é possível maximizar este efeito, evitando assim o uso de bombas, operando então o reator em circulação natural.

- reator integrado, SCHOMER e PURDY [68], ARRA e RASEK [69], MATZIE et alii [70], KLÄKE e KRACHT [71];

Visando minimizar os riscos de acidentes devido ao rompimento de tubulações, minimizar a perda de carga e compactar o conjunto reator + circuito primário, pode-se instalar o gerador de vapor na parte superior do vaso do reator ou por um pressurizador externo, pressurizar o circuito por meio de um colchão de vapor no topo do vaso, do reator e nele fixar as bombas de circulação, caso sejam necessárias para operação nas altas potências; este arranjo, extremamente seguro, compacto e silencioso é chamado reator integrado.

A empresa canadense ECS, vem desenvolvendo desde 1984 um conceito baseado na tecnologia nuclear, porém radicalmente diferente das tradicionais instalações PWR consagradas no meio naval, GOSLING et alii [37].

Consiste num reator basicamente PWR, porém intrinsecamente seguro, operando a baixa pressão e temperatura, de operação e manutenção extremamente simplificadas e de um sistema de conversão de energia baseada no ciclo a vapor Rankine. Esta instalação atenderia a demanda de potência elétrica para baixas e moderadas velocidades, sendo as baterias resguardadas para as condições de altas velocidades.

Existem três versões para diferentes faixas de potência: AMP5 100, AMP5 400, (de 300 a 500 kWe), e AMP5 1000 (de 1300 a 1700 kWe). A primeira seria adaptada a pequenos submersíveis de emprego civil. A segunda seria adaptada a submarinos da faixa de 1000 tons e utilizaria freon 113 como fluido de trabalho do sistema de conversão de energia no ciclo Rankine, de modo a melhorar o rendimento da instalação devido às baixas temperaturas nas quais ocorreriam as trocas de calor do ciclo. A terceira seria adaptada a submarinos na faixa de 2000 tons, utilizando a água como fluido de trabalho.

Na França existem estudos para a "nuclearização" do projeto de submarino convencional CA 1000 pelo STCAN, BOISFAYON [38]. Este submarino possuiria 1050 tons de deslocamento, 60 m de comprimento e 5,3 de diâmetro. A solução utiliza o chamado SCORE ("Systeme Compact de Réacteur Embarquable") baseado num conceito de reator intrinsecamente seguro desenvolvido pela TECHNICAHOME para aplicação civil.

O SCORE seria um reator auto-pressurizado, com a circulação do fluido primário feita via convecção natural até a máxima potência da instalação. Não existiriam, portanto, nem as bombas de circulação para resfriamento do reator, nem o pressurizador, sendo o envelope do circuito primário extremamente simples. A instalação seria intrinsecamente segura, não requerendo sistemas de segurança ativos nem intervenções rápidas do operador. O gerador de vapor seria integrado ao vaso do reator, de passo simples, com superaquecimento, composto por feixes de tubos helicoidais.

Essa instalação nuclear geraria 1000 KW, possibilitando uma velocidade de 13 nós. A velocidade máxima de 18 nós seria



alcançada operando-se em paralelo à instalação nuclear um grupo de baterias, que funcionaria como "booster" para os turbo-geradores.

Poderíamos caracterizar o virtual "mercado" (que em verdade não existe, como já vimos) de submarinos nucleares e sua tecnologia como encontrando-se numa situação de impasse:

- Por um lado, vem se tornando cada vez mais óbvio que o desenvolvimento tecnológico das nações ditas "periféricas" leva a impossibilidade de manutenção do oligopólio exercido pelas cinco nações, não por coincidência membros permanentes do Conselho de Segurança da ONU (EUA, URSS, China, Grã-Bretanha e França) sobre a tecnologia de propulsão nuclear nos últimos 40 anos, oligopólio este estabelecido sob o pretexto da "não-proliferação" nuclear, mas que de fato se reveste de um cunho estritamente econômico e estratégico.

- Em contrapartida, a escalada de dimensões (deslocamento) e consequentemente de custos que vem ocorrendo no projeto, sobre políticas internas aos países detentores do dito oligopólio, sobre sua relação custo/benefício

Das principais figuras de mérito de um submarino, que são discreção, mobilidade, poder de fogo e autonomia, é somente em discreção que o submarino convencional pode apresentar potencial superior ao submarino nuclear de ataque (SNA).

Entretanto, considerando integralmente o largo espectro das missões navais reservadas a este tipo de navio, o submarino convencional pode representar um desafio ao nuclear se forem feitas comparações baseadas em análises de custo-benefício.

Apesar do SNA ser sempre a plataforma ótima para um grande número de tipos de missão, seu custo unitário da ordem de US\$ 400-700 milhões, OLIVA e GOSLING [26], desconsiderando-se os custos de desenvolvimento, pode torná-lo inadequado para a quase totalidade das missões possíveis.

A escalada de custos e dimensões dos SNA nos últimos 20 anos, bem como as barreiras tecnológicas e, em alguns casos, políticas, para o seu desenvolvimento, e sua inadequabilidade para certos tipos de missão fundamentais para algumas Marinhas, têm provocado uma reavaliação pelo meio naval quanto à oportunidade de seu emprego em muitos casos, arrefecendo o entusiasmo inicial das décadas de 1950-70 e impulsionando a pesquisa e desenvolvimento de diversas tecnologias de sistemas de propulsão independentes do ar (SPIA) alternativos, até então abandonados após os relativos insucessos do princípio Walter e o estrondoso sucesso da propulsão nuclear, GABLER [45], FRIEDMAN [14], HEWLETT e DUNCAN [53].

Após a construção de submarinos nucleares de menor porte pelos EUA (Skate-1957, Tullibee-1960) e URSS (Alfa-1972), a

tendência moderna é o projeto de submarinos nucleares de deslocamento extremamente elevado. Exceto se faz aos franceses com sua moderna classe Rubis/Amethyste, o menor SNA já construído. Exemplos destes grandes projetos modernos são as classes de submarinos de ataque Los Angeles (7000 ton, EUA), Trafalgar (5200 ton, GB), Akula (8000 ton, UR55), e as classes de lançadores de mísseis balísticos Ohio (10700 ton, EUA), Vanguard (15000 ton, GB), Typhoon (25000 ton, UR55), SHARPE [15].

As restrições associadas a submarinos de tão grande porte não estão ligadas apenas aos seus custos - sua operação também fica limitada nas águas rasas (menos de 100 m). Mesmo com o advento da tecnologia dos mísseis submarino-superfície (SUB-SUP), que permitem ataques a longas distâncias (logo sem precisar navegar em águas rasas para atingir alvos que nelas estejam posicionados), não acreditamos que o problema possa ser totalmente resolvido, pois as limitações de alcance dos sensores acústicos próprios do submarino faz com que ele seja dependente de informações externas para lançar tais armas de longo alcance e aí recai-se na antiga e inerente limitação de comunicações externas do submarino.

Estes grandes submarinos nucleares são concebidos para emprego em conflitos de alta intensidade, entre as grandes potências. A situação política mundial atual tende, entretanto, a minimizar a eventual ocorrência de tais conflitos, mas por outro lado, há uma tendência de aumento na ocorrência de conflitos de baixa intensidade ("low intensity conflicts - LIC"), para os quais tais submarinos não estão preparados.

Desafortunadamente, nenhuma das tecnologias nucleares alternativas apresenta um desempenho sequer próximo àquela de uma instalação propulsora nuclear naval moderna, que pode manter velocidades acima de 30 nós indefinidamente. Entretanto, os exemplos do submarino NR-1 da Marinha Americana, com 400 tons de deslocamento e da classe X da Marinha Soviética, com 700 tons, apesar de não serem navios de combate, mostram que a propulsão nuclear não é necessariamente limitada a grandes submarinos, SHARPE [15].

O desenvolvimento de pequenos submarinos nucleares de ataque (alinhados de 550 ou "small n" em oposição aos grandes SSN), é considerado como extremamente promissor. Entretanto, o desenvolvimento de uma instalação propulsora para um SSN representa desafios tecnológicos muito mais complexos que o desenvolvimento de uma instalação nuclear naval típica dos atuais SSN, OLIVA e GOSLING [26].

Note-se que já se vão 35 anos que o SSN Nautilus foi comissionado e que não existe, até a presente data, nenhum SSN operativo, apesar dos mesmos estarem em desenvolvimento há cerca de 5-10 anos por nações que possuem pleno domínio de todos os aspectos das tecnologias nuclear e de submarinos.

Segundo BITTENCOURT (1), a Marinha do Brasil vem trilhando nos últimos 20 anos um árduo caminho, que visa mudar o papel que essa exerceu no passado, de passiva utilizadora de material estrangeiro - que tradicionalmente importava ou recebia material com baixo grau de conhecimento - para o de ativa utilizadora de material nacional e inteligente usúria de equipamentos estrangeiros.

A figura 2.8 mostra um fluxograma do caminho que se trilhou para alcançar o atual estágio, o patamar de competência do momento, e o que se pretende trilhar no futuro próximo. A figura 2.9 apresenta a evolução da construção de navios de guerra no Brasil, no final do século XX, chegando ao início do século XXI. O processo se inicia em 1970 com a assinatura do contrato para o projeto e construção de seis fragatas classe "Niterói", duas das quais construídas no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, e culminará, no próximo século, com a construção do SNA-C-II, primeiro submarino nacional dotado de propulsão nuclear. A obtenção desses navios de guerra modernos complexos muito contribuirá para que a Marinha do Brasil cumpra sua missão constitucional nas próximas décadas. Porém, enquanto os navios têm valor apenas pelo período relativamente curto de suas vidas úteis, a capacidade adquirida no exercício de seu processo de obtenção transcende esse prazo e possibilita o desenvolvimento contínuo de um Poder Naval. A figura 2.10 mostra um modelo que sintetiza essa contribuição do exercício da obtenção de navios de guerra. Da análise das figuras 2.8 e 2.9 podemos depreender a grande importância dada pela Marinha do Brasil à arma submarina.

Segundo PINHEIRO DA SILVA (2), em 1978 amadureceu na Marinha a idéia de que seria conveniente para o Brasil dispor de submarino com propulsão nuclear, para que pudessemos ser, ao início do século XXI, uma potência naval compatível com as dimensões dos interesses brasileiros no mar e com nossa vulnerabilidade marítima.

Os aspectos citados a seguir fazem-nos meditar sobre a importância do Poder Naval brasileiro:

- Queiramos ou não, somos um País debruçado sobre o Oceano Atlântico, com 7408 km de extensão de costa oceânica;
- De nossa população de aproximadamente 145 milhões de habitantes, cerca de 105 milhões de pessoas, ou seja, 72,4%, vivem numa faixa litorânea a até 100 km da costa;
- Mais de 90% de nosso comércio exterior se faz por via marítima; e
- Consideradas apenas as 200 milhas para nossa zona costeira de influência econômica, temos uma superfície de 2.750.000 km<sup>2</sup>, que equivalem a 32,3% da área

continental. Na realidade, segundo o consenso internacional, essa zona de influência econômica compreende toda a plataforma continental, que em nosso caso é superior a 200 milhas em alguns trechos. Dessa plataforma extraímos hoje dois terços de nossa produção petrolífera, e a mesma é sabidamente muito rica também em outros minerais.

Segundo FLORES [8], considerando-se a premissa básica de que o Brasil precisa dispor de um Poder Militar adequado ao cenário de segurança que lhe diz respeito, convém que a Marinha seja capaz de dificultar a aproximação de forças hostis e de impedir o uso de suas áreas costeiras por eventuais adversários (lembraremos do litígio franco-brasileiro em 1963, em torno da captura da lagosta em águas do Nordeste brasileiro). Isso implica capacidade de controlar as águas ao longo do litoral por navios (com suas aeronaves), aviões baseados em terra e, em papel coadjuvante, submarinos.

Em complemento à capacidade de defesa da fronteira marítima (defesa próxima e distante), precisamos ter condições de exercer influência em áreas sul-atlânticas afastadas, de acordo com o interesse nacional. Isso implica controlar área selecionada e restrição, em cooperação internacional, ou até mesmo autonomamente. Neste último caso é preciso reconhecer que, sob condições adversas de ameaça real, sobretudo se aérea, no futuro hoje previsível, seria conveniente que nossa estratégia se alicercasse na discriminação do submarino.

Se o problema se localizar em área relativamente pequena e moderadamente distante (por exemplo: proximidades de Ascensão ou até Cabo Verde) o submarino diesel-elétrico convencional, ou mais apropriadamente, um submarino de pequeno porte dotado de sistema de propulsão independente do ar, ainda atende à necessidade. Entretanto, se a localização for muito distante (por exemplo: Golfo da Guiné ou o amplo contorno sul da África - 3000 milhas de distância ou até mais), o submarino nuclear se importa como mais adequado.

Deduz-se assim, FLORES [8], que convém ao Brasil tanto o submarino diesel-elétrico convencional (ou, de forma muito mais eficiente, submarino de pequeno porte dotado de sistema de propulsão independente do ar) como o submarino nuclear de ataque.

Enquanto a defesa da fronteira marítima (defesa próxima e afastada) merecer atenção prioritária, o número daqueles primeiros poderá ser maior do que o de nucleares. A longo prazo, o crescimento da projeção, das responsabilidades e dos interesses brasileiros no cenário internacional, acabará por recomendar a maior presença em águas distantes do Atlântico Sul e isso induzirá a conveniência de ser aumentada a participação relativa da propulsão nuclear.

Note-se que a sempre importante defesa da fronteira



marítima não será comprometida por essa evolução. Pelo contrário, o submarino nuclear faz bem, ou até melhor, o que o convencional faz, sendo adequado à defesa distante, o que lhe confere boas condições para tornar mais difícil o exercício de ameaça pelo mar.

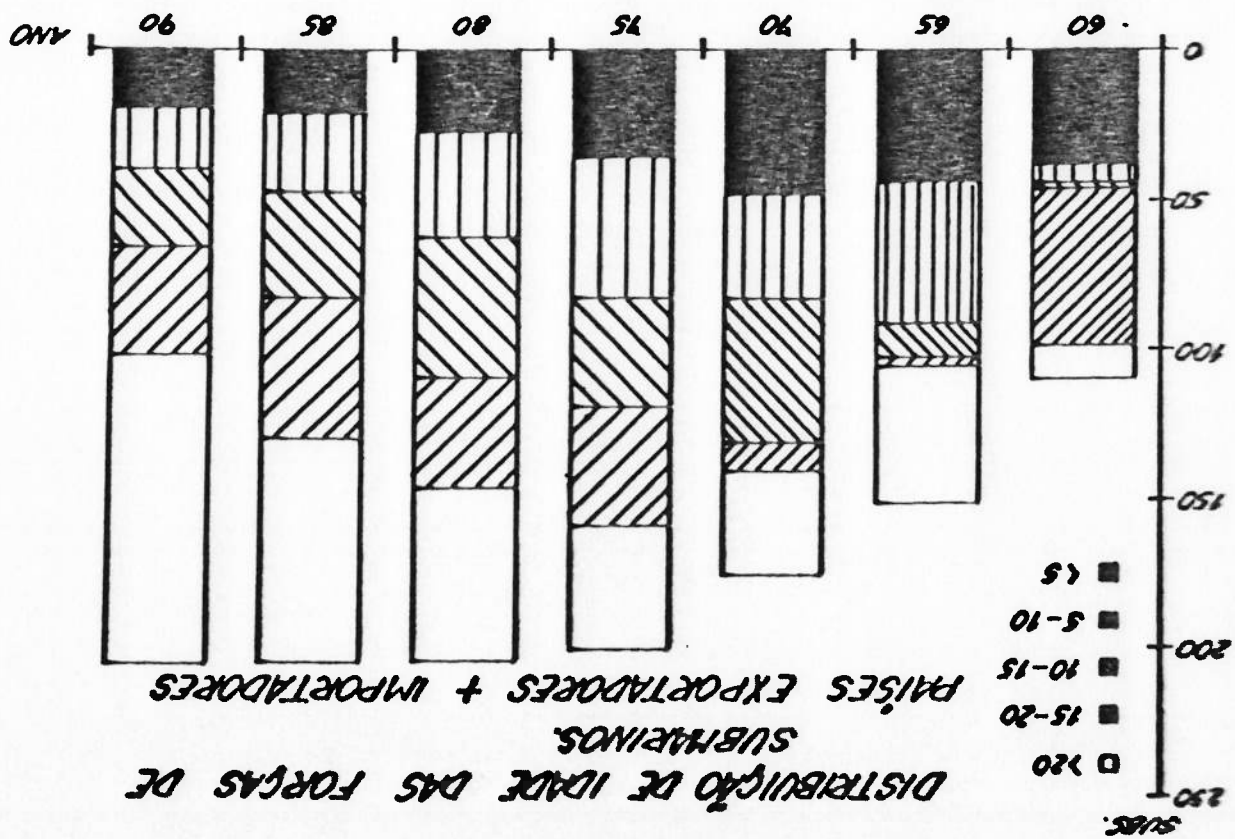
Um outro aspecto também extremamente importante é o emprego civil da tecnologia de submarinos. A indústria "offshore", da qual o Brasil é um dos líderes mundiais, caminha a passos largos em direção às águas profundas, regiões estas onde o emprego de veículos de operação remota (VOR), bem como o de mergulhadores torna-se tecnicamente inviável, HSU [39].

É previsível, portanto, uma forte demanda por submarinos de emprego civil com grande autonomia, bem como de fontes de geração de energia independentes do ar que possam ser instaladas no fundo dos oceanos, para o próximo século.

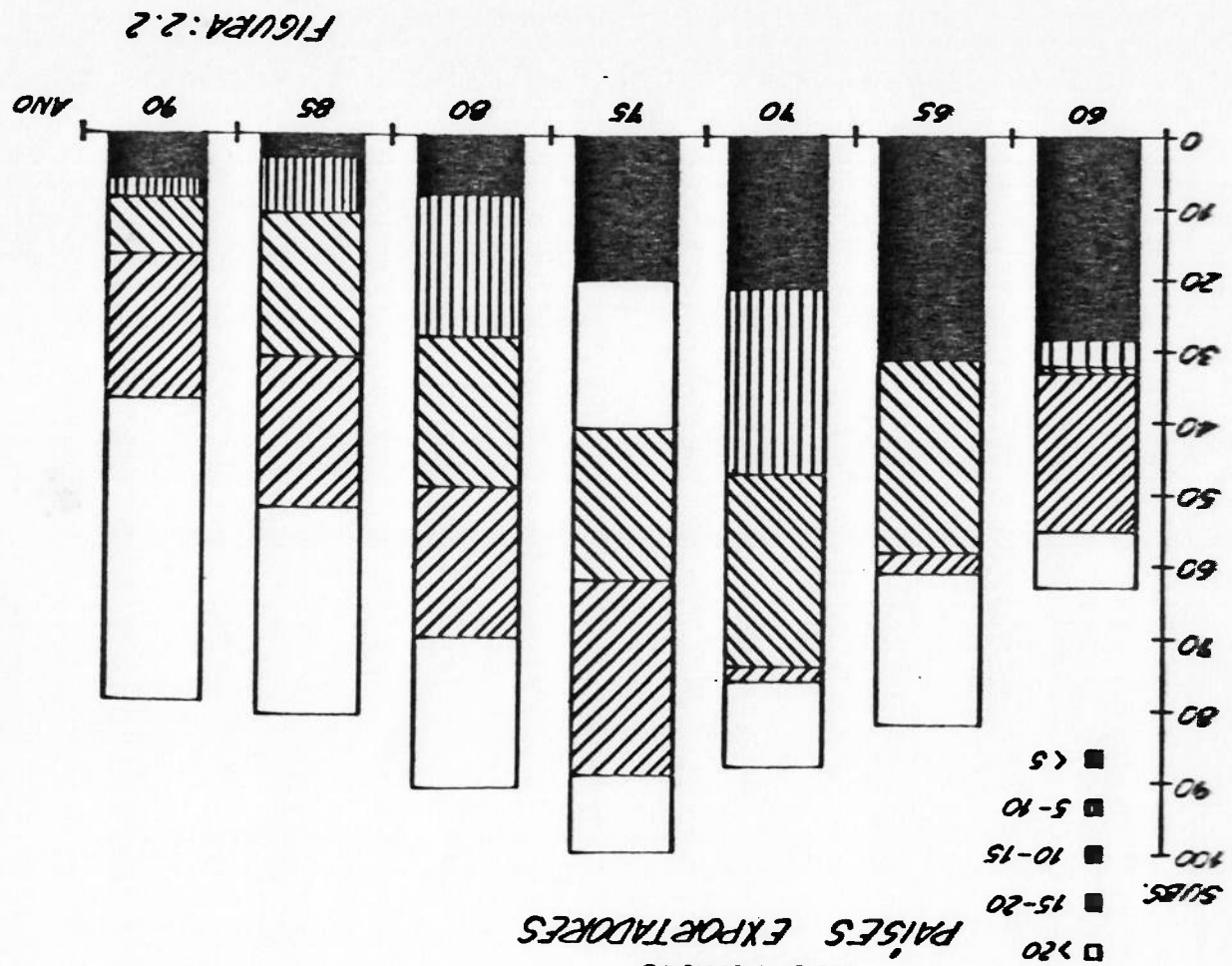
A oportunidade e importância do tema extrapola, portanto, os interesses militares, que já são grandes, estando também relacionado à viabilização da exploração econômica dos 70 % da superfície da Terra que constituem o fundo dos oceanos, sem dúvida o grande desafio do século XXI.

EXCERPTO DO DOCUMENTO "SUBMARINOS E O DESAFIO DO SÉCULO XXI"

FIGURA: 2.1



DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DAS FORÇAS DE SUBMARINOS. PAÍSES EXPORTADORES



# DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DAS FORÇAS DE

## SUBMARIOS PAÍSES IMPORTADORES

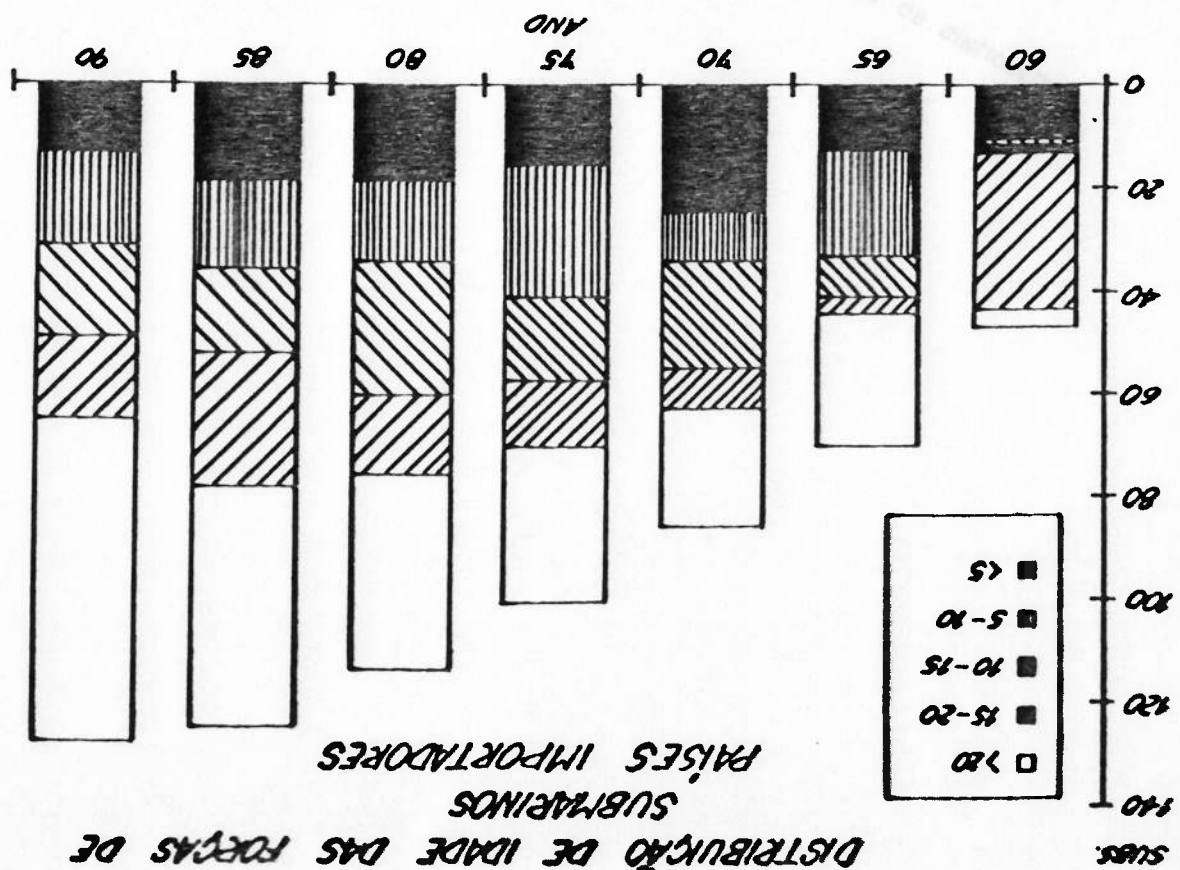


FIGURA : 2.3

# NÚMERO DE SUBMARIOS CONSTRUÍDOS.

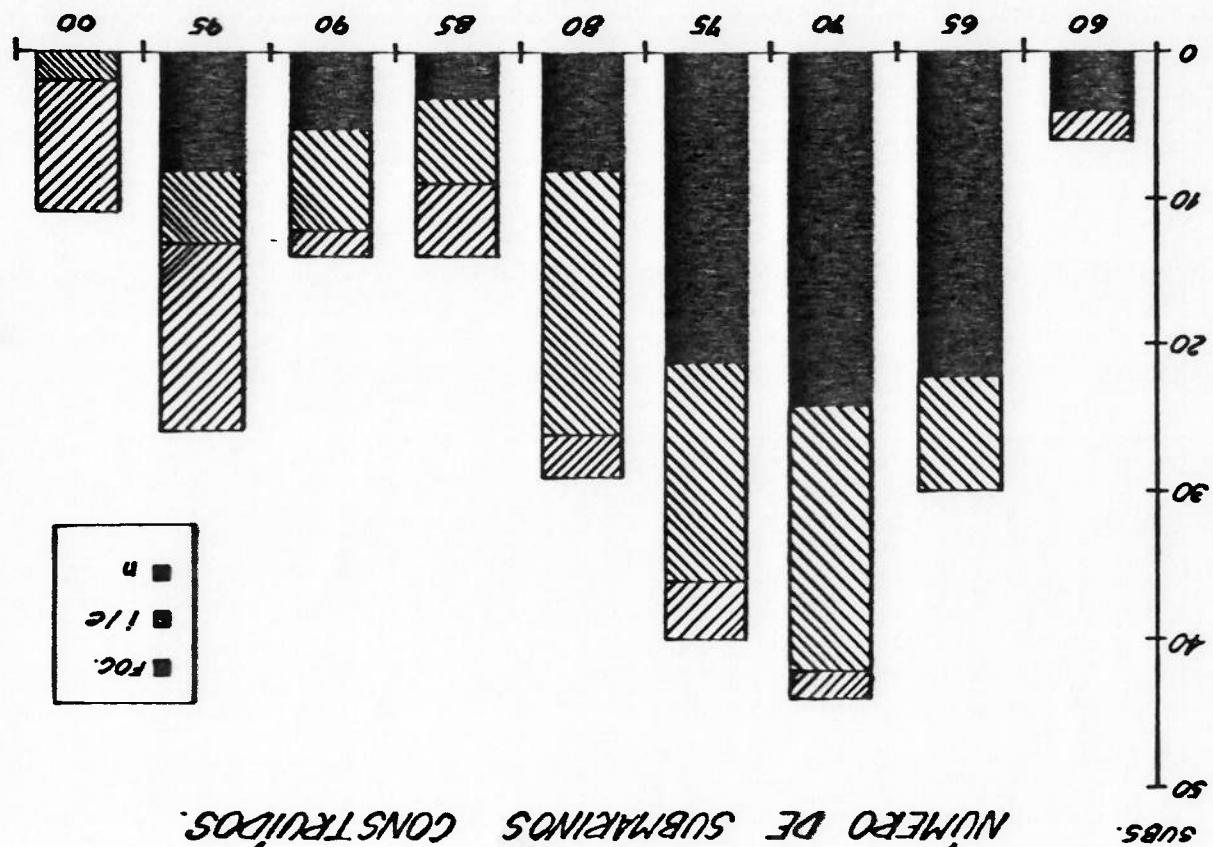
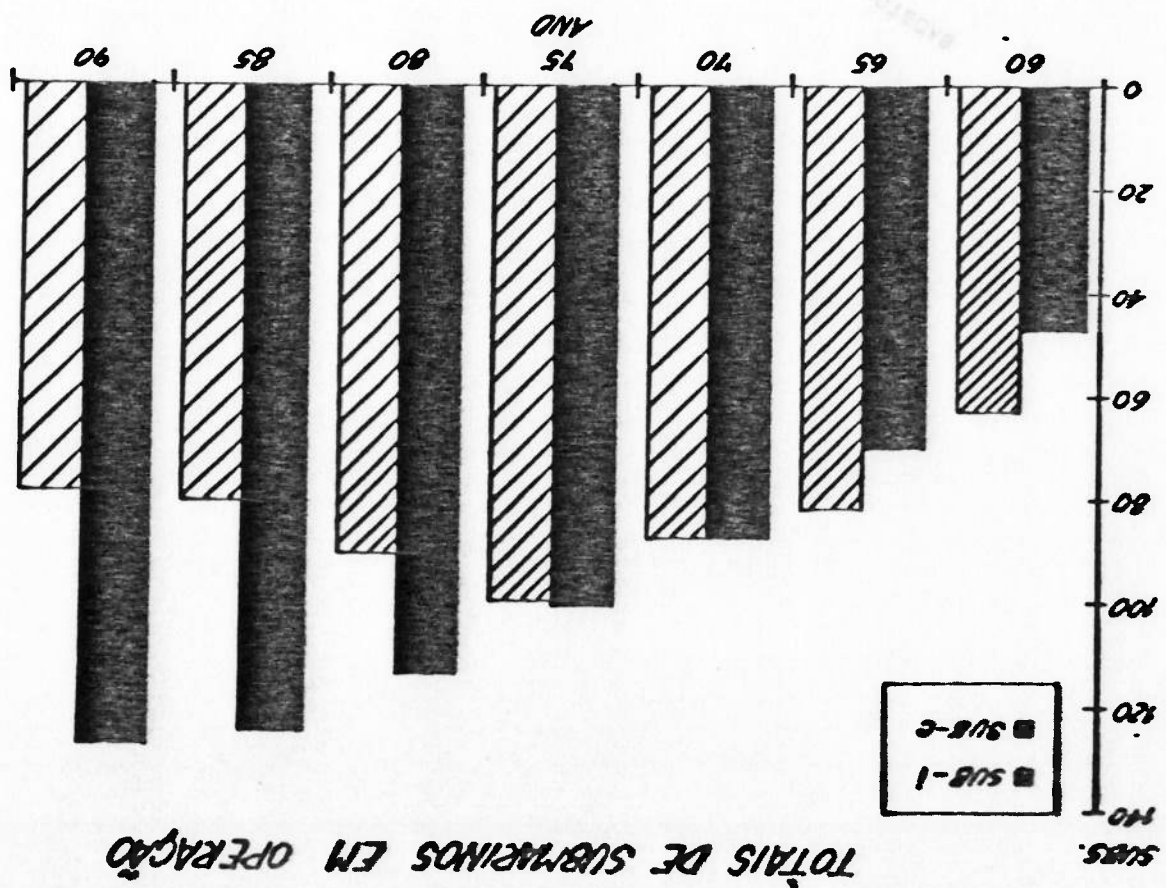


FIGURA : 2.6

FIGURA: 2.4



DISTRIBUIÇÃO DE IDADE DAS FORÇAS DE SUBMARINOS

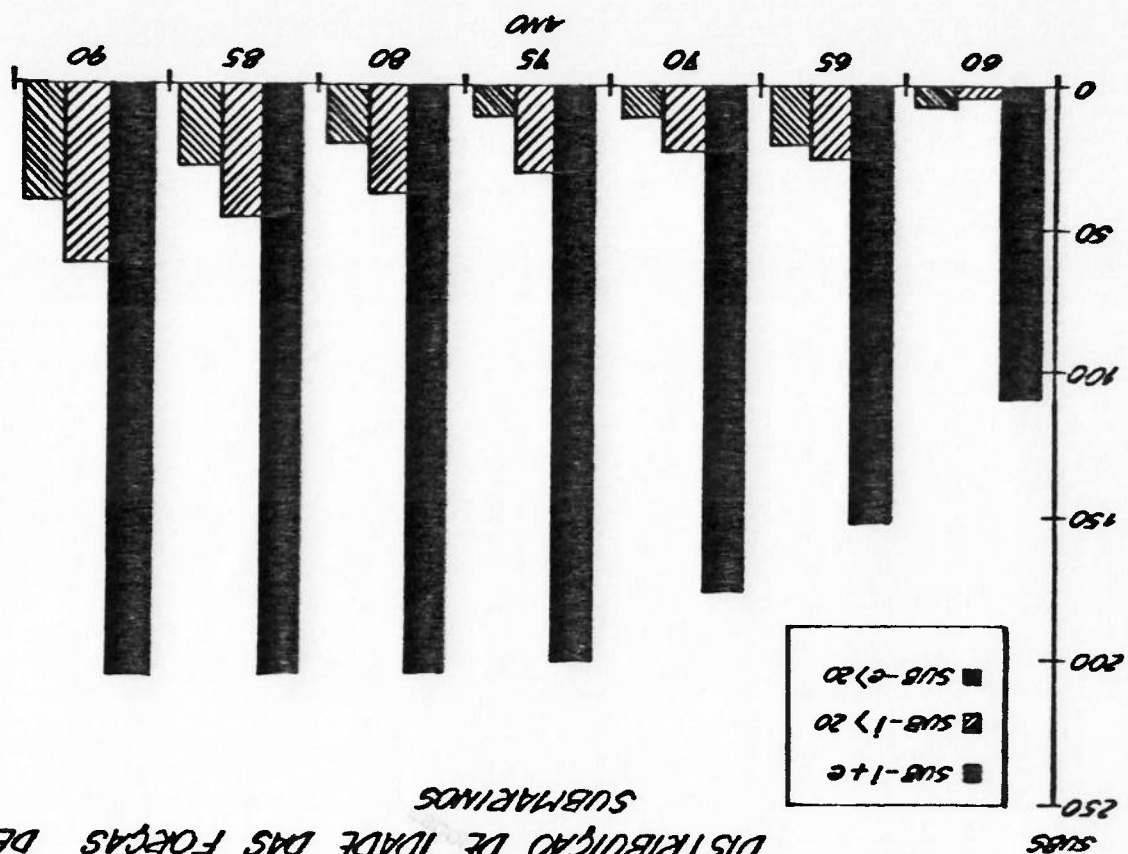


FIGURA: 2.5

# SUBMARINOS NUCLEARES

## UNIDADES OPERATIVAS EM 1991

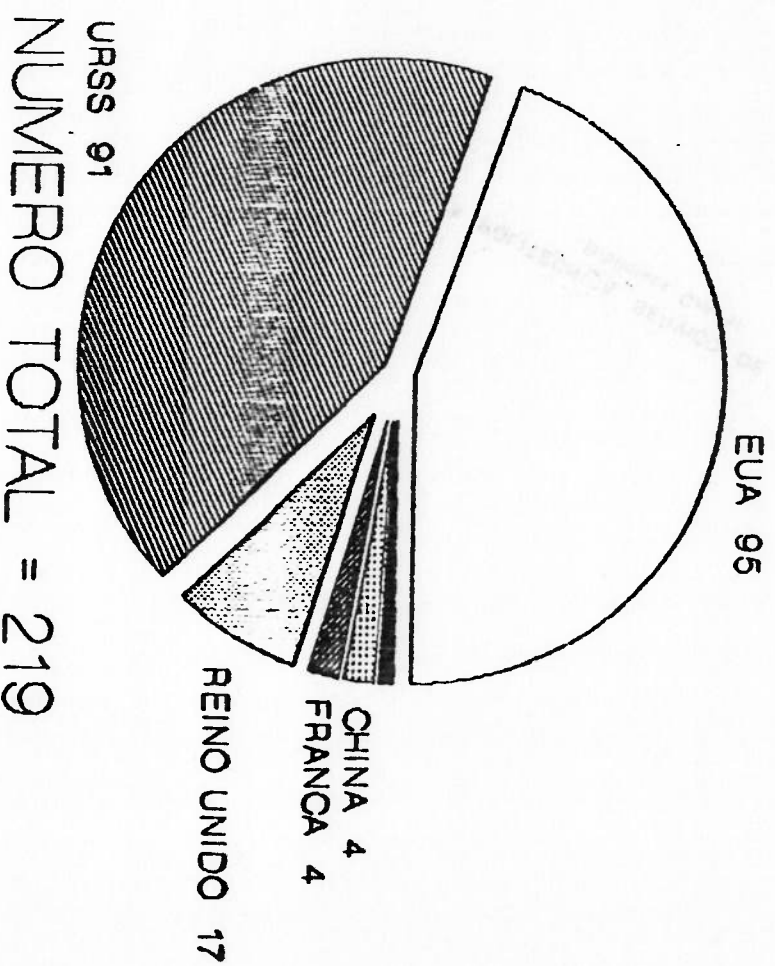
<u>P A I S</u>	<u>SSN/SSGN</u>	<u>SSBN</u>
ESTADOS UNIDOS	95	37
UNIAO SOVIETICA	97	63
GRA-BRETANHIA	17	4
FRANCA	4	6
CHINA	4	2
INDIA	2	-
TOTAL	219	112

SSGN : URSS (16) , INDIA (2)



# SUBMARINOS NUCLEARES

## SSN E SSGN OPERACIONAIS EM 1991



URSS - 16 SSGN / INDIA - 2 SSGN

FIGURA 2.7b

# SUBMARINOS NUCLEARES

## SSBN OPERACIONAIS EM 1991

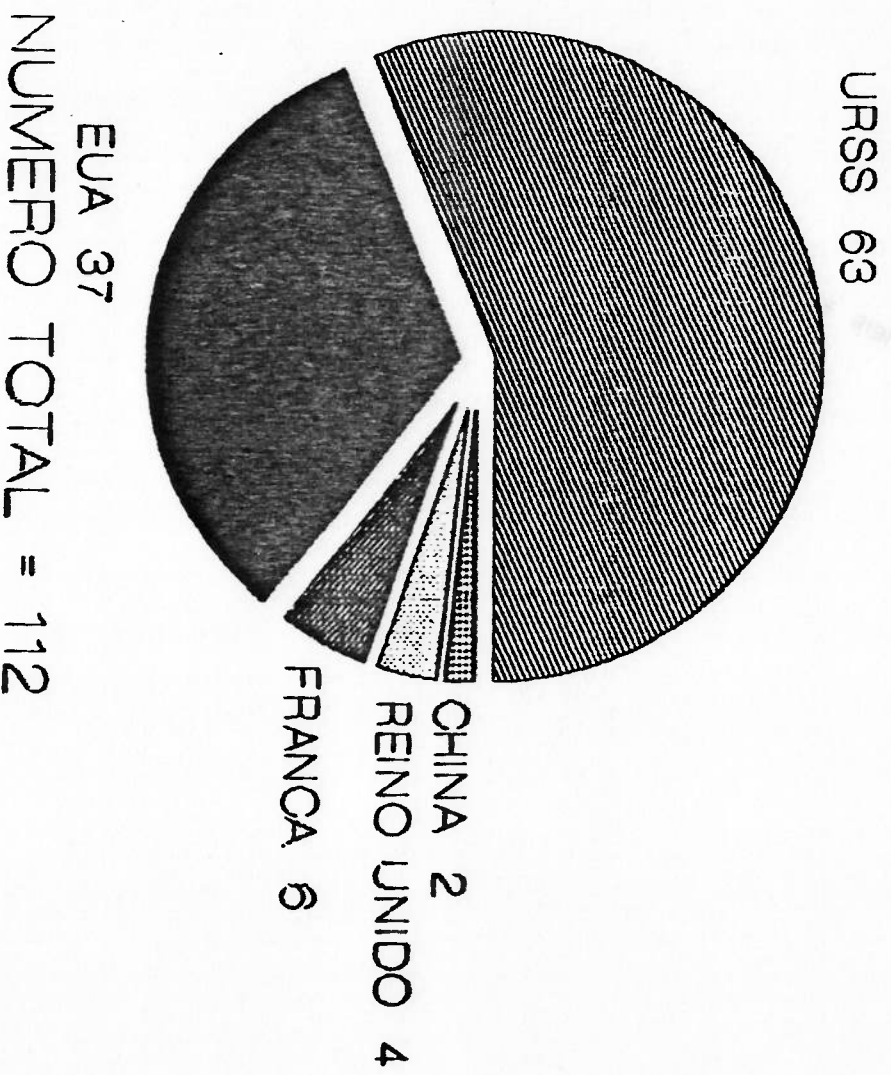


FIGURA 2.7c

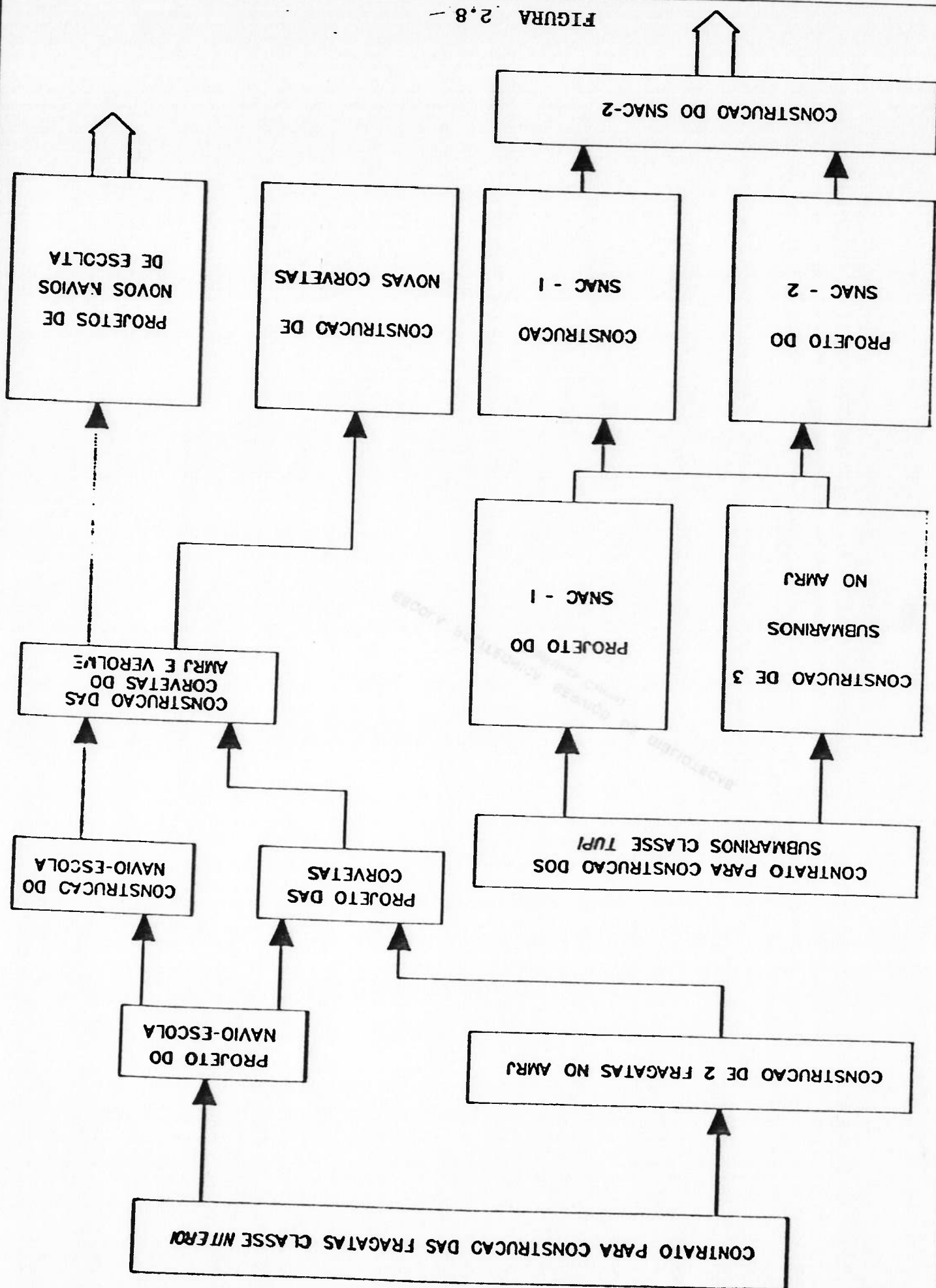
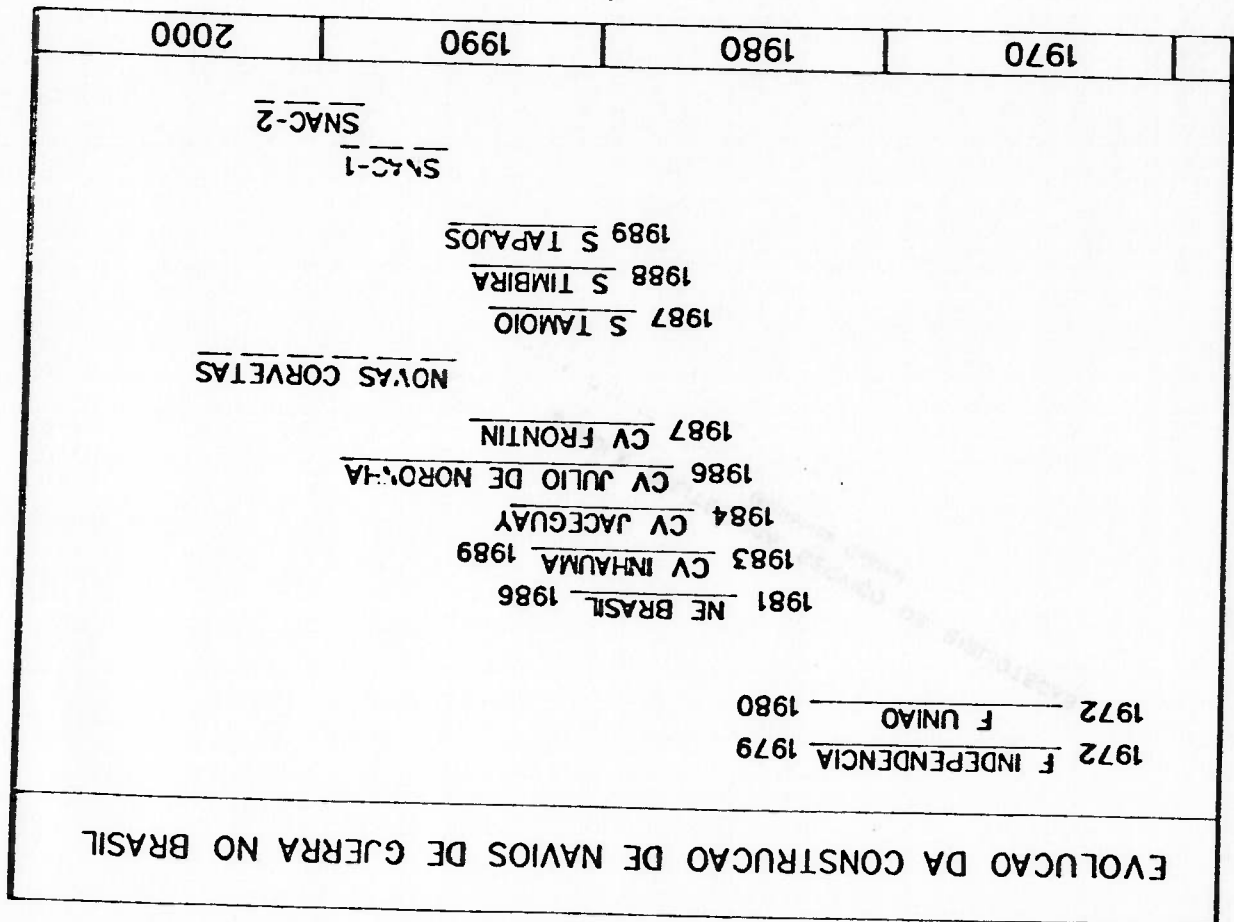


FIGURA 2.9



# O DESENVOLVIMENTO DO PODER NAVAL ATRAVES DO EXERCICIO DO REAPARELHAMENTO DA MARINHA

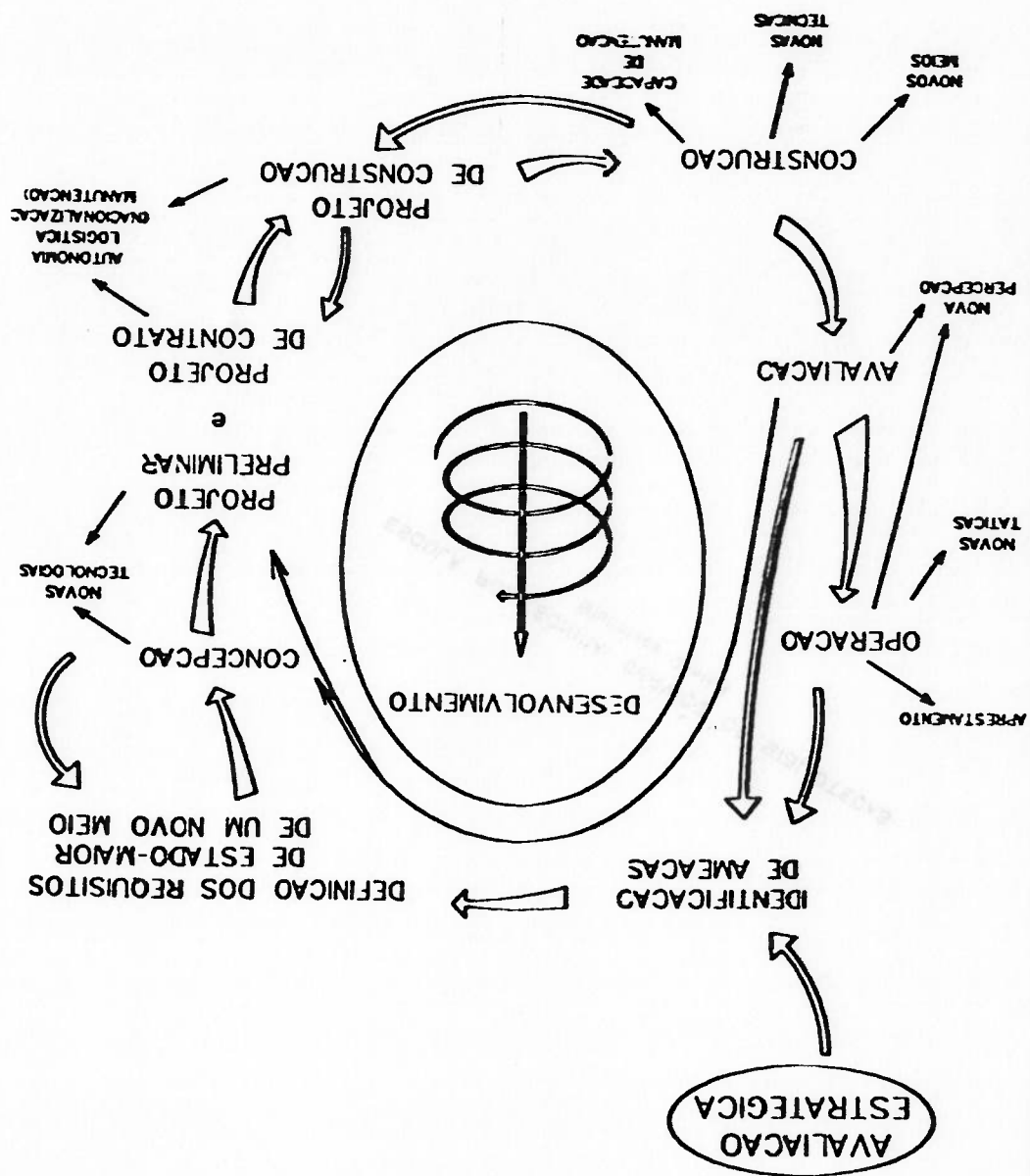


FIGURA 2.10



## CAPÍTULO 3

## MODERNAS TENDÊNCIAS

## 3.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Diferentemente de seus predecessores, os modernos navios de guerra são críticos em volume, ao invés de críticos em peso e um submarino, que por seu próprio conceito é inerentemente crítico em volume, mostra este efeito de maneira ainda mais acentuada, MCKEE [18], ARENIZEN E MANDEL [19]. Seu peso e seu volume (e consequentemente a área de seus convés) são muito mais intimamente relacionados do que um navio de superfície. Nestes, cerca de metade (ou mais) do volume está permanentemente acima da linha d'água, isto é, não se reflete em seu deslocamento. Em um submarino isto não ocorre, obviamente. Não existe uma vasta reserva de flutuabilidade contra a qual se possa adicionar novos pesos, nem há nenhuma margem de expansão de convés para instalação de novos equipamentos ou armas. Tudo deve ser instalado no seu interior e virtualmente tudo deve ser considerado quando o submarino é projetado, pois não existem margens de crescimento.

Este tipo de consideração também justifica como o submarino é penalizado em seu deslocamento. Em termos de volume, um submarino tem cerca de metade do espaço disponível em um navio de superfície de deslocamento similar, já que o navio de superfície terá pelo menos 100 % de reserva de flutuabilidade dentro de seu envelope estânque, mais o volume da superestrutura e a área do convés principal. Logo, um submarino de 6900 ton - o que é muito para um submarino - pode ser equivalente em espaço interno a uma fragata de 3000 ton, FRIEDMAN [20]. Este fato, por sua vez, explica porque os submarinos transportam relativamente poucas armas: não há submarinos que transportem mais de 30 torpedos e a maioria transporta muito menos, SHARPE [15].

O próximo elemento da equação é o peso. Os dois itens mais pesados são a estrutura do casco e a propulsão, SHEETS [21]. Além disto, a potência que o submarino necessita gerar para desenvolver determinada velocidade é uma função da superfície molhada do casco. O submarino mais eficiente, então, usa a mínima área de casco para envolver o volume interno requerido. Mínima área de casco significa também mínimo peso estrutural, logo, o maior peso recai sobre a propulsão - determinada pela velocidade ou, nos modernos submarinos, numa combinação de velocidade e nível de ruído irradiado.

Note-se que, devido ao fato de que o casco e as máquinas

5208 ton submerso e custa cerca de US\$ 440 milhões, OLIVA e GOSLING [26]. A última geração de SSN americana, a classe "Seawolf", 9100 ton, com comissionamento da primeira unidade previsto para 1995, é cotada em três a quatro vezes aquele valor, SHARPE [15].

Existem também problemas operativos com a tendência para os submarinos cada vez maiores e mais poderosos. Em águas rasas ou confinadas, onde uma boa parcela dos confrontos futuros tem possibilidades de ocorrer, sua capacidade não pode ser plenamente utilizada e eles podem se encontrar em sério risco, COMPTON-HALL [27].

Os modernos avanços na área de sonares de baixa frequência, na área de sensores infra-vermelho para medida das variações na temperatura do mar devidas a esteira térmica criada pelo submarino, na área de sensores para medida de anomalias no campo magnético da Terra provocadas pela massa de material magnético que compõe o submarino, e outros, menos comuns, tais como os sensores laser verde-azul, capazes de identificar com grande precisão objetos na superfície da Terra e mesmo objetos submersos até 100 metros, sensores capazes de detectar o campo eletromagnético associado ao submarino, a turbulência e o deslocamento de água e até a luminescência biológica (emissão de luz por microrganismos marinhos quando a água é perturbada devido ao movimento do navio), STEFANICK [28], KERVERN e LE GALL [29], que equipam, ou em breve virão a equipar navios de superfície, aeronaves, satélites e submarinos inimigos, transformam os grandes submarinos em alvos cada dia mais fáceis de serem detectados.

Por outro lado, como os submarinos são cada vez mais silenciosos, num embate sub x sub, as chances de detectar o inimigo por meios passivos a uma distância razoável são cada vez menores, ou seja, em diversas situações o "caçador" pode ser forçado a usar o sonar em modo ativo, revelando consequentemente sua posição. Nestas circunstâncias, onde os oponentes se encontram a poucas milhas de distância, o menor submarino tem muito melhores chances de ser o vencedor, ou de pelo menos escapar ileso, devido ao fato de ser um alvo menor e de possuir qualidades de manobra superiores. Esta vantagem em ser pequeno é extremamente aumentada se o cenário do confronto for em águas rasas (menos de 100 m). Em cada vez maior número de situações táticas se torna desvantajoso ser grande, COMPTON-HALL [27].

Entretanto existem outros fatores, que dificultam a redução do deslocamento dos modernos submarinos, a serem considerados quando são requeridas durações de missão muito longas. Grande autonomia implica em uma escolha de armas, com suficientes recargas, de modo a fazer frente às circunstâncias imprevisíveis. A tripulação precisa de conforto, ar puro, provisões e água potável. Uma atmosfera razoavelmente seca é essencial para os equipamentos eletrônicos. O submarino deve ser dotado de redundância nas instalações de máquinas e sistemas de emergência, bem como sobressalentes e ferramentas para reparo no

são os dois maiores componentes do peso total, qualquer tentativa de aumentar pronunciadamente a potência propulsiva num submarino de deslocamento fixo, consequentemente deverá reduzir o peso do casco, o que por sua vez, reduzirá a profundidade de operação, e menos que se utilize algum tipo de material especial.

Qualquer tentativa de combinar alta potência sem reduzir a profundidade de operação ou adotar um novo material terá como consequência um grande deslocamento, que por sua vez reduzirá o efeito do aumento da potência propulsiva. No sentido contrário, adotando-se uma instalação propulsora substancialmente mais compacta, deve ocorrer um efeito inverso, porque o deslocamento será reduzido e consequentemente a resistência a propulsão também o será, podendo-se alcançar altas velocidades e profundas cotas de operação.

Os sensores e o armamento apresentam alguns aspectos relevantes, SHARPE [22]. Os torpedos modernos tendem a ser de grandes dimensões exigindo, portanto sistemas complexos para sua manipulação. No passado, os torpedos eram lançados por um impulso de ar comprimido, mas este sistema não pode ser usado em grandes profundidades. As alternativas principais são o impulso por água sob pressão, que exige um sistema de bombeamento de grande volume ou permitir que o torpedo saia do tubo por seus próprios meios, o que requer um tubo de diâmetro significativamente maior que o do torpedo (de modo que a água possa fluir para dentro do tubo à medida que o torpedo avança para fora), KORN [23], HOUSTON [24].

A performance dos transdutores de sonar, tal como qualquer antena, é melhorada com o aumento de seu tamanho (medido em comprimentos de onda). Além disto, as condições do mar favorecem os sonares de baixas frequências (grandes comprimentos de onda, implicando em transdutores de grandes dimensões).

Os sistemas de armas e os centros de informações de combate também requerem uso intensivo de computadores e de seus periféricos de entrada, saída e armazenamento de dados. Este tipo de equipamento exige grandes áreas de convés e volume para seu arranjo, o que leva a um aumento do diâmetro do submarino, possibilitando a existência de maior área de convés num menor volume do casco, BOOTH e GILLET [25].

Considerando-se os diversos aspectos já ressaltados, pode-se perceber que a medida que os novos avanços tecnológicos na propulsão, técnicas de redução de ruídos e armamento foram se desenvolvendo, visando maiores velocidades, maiores profundidades, maior discriminação, maior poder de destruição e precisão das armas, os submarinos tenderam a tornar-se cada vez maiores e consequentemente mais caros.

Os grandes submarinos podem, em geral, ir mais longe e mais rápido que os menores e podem transportar mais armas e melhores sistemas para seu controle - mas eles custam muito mais. Um submarino inglês classe "Trafalgar", SSN catador-matador, desloca

caso de avarias. Estes requisitos conduzem, quase obrigatoriamente, a um submarino de grande deslocamento, grande diâmetro e elevados custos de obtenção, operação e manutenção.

O recente conflito no Atlântico Sul pela posse das ilhas Malvinas, entre a Argentina e a Grã-Bretanha, CAMINHA [30], apresentou alguns fatos muito ilustrativos dos aspectos técnicos até aqui levantados:

- o bloqueio naval, estabelecido pela Grã-Bretanha quase imediatamente após a invasão das ilhas pelas forças argentinas, só pôde ser efetivado pela disponibilidade de grandes SSN (no caso, três unidades da classe "Valiant"), que rapidamente se posicionaram e permaneceram indetetados por longo período de tempo, demonstrando a importância deste tipo de navio;

- o potencial da ameaça representada por dois submarinos argentinos classe "K12 209", de aproximadamente um quarto do deslocamento e do custo da classe "Valiant" inglesa, fizeram com que cerca de 50% da força-tarefa inglesa fosse composta por unidades anti-submarino, sendo, consequentemente, sua mobilidade extremamente restringida e o custo da operação extremamente elevado;

- mesmo com todas as precauções anti-submarino adotadas, o navio-aeródromo inglês "Hermes" só não teria sido atingido pelo submarino argentino "San Luis", devido a falhas no sistema de armas, possivelmente devidas a má operação e manutenção, demonstrando a efetividade dos pequenos submarinos, ainda que convencionais;

- a discutível decisão do comandante inglês do SSN "Conqueror" de afundar o cruzador "Belgrano" fora da região de conflito estabelecida pela própria Grã-Bretanha, poderia ter sido devida ao fato de que aquele navio possivelmente penetraria na zona de bloqueio naval pelo banco Burwood, região ao sul das ilhas, com profundidades inferiores a 100 m, onde o comandante inglês considerava impossível atacá-lo, ou pelo menos, que sua probabilidade de êxito seriam extremamente limitadas, demonstrando assim as severas restrições impostas aos grandes SSN pelas águas rasas.

Estes exemplos práticos que a história recente nos fornece levam à conclusão que os dois conceitos de submarino (grande e pequeno), não são mutuamente excluintes e sim complementares.

### 3 . 2 - TENDÊNCIAS GERAIS

- As tendências que se delineiam no presente e que determinarão a configuração dos submarinos no próximo século são condicionadas primordialmente pelas capacidades cada vez mais aperfeiçoadas da Guerra Anti-Submarino ("Anti-Submarine Warfare - ASW"), tais como:
- sensores acústicos com cada vez maior alcance útil, poder de discriminação e precisão na determinação da distância, marcação, rumo e velocidade dos alvos submarinos;
  - sensores não-acústicos capazes de detectar as mais sutis assinaturas dos alvos submarinos, até mesmo aquelas que há algum tempo atrás seriam imagináveis;
  - torpedos leves e pesados com cada vez maior poder de destruição, cada vez mais sofisticados sistemas de guiagem e de "homing" (busca ativa), maiores velocidades e maiores profundidades de operação;
  - sistemas de controle de armas totalmente integrados, capazes de processar um imenso volume de informações provenientes de uma grande variedade de sensores e transformá-las, em tempo real, em comandos para as armas;
  - sistemas de sensoramento remoto, baseados em satélites e aeronaves a altas altitudes, e fixos nos leitos oceânicos.
- Além de surgirem como respostas diretas às ameaças permanentemente renovadas dos meios anti-submarinos, existem outros fatores indiretos que também condicionam estas modernas tendências, tais como:
- introdução de novas tecnologias desenvolvidas em outros campos, o que ocorre com um certo atraso, dado que o meio naval é de certa forma conservador, como:
  - . integração de sistemas em larga escala ("very large system integration - VLSI");
  - . novos avanços em eletrônica de potência;
  - . novos materiais (ferrosos, não-ferrosos, compostos);
  - . novas técnicas de transmissão e processamento de sinais;
  - . novas técnicas de geração de empuxo, alternativas aos hélices tradicionais.
- restrições cada vez maiores ao orçamento militar dos diversos países;
  - crescentes dificuldades de recrutamento de pessoal qualificado para tripular os submarinos;



- crescente preocupação com a disponibilidade de meios de escape seguros e confiáveis para a tripulação em caso de acidente grave;

- crescente preocupação com a melhoria dos padrões de habitabilidade e conforto das tripulações;

- estabelecimento de padrões mais rígidos para a qualidade do ar ambiental interno ao submarino;

- estabelecimento de padrões mais rígidos para a descarga de rejeitos para o mar.

Abordaremos neste item, na forma de sub-itens, as tendências gerais associadas aos seguintes aspectos:

- comando e controle de armas (incluindo sensores);

- armamento;

- automação/tripulação/acomodação/ergonomia;

- medidas de redução das assinaturas;

- profundidade de operação / estruturas / materiais;

- segurança/capacidade de sobrevivência/salvamento;

- instalação propulsora e máquinas auxiliares;

- condições ambientais;

- resistência aos choques mecânicos.

Os itens posteriores deste capítulo abordarão em maior profundidade os aspectos de propulsão e redução de ruído irradiado, pontos de maior interesse para o presente trabalho.

### 3 . 2 . 1 - Comando e controle de armas

O campo tecnológico dos meios de detecção submarina e de superfície apresenta a tendência sempre crescente de aumento no seu número e melhoria no seu desempenho. Os alvos devem ser detectados o mais cedo possível, isto é, há um desejo geral de uma "visão" desobstruída o mais longe possível.

Para este propósito, atualmente são oferecidos sonares de baixa frequência, em adição aos disponíveis para distâncias pequenas e médias. Estes requerem que um grande volume de informação seja processado em tempo real. Da mesma forma, requerem que esta informação seja simultaneamente apresentada num modo

visual, possibilitando sua avaliação e posterior tomada de decisão tática. Os meios de armazenagem de dados devem, portanto, serem capazes de guardar esta informação por determinado período de tempo. Além disto, deve haver suficiente memória para armazenar um razoável volume de dados, previamente introduzidos para fins de classificação de contatos, dados estes que também devem ser acessados em tempo real.

Apesar da crescente miniaturização, estes requisitos aumentam o volume necessário para os equipamentos eletrônicos, que se reflete no crescimento do número de consoles de operação e painéis de apresentação de informações associados (vídeos, painéis mímicos, painéis de chaveamento com indicações luminosas, teclados, "joysticks", e outras interfaces homem-máquina), que por sua própria natureza ocupam muito espaço.

No caso dos sonares, o número de consoles tem crescido de 4, nos submarinos modernos em operação, para 8 nos projetos mais avançados em desenvolvimento. O engajamento simultâneo de vários alvos com diferentes armas também resulta num aumento do número de consoles e dos correspondentes operadores.

O desenvolvimento de mastros optônicos também conduz a consideráveis melhorias. Além de sua própria função ótica, eles podem ser equipados com diversos outros sensores, tais como gerador de imagens térmicas, TV de baixa intensidade de luz ("Low-level Light TV - LLTV"), antena de alarme radar antecipado, antena de navegação satélite ("Global Positioning System - GPS"), etc. Estes equipamentos devem estar entrando em serviço num futuro próximo.

Também no campo da navegação e das comunicações externas, novas tecnologias e procedimentos estão sendo introduzidos. A integração dos sistemas de navegação inercial ("Submarine Inertial Navigation Systems - SINS") ao GPS, a transmissão de dados táticos via "data links" baseados em satélites e o emprego das mais baixas frequências do espectro de transmissão rádio-acústica (VLF, ELF, ULF - Very, Extra and Ultra Low Frequencies) são exemplos destes avanços. O segundo permite que o submarino possa lançar mísseis táticos além de sua distância de detecção própria. O último requer antenas de comprimentos muito longos, que são flutuantes ou rebocáveis.

Para o futuro pode-se esperar aumentos da ordem de 50 a 100% no volume e área requeridos para o setor de Comando e Controle de Armas, incluindo seus sensores, dependendo do tamanho do submarino. Os requisitos referentes ao sistema elétrico de serviço e aos sistemas de resfriamento crescerão correspondentemente.

As missões dos submarinos modernos requerem um sistema de armas altamente flexível. O armamento usual dos submarinos consiste em torpedos, mísseis anti-navio, minas e sistemas de contra-medidas para torpedos ("torpedo decoys").

Estas armas são lançadas dos tubos de torpedos. Os torpedos tendem a ser pesados e, portanto, difíceis de manusear pelos métodos tradicionais. Os torpedos modernos são normalmente guiados a fio na primeira fase de sua trajetória, sendo o fio desenrolado de um "carretil" fixo na culatra do tubo de torpedos, o qual não pode ser aberto (para recarga) até que o fio tenha sido todo arastado ou tenha partido. Decorre então que qualquer tentativa de aumentar a cadência de fogo requer o máximo número possível de tubos de torpedos que, idealmente, devem ser montados na proa do submarino.

Os sonares de baixa frequência (grandes comprimentos de onda), anteriormente citados, cujo alcance é muito favorecido pelas condições do mar, tem torpedos de grandes dimensões, ocupando a maior parte do volume disponível na proa. Reduzem, e em alguns casos até eliminam, as possibilidades de arranjo dos tubos de torpedos. Este fato explica o posicionamento próximo a meio-navio dos tubos de torpedos dos submarinos americanos a partir da década de 60.

Sem dúvida é possível espalhar-se transdutores ao longo do casco do submarino, ou mesmo rebocá-los, mas estes "arrays" são exclusivamente passivos. Apesar dos submarinistas preferencialmente não usarem o sonar em modo ativo, eles geralmente desejam ter a capacidade de fazê-lo. Além disso, um transdutor esférico na proa permite o uso de transmissão em feixes estreitos, que podem ser direcionados para cima ou para baixo, de forma a levar-se vantagem de efeitos tais como a reflexão no fundo e da zona de convergência - nenhum "array" linear permitiria este tipo de seletividade.

Os sistemas de ejeção de armas modernos, tais como o impulso de água, atualmente disponíveis, são capazes de ejetar qualquer tipo de torpedos ou míssil anti-navio sem contato mecânico direto, independentemente da profundidade de lançamento e com o submarino desenvolvendo altas velocidades. Estes sistemas ainda têm a vantagem de ser seu próprio procedimento de ejeção mais silencioso que a fase inicial de um lançamento por "swim-out" (torpedos saindo do tubo por seus próprios meios, com o submarino a baixa velocidade), atualmente empregado na maioria dos submarinos e muito mais silencioso que o antigo sistema de impulso de ar comprimido (limitado em profundidade) - este sistema, e, portanto, volumoso, reduzindo ainda mais o máximo número de tubos.

Considerando-se estes fatores que tendem a reduzir o número de tubos associados aos sempre crescentes requisitos de número total de torpedos transportados e decrescentes requisitos de tempos de recarga, os sistemas de manuseio tendem a tornar-se cada

### 3 . 2 . 3 - Automação / Tripulação / Ergonomia / Conforto

A automação a bordo de submarinos tem como função liberar a tripulação de tarefas rotineiras, apresentar informações importantes com grande rapidez e elaboradas de forma concentrada, com o propósito de facilitar os processos de tomada de decisão e, em alguns casos muito especiais, executar procedimentos de emergência com mínimo tempo de reação.

Um alto grau de automação também objetiva reduzir, ou pelo menos manter constante, o número de tripulantes, apesar do crescente número de sensores no setor de comando e controle de armas. A automação dos "sistemas da plataforma" (propulsão e auxiliares) e dos "sistemas de missão" (comando e controle de armas) têm diversos efeitos sobre o número de tripulantes. Em geral, busca-se uma redução da tripulação. As razões abaixo apresentadas são favoráveis a esta redução:

- cada tripulante requer uma área média de 2,5m<sup>2</sup>, logo o número de tripulantes é um aspecto essencial na definição das dimensões do submarino;

- também as marinhas suportam custos de pessoal, sendo comumente mais econômico empregar um pequeno número de tripulantes altamente qualificados ao longo de extensos períodos do que um grande número de tripulantes de menor qualificação, num sistema de alta rotatividade;

- os sistemas de combate modernos possuem facilidades de simulação próprias que podem ser usadas por pessoal em treinamento a bordo, em complemento às facilidades em terra; a acomodação deste pessoal em treinamento deve ter um padrão inferior ao da tripulação.

Outras circunstâncias, entretanto, devem ser levadas em conta durante a definição do número de tripulantes:

- existe um limite superior para o grau de automação dos "sistemas da plataforma" que será alcançado num futuro não muito distante (em verdade pode-se considerar que já foi alcançado nos projetos em desenvolvimento mais recentes);

- a tripulação necessaria para operar os "sistemas da plataforma" é atualmente determinada pelos modos de operação em emergência e pelo controle de avarias; levando-se em consideração estas condições eventuais, existe um número de tripulantes mínimo; com vistas a este fato, algumas marinhas estão tendendo a distinguir tripulação de paz de tripulação de guerra, a última com um maior número de tripulantes, acomodados com menor conforto.

O conceito de automação requer o estabelecimento de um centro integrado de comando, onde, adicionalmente aos equipamentos de comando e sensores, é arranjado um console de controle do submarino ("Submarine Control Console - SCC") e, em alguns casos, também um console de controle de máquinas ("Engineering Control Console - ECC"). Este último pode ser arranjado em compartimento separado. Estes consoles são a estação de trabalho do grupo de tripulantes que conduz todo o navio e suas operações.

A exceção do controle do navio e dos sistemas associados à segurança das instalações propulsoras nucleares, todos os outros sistemas têm dois níveis de operação. O primeiro nível assume um modo automático ou de controle remoto, enquanto o segundo nível assume um modo de operação substituto ou de emergência, dependendo da necessidade. Este segundo modo de operação é, em geral, local e admite-se um certo grau de degradação dos sistemas controlados.

Aqueles sistemas citados como exceção admitem ainda um modo de operação intermediário entre o automático e o manual local, que seria o manual assistido por computador ou semi-automático.

Dependendo das dimensões do submarino e da tecnologia de seu sistema de propulsão, o número de tripulantes deverá, no futuro, estar entre 20 e 35 homens, para submarinos convencionais, híbridos e mono-submarinos e entre 50-70 homens para submarinos nucleares de ataque. Os alojamentos são sub-divididos em camarotes para no máximo 8 tripulantes (4 para oficiais, suboficiais e sargentos) de modo a garantir acomodações mais confortáveis, sendo atualmente mandatório não utilizar-se de "camas-quentes" (dois tripulantes usando a mesma cama em horários intercaldados). Em geral, para as áreas de descanso, cozinha e banheiros adota-se mais espaço por pessoa do que era usual há 10 anos atrás.

Existe também a necessidade de prover-se equipamentos para o lazer da tripulação. Como, entretanto, já existe uma tendência para maiores submarinos, com maiores espaços por pessoa, este requisito é satisfeito de forma marginal. Se compararmos os projetos mais recentes com os submarinos convencionais das décadas de 70-80, as acomodações tiveram melhorias da ordem de 50% e para os projetos futuros prevê-se que serão atingidas melhorias da ordem de 100%. Estas melhorias já foram introduzidas nos submarinos nucleares desde a década de 60.

### 3 . 2 . 4 - Redução das Assinaturas do Submarino

Os mais relevantes aspectos dentro das vantagens táticas do submarino são os associados à discreção e "invisibilidade". O submarino é o único meio da guerra naval capaz de operar tri-dimensionalmente no meio aquático, evadindo-se, desta forma, das inúmeras possibilidades de ser detectado.

A invisibilidade e discreção são, entre outros aspectos,



definidas pelas assinaturas do submarino. O termo "assinatura" compreende todas as características físicas de um submarino que permitem ao seu adversário detectá-lo. Atualmente existem meios de detecção para as seguintes assinaturas:

- nível de ruído irradiado (NRI);
- intensidade de reflexão de ondas acústicas (alvo sonar);
- campo de pressões hidrodinâmicas;
- campo magnético;
- seção reta de reflexão radar;
- visibilidade infra-vermelha;
- visibilidade ótica.

Os meios de guerra anti-submarina fazem uso destas assinaturas por meio de detecção ativa e passiva. Os sensores mais cruciais para este propósito são os sonares ativos e passivos, radar, sensores magnéticos e sensores óticos.

Estes são aplicados separadamente, ou em conjunto, por várias unidades, como:

- navios de superfície;
- submarinos;
- aviões/helicópteros;
- sistemas estacionários;
- satélites.

Além destes métodos, existem também novos meios de detecção propostos ou em desenvolvimento, tais como:

- magnetômetros SQUID (Supercondutiva Quantum Interference Device);
- detecção de ondas internas geradas no seio da massa líquida devido ao movimento do submarino, por radares de abertura sintética;
- reflexões de laser azul-verde;
- medidas de séries de contato eletroquímico.

A responsabilidade do projetista de submarinos é, primeiramente, encontrar soluções técnicas para reduzir continuamente as assinaturas do submarino.

#### - ruído irradiado

A maior ênfase é posta na detecção da assinatura acústica, a qual possui considerável impacto no projeto do submarino. O ruído irradiado na água por um submarino em trânsito submerso tem oferecido, até o presente, a maior probabilidade de detecção, principalmente na faixa de baixas frequências, inferiores a 200 Hz, onde os navios podem até mesmo serem classificados aplicando-se vários métodos de processamento de sinais. Os meios de detecção na faixa das baixas frequências (sonares "flank array" e "towed array") têm sido, portanto, consideravelmente aperfeiçoados.

A probabilidade de detecção desta assinatura pode ser sensivelmente reduzida evitando-se equipamentos cuja operação gere vibrações em tons discretos e por meio de calçamento resiliente duplo de baixa frequência para todos os equipamentos ruidosos.

O aperfeiçoamento do calçamento das máquinas rotativas também requer uma redução no ruído transmitido ao ar, bem como a estrutura por caminhos secundários (outros que não os jateantes). Os dispositivos geradores de ruído devem ser encapsulados por material absorvedor de som e as ligações (tubulações, cabeaceação) devem ser o mais flexíveis possíveis.

O ruído de escoamento pode ser reduzido por meio de um projeto hidrodinâmico de casco e apêndices adequados, pelo fechamento de todas as aberturas no casco e por baixas velocidades do propulsor. Alguns sistemas alternativos ao hélice convencional têm sido propostos visando a redução de ruído e serão tratados em outro item do presente trabalho.

A radiação de ruído proveniente de estruturas leves excitadas por turbulências de camada limite podem ser eliminadas pelo uso de materiais de revestimento com características de amortecimento. Estes materiais também levam à redução do ruído irradiado pelo casco.

#### - intensidade de alvo

De crescente importância é a detecção acústica ativa, inclusive na faixa de baixas frequências, empregada pelos sistemas de busca ("homing") de torpedos e, em menor escala, por navios de superfície e submarinos. A intensidade de alvo de um submarino passível de aquisição pelos sensores ativos do inimigo pode ser reduzida pelas suas formas e por diversas possibilidades de revestimentos.

Uma forma em que a maioria das superfícies são tridimensionais tem uma influência favorável sobre a intensidade de alvo. Esta forma, entretanto, normalmente não é compatível com os requisitos hidrodinâmicos, exigindo uma cuidadosa consideração das vantagens e desvantagens durante o "projeto acústico" do submarino.

O revestimento do casco com material anecótico leva a uma redução adicional da reflexão dos feixes sonoros emitidos por sonares ativos de navios de superfície, outros submarinos e torpedos.

#### - emissão infra-vermelha

A assinatura térmica é um problema de especial importância para submarinos nucleares, cuja instalação propulsora em ciclo Rankine rejeita grandes quantidades de calor para o mar, pois o seu rendimento é relativamente baixo (da ordem de 15-25%).

e para os submarinos convencionais esnorpueando, condição em que descarregam próximo à superfície grandes quantidades de gases de combustão a temperaturas elevadas.

Mantendo-se pequenas diferenças de temperatura nos trocadores de calor, a energia térmica é dissipada em grandes vazões de água de resfriamento, com a desvantagem de aumento na área de troca de calor destes equipamentos e na potência de bombeamento requerida (para reduzir-se esta última desvantagem, pode-se buscar o aproveitamento da pressão dinâmica devida ao deslocamento do navio através do cuidadoso posicionamento e projeto hidrodinâmico das tomadas de água de resfriamento).

A descarga da água aquecida deve ser conduzida o mais próximo possível do disco do hélice, de modo que seu turbilhonamento auxilie nesta dissipação.

É possível evitar a emissão de calor para o meio ambiente durante períodos limitados utilizando-se a água contida nos tanques de lastro como acumulador térmico.

Os sistemas de descarga de gases de combustão são dotados de resfriamento antes de sua emissão para o mar, que deve ser feita à maior profundidade possível (normalmente no topo da vela e não diretamente para o ar, através de mastro retrátil de descarga, como nos projetos mais antigos). Seria também vantajoso que esta descarga pudesse ser feita próxima ao disco do hélice.

Os dispositivos icáveis são revestidos para reduzir sua emissão infra-vermelha.

#### - visibilidade radar e ótica

Tais assinaturas são críticas para os submarinos quando operam próximo à superfície, o que lhes confere grande importância no projeto de submarinos convencionais.

É possível reduzir-se a assinatura radar e, em menor escala a ótica, de um submarino navegando na cota periscópica, por meio de formas especiais dos dispositivos icáveis, seu arranjo conjunto (minimização da geração de ondas e esteira) e por revestimentos especiais.

#### - assinatura magnética

Esta assinatura deve ser levada em conta por dois lados, ou seja, devido à ameaça de minas e devido à detecção magnética por aviões/helicópteros.

Os meios para sua redução são a construção amagnética (acos austeníticos), projeto de equipamentos e cabeaço com baixo campo de dispersão magnética e medidas de compensação magnética, como os sistemas ativos de desmagnetização ("degussing") e tratamentos passivos como "depurming" e "whipping".

A construção do casco e equipamentos em material ferroso não-magnético (aços austeníticos) é extremamente cara, e somente se justifica se o submarino for projetado para operar em águas rasas e sob forte ameaça aérea.

A adoção de materiais não-ferrosos (titânio) ou compostos visando a redução de peso estrutural e/ou maiores profundidades de operação é extremamente favorável sob este aspecto.

As possibilidades técnicas de redução das assinaturas podem ir muito longe, mas devem ser limitadas pelos aspectos de custos. As responsabilidades dos projetistas não está confinada aos aspectos técnicos. Justamente por haver uma forte interface entre a tática e a técnica, a redução das assinaturas deve ser balanceada pelas restrições financeiras.

### 3 . 2 . 5 - Profundidade de Operação/Estruturas/Materiais

Atualmente existe uma tendência em buscar-se maiores profundidades de operação, o que se justifica principalmente com base no aumento da proteção do submarino:

- as possibilidades de detecção dos sensores do próprio submarino são melhores devido a um melhor uso dos canais acústicos de baixa frequência;
- a possibilidade de uso de um maior número de camadas de água acusticamente diferentes protegem o submarino, diminuindo as possibilidades de sua detecção;
- maior espaço de manobra, levando a uma ampliação das capacidades operacionais;
- imunidade a torpedos e cargas de profundidade, que, em geral, não podem ser empregados em grandes profundidades;
- melhor proteção contra detetores de anomalias magnéticas (MAD), dado que a sensibilidade destes equipamentos é inversamente proporcional ao cubo da profundidade;
- maior resistência a choque do casco resistente projetado para grandes profundidades, quando operando a cotas inferiores a máxima.

Estas grandes profundidades requeridas podem ser obtidas usando-se os aços relativamente usuais, tais como o HY-80. Entretanto, dado um mesmo deslocamento do casco resistente, deve ser considerado que a proporção do peso estrutural cresce acentuadamente com relação aos outros pesos, tais como a propulsão.

Deve-se, entretanto, notar que, por outro lado, outros critérios e tendências associados aos sistemas de combate,

tripulação e mesmo a aplicação extensiva de técnicas de isolamento de ruído levam a aumentos no volume de deslocamento do navio, o qual deve ser balanceado por pesos adicionais. Estes pesos adicionais podem ser compostos por aço estrutural, o que conduz a aumentos na profundidade de operação. Este efeito deve ser considerado sempre que se pensar em reduzir peso estrutural através de novos materiais.

Para as grandes profundidades de mergulho, o fator de segurança entre a cota de operação e a de colapso pode ser reduzido em comparação com os fatores usualmente adotados (1.5-2.0) nos projetos para menores cotas, sem diminuição da segurança do submarino. Este fato justifica-se porque a segurança do navio está, em realidade, muito mais ligada ao valor absoluto da diferença entre a cota de colapso e a cota de operação (lâmina d'água de segurança) do que ao seu valor relativo. Cálculos estruturais mais detalhados e tolerâncias de fabricação mais rígidas também contribuem para a manutenção do nível de segurança do submarino.

O valor absoluto da lâmina d'água de segurança está associado não só aos critérios de cálculo estrutural, como também às características dos sistemas de controle de profundidade e de lastro em emergência, ao compromisso e deslocamento (características de manobrabilidade) do navio e às suas velocidades de operação. Devido a estes fatores, a margem de segurança deve diminuir em porcentagem, porém apresentar um ligeiro aumento em termos absolutos.

Paralelamente, prossegue-se na busca de materiais com resistência superior aos usuais aços temperados e revenidos do tipo HY-80. Os projetos de submarinos requerem que o peso do casco resistente não ultrapasse 25-30% do deslocamento do navio. Desta forma, para maiores profundidades são requeridos materiais com maior relação resistência/densidade. Destes novos materiais podemos citar:

#### - materiais ferrosos (aços)

O aumento da profundidade de operação, mantendo-se constante o peso estrutural com relação ao HY-80 (550MPa), pode ser obtido pela aplicação do HY-100 (690 MPa) ou HY-130 (890MPa) e outros, na mesma linha, de ainda maior resistência. O sucesso desta aplicação depende fortemente do desenvolvimento de técnicas adequadas de união de juntas, desde que a maioria dos problemas de fadiga e "toughness" associados aos materiais de maior resistência são limitados às soldas e às zonas termicamente afetadas (ZTA). Os métodos automáticos de soldagem MIG têm vantagens no controle do conteúdo de liga do material soldado e do insumo de calor, melhorando os cordões de solda e as propriedades da ZTA.

Pensando-se no futuro, os processos de corte e solda a laser e feixe de elétrons ("electron beam") criam perspectivas de resultados de alta qualidade com mínima ZTA e reduzidas



quantidades de consumíveis. Ambos os métodos requerem alinhamentos iniciais precisos, o que é difícil de ser atingido com seções de casco resistente de submarinos.

A soldagem de 50 mm de profundidade por feixes de elétrons é viável de ser feita hoje no campo e as máquinas são relativamente móveis. O processo a laser é, entretanto, limitado atualmente a 15 mm e pelo tamanho das máquinas. Serão ainda necessários desenvolvimentos futuros para que possa ser aplicado em estaleiros. O processo a laser abre a possibilidade de soldas unitárias de penetração total, o que permitiria a construção de estruturas celulares em aço, sem necessidade de acesso ao interior das células. Poder-se-ia então produzir cascos resistentes tipo "sanduíche" - estrutura altamente eficiente - em aço ou outro material soldável.

As ligas de aço tipo "Maraging" abrem a possibilidade de resistências da ordem de 1200 MPa ou mais. Entretanto, como sua resistência é obtida através de tratamento térmico final, elas são extremamente difíceis de soldar. Existem exemplos de emprego destes materiais em pequenos submersíveis, porém métodos alternativos de fabricação foram empregados, nos quais a estrutura acabada foi tratada termicamente em módulos e finalmente montada através de juntas aparafusadas. O pleno potencial destes materiais é somente aproveitado em veículos de imersão profunda, onde a resistência ao escoamento domina sobre os efeitos de fadiga. Estes materiais também apresentam problemas de corrosão sob tensão, o que requer medidas de proteção para seu uso em ambiente marinho.

Os aços de baixa liga e alta resistência ("High Strength Low Alloy - HSLA") abrem a perspectiva de resistências da ordem do HY-80, porém a custo reduzido. Existe também o potencial para a produção de HSLA a níveis de resistência do HY-100 e HY-130, porém o aumento dos componentes de liga tornam seus custos equivalentes. A vantagem do HSLA-80 está na sua reduzida suscetibilidade ao surgimento de trincas pós-soldagem ("cold cracking"), evitando a necessidade de pré-aquecimento, o que reduz significativamente os custos de fabricação. As juntas soldadas de espessuras superiores a 25 mm sofrem, entretanto, de problemas de "toughness", o que limita sua aplicação a estrutura do casco não resistente. A elevada ocorrência de trincas no metal soldado devido ao hidrogênio para o HSLA-100 e 130 levam a necessidade de pré-aquecimento, o que nega, desta forma, a maioria dos benefícios destes materiais.

As ligas austeníticas não-magnéticas são também disponíveis, se bem que a níveis de resistência inferiores aos ferríticos temperados e revenidos. Apesar destes materiais serem viáveis para a estrutura do casco resistente de submarinos, tendo sido avaliados por diversos países, principalmente a Alemanha, sua combinação de alta densidade, baixa resistência e elevado custo tornam os materiais não-ferrosos mais atrativos para estruturas não-magnéticas. O recente desenvolvimento dos aços

austeníticos com alto teor de nitrogênio ("High Nitrogen Steel - HNS") é extremamente promissor, dado que possuem níveis de resistência mais elevados e custos mais moderados.

#### - materiais não-ferrosos

O alumínio tem a vantagem de baixa densidade e uma ampla gama de ligas de alta resistência, com relações resistência/peso similares ao HY-130. As ligas de alumínio resistentes à corrosão são, entretanto, limitadas ao grupo Al/Mg, que têm resistência típica da ordem de 150M Pa, o que conduz a relações resistência/peso da ordem de HY-80. Os cascos resistentes neste material são espessos e, portanto, difíceis de soldar. A experiência da indústria aeronáutica mostra que a sua resistência à fadiga é duvidosa. Os desenvolvimentos recentes de ligas de alumínio/lítio de alta resistência é uma perspectiva, porém, no presente, limitada a chapas relativamente finas. As técnicas de tratamento térmico podem ser estendidas a seções mais espessas, mas o significativo aumento de custos sobre o aço limita a aplicação destas ligas a submarinos.

As ligas de titânio têm muitos atributos para emprego como material estrutural do casco resistente. Ligas soldáveis de alta resistência são disponíveis, com boas propriedades de resistência à fadiga e a corrosão. Mantida constante a profundidade de cálculo, o uso do titânio pode levar a reduções de até 50% no peso da estrutura do casco resistente, quando comparado com o HY-80. A maior desvantagem deste material é o seu custo, várias vezes superior ao dos aços. A altos níveis de resistência, surgem problemas de corrosão sob tensão e surgimento de trincas sob carregamento, a menos que seja minimizado o grau de impurezas do material de solda e de base, o que complica significativamente os processos de soldagem. O titânio representa um material viável para aplicação no casco resistente de submarinos, como já demonstraram os soviéticos, particularmente para as grandes profundidades de imersão - porém a um custo considerável.

#### - materiais compostos

Os materiais compostos que podem ter aplicações em estruturas de submarinos incluem os polímeros reforçados por fibras ("Fiber reinforced Polymers - FRP"), metais reforçados por fibras e, possivelmente, cerâmicas reforçadas por fibras. Apesar de serem vistos como possíveis materiais para o casco resistente, os compostos são muito bem adaptados para emprego em estruturas secundárias, tais como superestruturas, velas, lemes, casco não resistente (domos de vante e cones de ré), conveses e anteparas, bem como submersíveis tripulados, veículos de operação remota, torpedos, minas e bóias.

Os compostos FRP com alta relação resistência/peso incluem enrolamento de filamento ou laminação por compressão em moldes, empregando resinas epoxi ou vinil-éster, com reforços de fibras de vidro R ou S e/ou fibras de carbono. Os laminados de

fibra de vidro E/poliéster, de menor resistência e menor custo são adequados para muitas aplicações estruturais secundárias, sendo o poliéster substituído por resinas fenólicas onde a resistência ao fogo é importante.

Os compostos de matriz metálica ("Metal Matrix Composites - MMC"), formados pela incorporação de fibras curtas ou contínuas de materiais de alta resistência e alta rigidez, tais como o carbono, boro, carbeto de silício ou alumínio, ao metal da matriz, usualmente uma liga de alumínio, são materiais de resistência excepcionalmente alta. Algumas de suas vantagens sobre os FRP são maiores resistências transversais (inter-laminares) e menor sensibilidade de suas propriedades às altas temperaturas. Seus custos, entretanto, são muito elevados e, até o presente, sua fabricação é limitada a pequenos componentes.

Os benefícios potenciais do emprego de materiais compostos incluem as perspectivas de grandes reduções de peso. Para um peso de casco constante pode-se obter significativos aumentos na profundidade de operação. De forma inversa, para uma profundidade constante, pode-se obter uma significativa redução do peso estrutural, que pode ser convertido em carga útil ou em redução das assinaaturas ou em aumento da capacidade de sobrevivência. Especificamente, as amplas possibilidades de conformação de estruturas, incorporando capacidades de amortecimento e desacoplamento, podem melhorar muito as características anecóicas e de isolamento ao choque. Outras vantagens dos compostos são a reduzida manutenção, devido a eliminação da corrosão, e a redução da assinatura magnética. O uso de compostos abre um amplo escopo de possibilidades para a geometria da estrutura dos submarinos e o aproveitamento das propriedades do material, com variações de espessuras e de orientações das fibras visando as regiões de concentração de tensões.

A busca das grandes profundidades e o emprego de novos materiais e arranjos estruturais alternativos vem levando a uma reavaliação dos critérios determinísticos até aqui adotados no projeto estrutural de submarinos. A presença de múltiplos modos de falha, que se tornam cada vez mais acoplados, e os variados graus de incertezas associados a cada um deles abrem um novo campo para a abordagem de confiabilidade estrutural e para a análise de riscos.

Os problemas associados ao uso de compostos incluem o alto custo do material. Os custos de fabricação, que dependem do método construtivo, são difíceis de serem previstos em escala real, dado que até o presente não existem grandes estruturas (do porte de submarinos) feitas nestes materiais. Os compostos sofrem de várias deficiências estruturais não observadas nos metais, tais como falta de resistência inter-laminar, suscetibilidade à fadiga sob compressão e à deformação visco-elástica. O perigo de incêndios e a transparência eletromagnética são também características da maioria dos compostos.

Em operação, o risco de excursões de profundidade acidentais poderia ser acessados e associados às estimas de confiabilidade do casco resistente para as grandes profundidades (superiores a profundidade máxima de operação), fornecendo probabilidades combinadas das consequências. Seria especialmente importante o comandante do submarino poder acessar estes riscos quando considerar a possibilidade de exceder a cota de operação visando a evasão de armas.

### 3 . 2 . 6 - Segurança / Salvamento

Um alto padrão de segurança continua a ser a primeira prioridade com relação aos meios de salvamento. No campo de submarinos, o problema é tratado de forma similar à aviação, ou seja, tudo é feito para a segurança, isto é, para evitar o acidente, mas, pelo menos no passado, somente poucas medidas foram tomadas para o salvamento da tripulação.

O objetivo primordial das medidas de segurança é evitar que acidentes e falhas provocadas por causas internas ao navio, causas ambientais externas e, principalmente, ataques feitos por armas anti-submarinas eliminem ou reduzam a níveis inaceitáveis as capacidades inerentes ao submarino, que são, basicamente, em ordem de precedência, emergir, movimentar-se e combater.

A capacidade de sobrevivência de um submarino está intimamente associada aos seguintes aspectos:

- resistência ao choque para equipamentos ligados rigidamente ao casco e calcamento resistente adequado para os demais equipamentos;
- profundidade de colapso do casco resistente;
- padrão de qualidade das juntas soldadas nos sistemas submetidos a pressão externa;
- confiabilidade (com eventual redundância) dos meios de fechamento das aberturas no casco resistente;
- volume dos tanques de lastro (reserva de flutuabilidade);
- capacidade de armazenamento de ar comprimido a alta pressão;
- disponibilidade de sistemas de esgotamento em emergência dos tanques de lastro;
- capacidade das bombas de esgotamento;
- compartimentagem estanque;
- redundâncias no sistema de propulsão principal;
- disponibilidade de sistema de propulsão em emergência;
- estabilidade transversal e longitudinal;
- redundância de equipamentos críticos;
- proteção contra incêndios;
- precisão dos sistemas ligados à navegação;
- procedimentos tático-operativos;



- possibilidades de operação de sistemas em modos degradados, locais e manuais, independentemente dos sistemas de controle integrados existentes;
- grau de adestramento da tripulação;
- rapidez de resposta à atuação das superfícies de controle (monobrabilidade).

Se analisarmos cada um destes aspectos criteriosamente e os compararmos aos submarinos ocidentais modernos, percebemos que muitos deles têm sido negligenciados em favor de outros requisitos, tais como máximas velocidades, menores dimensões (e custos), minimização da probabilidade de detecção etc. Esta postura fundamenta-se, basicamente, na crença de que tudo deve ser feito para evitar a detecção, pois caso ela ocorra e for efetuado o ataque, e não for possível a evasão, a potência do armamento anti-submarino moderno é tal que tornaria inúctuo qualquer meio de garantia das capacidades de sobrevivência. Isto significa que as medidas mais importantes para determinação do valor militar dos submarinos ocidentais são a detecção e a capacidade de detecção de seus sensores.

Sem dúvida alguma, existe muito de realidade nesta filosofia, porém se analisarmos os submarinos soviéticos, vemos que os mesmos são projetados com base numa filosofia radicalmente diferente, que privilegia as capacidades de sobrevivência. Dado que desde 1945 não existe experiência operacional de submarinos em teatro de guerra (a exceção pouco significativa do conflito das Malvinas e do conflito no Golfo Pérsico), julgamos que não se pode afirmar "a priori" qual dos dois enfoques é o melhor.

Os exemplos mais marcantes destas diferenças de filosofia estão na opção casco duplo x casco simples, na subdivisão do casco em compartimentos estanques e na velocidade e profundidade máximas, cujas opções são radicalmente diferentes para os ocidentais e os soviéticos. Podemos considerar que as medidas mais significativas para determinação do valor militar dos submarinos soviéticos são a velocidade, capacidade de imersão e capacidade de sobrevivência pós-ataque.

Na área de submarinos convencionais as diferenças quanto a velocidade e profundidade praticamente inexistem, porém na área de submarinos nucleares elas são marcante. A ênfase na detecção assumida pelos ocidentais restringe, ou praticamente impossibilita, o desenvolvimento de instalações propulsoras de elevada relação potência/peso, limitando assim as máximas velocidades a faixa dos 30-35 nós. Por outro lado, os soviéticos, deixando para um segundo plano estas restrições, projetam instalações extremamente compactas, possibilitando que seus submarinos nucleares atinjam velocidades máximas na faixa de 35-40 nós ou até mais, no caso de emprego de reatores resfriados a metal líquido.

A prioridade pela maximização da profundidade de operação, uma possível "despreocupação" com os custos e, talvez, a adoção de



margens de segurança menos restritivas, têm levado os soviéticos a uma liderança na área de materiais de alta resistência, tais como o titânio, para emprego no casco resistente, permitindo aos seus submarinos operarem em cotas da ordem de 600-700 m, em oposição aos projetos ocidentais, limitados a 300-450 m.

Ao final dos anos 50, os projetistas ocidentais abandonaram o uso do casco duplo, com cavernamento externo, em favor do casco simples, com cavernamento interno. Esta mudança foi motivada pela prioridade dada à busca da minimização do peso estrutural e da superfície molhada, visando a otimização da velocidade máxima do submarino (volume interno do casco e potência de propulsão fixas). As formas suaves e sem discontinuidades ou grandes aberturas, obtidas com o casco simples também minimiza o ruído de escoamento hidrodinâmico. Esta transição, entretanto, levou a alguns prejuízos:

- a reserva de flutuabilidade foi reduzida de 25-35% para 9-10% do deslocamento de superfície, limitando o volume de água embarcada devido a alagamento que o sistema de lastro poderia superar;

- o casco resistente simples deixou de ter a proteção física contra colisão e efeito de explosões que a distância entre os cascos interno e externo do sistema duplo propiciava;

- o número de anteparas estanques foi sensivelmente reduzido (ou foram simplesmente eliminadas), o que praticamente eliminou as capacidades de sobrevivência do submarino no caso de sério alagamento, quando a propulsão é perdida.

Os soviéticos optaram por manter o casco duplo até os dias atuais, aceitando as desvantagens de peso estrutural, velocidade e ruído para manter grandes reservas de flutuabilidade e proteção do casco resistente. Garantiram assim, a capacidade do submarino emergir em condições estáveis, ou continuar suas operações acima da profundidade de projeto das anteparas, mantendo a propulsão, mesmo após um ou mais compartimentos e seus tanques de lastro adjacentes terem sido alagados. Isto significa maior segurança física do navio e tripulação, em tempo de paz, e capacidade de sobrevivência após sofrer ataques, em tempo de guerra.

Julgamos, porém, que o grande avanço nas técnicas de redução das assinaturas têm levado a que as distâncias de detecção se tornem muito pequenas, o que conduz a confrontos sub muito próximos e com uso de sonar ativo. Nestas circunstâncias as capacidades de sobrevivência, juntamente as de manobrabilidade (incluindo velocidade e profundidade de operação) são fundamentais. Espera-se, portanto, em futuro mais ou menos breve, uma tendência à reavaliação da filosofia adotada nos submarinos ocidentais.

Motivada pelos critérios atuais de segurança da vida humana e também devido ao fato de que a indústria tem desenvolvido novos

e melhores equipamentos de salvamento, há uma forte tendência para melhorar os meios de salvamento da tripulação de submarinos acidentados.

Estas melhorias, entretanto, não devem ser jamais implementadas em detrimento da segurança, mas sim como recursos adicionais. Presentemente, os seguintes procedimentos de escape são disponíveis:

- escape livre ("free escape"), feito a partir das escotilhas de escape e/ou torreão do submarino, até 80 m de profundidade;

- subida livre ("free ascent"), similar ao anterior, porém requerendo roupas especiais, até 180 m de profundidade;

- esfera de salvamento, associada a uma antepara estanque;

- sistema de esgoto em emergência dos tanques de lastro por hidrazina;

- escotilha de acoplamento para veículos de salvamento a imersão profunda ("Deep Submergence Rescue Vehicle - DSRV").

Se for tomada decisão por algum destes sistemas ou pela combinação de mais de um deles, sua integração ao projeto do submarino levará a aumentos da ordem de 0.5-3.0 % no deslocamento de superfície, dependendo do tipo do sistema. Incorre-se também no correspondente impacto no arranjo físico do submarino e dos sistemas relacionados com o deslocamento, bem como num aumento de custos.

### 3 . 2 . 7 - Instalação Propulsora e Auxiliares

Contrariamente aos outros sistemas, os últimos desenvolvimentos na propulsão mostram uma tendência a menores requisitos de espaço e menor peso. A tendência de redução, ou pelo menos não crescimento, dos requisitos de velocidade máxima tem contribuído significativamente para isto.

Com respeito à radiação de ruído, eficiência, velocidade, peso, volume e também cumprimento total do navio, o desenvolvimento de motores síncronos excitados por magnetos permanentes representa uma nova geração se comparado com os motores de propulsão de corrente contínua. O volume e o peso destes novos motores correspondem aproximadamente a  $1/2$  e  $2/3$  respectivamente, em relação as figuras de seus antecessores mais modernos. O desenvolvimento destes motores por diversas empresas em diferentes países (inclusive no Brasil) faz-nos crer que no máximo em dois anos os primeiros protótipos na faixa de potência útil para emprego em submarinos de pequeno/médio porte (até 2000



(tons) estarão disponíveis.

No campo de motores diesel, atualmente têm sido desenvolvidas várias versões turbo-carregadas com figuras peso/potência e volume/potência sensivelmente melhoradas com relação aos seus antecessores mecanicamente carregadas. Vários números de cilindros, de 6, 12, 16, 18 e 20, com as correspondentes faixas de potência, resultam num alto grau de flexibilidade para os projetistas, permitindo o atendimento dos requisitos das diversas máquinas com razoável precisão.

Os requisitos impostos para alcançar submerso a baixas velocidades para submarinos convencionais têm se mantido razoavelmente constantes nos últimos anos. Este fato somado às melhorias obtidas nas figuras de desempenho das baterias (energia específica) e à tendência de aumento do deslocamento dos submarinos conduz a que seu peso relativo ao deslocamento seja reduzido para valores de ordem de 15-18%.

No campo de reatores nucleares, há forte tendência a buscar-se maximizar o aproveitamento do fenômeno de circulação da água de resfriamento do reator por convecção natural, restringindo o uso das ruídasas bombas de circulação forçada às altas velocidades. Na esteira desta tendência, associando-se o desejo de minimizar peso e volume da instalação, bem como melhorar suas características de segurança de operação, reduzindo-se o número de sistemas de resfriamento em emergência ativos, tende-se a caminhar para os reatores ditos "integrals", onde os geradores de vapor e pressurizador são integrados ao vaso de pressão do reator. Nestas novas gerações de reatores busca-se os princípios de segurança intrínseca.

No campo dos hélices, têm surgido algumas alternativas aos usuais propulsores de grande número de pás (em geral 5, 6 ou 7) e "high skew", tais como os "pump jet", hélices em duto de desacelerador de fluxo visando a minimização do ruído de cavitação, hélices contrarotativos e um curioso arranjo adotado por uma classe soviética composto por dois hélice de 4 pás fixos um no outro com uma defasagem de 45°. Outros dispositivos de geração de empuxo "exóticos" tais como a propulsão magneto-hidrodinâmica têm merecido considerável esforço de pesquisa, entretanto faltam ainda muitos anos para tornarem-se sistemas de propulsão principal viáveis (o que não quer dizer que não possam ser desenvolvidas pequenas unidades com fins de propulsão secundária em prazos mais curtos).

Devido aos requisitos cada vez mais restritivos para o nível de ruído irradiado, a instalação de equipamentos em plataformas resistentes "flutuantes", simples ou duplas e, eventualmente, o seu encapsulamento em material isolante acústico não podem ser evitados, visando obter melhorias no isolamento do ruído transmitido à estrutura ("structureborne noise") e ao ar ("airborne noise"). As necessidades de espaços e peso das plataformas, calcos e encapsulamento são consideráveis.

Deve-se notar que estas medidas são de aplicação difícil, se não impossível para reatores nucleares e seus circuitos de resfriamento e de segurança (circuito primário) PWR usuais, devido, basicamente, ao grande peso deste conjunto, a baixa resistência dos materiais resistentes à radiação e a baixa confiabilidade (para os padrões nucleares) dos itens associados a estas medidas (juntas flexíveis).

A crescente ameaça dos meios da guerra anti-submarina aos submarinos esnorpando requer coeficientes de indicação (tempo em esnorpel / tempo total) cada vez menores. Isto leva a substanciais aumentos na potência dos diesel-geradores, dentro dos limites impostos pelo tamanho e características de carga das baterias e pelo volume de ar contido no interior do submarino. Este requisito, por outro lado, gera atualmente o maior desafio para o submarino não-nuclear, que é o desenvolvimento de sistemas de propulsão independentes do ar (SPIA), conforme abordado no capítulo anterior.

### 3 . 2 . 8 - Condições Ambientais

Com respeito ao condicionamento do ar a bordo, um substancialmente alto grau de conforto é requerido, refletindo-se em faixas de temperaturas máximas e mínimas mais estreitas e diminuição da umidade relativa do ar. Os mais recentes estudos de medicina definem que a concentração de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) máxima admissível é de 0.5% por volume. Há sistemas disponíveis hoje que garantem este padrão. Também os valores limites para o oxigênio são maiores do que eram há 10 anos atrás.

Estes fatos por si só levam a aumentos na capacidade de armazenagem e geração de oxigênio e no crescimento das instalações de absorção de  $CO_2$  e ar condicionado e, em consequência, aumentos no peso e volume requeridos. Além disto, os sistemas de medição e de controle de concentração de gases devem ser aperfeiçoados, estendendo-os a um número muito maior de produtos químicos do que era usual há algum tempo atrás. Estes sistemas hoje também se encontram disponíveis.

A proteção ambiental também deve ser considerada em navios militares, aspecto este que se aplica igualmente aos ambientes interno e externo do submarino. A regulamentação civil internacional e nacional para a marinha mercante, cada vez mais restritiva, deve ser aplicada ao projeto do submarino. Os rejeitos líquidos, subdivididos em água cinza (de lavagem e de cozinha), água negra (de banheiros), a água de porão (contaminada por graxas, óleos e combustíveis), outros rejeitos químicos provenientes de instalações de propulsão não convencionais e rejeitos sólidos não podem mais ser simplesmente lançados para fora do navio, requerendo, portanto, sistemas de tratamento e/ou



## 3 . 2 . 9 - Resistência ao Choque

Choques são solicitações impulsivas causadas por explosões submarinas sem contato. Não incluem as solicitações devidas a impactos diretos, que em geral não são consideradas porque é totalmente impossível projetar o casco de modo que possa suportá-las. Entretanto, a ocorrência de impacto direto é extremamente improvável, sendo inclusive o armamento anti-submarino (torpedos, minas e cargas de profundidade) projetado para destruir o alvo pela onda de choque gerada pela explosão sem contato.

O estudo da resposta do submarino ao choque cai dentro do domínio dos problemas associados a complexas interações fluido-estrutura, o qual tem sido domínio de experimentalistas. Enquanto muito das atividades de pesquisa continuam a ser baseadas na experimentação, elas têm sido crescentemente complementadas por estudos teóricos. Estes tornam-se possíveis a partir do desenvolvimento de métodos computacionais analítico/númericos eficientes.

A capacidade de análise teórica de choque é necessária, por exemplo, para estudar casos de carregamento não facilmente reproduzíveis experimentalmente, para avaliar-se a resposta de modelos experimentais sem o recurso de leis de semelhança e para determinar melhores cenários de ataque, otimizando os experimentos. Deve-se entretanto reconhecer que existem questões que só podem ser respondidas experimentalmente e que um método de projeto teórico aceitável só pode ser obtido por um processo de validação que depende da aquisição de dados experimentais confiáveis.

O carregamento de choque de um corpo flexível de geometria arbitrária é um problema complexo de interação transitente fluido-estrutura. No caso de choque, as pressões no fluido e as velocidades das partículas geradas na superfície molhada da estrutura pelo pulso de pressão incidem sobre os valores das variáveis no fluido. Conforme ilustrado pela figura 3.2, a pressão dinâmica total e a velocidade de partícula num ponto sobre a superfície molhada da estrutura ou no fluido são dadas pela soma das componentes incidente, refletida (corpo rígido) e irradiada (corpo flexível), sendo esta última função do movimento da estrutura.

O modo com qual pode-se resolver este problema acoplado depende do escopo e complexidade da configuração estrutural, do grau de precisão das respostas calculadas e capacidade dos recursos computacionais disponíveis. Os muitos métodos de análise desenvolvidos podem ser classificados em três categorias, HAXTON [121]



- métodos analítico/númericos de "solução fechada", limitados a geometrias simples!

- métodos de elementos finitos/elementos de fronteira, aplicáveis a geometrias mais complexas!

- "hidrocodes", mais precisos e de ampla aplicação, mas que hoje tem seu uso restrito aos maiores computadores, mesmo para os problemas bi-dimensionais, requerendo o uso dos chamados "super-computadores" para a modelagem 3-D, ANDERSON [1], HALOUST [1], HANCOCK [1]; considerando-se porém as tendências na tecnologia de computadores, será uma questão de tempo a ampliação do seu emprego.

A resistência a choque está diretamente associada a capacidade de sobrevivência do submarino. Esta também intimamente interrelacionada à redução de ruído, pois algumas das principais técnicas de redução do NRI são, simultaneamente, favoráveis à resistência a choque. Deve-se entretanto notar que a aplicação indiscriminada de severos requisitos de choque ao projeto de estruturas internas e equipamentos, principalmente aqueles não montados em calçamento resistente, conduzem a aumentos significativos no peso e volume do submarino (logo, também nos seus custos).

Considerando-se que até o presente não existem critérios de projeto do casco resistente que considerem explicitamente seu nível de resistência a choque (este nível, de certa forma indeterminado, é considerado pela lâmina d'água de segurança), a definição dos requisitos específicos para cada estrutura / sistema / componente deve ser extremamente cuidadosa, levando-se em conta a mesma classificação quanto à segurança adotada no caso da redução de ruído, descrita pelo sub-item 3.3.1 e os aspectos associados ao custo/benefício apresentados no sub-item 3.3.6.

### 3 . 3 - REDUÇÃO DE RUÍDO

Como vimos no item 3.2.4, há uma forte tendência ao estabelecimento de requisitos de ruído irradiado cada vez mais restritivos. Consideramos, entretanto, que dois princípios básicos devem ser levados em conta ao transformar-se estes requisitos em um submarino real:

- a redução de ruído não deve ser uma razão para sacrificar-se outras medidas de desempenho que também contribuem para a eficiência global do submarino; em caso de conflito, o projetista deve buscar soluções de compromisso convenientes;

- a redução de ruído não deve ser uma razão para degradar a segurança do submarino; deve-se enfatizar que um alto grau de segurança é também parte do valor militar, pois não há dúvidas que uma tripulação que não acredita no seu navio não pode ser eficiente do primeiro ao último dia de sua missão; além disto, ao considerarmos uma esquadra de submarinos, deve-se ter em mente que cada unidade é um investimento caro, daí porque o número de submarinos é limitado na maioria das marinhas; a segurança é, portanto, uma garantia da preservação do número de submarinos e, logo, da eficiência global da esquadra a que pertencem.

Examinaremos, neste item, com base nos princípios supra-citados, como a redução de ruído se aplica com respeito a:

- estabelecimento de requisitos;
- dimensões principais;
- formas externas;
- arranjo geral;
- projeto estrutural;
- projeto de sistemas;
- equilíbrio geral do projeto: pesos e volumes;
- segurança.

### 3 . 3 . 1 - Estabelecimento de Requisitos

Os requisitos gerais de redução de ruído são estabelecidos pelas curvas de máximo nível de ruído irradiado (NRI) permitíveis (nível em dB x frequência), associadas a cada modo de operação (e velocidade) do submarino. Alguns procedimentos alternativos podem ser usados para o estabelecimento destas curvas:

- defini-las como um certo número de dB acima ou abaixo da curva de ruído ambiental do mar (em determinada profundidade e em determinada localização geográfica);

- assumir-se um determinado ruído de fundo e o ganho dos "arrays" do sistema de hidrofonos passivos do inimigo, determinando assim o mais baixo nível de ruído que o inimigo pode

detetar! esta curva passa então a definir o máximo nível de ruído irradiado pelo submarino permitível que evita detecção a, digamos, 100m do sonar do inimigo! com base nesta curva e no valor das perdas de propagação do ruído na água, pode-se então definir uma família de curvas parametrizadas na distância de detecção (figura 3.3)! com esta família de curvas, a partir de requisitos tático-operativos, pode-se determinar as distâncias máximas requeridas para cada modo de operação (e velocidades) e, consequentemente, as curvas de máximo NRI permitíveis!

A figura 3.4 mostra valores típicos para o NRI em banda larga de submarinos nucleares e convencionais.

Conhecer o máximo NRI na água não é suficiente; é necessário converter este nível a níveis máximos permitíveis por fonte para os diferentes itens a bordo. Deste modo, precisa-se conhecer as funções de transferência apresentadas na figura 3.5. e aplicá-las a cada sistema.

Para todos os sistemas do submarino, os requisitos de redução de ruído devem ser estudados considerando-se dois critérios:

- o funcionamento do sistema é necessário quando o submarino deve estar operando silenciosamente?

- o sistema contribui para a segurança do navio?

Para o primeiro critério, o principal requisito é o nível da velocidade tática.

Para o segundo critério, devem ser considerados quatro níveis principais de segurança para os quais os sistemas podem contribuir:

A - resistência e estanqueidade do casco e das válvulas de casco! para este nível é óbvio que, se existem requisitos de ruído, eles devem ser verificados depois da segurança estar garantida!

B - capacidade de mergulho; este nível envolve sistemas de controle de governo e profundidade, sistema de lastro, sistemas hidráulicos e de ar comprimido, etc.

C - capacidade de combate! este nível envolve sistemas de armas e de propulsão!

D - outros sistemas, não necessários para mergulhar (e emergir) ou combater (mover-se e abrir fogo)!

Para sistemas do nível A e B não há requisitos de ruído (por exemplo, sistemas usados somente no escape do submarino). Nestes sistemas o requisito principal é a confiabilidade. Para os sistemas nível D os requisitos de ruído são plenamente aplicáveis.

Para os sistemas nível C, os requisitos de ruído têm interface com os de segurança, sendo necessário buscar-se soluções de compromisso, sem esquecer as missões principais do submarino.

### 3 . 3 . 2 - Dimensões Principais

A experiência dos recentes projetos de submarinos mostra claramente que uma das maiores consequências do emprego extensivo das técnicas de redução de ruído é o aumento do diâmetro. Anteriormente, durante o projeto de concepção, o diâmetro externo do casco resistente podia ser estimado com base no número de conveses (níveis) N, no pé direito médio dos conveses H e pelos escantilhões do arranjo estrutural R (espessura do casco + altura da alma + espessura de flange da caverna), este último fator determinado basicamente pela profundidade de operação.

$$D = N \times H + 2 \times R$$

A figura 3.6 apresenta os resultados de um estudo de áreas e volumes para submarinos de 2, 3 e 4 níveis, que indicam as faixas de diâmetro associadas, ARENIZEN e MANDEL [19]. Nos três casos, somente áreas de conveses com altura livre disponível mínima de 1m foram computadas.

A altura média dos conveses H é determinada por vários parâmetros, sendo a altura média do ser humano talvez ainda o mais importante deles. O número de conveses N é determinado pelos requisitos de volumes necessários para o arranjo dos equipamentos e também por requisitos específicos de alguns equipamentos e/ou sistemas, tais quais arranjo de tubos de torpedos e torpedos reserva.

Conforme a figura 3.7 tenta demonstrar, o emprego das técnicas de redução de ruído, principalmente aquela que impõe "nada montado rigidamente ao casco", modifica radicalmente a relação elementar apresentada.

Estes novos arranjos internos, onde conjuntos de equipamentos são montados em bases independentes, sobre calçamento resiliente, adaptam-se particularmente bem aos modernos métodos construtivos de pré-montagem e de construção do submarino em seções ("zone oriented construction"), os quais têm vantagens econômicas bem conhecidas.

A influência da redução de ruído no compromisso do submarino é menor, mas também existe, como procuraremos mostrar através dos dois exemplos a seguir:

- é necessário evitar uma conicidade muito acentuada na parte de re (corpo de saída), a qual pode alterar negativamente o fluxo de entrada no disco do propulsor; neste caso de alta conicidade, a espessura da camada limite é aumentada e há o risco

- e também inadequado desviar-se significativamente de formas suavemente carenadas para a parte de vante (corpo de entrada), solução que foi muito usada até o passado recente visando facilitar o arranjo de tubos de torpedos e transdutores de sonar; estes desvios podem levar a perturbações no escoamento e, consequentemente, a elevado ruído próprio no sonar e mesmo elevado ruído irradiado devido ao propulsor, pois estas perturbações no escoamento são propagadas e amplificadas ao longo do comprimento do navio.

Desde que o diâmetro é significativamente aumentado e o comprimento é levemente alterado, mantendo-se as demais variáveis constantes, pode-se concluir que o emprego extensivo de técnicas de redução de ruído levam ao aumento do deslocamento do submarino. Isto não quer dizer que pequenos submarinos não possam ser silenciosos. Estudos feitos na França, com base em um pequeno submarino costeiro tipo CA (1000 tons), mostram que a aplicação das mais avançadas técnicas de redução de ruído conduziriam a um aumento de diâmetro da ordem de 0.5m, o que corresponderia a um aumento de 20-30% no deslocamento, com referência a um projeto mais convencional, BOISRAYON [38]. Acredita-se que este efeito possa aplicar-se a submarinos oceânicos, de deslocamentos da ordem de 2000-2500 tons.

### 3 . 3 . 3 - Formas Externas

As restrições nas forma externas têm sido reforçadas pela redução de ruído. Torna-se necessário eliminar qualquer alteração significativa nas formas hidrodinâmicas ótimas, com respeito a baixa conicidade do corpo de saída, suavidade na curvatura do corpo de entrada e minimização de apêndices externos.

Os requisitos de redução de ruídos aplicam-se não só sob o aspecto do NRI como também da interferência de ruídos localizados, devido ao escoamento sobre os hidrofones do navio, reduzindo seu ganho. A figura 3.8 apresenta a localização dos sensores acústicos nos modernos submarinos.

Entre os maiores apêndices está a vela, que deve ter sua área, comprimento e largura minimizada, o que, em geral, conflita com os requisitos de comunicações, detecção e guerra eletrônica. É necessário projetar-se velas "finas" e rígidas, o que requer antenas multifuncionais, de modo a reduzir o número de mastros icáveis.

É também necessário minimizar as dimensões dos lemes verticais e horizontais de ré, pois a esteira destes apêndices tem forte influência no ruído irradiado pelo hélice. Sob este ponto de vista, é conveniente estudar-se novos arranjos para o sistema de controle de governo e profundidade, de modo a afastar as



superfícies de controle ao máximo do disco do propulsor, desde que sejam mantidas as características de estabilidade dinâmica, manobrábilidade e um grau apropriado de segurança no controle de profundidade em caso de falha.

Estes dois últimos exemplos são casos típicos da aplicação dos dois princípios mencionados ao início deste item:

- deve ser encontrada uma solução de compromisso entre redução de ruído e outras funções principais, tais como comunicações e detecção;

- a redução de ruído não deve ser uma razão para se projetar um submarino com pouca estabilidade dinâmica ou com comportamento perigoso no caso de falha no controle dos hidroplanos.

Finalmente, a existência de escolilhas de escape e manutenção, equipamentos de salvatagem, bóias de comunicações, tubulações de descarga de gases de exaustão de motores diesel, aparelhos de conves, etc., todos posicionados na parte superior externa do casco resistente, torna necessária a utilização de uma superestrutura que envolva estes itens. Esta superestrutura deve ser cuidadosamente carenada e as frequências naturais dos seus painéis devem suficientemente elevadas para evitar efeitos de vibrações indesejáveis causadas pelo escoamento turbulento.

Para concluir estes aspectos, parece-nos que a redução de ruído tende a reduzir em muito as possibilidades do projeto das formas externas e a complicar o projeto de alguns componentes, principalmente as superfícies de controle, os mastros e proa do submarino. Os projetistas devem, entretanto, analisar criteriosamente estas restrições, cuja intensidade é diretamente proporcional ao deslocamento e à velocidade tática do submarino. No nosso entender, careceria de sentido aplicar rigorosamente as regras anteriormente citadas a submarinos costeiros, de pequenos deslocamentos, na faixa de 1000-1500 tons, e baixas velocidades táticas, da ordem de 10-15 nós.

### 3 . 3 . 4 - Arranjo geral

Os princípios de divisão do submarino em volumes principais, tais como setor de propulsão, setor de operações, setor de acomodações, etc., permanecem inalterados. Estes setores são subdivididos em blocos ou compartimentos, que correspondem, de uma maneira geral, a uma ou mais funções técnicas ou operativas do navio.

A redução de ruído é agora uma razão adicional para aplicar esta regra no seu máximo rigor, pois cada bloco elementar recebe um tratamento acústico diferenciado, adequado ao tipo de máquinas e equipamentos nele instalados. É óbvio que o tratamento do setor

dedicado ao Centro de Informações de Combate (CIC) ou às acomodações tripulação é diferente daquele aplicado ao setor de propulsão.

O arranjo físico dos blocos não pode ser feito sem levar em consideração as ligações funcionais entre eles. Ao dividir-se o submarino em setores ou blocos, deve-se buscar a minimização das ligações entre os blocos, pois cada ligação implica, na maioria das vezes, em elementos flexíveis entre equipamentos posicionados em blocos adjacentes.

Os critérios para atribuição de volumes a cada setor ou bloco também têm sido modificados devido à redução de ruído: nas fases iniciais do projeto, maiores reservas de volume devem ser alocadas para algumas funções, tais como os compartimentos de propulsão e máquinas auxiliares.

O arranjo da proa é principalmente determinado por três fatores:

- formas hidrodinâmicas externas;
- número e tipo de tubos de torpedo;
- tamanho e forma dos transdutores do sonar de proa.

Quando uma alta prioridade é dada para a vantagem acústica, o que significa alta probabilidade de detectar primeiro (desempenho do sonar, incluindo mínimo ruído próprio) e sem contra-deteção (baixo NRI), o primeiro e o último fatores têm a mais forte influência no projeto. Podem-se identificar aí grandes dificuldades se, simultaneamente, for requerido um alto número de tubos de torpedos. Parece-nos ser quase impossível conciliar alta velocidade táctica com número elevado de tubos de torpedo na proa.

O custo/benefício do aumento das dimensões dos "arrays" de proa deve também ser analisado, pois sonares muito grandes, de alto desempenho, conduzem a formas do corpo de entrada extremamente "bojudas", que podem, por sua vez, degradar suas características, devido ao ruído próprio gerado pelo escoamento não otimizado. A solução deste problema pode ser encontrada no aumento do diâmetro do submarino, reforçando as colocações do sub-item 3.3.2.

### 3 . 3 . 5 - Projeto do Casco Resistente

A tendência de aumento da profundidade de operação concilia-se de modo favorável, sob vários aspectos, com a redução de ruído.

O projeto do casco resistente o mais simples possível (cilindro de raio quase constante fechado nas suas extremidades por domos esféricos ou elípticos) é conveniente tanto do ponto de vista estrutural como acústico. Os cascos resistentes com projetos

complexos, especialmente aqueles com numerosas variações de raio, conduzem a problemas de vibrações de baixas frequências, devido ao número de modos de vibração locais gerados por tais desconfinidades.

As anteparas estanques, que se justificam em submarinos de maior porte devido a razões de segurança (incêndios, alagamentos) devem ser minimizadas, pois causam não somente concentrações de tensão se não forem projetadas adequadamente, como também deformações e caminhos de propagação de vibrações.

Normalmente, numerosas ligações devem cruzar tais anteparas. As respectivas penetrações devem ser flexíveis ou desacopladas, de modo a suportassem deformações devido à pressão externa e para criar descasamento de impedâncias nos caminhos de propagação de vibrações. Adicionalmente, podem existir problemas de segurança em algumas ligações (ar de alta pressão, hidráulica) que são vitais para o submarino, devendo neste caso serem evitados elementos flexíveis.

Dentro do mesmo enfoque, o desacoplamento das estruturas internas de alguns blocos é requerido tanto por razões estruturais como por requisitos de ruído.

Algumas vezes, entretanto, a profundidade e a redução de ruído encontram-se em conflito, especialmente com respeito às grandes fundações no casco resistente. A redução de ruído requer fundações o mais rígidas possível, que levam a potenciais problemas de fadiga devido às concentrações de tensões resultantes. Aplicam-se, no caso, os dois princípios enunciados ao início deste item e, caso não seja possível uma solução de compromisso, os requisitos estruturais devem prevalecer, dado sua importância para a segurança do navio.

### 3 . 3 . 6 - Projeto de Sistemas, Máquinas e Equipamentos

A redução de ruído é uma oportunidade para se reforçar a lei da simplicidade no projeto de submarinos. Até o presente, era bem conhecido o princípio de que "o equipamento mais confiável no mar é aquele que ficou em terra". Pode-se agora adicionar que esse equipamento que ficou em terra é também o mais silencioso! A redução de ruído requer também simplicidade de um modo indireto, pois, como temos visto, gera pesos e volumes suplementares, reduzindo assim a disponibilidade de margens para equipamentos e sistemas muito complexos.

Deve ser constantemente verificado se os critérios de projeto de todos os sistemas são coerentes com as metas de redução de ruído do submarino. Há uma inclinação natural de projetar-se e otimizar-se os sistemas para condições extremas e, em geral, infrequentes (a velocidade máxima do submarino, por exemplo) ou dar uma exagerada importância a combinações de condições

ambientes anormais (lim máximo + máxima profundidade + choque, por exemplo). Isto pode levar a um projeto desequilibrado de sistemas e a geração de ruído nas velocidades silenciosas do submarino. Para atender a situações cuja probabilidade de ocorrência é pequena não deve-se criar problemas constantes. Estes aspectos podem parecer óbvios mas a experiência mostra que para evitar estes desvios é necessário uma constante crítica do projeto de todos os sistemas, pois um pequeno componente pode comprometer todo o esforço feito para a redução de ruído do submarino: a dificuldade deste gerenciamento provém do fato de que existe um número extremamente elevado de componentes no submarino o que requer uma organização específica dentro da gerência do projeto, sendo parte do chamado "gerenciamento da configuração".

### 3 . 3 . 7 - Equilíbrio Geral do Projeto: Pesos e Volumes

A redução de ruído inclui significativamente no balanceamento geral de volumes do submarino porque leva ao aumento do diâmetro e a exigentes requisitos por parte de alguns componentes, tais quais:

- estruturas internas desacopladas do casco resistente, que devem garantir espaço para o arranjo das máquinas e ter rigidez dinâmica apropriada;

- espaço (principalmente comprimento) para ligações flexíveis de todos os tipos (calços resistentes, juntas de expansão para tubulações, acoplamentos elásticos para transmissões mecânicas, etc.);

- espaço em todas as direções de forma que as estruturas desacopladas de baixa frequência possam deslocar-se sob choque; de fato não há nenhum conflito entre a redução de ruído e a resistência ao choque pois as acelerações resultantes são significativamente reduzidas pela montagem resistente dos componentes; neste caso, porém, o problema é transferido para as ligações flexíveis, que devem ser capazes de absorver grandes deformações devido aos deslocamentos dos equipamentos.

Pode-se imaginar a primeira vista que o aumento da flutuação devido ao crescimento do diâmetro e requisitos de volume tornaria mais fácil satisfazer o equilíbrio de pesos para submarinos silenciosos. Isto, entretanto, não ocorre na prática porque a redução de ruído gera novos pesos que consomem a flutuação suplementar:

- peso das estruturas internas, que são extremamente rígidas;

- peso das fundações, que também são extremamente rígidas;

- peso de alguns dispositivos flexíveis, especialmente aqueles associados a tubulações de grande diâmetro e elevada pressão de operação (sistemas de água salgada);

- aumento no peso de alguns componentes de modo a reduzir seu nível de vibrações.

Deve-se considerar, entretanto, que algumas novas tecnologias vêm a contribuir para a redução de pesos, dentre as quais poderíamos ressaltar:

- motores síncronos de pólos permanentes, que, para mesma rotação e torque, têm peso significativamente menor que os motores CC convencionais, utilizados não somente para propulsão, como também para o acionamento de outras máquinas de alta potência que operam em velocidade variável;

- motores diesel turbo-carregados, que, para mesma potência, têm peso significativamente menor que os motores mecanicamente carregados convencionais;

- reatores PWR integrados, que, para mesma potência térmica, têm peso significativamente menor que os reatores PWR tipo "loop";

- aços estruturais de maior resistência, que, possuindo a profundidade de operação constante, têm peso significativamente menor que os usuais aços temperados e revenidos tipo HY-80;

- materiais compostos, que têm tido crescente emprego na estrutura do casco não-resistente e estruturas secundárias;

- crescente grau de automação, reduzindo o número de tripulantes.

### 3.3.8 - Segurança contra Falhas

Conforme vimos no sub-tema 3.3.1, podemos classificar os sistemas do submarino em quatro níveis, de acordo com a sua importância para segurança e associação com as funções básicas do navio que são emergir (e submergir), deslocar-se e combater.

Para sistemas nível A, é óbvio que não há requisitos de redução de ruído quando os mesmos operam, pois a prioridade nestas circunstâncias é a sobrevivência do navio e o salvamento da tripulação. O seu requisito fundamental é a confiabilidade. Este fato, entretanto, não resolve o problema de redução de ruído, pois estes sistemas, simultaneamente, não devem gerar níveis significativos de ruído durante as situações normais. Os sistemas associados ao esgotamento em emergência dos tanques de lastro são bons exemplos deste tipo de dificuldade, pois não é recomendável (e de



Certa forma também de difícil viabilidade técnica a instalação de juntas flexíveis nas suas tubulações. Por outro lado, ausência destas pode levar a criação de caminhos para a transmissão de ruídos entre os blocos ou dos blocos para o casco resistente. Este é um tipo de difícil solução, pois não há uma opção que satisfaca os dois requisitos, devendo então prevalecer a segurança. Para o caso específico de sistemas de esgoto em emergência dos tanques de lastro, uma possível solução é montá-los inteiramente rígidos ao casco. Porém, esta solução não seria aplicável a todos os sistemas neste nível A.

Para sistemas do segundo nível B, que operam continuamente ou na maior parte do tempo, não há outra escolha senão buscar a melhor conciliação possível entre os requisitos de ruído e segurança. Para sistemas com vários níveis de redundância, pode-se projetar o sistema normal com prioridade para a redução de ruído e o sistema de emergência considerando exclusivamente a segurança. O sistema de controle de governo e profundidade enquadra-se neste caso, pois o controle normal (automático ou manual assistido por computador) pode ser projetado para ruído, incluindo elementos flexíveis nas tubulações de óleo hidráulico e o controle em emergência (manual, local ou remoto) pode ser totalmente separado, sem adotar-se tais elementos.

Como se pode perceber, os elementos flexíveis em linhas de alta pressão e suportando equipamentos são os principais componentes sobre os quais recaem dúvidas quanto à sua confiabilidade e segurança. Atualmente busca-se desenvolver tais componentes num grau de confiança comparável às tubulações rígidas e às fundações clássicas, o que implica necessariamente em prolongados e caros processos de qualificação para demonstrar sua segurança.

Os sistemas do nível C representam os maiores desafios aos projetistas, pois para eles é mandatória a busca de soluções otimizadas, que atendam num máximo grau os dois requisitos conflitantes. Apresentaremos a abordagem adotada através de um exemplo típico, constituído pelos sistemas de resfriamento por água salgada, ilustrado pela figura 3.9.

Sua função é um fluxo Q de água do mar e uma diferença de temperatura  $\Delta T$  entre a entrada e a saída do trocador de calor. Outra característica é o valor da pressão de trabalho, igual à coluna d'água devido à cota de operação do submarino. O método usado para este tipo de sistema poderia ser descrito como:

- determinação do diâmetro interno  $D_i$  da tubulação, com base na máxima velocidade  $V_m$  admissível com vistas à corrosão dos tubos e a especificação do nível de ruído para sistemas de resfriamento, o número de Reynolds  $Re$  é limitado a:

$$Re = (V \times D_i / \nu) \times 3 \times 10^5$$

$$\nu \times 3 \text{ m/s}$$

onde  $V$  = velocidade média (m/s)  
 $v$  = viscosidade cinemática ( $m^2/s$ )

- arranjo físico do trocador de calor, bombas, e outros equipamentos, que deve ser determinado por:

• as bombas devem ter montagem resiliente; a figura 3.10 mostra a diferença entre o arranjo clássico e esta montagem moderna, onde o compromisso com a segurança esta no uso de somente duas juntas flexíveis e não quatro, mesmo que o calcamento seja duplo;

• os acessórios de tubulação devem ser projetados visando-se boas características hidráulicas; por exemplo, o raio das curvas não deve ser menor que  $3 \times D$ ; assim, duas curvas subsequentes devem ter um trecho reto de no mínimo  $5 \times D$ , entre elas;

• dado que os elementos flexíveis tendem a ter uma certa rigidez na direção axial, deve-se buscar posicioná-los em ângulos de  $45^\circ$  com relação ao eixo da tubulação ou colocar dois elementos em sequência, formando ângulo de  $90^\circ$  entre si (com a desvantagem de aumentar seu numero, logo reduzir a segurança);

- especificação da bomba, que deve ser o mais silenciosa possível, minimizando suas fontes de ruído inerentes:

• pulsações de pressão no interior dos tubos;

• vibração (balançamento estático e dinâmico do impelidor);

• ruído transmitido ao ar;

- projeto estrutural da base resiliente, que deve ter uma rigidez dinâmica suficientemente elevada para evitar ressonâncias entre a rotação da bomba e seus primeiros modos próprios de vibração;

- determinação da resposta em frequência do conjunto sob excitação das vibrações provenientes da bomba e dos carregamentos de choque nas direções principais, permitindo a identificação de eventuais modos de vibração que comprometam a resistência dos equipamentos, estruturas e tubulações e os caminhos de transmissão de vibrações; neste caso juntam-se os requisitos de segurança e ruído;

- determinação da resposta dinâmica dos fluidos no interior das tubulações, o que permite o conhecimento do NRI para a água do mar; se este nível é muito elevado, é possível adotar-se dispositivos para a sua redução, tais como "mufas", amortecedores, suportes, etc; é também possível inserir-se o

## controle ativo de flutuações de pressão na tubulação:

- as válvulas de casco devem ser duplas e fixadas diretamente no casco resistente, evitando-se válvulas borboleta pois estas introduzem excessiva perturbação no escoamento (e consequentemente ruído).

O problema principal em sistemas de resfriamento por água salgada é o desenvolvimento de elementos flexíveis seguros. É comum que nas tubulações de água salgada tais elementos sejam seguros, porém menos flexíveis que as estruturas resistentes às quais estão associados, ou flexíveis, porém não tão seguros, tal como os mangotes de elastômeros.

Os mangotes de elastômero não podem ser considerados como seguros pois estão sempre sujeitos ao rompimento súbito. Mesmo que existam duas válvulas de casco com fechamento rápido em caso de alagamento, é óbvio que o rompimento de tubulações de água salgada deve ser evitado ao máximo. Eles são usados somente em tubos de pequeno diâmetro, pois para os diâmetros maiores têm sido desenvolvidos e testados outros dispositivos.

O primeiro requisito para um elemento flexível é, obviamente, sua flexibilidade. O segundo é a segurança. Para obter-se uma boa flexibilidade, com mínima transmissão de ruído, a melhor solução é o uso de elastômeros. A dificuldade está em usar estes materiais sem degradar a segurança de mergulho do submarino. Estes materiais são mais perigosos que os metais porque:

- primeiramente, nos materiais metálicos há sempre um vazamento antes de um rompimento catastrófico, desde que o mesmo não seja frágil ("leak before break"). Com elastômeros ou borrachas é atualmente impossível garantir um comportamento não frágil;

- em segundo lugar, é mais fácil controlar a qualidade de peças metálicas do que elastômeros, através de ensaios não-destrutivos (END). Por exemplo, o único teste possível para mangotes é o de pressão. Tem sido desenvolvidos, entretanto, alguns novos métodos de END, que porém não são ainda suficientemente simples para emprego em processos industriais.

Os conceitos de "falha segura" ou "redundância" devem ser usados para os elastômeros visando evitar qualquer efeito catastrófico para a integridade estrutural da tubulação. A dificuldade na aplicação destes conceitos é a determinação do evento catastrófico, ou seja, qual a vazão de vazamento máxima a considerar como não catastrófica. Para sistemas de água salgada, a vazão limite para vazamento catastrófico é de cerca de 1 m<sup>3</sup>/hora.

A figura 3.11 apresenta uma ligação flexível composta por três rótulas idênticas, conectadas por curvas dispostas em "U" ou em "Z" (vide figura 3.12). Este arranjo permite os seis graus de liberdade. A flexibilidade é dada pelas rótulas e pelo tamanho das

A flexibilidade da rótula (figura 3.13) é obtida com peças de elastômero. Por segurança, o arranjo da junta garante que os elastômeros trabalhem sempre sob esforços de compressão quando submetidos à pressão da água do mar, tornando quase impossível uma falha catastrófica.

Com respeito à capacidade de sobrevivência a acidentes, sem tentar ser exaustivo, uma vez que existem muitos acidentes possíveis à bordo de submarinos, consideremos o caso de incêndios, cujas diretrizes básicas são:

- prevenção, evitando ao máximo o emprego de materiais inflamáveis;

- barreiras que contenham o fogo, impedindo sua propagação de um setor a outro, no caso de incêndios severos;

- meios apropriados de combate a incêndios em cada setor, dependendo dos riscos.

A prevenção de incêndios leva a descartar-se o uso de alguns materiais favoráveis à redução de ruído (materiais amortecedores, barreiras acústicas), porém muito perigosos com relação ao fogo. O uso de materiais compostos é restrito no interior do casco resistente pela mesma razão, apesar de suas vantagens com relação ao peso. Nas situações especiais onde excepcionalmente são usados, é necessária a criação de barreiras contra incêndios.

Se uma barreira consiste em uma antepara, todas as penetrações devem suportar o fogo e serem qualificadas para isto, mesmo que a penetração seja desacoplada. A resistência intrínseca e, entretanto, melhor que qualquer barreira adicional.

O tratamento acústico e anti-vibração em geral envolve o uso de materiais elastômeros, e conduzem ao aumento da sensibilidade ao fogo. Exige-se, portanto, uma cautelosa análise de riscos de incêndio.

A figura 3.14 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de propulsão convencional típico, HEWITT e GARLICK (51). Detalhes podem variar de classe para classe porém os princípios básicos permanecem os mesmos. Para operação submersa, um motor de propulsão (usualmente uma máquina de dupla armadura e excitação independente) é acionado por um grande banco de baterias dividido em seções ou grupos. Para recarregar as baterias, o submarino deve vir à superfície ou "esnornquear", para usar seus diesel-geradores para a carga e propulsão, simultaneamente.

O controle de velocidade do motor principal é feito por um quadro elétrico de propulsão e é usualmente obtido por meio do chaveamento das armaduras do motor e grupos de baterias em várias combinações série/paralelo, atingindo em consequência, variações discretas na voltagem das armaduras e portanto variações equivalentes na rotação do hélice e velocidade do navio.

O controle contínuo de velocidade é obtido enfraquecendo os campos de excitação do motor principal, os quais são alimentados por conversores, através de reguladores controlados pelo quadro de propulsão (reostatos de campo). Para operar a velocidades muito baixas é necessário reduzir a tensão das armaduras do motor abaixo da voltagem mínima das baterias - portanto um controlador de baixa velocidade é necessário.

Durante os períodos de operação com esnorquel, os diesel-geradores entram em funcionamento, passando a alimentar o quadro elétrico de propulsão. Parte da energia gerada por eles é absorvida pelo MEP, parte pelas demais cargas não propulsivas (ditas "Carga Hotel") e o restante é utilizado para recarga das baterias.

Fica claro que apesar de existir uma configuração básica, há um grande número de variações para este sistema visando atender aos requisitos específicos de cada submarino e acompanhar o desenvolvimento tecnológico de seus componentes. Os submarinos atuais possuem um variado número de baterias parciais, armaduras do MEP e diesel-geradores, bem como diferentes níveis de sofisticação, desde controle digital totalmente automático até o semi-manual.

A escolha de uma configuração particular para o sistema determina o projeto de seus componentes individuais. Os equipamentos são especificamente projetados para uma aplicação particular e podem incorporar numerosas características não usuais para os equipamentos industriais e mesmo para os de navios de superfície.

Conceitos particularmente eficazes foram desenvolvidos ao longo dos anos 60-70 na Alemanha, para sua Marinha Nacional e para exportação, especialmente com respeito a:



- baixo nível de ruído irradiado;

- alta eficiência;

- alta disponibilidade (redundâncias e confiabilidade);

- elevada resistência ao choque;

- insensibilidade ao movimento do navio no mar (trim, banda, jogo, caturo);

- insensibilidade às condições ambientais (altas temperaturas e umidades do ar);

- caso requerido, projeto não-magnético ou com baixo campo magnético de dispersão.

Nos sub-ítem a seguir analisaremos os principais conceitos de propulsão empregados nas décadas de 70 e 80 e avaliaremos as atuais tendências para a década de 90.

### 3 . 4 . 1 - Conceitos dos Anos 70

O sistema de propulsão, conforme exemplificado pela classe alemã Tipo 209 (da qual o Brasil conta presentemente com 1 unidade operacional e mais três em construção), consiste de quatro grupos de baterias (120 elementos), quatro diesel-geradores (420 kW cada), um motor de propulsão de corrente contínua de dupla armadura (3700 kW) e um quadro principal de chaveamento. A subdivisão da bateria principal e do motor de propulsão permite amplas possibilidades de criar-se "degraus de velocidade" (figura 3.15). Disjuntores compactos e resistentes à choque assumem as funções de chaveamento (ligações série/paralelo) e de proteção, sendo associados a dispositivos de limitação de corrente, tais como fusíveis e relés de sobre-corrente, que limitam valores superiores a 100 kA. Estes podem ser chaveados remotamente por ar comprimido ou manualmente, no local.

Com as baterias ligadas em série e as armaduras ligadas em paralelo, a instalação opera na sua máxima voltagem, que pode ser reduzida ligando-se as armaduras em série; ligando-se as baterias em paralelo e as armaduras em série obtém-se nova redução, que pode ser ainda mais diminuída ligando-se as armaduras em paralelo.

O motor de propulsão é CC de dupla armadura, ou seja, dois motores eletricamente separados, montados num eixo e caraca comum. Para velocidades muito baixas são instalados enrolamentos auxiliares série de compensação para garantir a estabilidade da operação em paralelo. Características especiais de projeto distinguem estes motores com respeito ao baixo NRI, proteção contra imersão em água salgada, duração da vida útil, facilidade de reparos, etc. As perdas térmicas são dissipadas por ventiladores, controlados pela corrente nas armaduras, num circuito aberto de resfriamento a ar via trocadores de calor e água salgada.

A excitação pode ser obtida, conforme desejado, via

reostato de campo controlado remotamente, ou pelo moto-generador de excitação, sendo o último usado, nas chamadas "creeping speeds", velocidades muito baixas com mínimo ruído possível, como um conversor Ward-Leonard para os circuitos de armadura (figura 3.16). Dentro dos graus de velocidade, a rotação é ajustada pelo enfraquecimento do campo, por onde a queda de voltagem da bateria em função do tempo de descarga deve ser compensada.

A velocidade requerida é introduzida via um controlador combinado que serve como controlador de eixo de cames para o chaveamento dos grupos de baterias e armaduras e como transmissor de "set-point" para o ajuste da corrente de excitação, feita através de circuitos de controle analógicos atuando no moto-generador de excitação.

Ao longo dos anos 80, este conceito técnico básico foi parcialmente adaptado para os requisitos crescentes de baixo nível de ruído, eficiência, disponibilidade e automação, através das seguintes alterações:

- alternadores síncronos sem escovas com retificadores integrados passaram a substituir os antigos geradores CC de carga de baterias e de excitação;

- controle automático digital de velocidade com micro-processadores 8031;

- conversores de corrente de excitação transistorizados ("choppers") para controle de velocidade no degrau mais baixo.

### 3 . 4 . 2 - Conceito dos anos 80

Como resultado dos métodos mais refinados de detecção acústica, são requeridos níveis de ruído irradiado muito mais baixos para os submarinos, devendo então ser evitada a transmissão de ruído a estrutura ("structureborne noise") e ao ar ("airborne noise") pelos equipamentos da propulsão.

O primeiro passo é a melhoria do projeto do motor de propulsão. Como um exemplo desta melhoria, formas especiais para os polos foram desenvolvidas com o objetivo de reduzir o ruído excitado magneticamente por meio de suavização das variações de fluxo. Arranjos especiais dos porta-escovas foram implementados para reduzir o nível de ruído dependente da frequência lamelar. Outra possibilidade é o uso de circuito fechado de ar de resfriamento, que reduz os níveis de ruído transmitido ao ar e permite a montagem dos conversores de corrente de armadura ("choppers") nas laterais ou na parte superior do motor. Os "choppers" permitem melhorar significativamente a eficiência do motor em baixa velocidade, a qual determina o máximo alcance submarino. Associados com um maior número de elementos nos grupos de baterias e, portanto, numa maior voltagem de cada grupo, o

número de graus de velocidade pode ser reduzido (figura 3.16) e suas respectivas faixas ampliadas. Isto, por sua vez, reduz a necessidade de chaveamentos, reduzindo o ruído transmitido pela operação de disjuntores.

Os "choppers" de armadura (figura 3.17) satisfazem os requisitos de redução de ruído em virtude de empregarem transformadores com circuito magnético sem entreferro ("airgap free"), com núcleo em material amorfo e seus circuitos de disparo serem compostos por módulos transistorizados.

Um módulo específico serve para reversão rápida do motor e parada do submarino. Com os contadores abertos, a corrente do motor passa através de um diodo de reversão e é comutada para a bateria em intervalos de pulso. Isto permite que o campo de excitação seja invertido, enquanto a velocidade é ainda positiva, sem picos de corrente indesejáveis através dos diodos principais do "chopper" de corrente de armadura.

Os módulos transistorizados dos "choppers" de corrente de armadura e excitação são diretamente resfriados a água doce, com controle de temperatura. É dada especial ênfase à compatibilidade eletro-magnética ("Electro-Magnetic Compatibility - EMC"), principalmente com respeito a minimizar a emissão de corrente de "ripple" e a resistência ao choque, que é favorecida pela montagem dos "choppers" sobre o motor de propulsão.

Os "choppers" de armadura e de excitação são projetados em combinações que são autárquicas e independentes das voltagens externas. Fazem parte destas combinações circuitos de controle em malha aberta e fechada e de monitoração. Um sistema de automação concebido como sistema super-ordenado e usado para controle automático de velocidade (controle de disjuntores, controle de velocidade e monitoração do "chopper"), enquanto os circuitos de controle em malha fechada subordinados são de projeto analógico devido aos seus requisitos dinâmicos.

Os reatores de campo e moto-geradores de excitação do conceito dos anos 70 são substituídos por conversores de corrente de excitação transistorizados ("choppers"), redundantes. Isto torna possível dispensar os enrolamentos série de compensação do motor de propulsão, o que por sua vez, melhora as características de operação e eficiência do motor, simplificando os circuitos de chaveamento dos graus de velocidade.

Uma considerável melhoria na disponibilidade da instalação é obtida pela sua divisão consistente em duas instalações parciais, designando-se cada função de chaveamento a um disjuntor separado e provido-se redundâncias do nível de potência ao nível de controle e automação, através de unidades idênticas e intercambiáveis. Isto prove duas instalações parciais completamente independentes a nível funcional, cada uma com 50% da potência total. Desde que o número de grupos de baterias (com maior número de elementos cada um) é reduzido, não é significativo

o aumento no volume dos quadros elétricos de chaveamento.

O isolamento elétrico da instalação é dimensionado para a ligação, série dos grupos de baterias sem baixas (cerca de 1000 V), sendo é possível continuar a operação mesmo com uma falha de aterramento simples.

O sistema de controle operado a came é desenvolvido para várias funções de chaveamento (por exemplo, disjuntores dos ventiladores, disjuntores de partida, disjuntores de excitação em emergência, etc.) divididas em chaveamentos básicos, componentes de elementos de chaveamento operados por cames e acessórios especiais. Os disjuntores são controlados e operados da mesma maneira que os disjuntores CC.

### 3 . 4 . 3 - Conceito dos anos 90

Os Motores Elétricos de Propulsão (MEP), usados no passado e até o presente com grande sucesso no acionamento do eixo de submarinos, são máquinas elétricas controladoras convencionais de CC, de excitação separada, as quais são projetadas e construídas especificamente para tal emprego. Elas atingiram um estágio de desenvolvimento técnico tão elevado que o seu potencial de aperfeiçoamento está praticamente esgotado.

A eficiência, relação peso/potência, volume unitário e valores das suas assinaturas (ruído, campos magnéticos de dispersão, compatibilidade eletro-magnética, etc.) são, entretanto, dados do motor de grande significado para o alcance submerso, capacidade de combate e discriminação do submarino. Sua contínua melhoria a longo termo é, portanto, indispensável. Esta busca de aperfeiçoamento tem levado ao desenvolvimento de uma máquina radicalmente diferente: o Motor Síncrono de Polos em Magneto Permanentes MSPMM ("Permanent Magnet Motor" ou "Electronic Motor"), com inversores, equipamentos de controle em malha aberta e fechada e monitoração integrados.

O conceito do MSPMM, cuja aplicação não é limitada a submarinos, foi introduzido no meio naval em 1986 na Conferência Internacional sobre Máquinas Elétricas realizada em Munique e em 1987 por artigo apresentado ao Schiffbautechnische Gesellschaft (S16) alemão. A construção fundamental deste motor é apresentada na figura 3.18.

Algumas das características principais para emprego naval seriam:

- pequeno volume unitário e favorável eficiência:

• comparado com uma máquina controladora CC, o MSPMM de mesmo torque é consideravelmente menor! com mesmo volume unitário e mesma potência, o MSPMM pode operar



a rotações significativamente menores e o propulsor pode ter maior diâmetro! estas são propriedades que resultam em menor emissão de ruído pelo navio e melhor eficiência propulsiva!

- campo rotórico gerado por magnetos permanentes:

o rotor tem a forma de cilindro vazado! os magnetos permanentes são montados na circunferência externa do cilindro, enquanto os módulos de eletrônica de potência são arranjados no seu interior! a eliminação das perdas de excitação, entre outras razões, levam a maiores eficiências que os motores CC, particularmente nas baixas velocidades!

- refrigeração direta a água:

devido aos magnetos permanentes, o rotor só é sujeito a pequenas perdas, logo, pode-se dispensar os complexos e ruidosos sistemas de refrigeração a ar! as partes ativas do estator, bem como a eletrônica de potência, pode ser diretamente resfriada a água via dutos e placas!

- enrolamento do estator de múltiplas fases:

as fases são eletricamente separadas entre si; de modo a otimizar a eficiência, elas podem ser agrupadas em diferentes configurações por meio de elementos de chaveamento internos e alimentadas por diferentes fontes de energia por meio de chaveamentos externos!

- as correntes de fase são ajustadas em magnitude e forma de onda via inversores de pulso:

a forma de onda das correntes e frequência de pulso dos inversores são selecionados com base na minimização do nível de ruído transmitido!

- inversores integrados:

os inversores são compostos por transistores de potência com conexão Darlington e combinados com sua parte de controle e regulação de corrente, formando módulos que são fixados numa estrutura presa ao estator, de forma a se projetarem para o interior do cilindro vazado! desta forma o volume e o peso são reduzidos e a EMC é melhorada pelo efeito de blindagem do rotor cilíndrico!

- computador de velocidade:

dois computadores trabalhando no princípio mestres/escravos com controle mútuo são integrados ao



motor; eles implementam não só o controle de velocidade, como também a inteira monitoração do motor e iniciam os alarmes de falha no caso de perturbações e, quando necessário, a redução automática de potência ou desligamento da máquina; os computadores comunicam-se com o sistema de controle integrado de plataforma do submarino por meio de interfaces seriais.

As fontes de energia disponíveis para suprir o motor (grupos de baterias e diesel-geradores para os sistemas convencionais) são, conforme a figura 3.19 conectadas ao quadro de distribuição elétrica, que por sua vez é ligado aos polos do motor.

O barramento principal é dividido em duas partes por razões de redundância. Isto é feito levando-se em conta o número de fontes de energia e as correspondentes divisões dos sistemas auxiliares do MSPHM a serem alimentadas. Esta divisão é possível através do projeto do enrolamento do estator do motor, o que garante que mesmo com a perda total de uma seção do barramento principal e da abertura do disjuntor de ligação, o acionamento do eixo seja disponível a 50% de sua potência máxima. Mesmo com a falha de um ou mais módulos de inversão do motor, a propulsão é mantida a uma certa fração do torque máximo.

O projeto do quadro de distribuição é particularmente simples usando-se o MSPHM, porque não há necessidades de chaveamentos série/paralelo dos circuitos de armadura. Poucos degraus de velocidade reduzem, por outro lado, o ruído de operação de disjuntores e também a dimensão dos quadros elétricos.

O sistema distribuído de controle digital (SDCD) dos submarinos do futuro farão altamente automatizados a ligação entre o operador do console de controle integrado de plataforma com os controladores locais do sistema de propulsão. Desta forma, o sistema integrado de computadores do MSPHM receberia os valores de entrada para o "set point" da velocidade, modo de operação, etc. via uma interface serial com a via de dados ("data bus") do SDCD da plataforma. De modo inverso, o SDCD receberia o valor presente de todas as variáveis monitoradas e controladas do motor necessárias à operação do navio e à identificação de condições de falha.

O fluxo de informações entre o quadro elétrico de distribuição principal e o sistema de controle do motor se daria de modo similar, reduzindo significativamente o número de cabos entre os equipamentos. Os chamados "terminais inteligentes" no quadro de distribuição servem como interface para esta condição, suprindo todos os dados necessários sobre condições de chaveamento, correntes, etc. para o sistema de controle local do motor. Por outro lado, as configurações de alimentação desejadas são ajustadas pelo controle central de plataforma via esta interface.

O motor requer estas informações para reconhecer os modos de operação e ajustar sua potência automaticamente conforme a disponibilidade de fontes de energia. Somente para transmissão de dados críticos, que não admitem os atrasos médios na transmissão por via de dados, é requerida a ligação direta por fios entre o motor e o quadro de distribuição. A limitação de corrente no motor é um exemplo desta necessidade.

Por razões de segurança e redundância, o sistema de propulsão deve também ser capaz de operar após falha no sistema de controle de plataforma ou falha de seus dois computadores. Neste caso o sistema pode ser operado a potência reduzida de uma estação de controle em emergência.

EXPOSIÇÃO DE CONHECIMENTOS  
SISTEMA DE CONTROLE DE PLATAFORMA

Existe, teoricamente, um grande numero de tipos genericos de reatores que poderiam ser aplicaveis a propulsao de submarinos. Se considerarmos apenas os diferentes tipos de fissao, tipos de combustivel, tipos de refrigerante, tipos de moderadores, tipos de controle e formas do combustivel e fizermos um calculo simples de analise combinatoria, poderiamos chegar a uma infinidade de tipos basicos:

- tipo de fissao: termica (ate 0.1 eV)  
epitermica ou intermediaria (0.1 a 10 eV)  
rapida (acima de 10 eV)

- tipo de moderador: agua ( $H_2O$  ou  $D_2O$ )

liquido organico  
solido (grafite,  $BeO$ ,  $ZrH$ )

- tipo de combustivel: U natural (0.7% de U-235)

U levemente enriquecido (ate 5%)  
U de enriquecimento medio (ate 20%)  
U altamente enriquecido (ate 90%)  
Plutonio-239  
Uranio-233

- tipo de refrigerante: agua ( $H_2O$ ,  $D_2O$ )

liquido organico (difenil, terfenil)  
metal liquido (Na, NaK, Bi, Pb)  
gas (ar,  $CO_2$ ,  $H_2$ , He)

- tipo de controle: barras mecanicas (absorvedores solidos)

venenos queimaveis  
venenos diluidos  
movimento do moderador  
movimento do refletor

- forma do combustivel: combustiveis metalicos

combustiveis ceramicos  
dispersoes ("cermets")  
combustiveis metalicos  
combustiveis aquosos  
combustiveis gasosos

Em realidade, a grande maioria das possiveis combinacoes ou possuem grandes inconvenientes tecnicos, ou nunca passaram de proposicoes teoricas, ou sao mesmo totalmente inviaveis. Poderiamos considerar, entao, as opcoes ressaltadas em negrito na lista anteriormente apresentada como passiveis de analise.

Os reatores epitermicos ou intermediarios nao possuem nenhuma vantagem sobre os termicos e rapidos; o uso de liquidos organicos como moderador e refrigerante nunca foi verificado por experimentacao consistente; o combustivel U natural conduz a

- serem extremamente compactos e leves;
- serem extremamente seguros e controláveis;

Quando se pensa em termos de tendências para o futuro previsível, pode-se afirmar com razoável confiança que os reatores térmicos resfriados a água leve continuaram predominando por longo tempo no meio naval, pois somente esta classe tem demonstrado atender aos requisitos de emprego militar no ambiente marinho. Estes critérios poderiam ser resumidos como:

Poder-se-ia ainda considerar como eventualmente viáveis para emprego naval os reatores resfriados a gás, associados a uma instalação de turbina a gás em ciclo fechado. Os problemas deste tipo de reator residem no fato de que, para as temperaturas relativamente baixas (apesar de muito mais altas que aquelas associadas aos reatores resfriados a água e a metal líquido) a que os materiais hoje disponíveis resistem sua operação, este reator é muito pesado, volumoso e de insuficiente resistência ao choque. Recentes pesquisas nos chamados HIGR ("High Temperature Gas Reactors") associadas aos desenvolvimentos de novos materiais podem, entretanto, mudar este quadro no futuro.

Verifica-se também que todos estes reatores navais são associados a instalações a vapor em ciclo Rankine, sendo o acionamento do eixo, em sua grande maioria, feito por transmissão direta turbina-redutora. As exceções, dotadas de acionamento turbo-elétrico, são as unidades únicas das classes americanas "Tullibee" e "Glenard P. Lipscomb", as quatro unidades da classe francesa "Rubis" (com mais quatro unidades em construção na versão "Amethyst") e as unidades soviéticas dotadas de reatores resfriados a metal líquido.

Se analisarmos as instalações atualmente em operação, identificamos que a imensa maioria dos reatores navais são térmicos, moderados e resfriados a água leve, combustível cerâmico de enriquecimento médio, controlados por barras mecânicas ("short term") e venenos queimáveis ("long term"). As únicas exceções seriam as 6 unidades da classe "Alfa" e a única unidade da classe "Mike", que recentemente (1969) naufragou após incêndio na costa da Noruega, soviéticas e a única unidade da antiga classe "Seawolf" (1956) americana. Os soviéticos possuem reatores rápidos resfriados a chumbo-bismuto líquido. Já o americano possui reator epitérmico, resfriado a sódio líquido.

reatores volumosos, incompatíveis com o emprego naval; o U altamente enriquecido não conduz a significativas vantagens, em face aos elevados custos e aos problemas associados à segurança e salvaguardas ao manusear-se material com potencial para emprego em explosivos; o Pu-239 e o U-233 são possibilidades não verificadas experimentalmente, porém com problemas na própria produção destes materiais; o controle com venenos diluídos e movimentos do moderador ou refletor são também possibilidades não verificadas experimentalmente; os combustíveis líquidos e gasosos se enquadram no mesmo caso.



- Note-se, entretanto, que, ao considerarmos os reatores térmicos resfriados e moderados a água leve, falamos numa grande família de reatores compactos, que operam em diferentes condições e que são baseados em conceitos diferentes (figura 3.20). Poderíamos classificá-los fundamentalmente em dois grandes grupos:
- Pressurized Water Reactors - PWR, reatores pressurizados, onde a água permanece, ao longo de todo o processo, no estado líquido, sendo a instalação a vapor para conversão de energia mecânica ou elétrica fisicamente separada do reator (circuito secundário);
  - "Boiling Water Reactors - BWR", reatores a água em ebulição, onde ocorre vaporização no interior do reator, não havendo portanto separação física da instalação de conversão de energia.

- "Boiling Water Reactors - BWR", reatores a água em ebulição, onde ocorre vaporização no interior do reator, não havendo portanto separação física da instalação de conversão de energia.

- o BWR é claramente mais volumoso que o PWR, devido à necessidade de coletar o vapor, que é gerado com título da ordem de 2.5%, e em seguida secá-lo e purificá-lo, com respeito à eventual contaminação por produtos de fissão, antes de sua entrada na turbina;

- mesmo admitindo-se que o processo de purificação anteriormente citado seja perfeito, a água, que sempre possui algum ar dissolvido, ao vaporizar em contato com o núcleo, é irradiada por nêutrons, gerando o nitrogênio-16, isótopo radioativo de meia-vida relativamente longa, que irá contaminar todo a instalação a vapor de conversão de energia, restringindo assim o acesso à praça de máquinas!

- os efeitos dos movimentos de navegação ou de chegada na utilização adequada dos elementos comuns são avaliados em função das necessidades de utilização das instalações operacionais.

Restringindo-nos então exclusivamente aos reatores PWR, ainda assim podemos distinguir diferentes tipos:

[illegible]



- convecção forçada por bombas;
- convecção natural;

- quanto ao arranjo do circuito primário:

- integral, com gerador de vapor no interior do vaso, podendo ser o gerador de vapor em tubos "U" verticais, tubos retos verticais ou tubos helicoidais;
- segregado, com gerador de vapor externo, ligado por tubulações ao vaso ("loop");
- acoplado, com gerador de vapor externo, porém fixado ao vaso, sem tubulações ("close coupled");

- quanto a pressurização:

- pressurizado externamente, por equipamento separado
- auto-pressurizado.

A grande maioria das instalações PWR de propulsão de submarinos opera em circulação forçada (na maior parte de suas velocidades operacionais) e tem arranjo segregado, com pressurizador independente (figura 3.20). As exceções são os reatores das 11 unidades (mais 6 em construção) da classe de submarinos balísticos americanos "Ohio", a única unidade da classe experimental de submarinos de ataque "Nautilus", projetados para operar na maior parte de sua faixa de velocidades em circulação natural, e as 4 unidades (mais 4 em construção) da classe francesa "Rubis/Amethyste", com reatores integrais, com circulação forçada a partir de 80% de sua potência nominal, gerador de vapor em tubos "U" verticais, com pressurização separada (figura 3.22).

O reator integral, com circulação forçada, geradores de vapor em tubos helicoidais, auto-pressurizado, tem sido objeto de muitas propostas de reatores para emprego naval, inclusive para submarinos (fig 3.24 e 3.25), tendo atingido sucesso operacional na propulsão do navio de superfície experimental civil alemão "Otto Hahn" (figura 3.23). Não há, entretanto, até o presente, nenhum reator deste tipo instalado em submarinos militares.

Este último tipo de reator integral tem algumas vantagens sobre aquele empregado na classe "Rubis" tais como:

- conjunto mais compacto, pois os trocadores de calor helicoidais ocupam menos espaço e a auto-pressurização dispensa um pressurizador externo relativamente volumoso;

- o arranjo do mecanismo de acionamento de barras de controle (MAB) no topo do vaso é usual, mais simples e, portanto, mais confiável; os geradores de vapor em tubos em "U" impedem este arranjo, deslocando os MAB para as laterais do vaso do reator, requerendo uma transmissão em "L", sem dúvida mais complicada;

- nos trocadores de calor helicoidais, pelo fato do fluido a ser aquecido se encontrar no interior dos tubos (contrariamente

aos de tubos em "U", onde o fluido de aquecimento é o que está no exterior dos tubos), é possível gerar-se vapor ligeiramente super-aquecido, evitando a necessidade de separadores de unidade (esta possibilidade praticamente inexiste no caso dos tubos "U")!

Entretanto, este tipo de reator tem algumas dificuldades técnicas, tais como:

- a auto-pressurização através vapor no topo do vaso do reator, geradopela manutenção da água de resfriamento na condição de líquido saturado na saída do núcleo, torna sua operação, de forma similar ao BWR, sensível aos movimentos do navio no mar e ao choque, o que pode causar flutuações de potência indesejáveis; outra desvantagem da auto-pressurização é a possibilidade de absorção de gases pelos mecanismos selados do MAB acima do espaço da bolha de vapor e consequentes flutuações na pressão no interior do reator durante transientes normais de variações na potência; com efeitos adversos de fadiga do vaso de pressão do reator (VPR); este último problema pode, entretanto, ser aliviado aumentando-se o espaço ocupado pela bolha de vapor!

- os trocadores de calor helicoidais requerem maior controle da composição química da água do secundário para evitar corrosão sob tensão e "pitting", incluindo desionizadores, de modo a proteger as regiões de secagem do vapor na saída dos tubos; além disto, requerem um sistema de controle automático mais complicado, com rápidas respostas à demanda de vapor e à potência térmica do reator, de modo a evitar o araste de água; sofrem também de problemas de estabilidade a baixas cargas e são mecanicamente mais complexos.

O reator PWR com arranjo acoplado ("Close Coupled - CCPWR") é um projeto entre o arranjo segregado e os reatores integrals, que dispensa a tubulação do circuito primário do primeiro, sem recarir na íntima inter-dependência dos componentes principais da instalação do segundo (figura 3.20). Não há, até o presente, nenhuma experiência disponível com este tipo de instalação e os problemas de segurança criados pelas conexões entre as massas grandes e independentes do reator e geradores de vapor não o tornam uma opção atrativa para uma aplicação na qual preconizam-se severos requisitos de choque, como é o caso da aplicação na propulsão de submarinos.

Todas estas considerações levam-nos a acreditar que as tendências no projeto de reatores nucleares para aplicação futura em submarinos devam ser:

- maximização das características de circulação natural, ampliando-a para a maior parte da faixa de velocidades operacionais do navio, o que é, obviamente, muito favorável sobre o ponto de vista do nível de ruído irradiado, pois elimina o uso das inerentemente ruidosas bombas de circulação!

- desenvolvimento de reatores integrals, que são mais

leves, compactos e mais seguros pois praticamente eliminam as possibilidades de ocorrência de grandes acidentes de perda de refrigerante ("loss of coolant accidents" - LOCA) devido ao rompimento de tubulações principais do primário e mais favoráveis a operação em circulação natural do que os reatores de arranjo segregado ("loop"); esta última característica vem a aumentar sua segurança à medida que garante o resfriamento do núcleo, pós-desligamento, por meios passivos.

Apesar de já terem sido propostos reatores integrals que operem exclusivamente em circulação natural, acreditamos que essa não seja uma tendência para a propulsão de submarinos, pois, de um reator deste tipo, poder-se-ia extrair potência adicional introduzindo-se bombas de circulação. Como a capacidade de desenvolver máxima velocidade é crucial para os submarinos, considerando a operação nesta condição ser restrita a períodos relativamente curtos da missão e que os requisitos de ruído são secundários neste caso, julgamos que o objetivo a ser perseguido é o de restringir ao máximo a necessidade de operação destas bombas, sem dispensá-las de todo.

Uma possível exceção a este enfoque seriam reatores destinados a compor o SPIA de submarinos de propulsão híbrida ou mono-submarinos nucleares (figura 3.25). Para este emprego, as características de "carregador de baterias" fazem com que estes reatores operem a maior parte do tempo como "geração elétrica de base", ou seja, não sujeito a transientes, com o navio em velocidades silenciosas. Neste caso, a condição do reator operando a máxima potência é a mais comum, sendo portanto fundamentais os requisitos de ruído.

Nos sub-ítem a seguir, analisaremos as tendências associadas a aspectos específicos das instalações propulsoras nucleares de submarinos, com respeito aos reatores PWR integrals e segregados ("loop").

### 3.5.1 - Combustível e Núcleo

Materiais combustíveis nucleares são utilizados nos reatores sob diversas formas de compostos. De maneira geral, procura-se associar o urânio a materiais de baixa seção de choque de absorção de nêutrons ou elementos moderadores de nêutrons, de forma a trabalhar-se com uma relação teor de urânio / concentração isotópica de U-235 adequada. A tabela 3.26 apresenta alguns compostos de urânio utilizados como combustível nuclear, verificando-se a relação do teor de urânio nestes compostos.

A escolha do material combustível dependerá das características de operação do reator, bem como das limitações de cunho tecnológico ou político. Os principais materiais combustíveis são utilizados na forma de compostos metálicos, dispersões e materiais cerâmicos. A tabela 3.27 mostra os

## combustíveis de urânio mais utilizados.

Os combustíveis metálicos não têm emprego em reatores de propulsão naval devido, principalmente, às limitações de temperatura máxima de operação deste material (problemas associados a danos de radiação). Os combustíveis em dispersões são desenvolvidos recentemente, não tendo ainda emprego no meio naval.

Dentre os combustíveis cerâmicos, o  $UO_2$ , devido à sua relativamente alta densidade de átomos de U (88,2% em peso de urânio no composto), pode ser utilizado com menores enriquecimentos e, aliado às suas excelentes características de comportamento sob irradiação, é o combustível mais utilizado em reatores térmicos. Tem sido utilizado principalmente em duas formas de elementos combustíveis: tipo placa e tipo vareta cilíndricas.

A utilização do  $UO_2$  em placas é possível através da montagem de um conjunto de plaquetas planas de  $UO_2$  sinterizado, de pequena espessura, em compartimentos individualizados e estanques, revestidos por duas placas externas de zircalloy. A placa combustível assim constituída é denominada "caramelo".

Os elementos combustíveis com vareta cilíndricas são utilizados na maioria dos reatores de potência comerciais. O  $UO_2$  é usado nestes reatores na forma de pastilhas cilíndricas sinterizadas. Estas pastilhas são montadas no interior de tubos metálicos, de zircalloy ou aço inoxidável austenítico, formando as vareta combustíveis.

As diferenças básicas entre os dois tipos de elemento, placa e vareta, são a relação de densidade de potência, área de transferência de calor, resistência ao choque e o desempenho sob irradiação, todas favoráveis ao combustível tipo placa, ROSADA SILVA [127].

Existem alguns combustíveis em dispersões metálicas que possuem atrativos para o emprego naval. Neste caso se enquadraram as ligas do tipo U-ZrH, que são utilizadas em reatores de pesquisa do tipo TRIGA e foram propostas como combustível para o SPINA nuclear canadense AMP5, anteriormente citado. A principal característica desse tipo de combustível é a de possuir combustível e moderador contidos numa mistura essencialmente homogênea, proporcionando um grande coeficiente de reatividade negativa e uma baixa taxa de liberação de produtos de fissão. Estas características são extremamente favoráveis sob o ponto de vista de segurança do reator.

Não só para o material combustível, como também para o material empregado nas estruturas de suporte dos elementos combustíveis, existem opções a serem feitas, basicamente entre o aço inoxidável e o zircalloy. O aço inox tem vantagem sob o aspecto de confiabilidade em serviço, apesar de ambos apresentarem

uma baixa taxa de defeitos como encamisamento do combustível. Com o zircalloy existe o perigo de rompimento se uma vareta defeituosa não for retirada do reator num intervalo razoavelmente curto de tempo, o que pode não ser compatível com os períodos de recarga do submarino.

Adicionalmente, o encamisamento de zircônio apresenta problemas de "creeping" após períodos apreciáveis a baixa potência, tais que rápidas rampas de potência subsequentes podem levar a fratura. O aço inox, entretanto, tem efeitos adversos na economia de nêutrons (relativamente alta seção reta de absorção) e portanto nos custos do inventário de combustível residente no núcleo.

### 3 . 5 . 2 - Vaso de Pressão do Reator

O vaso de pressão de um reator integral é de maior porte e mais complexo do que o vaso de uma instalação segregada, pois deve conter o gerador de vapor, além do núcleo, e também possuir aberturas de acesso para as bombas de circulação de refrigerante, caso não opere exclusivamente em circulação natural.

A figura 3.28 apresenta um vaso típico de instalações segregadas, que pode ser comparado com as figuras 3.22, 3.23 e 3.24 que apresentam soluções diferentes para vasos de instalações integrais. Deve-se notar que o conceito adotado no reator de classe de submarinos francesa "Rubis" difere significativamente dos outros dois exemplos, pois o uso de geradores de vapor em tubos "U" faz com que a parte superior do vaso não seja pressurizada à mesma pressão do refrigerante primário (que circula pelos tubos) e sim à pressão de vapor do secundário.

Sob o aspecto de segurança, é possível fazer-se uma comparação numérica de probabilidade de falhas do envelope primário para os dois casos por um método estatístico, THOMAS [149], a qual favorece, a princípio, a instalação segregada. Uma avaliação precisa requer, entretanto, uma rigorosa análise de mecânica da fratura.

### 3 . 5 . 3 - Geradores de Vapor

Os geradores de vapor (GV) podem ser de recirculação, cujo o tipo em tubos "U" é típico, que requerem separadores e secadores, ou de passe único ("once through"), como os de tubos helicoidais. Nas instalações segregadas são utilizados os primeiros. Nos reatores integrais utiliza-se, em geral, os últimos, devido às dificuldades de desenvolver um projeto compacto incluindo os separadores e secadores requeridos pelos GV em recirculação, apesar do reator do "Rubis" adotar tal solução.



Como já foi visto, as duas soluções para os reatores integrais têm vantagens e desvantagens que devem ser acessadas cuidadosamente, tendo como critério básico as características de segurança e as dificuldades tecnológicas de cada uma destas opções.

Uma maneira de melhorar as condições de recirculação nos GV de tubos em "U" é dotá-los de bombas de recirculação, similares às existentes nos reatores BWR, melhorando assim seus coeficientes de troca de calor e consequentemente tornando-os mais compactos. Estas bombas seriam do tipo "jet pump", cuja descarga é feita através de ejetores (figura 3.29).

### 3 . 5 . 4 - Bombas de Circulação do Circuito Primário

As bombas de vazamento zero tipo "canned pumps" são empregadas tanto para instalações segregadas como integrais, devido à sua relativa simplicidade e excelente confiabilidade, demonstrada pela grande experiência operacional com este tipo de bomba, tanto em reatores navais como de terra.

No caso de reatores integrais, pode-se optar por diferentes posicionamentos com relação ao vaso do reator, conforme visto no sub-ítem 3.5.2. A posição adotada na instalação do navio de pesquisas "Otto Hahn" faz com que o conjunto tenha maior altura, porém simplifica o projeto dos internos do reator. A solução do submarino "Rubis" diminui a altura, porém aumenta o diâmetro do conjunto. A terceira solução é a mais compacta, porém a que leva a maior complexidade dos internos.

### 3 . 5 . 5 - Válvulas de Grande Porte

As instalações integrais não possuem grandes válvulas de bloqueio no circuito primário, porém requerem válvulas de grande estanqueidade nas linhas de vapor e de água de alimentação do circuito secundário, que ficam, neste caso, junto ao vaso do reator. Estas válvulas compõem as fronteiras do circuito primário no caso de vazamento nos tubos do GV, devendo impedir o ingresso da água de resfriamento do reator, potencialmente ativa, no circuito secundário.

Nas instalações segregadas, a opção usual é por válvulas de isolamento de selagem simples, atizadas pela própria água pressurizada do primário, de modo que um GV com vazamento possa ser isolado sem desligamento total do reator, sendo posteriormente seus tubos defeituosos "plugados" em instalações de terra adequadas. As correspondentes válvulas de vapor e de água de alimentação devem também ser fechadas nesta situação, porém podem ser de projeto mais convencional que nos reatores integrais, pois a água ativa que tenha vazado através do assento das válvulas do

Circuito primário é efetivamente contida na água de alimentação e remanescente no interior do GV, a qual é resfriada e despressurizada.

### 3 . 5 . 6 - Pressurização

As instalações integrais podem ser pressurizadas por meio de um pressurizador externo aquecido eletricamente, como nas instalações segregadas, ou auto-pressurizadas pelo vapor formado no vaso do reator, acima do núcleo.

Para viabilizar-se a auto-pressurização, é necessário manter o fluxo de água de resfriamento na saída do núcleo do reator nas condições de líquido saturado, o que cria algumas dificuldades conforme já foi visto anteriormente.

Os pressurizadores externos compreendem um vaso cilíndrico com cerca de dois terços de seu volume cheio de água, dotado de resistências de imersão. Estas mantêm a temperatura de saturação correspondente à pressão de operação do primário. As elevações de pressão durante surtos no volume do refrigerante é limitada a valores relativamente pequenos. O vaso do pressurizador é projetado de forma a possibilitar espaço para os aquecedores, e para o colchão de vapor acumulado no seu topo e garantir que os aquecedores, normalmente energizados, permaneçam submersos mesmo nos mais severos transientes e nas mais desfavoráveis atitudes do submarino (trim e banda). As quedas de pressão do sistema são compensadas pelo aumento do volume de vapor no topo do pressurizador, obtido pelo aumento da corrente elétrica nos aquecedores. As elevações de pressão são compensadas pela aspersão de água de resfriamento no topo do pressurizador, reduzindo o volume da "bolha" de vapor.

### 3 . 5 . 7 - Flexibilidade do Projeto e Manutenção

As principais unidades de uma instalação segregada, que são interligadas pelas tubulações do primário, oferecem ao projeto de cada unidade um considerável grau de independência, de modo que todas as alterações, e particularmente aquelas relacionadas à segurança, que são necessárias nos estágios iniciais de projeto e desenvolvimento, ou mesmo aquelas posteriores, resultado da experiência em serviço, podem ser feitas com um mínimo de perturbação na instalação como um todo.

Inversamente, numa instalação integral, onde as mesmas unidades básicas estão intimamente interligadas, mudanças em um componente geram impacto em toda a instalação.

Esta comparação fornece uma indicação da facilidade de manutenção que pode ser esperada de uma instalação segregada, onde

## 3 . 5 . 8 - Circuito Secundário

todas as unidades, aparte o vaso do reator, são muito mais facilmente acessíveis e, na maioria dos casos, podem ser reparadas ou substituídas sem perturbações nos demais componentes da instalação. Os problemas de manutenção e reparo que surgem numa instalação integral quase sempre envolvem acesso ao vaso de pressão do reator, com todas as dificuldades de manipulação decorrentes de ambiente de alta radiação.

A instalação a vapor associada aos reatores de propulsão de submarinos são, em certa medida, bastante semelhantes às de navios de superfície. As diferenças básicas encontram-se nos critérios de otimização empregados.

Numa instalação a caldeiras a óleo, busca-se as máximas temperaturas e pressões de operação, associadas a um relativamente elevado grau de superaquecimento, com vistas a otimizar o rendimento do ciclo Rankine. As condições extremas de operação são limitadas pela construção mecânica dos componentes. Visando também esta otimização, usa-se o vapor extensivamente para acionamento de máquinas auxiliares (bombas, etc.) e para serviços gerais do navio.

Numa instalação associada a reator PWR, as condições do vapor de alimentação são limitadas pelas relativamente baixas temperaturas da água de resfriamento (250-300°C), condições pela máxima pressão do sistema primário viável pelo aspecto de construção mecânica dos equipamentos, na ordem de 150 atm, e pela margem de segurança termo-hidráulica ("Departure from Nucleate Boiling - DNB"), da ordem de alguns graus celsius, dado que deve-se garantir a não ocorrência de vaporização no primário. O emprego de GV em recirculação inviabiliza, na prática, a obtenção de superaquecimento do vapor, o que leva aos inconvenientes de emprego de turbinas para operação na faixa do vapor saturado. Os aspectos de segurança da instalação levam a limitações no uso dos meios convencionais empregados para melhorar a eficiência do ciclo, tais como regeneração e pré-aquecimento e no uso de vapor para acionamento de auxiliares (e usado preferencialmente o acionamento elétrico).

O resultado final destas limitações é um baixo rendimento global das instalações a vapor nucleares com relação às convencionais. Poder-se-ia imaginar que este não seria um problema, pois contrariamente às instalações convencionais, onde existe um suprimento limitado de óleo, as instalações nucleares possuem um suprimento virtualmente infinito de energia, o que sem dúvida é uma realidade. Deve-se, entretanto, também considerar que baixa eficiência não implica exclusivamente em gasto elevado de combustível, mas também, e principalmente no caso nuclear, em baixa relação peso/potência e volume/potência, com suas consequências sobre o aumento do deslocamento, mantida a potência constante, ou redução da velocidade máxima, mantido o volume

constante.

Este problema pode ser contornado, com excelentes resultados, conforme demonstrado pelos soviéticos, pela opção por reatores resfriados a metal líquido, nos quais a pressão baixa no primário pode-se obter elevadas temperaturas, permitindo-se chegar a condições de vapor similares as das instalações convencionais. A classe de submarinos "Alfa" é um exemplo desta aplicação, onde, com reduzido deslocamento (da ordem de 3200 t) chega-se a altíssimas velocidades (da ordem de 45 nós).

Um dos meios de contornar-se as limitações impostas pelas baixas temperaturas do primário dos PWR seria o emprego de fluidos de trabalho do secundário alternativos ao vapor d'água, tais como os compostos halogenados (diversos tipos de freon). Esta solução de fato tem sido adotada no projeto de SPIA nucleares de baixa potência, tais como o anteriormente citado AMP5 canadense. Neste caso aquelas limitações são ainda mais graves, pois, buscando-se a segurança intrínseca, a pressão do primário é muito reduzida.

### 3 . 5 . 9 - Acionamento do Eixo Propulsor

Como já observamos, o acionamento direto por turbina/redutor predomina na propulsão de submarinos nucleares. Entretanto o acionamento turbo-elétrico possui algumas interessantes vantagens:

- flexibilidade da instalação: As máquinas principais (turbinas) não necessitam ser instaladas nas vizinhanças do eixo. O número, tamanho e arranjo das máquinas principais podem ser determinados com base em considerações de confiabilidade, facilidade de acesso e outras;

- confiabilidade de operação: Desde que vários geradores e motores de propulsão podem ser usados, maior confiabilidade é garantida, já que a perda de uma unidade não resultará em completa perda de potência. Adicionalmente, o serviço e manutenção de várias unidades menores de construção idêntica pode ser desempenhada mais eficiente e facilmente que uma unidade maior;

- facilidade de operação: Com a propulsão elétrica as funções de controle podem ser reduzidas a relativamente poucas e simples operações e o controle remoto pode ser facilmente implementado quando desejável. Maior manobrabilidade e também possível, obtendo-se melhor controle de velocidade e respostas mais rápidas em transientes;

- menor nível de ruído irradiado: os motores elétricos de propulsão operam a baixas rotações e tem funcionamento "suave" em relação às inerentemente ruidosas engrenagens associadas a turbinas de alta rotação;



- adaptabilidade e outros serviços: Os geradores podem ser usados para fornecer energia elétrica para outros serviços em adição ao fornecimento de potência para a propulsão.

- eficiência: as instalações turbo-elétricas têm excelente desempenho as velocidades reduzidas, já que alguns geradores podem ser desligados completamente e outros operarem próximo a carga plena e portanto com alta eficiência! as características de operação dos modernos MEP possibilitam dispensar motores auxiliares para baixas velocidades, indispensáveis nas instalações de acionamento direto dadas as limitações de operação das turbinas em baixas cargas.

Deve-se notar, entretanto, que tais vantagens são obtidas com alguns efeitos negativos, tais como:

- maior peso e custo, além de maior volume ocupado;
- o uso de equipamento elétrico introduz perigos adicionais que devem ser prevenidos, como maiores riscos de incêndios, avarias devido à água, acidentes pessoais devido a choques, etc.
- necessidade de operadores mais treinados e maior pericia na operação;
- uma grande variedade de sobressalentes são necessários;
- aumentam os problemas de manutenção;
- eficiência global da instalação é normalmente mais baixa.

Em verdade, podemos resumir as diferenças entre os dois métodos de acionamento do eixo como:

- a instalação turbo-elétrica é, em princípio, menos ruidosa com relação ao ruído transmitido às estruturas e ao ar, de maior importância nas baixas e moderadas velocidades; as limitações tecnológicas dos motores de propulsão CC, para os quais a mínima rotação possível para o máximo torque é da ordem de 200 rpm, restringem o diâmetro do propulsor, tornando-o ruidoso e pouco eficiente as altas velocidades; seu maior peso e volume (e custo) aumentam o deslocamento do navio, limitando sua velocidade máxima;
- a instalação direta é, em princípio, mais ruidosa nas baixas e moderadas velocidades; a ausência de limitações para os valores de rotação e torque proporcionado pelo projeto das engrenagens, redutores, possibilita o emprego de hélices silenciosas de grande diâmetro e alta eficiência as altas velocidades; seu menor peso e volume reduzem o deslocamento do navio, aumentando sua velocidade máxima.

Estes efeitos foram claramente demonstrados pelos EUA na década de 70. Com base no projeto dos SSN classe "Sturgeon", de



acionamento direto, desenvolveu-se o SSN "Glenard P. Lipscomb", de acionamento turbo-elétrico. O resultado foi um submarino mais silencioso, porém cerca de 15m mais longo e, portanto, cerca de 3-5 nós mais lento. A experiência não foi repetida, sendo o "Lipscomb" desativado em 1990.

Temos porém ainda os exemplos do SSN americano "Tullibee", de década de 60, de deslocamento extremamente pequeno (2700 t), altamente silencioso e lento (22 nós), e da classe francesa "Rubis", o menor submarino nuclear em operação (2600 t) e velocidade máxima da ordem de 25 nós.

Os modernos desenvolvimentos tendem a reduzir as deficiências dos dois tipos de acionamento. Redutores silenciosos, cujas engrenagens são fabricadas por processos de usinagem especiais ou mesmo com emprego de materiais não metálicos, como o teflon, montadas sobre bases resistentes cuidadosamente projetadas usando-se as mais modernas técnicas de redução de ruído, trazem melhores significativas ao sistema de acionamento direto. O motor síncrono de polos em magnéticos permanentes libera as instalações turbo-elétricas da limitação de rotação no torque máximo e reduz significativamente seu peso e volume.

### 3 . 5 . 10 - Controle da Instalação Propulsora

Análises e experiências obtidas na operação de reatores PWR claramente indicaram uma mudança nos requisitos de controle. Onde inicialmente acreditava-se que uma regulação rápida e precisa da potência, através de instrumentos nucleares, fosse requerida, passou-se a perceber que os PWR podem ser projetados para serem auto-reguláveis em potência. A temperatura do refrigerante é ajustada durante a operação pelas barras de controle absorvedoras de nêutrons. Os PWR são um exemplo do uso de sistemas de controle por regulação de temperatura.

Em um PWR de circulação forçada, a água de resfriamento é circulada através do reator como fonte de calor em um ou mais circuitos fechados, e daí para o gerador de vapor, através de bombas. O vapor gerado é enviado para uma ou mais turbinas e o condensado recirculado. O pressurizador opera como um tanque de surto para o sistema refrigerante primário. As mudanças de temperatura no refrigerante, e as resultantes mudanças no seu volume, são absorvidas pelo pressurizador e por mudanças na pressão do sistema. Os projetos usuais de pressurizadores usam aquecedores elétricos para manter a água no seu interior na temperatura de saturação para a pressão requerida do sistema. A bolha de vapor no topo do vaso do pressurizador age como um colchão para os surtos de pressão. A redução destes surtos de pressão pode ser obtida aspergindo-se água de resfriamento no topo do vaso. Note-se entretanto que o tamanho do pressurizador influencia na escolha do sistema de controle e seus parâmetros.

Designaremos a temperatura da água ao sair do reator por  $T_a$ , por  $T_c$  a temperatura de saída do gerador de vapor. A temperatura média do refrigerante no reator é um parâmetro de controle conveniente. Sua única medida é, entretanto,  $(T_a + T_c)/2$ , que designaremos como  $T_m$ .

A programação das temperaturas como função do nível de potência é de grande importância para o projeto do sistema de controle. Para reatores com coeficiente de temperatura negativo, é desejável que  $T_m$  seja mantida num valor constante. O reator por si só tende a manter esta programação durante mudanças de potência. A figura 3.30 apresenta a programação de temperatura média constante. Note-se que, além de  $T_c$  e  $T_a$ , as variações de temperatura e pressão do vapor são significativas. O programa de variação de pressão de vapor é, entretanto, contrário a prática normal de manter constante a pressão de vapor nas instalações de potência. Esta prática, porém, conduz a grandes variações nas temperaturas do refrigerante primário e resulta em aumento nas dimensões do pressurizador.

O projeto de uma instalação de potência nuclear inclui a especificação de um programa de temperaturas e pressões como função do nível de potência em regime permanente, de modo a garantir as condições de operação para qual a instalação foi projetada.

Mudanças na demanda de vapor obviamente requerem que a potência do reator seja alterada para satisfazê-las. Durante estes transientes, as temperaturas e pressões da instalação serão desviadas temporariamente do programa especificado. As limitações da instalação impõem limites a faixa permitível de desvios e nas taxas de variação destas variáveis. A instalação deve então responder satisfatoriamente as variações de carga sem exceder as limitações de projeto.

Durante a operação podem ocorrer falhas de funcionamento que podem levar as avarias permanentes no sistema e também perigos ao pessoal. O sistema deve ser capaz de proteger-se contra estes acidentes.

Sumarizando os requisitos de desempenho, podemos considerar que o sistema de controle deve:

- manter um programa de temperatura e pressão prescrito para operação em regime permanente;
- responder satisfatoriamente a mudanças na carga, sem exceder os limites da instalação;
- auto-protoger-se de acidentes.

Considerando os requisitos de desempenho e os efeitos de realimentação inerente da reatividade, observa-se que os problemas de controle podem ser subdivididos num espectro de frequência. A

compensação pela depleção do combustível requer ajustes de reatividade extremamente lentos ("long term"), o que em geral é feito pelos chamados "venenos queimáveis". O controle de transientes do xenônio requer compensação mais rápida. O problema de ajuste a mudanças na demanda de vapor requer respostas ainda mais rápidas. A duração destes transientes de carga são determinadas basicamente pelo tempo de circulação do refrigerante. Finalmente, considerações de acidentes requerem reações quase instantâneas.

Os requisitos para as instalações a vapor que operam gerando energia de base, ou seja sujeitas a poucos transientes, tais como "carregadores de baterias" nucleares das instalações híbridas poderiam ser descritos por:

- regime permanente:

Pressão de vapor constante para todas as cargas em regime, devido a:

- projeto mais econômico do sistema de vapor;
- controle da turbina mais simples;
- melhor controle dos problemas de armazenamento de energia durante rápidas reduções de carga;
- melhor controle de água de alimentação do gerador de vapor;

- transientes:

Os requisitos de variação de carga de tais instalações não são tão rigorosos como para uma instalação de propulsão dos submarinos nucleares "puros". As variações para as quais o sistema de controle é projetado podem ser aproximadas por:

- degrau de +/- 20 %;
- degrau de +/- 25 % a 0,5 % por segundo;
- aumento ou decréscimo de 100 % da carga em graus destas magnitudes espaçados de modo a ter uma taxa média de 3 % por minuto.

Para que a pressão do vapor permaneça constante na válvula garganta da turbina, a temperatura média da água de resfriamento do reator deve mudar, conforme mostra a figura 3.31. O maior efeito disto é que o pressurizador requer um grande volume de expansão. Por outro lado, se a temperatura média for mantida constante, conforme a figura 3.30, um pressurizador menor pode ser usado. Este programa foi selecionado como base para o sistema de controle descrito a seguir.

O reator deve mudar sua carga pelo aumento temporário de seu fator de multiplicação. A inserção de reatividade positiva ou negativa necessitaria para elevar a taxa de fissão de um nível para o seguinte deve ser removida tão logo o novo nível seja alcançado. Desde que este aumento temporário possa ser obtido pelo

coeficiente de temperatura negativo de reatividade, o seu uso é dominante para os transientes de carga, isto é, o sistema de controle do circuito primário pode ser projetado de modo que o coeficiente de temperatura faça no mínimo a maior parte do ajuste do nível de potência nuclear, sem ajuda das barras de controle. A desvantagem deste procedimento é uma resposta mais lenta, especialmente para grandes variações de carga. Este sistema é mostrado no diagrama de blocos figura 3.32.

Desde que a temperatura média deva ser mantida constante, o sistema mede a temperatura na saída do reator, na saída do gerador de vapor, faz a média entre elas, compara com uma referência e move as barras de controle em resposta ao sinal de erro assim criado. Devido à desejável estabilidade na potência de saída do gerador elétrico para cada determinado ajuste na válvula garganta da turbina, consideram-se valores limite de controle de  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Estes limites são muito restritivos quanto aos elementos medidores de temperatura.

É necessário um sinal de amortecimento para a estabilidade do reator devido às altas taxas de inserção de reatividade pelas barras de controle, requeridas pelos transientes do xenônio nas condições mais severas. O sinal de amortecimento utilizado é a taxa logarithmica de variação do nível de potência nuclear.

O sinal de controle completo então será:

$$\text{Erro em } ^\circ\text{C} = I_h + I_c - K \frac{d(\log N)}{dt} - T_{ref}$$

$$= I_h + I_c - K \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} - T_{ref}$$

A constante K é um fator de conversão para transformar unidades de  $\log N$  em graus celsius e para ajustar o ganho desta porção do sinal.

As vantagens deste sistema são:

- não é dependente das limitações na precisão absoluta dos medidores de vazão de vapor e nível de potência nuclear;

- a taxa de variação logarithmica do nível de potência nuclear é mais apropriada para a estabilidade do reator devido a sua rápida resposta às variações. Por esta razão também é mais sensível a mudanças na reatividade produzidas pelo movimento inadvertido das barras de controle ou transiente de temperatura da água de resfriamento criados pela operação de bombas e válvulas do circuito primário;

- devido a não existência de um sinal de vazão de vapor o sistema não responde imediatamente a variações de carga de pequena magnitude, permitindo que o coeficiente de temperatura execute esta função;

- pelo uso de TC na saída do gerador de vapor, grandes transientes, tal como a perda súbita de toda a carga na instalação a vapor, gera um forte sinal de erro antes que o coeficiente de temperatura possa efetuar alguma mudança;

- as mudanças de reatividade devido à concentração de xenônio, produzindo erros de temperatura, são diretamente corrigidas pelo sistema de medição de temperatura.

Os requisitos operacionais de uma instalação propulsora de um submarino nuclear "puro" fazem com que seu controle seja diferente do controle de uma instalação nuclear de submarino híbrido que normalmente opera em geração de base, sem ser submetida a freqüentes transientes.

Primeiramente, as taxas máximas de variação da potência são determinadas pela manobrabilidade do submarino. A relação entre a velocidade do navio e a rotação do hélice define a taxa de variação de potência que propiciará a máxima aceleração sem cavitação. A necessidade de reversão do propulsor em emergência define o pior caso, onde o transiente de potência poderá ir da máxima a mínima num intervalo de tempo de poucos segundos.

Em segundo lugar, as características do núcleo do reator, principalmente a concentração de xenônio transiente, não deve limitar a potência disponível da planta. Isto requer que o reator possa ser tornado crítico com qualquer possível concentração de xenônio. A potência máxima deve ser produzida com qualquer concentração de xenônio e o sistema de segurança deve prover proteção adequada mesmo que esta produza distorções no fluxo de neutrons e consequentes pontos quentes no núcleo.

Finalmente, as grandes e rápidas perturbações na reatividade que seguem uma mudança no nível de potência devido às variações na concentração do xenônio devem ser superadas pelo sistema de controle de modo que a manobrabilidade da instalação não seja prejudicada.

O projeto do controle de temperatura e potência do reator pode seguir dois métodos diferentes. O primeiro é superdimensionar o pressurizador de modo que os aumentos na temperatura do reator expulsação água do núcleo com um surto de pressão relativamente pequeno. Desde que o coeficiente de reatividade é primariamente dependente da expansão da água com o aumento da temperatura, este sistema permite que as variações de potência sejam efetuadas pelo coeficiente de temperatura; as barras de controle não necessitam ser movidas. O sistema de controle move as barras somente em resposta a variações na temperatura do reator. O controle de potência é então inerente ao reator, pressurizador e geradores de vapor. Este método conduz a um sistema de controle simplificado, mas exige requisitos especiais sobre o projeto do pressurizador e do núcleo, com respeito a um coeficiente de temperatura mínimo e sobre a instalação como um todo, já que leva a oscilações relativamente amplas nas temperaturas



refrigerante na entrada e saída do núcleo do reator e na pressão do vapor no secundário.

Um segundo método de controle tem sido utilizado, onde não existe dependência essencial do coeficiente de temperatura (figura 3.33). Este método utiliza a determinação da potência requerida pelo reator. A potência gerada é mantida então igual à requerida pela medida do nível do fluxo de neutrons e posicionamento das barras de controle. O sistema de controle resultante utiliza mais componentes, mas uma melhor regulação de transientes e de temperatura em regime permanente é possível, reduzindo os requisitos sobre o projeto do pressurizador e do núcleo. Os resultados são um sistema de controle mais flexível, adaptado a uma ampla gama de instalações propulsores nucleares e condições de operação.

Este método de controle é ilustrado em maior detalhe pela figura 3.33:

O sistema consiste de uma malha fechada menor N e uma maior malha N. A malha N controla a reação nuclear de fissão, movendo as barras de controle através de programa de posicionamento pré-definido em função da potência. Este programa mantém a potência nuclear gerada N, igual a potência demandada No. A frequência característica da malha N é muito mais alta que a da malha No, o que minimiza o efeito de interação na estabilidade do sistema de controle.

A malha No controla a potência nuclear gerada através da medida pelo sinal de vazão de vapor  $F_v$ , e mantém a temperatura de saída do refrigerante do gerador de vapor  $T_c$  próxima do valor de referência. A resetagem (ou integração) do sinal de  $T_c$  não é efetuada, pois piora a estabilidade do sistema. Os erros de calibração de  $F_v$  e N não são grandes o suficiente para requerer resetagem. As equações de controle principais são:

$$N_o = K_1 F_v + K_2 (T_c - T_{c,ref})$$

$$\frac{dN_o}{dt} = a \left( \frac{N_o}{N} - 1 \right)$$

$$\frac{dN_o}{dt} = a \left( \frac{N_o}{N} \right) + b$$

$$\frac{dN_o}{dt} = a \left( \frac{N_o}{N} \right) - c$$

Onde  $p_c$  é a reatividade devido as barras de controle:

$$\frac{dp_c}{dt} > 0 \quad \text{--} \quad \text{barras saindo do núcleo}$$

Conforme mostrado na figura 3.33, o coeficiente de temperatura da reatividade representa uma interação entre as malhas N e No. Um coeficiente de temperatura negativo reduz a frequência característica da malha N e é uma medida de estabilização. O sistema é adaptável a uma grande variedade de instalações nucleares de propulsão pelo ajuste das constantes nas equações de controle.

Sem dúvida as tendências gerais na área de controle de plataforma de submarinos apresentadas no item 3.2 também se aplicam às instalações propulsoras nucleares. A tecnologia de VLSI, SDCD, controle e monitoração via "software", "data bus", etc. estarão cada vez mais presentes. O ponto crítico que tem retardado e, acredita-se, ainda retardará por algum tempo, são os aspectos de confiabilidade e disponibilidade destes sistemas em situações ambientais e funcionais críticas, tais como avarias operacionais, acidentes, falhas de sistemas auxiliares, etc. Note-se que aí os aspectos de segurança são duplicados, pois existem todos aqueles aspectos típicos de submarinos em geral e os aspectos nucleares.

Se já existe resistência por parte dos operadores aos elevados níveis de automação em submarinos convencionais, é de se esperar que, no caso de submarinos nucleares, esta resistência seja ainda maior.

### 3 . 5 . 11 - Segurança Passiva e Segurança Intrínseca

Os dispositivos de segurança de qualquer instalação nuclear podem ser categorizados em três classes:

- dispositivos de segurança intrínseca (ou inerente), os quais, devido às suas características físicas e funcionais desempenham as funções de segurança a eles designada com base em uma lei natural, sem qualquer fonte de potência externa, atuação ou modificação da configuração de componentes ou sistemas;

- dispositivos passivos, os quais desempenham suas funções exclusivamente por meio da potência proveniente de fontes de energia previamente armazenada, sem necessidade de atuação automática;

- dispositivos ativos, que desempenham suas funções através de atuação manual ou automática e por meio de fontes externas de geração de potência (e outros sistemas auxiliares associados).

No caso de dispositivos passivos e ativos, as funções de segurança são desempenhadas por meios de sistemas ou componentes externos àqueles que fornecem energia em condições normais.

De maneira oposta, a definição de dispositivos inerentemente seguros deve ser aplicada somente àquelas partes da instalação que permitem a geração de energia na condição normal, e garantem a parada da reação nuclear e posterior remoção de calor residual na condição anormal.

Em outras palavras, estas partes são projetadas de modo a desempenhar por si só as funções de operação normal e as funções de segurança, o que obtido nos seguintes casos:

- se parâmetros de processo importantes à segurança aproximam-se de seus valores limite, reações inerentes ao processo de geração de energia são capazes, por sua própria natureza física, de conduzir a instalação para uma condição segura;

- quando essas reações inerentes são capazes de iniciar em partes da instalação diferentes processos físicos que a conduzem a uma condição segura, sem qualquer fonte de energia externa e sem atuações ou modificações na configuração de componentes.

Os conceitos gerais apresentados acima devem ser analisados em profundidade, com objetivo de julgar o grau de passividade ou de segurança intrínseca das diversas propostas para as futuras gerações de reatores de propulsão de submarinos.

### 3 . 5 . 12 - Circulação Natural

Além das inerentes vantagens sob o aspecto de redução do NRI, os reatores integrals projetados para operar em circulação natural teriam as seguintes vantagens adicionais:

- sob o ponto de vista de simplicidade:

- ausência de tubulação do primário;
- ausência de válvula de bloqueio;
- ausência de válvulas de retenção;
- menor manutenção;
- menor probabilidade de avaria;
- menor dotação de peças de reposição;

- sob o ponto de vista de segurança:

- o acidente de perda de refrigerante é menos provável e menos grave, pois as tubulações de água de resfriamento que saem do reator são em menor número e dimensões;
- não existe o acidente de injeção inadvertida de água fria no núcleo;
- não existe o acidente de perda de fluxo de refrigerante;

- sob o ponto de vista de blindagem:

- a concentração das fontes de radiação no vaso de pressão integral permite compactar a blindagem secundária, reduzindo seu peso.

Há que se considerar, entretanto, algumas desvantagens, tais como:

- sob o aspecto de operação:

- influência dos movimentos do navio no seu funcionamento;
- respostas mais lentas a variações de carga;

- sob aspecto de dimensões:

- maiores dimensões do núcleo, devido à baixa densidade de potência necessária para aumentar a estabilidade de operação e diminuir a perda de carga;
- maiores dimensões do vaso de pressão do reator;
- maior superfície de troca de calor para compensar as menores velocidades de circulação (logo menores coeficientes globais de transferência de calor);

- sob aspecto de eficiência global da instalação:

- pressão relativamente baixa do vapor de alimentação do secundário.

Sistemas de propulsão independentes do ar para submarinos tiveram suas pesquisas iniciadas ainda durante a 2ª. Guerra Mundial, pela Alemanha, com alguns promissores resultados práticos representados pelo princípio Walter e os motores Kreislauf (diesel em ciclo fechado). A partir de 1945, um grande esforço para realização prática destes sistemas teve início em diversos países. Um exemplo foi a Marinha Americana, que desenvolveu simultaneamente seis projetos alternativos de instalação propulsora para submarinos: projeto Alton (turbina Walter); caldeiras de alta pressão e temperatura extremamente compactas empregadas em contra-torpedeiros; projeto Gentry (turbina a gás com combustível Diesel); projeto Gumbo (motor diesel de ciclo fechado); projeto Wolverine (turbina a gás em ciclo fechado) e finalmente o projeto Nautilus de propulsão nuclear, que eclipsou todos os outros. Os requisitos básicos para estes projetos eram 7500 HP de potência e raio de ação de 10 horas na velocidade máxima.

Nas últimas duas décadas, o interesse por SPIA não nucleares voltou a crescer. As razões deste crescimento se prendem basicamente aos altos custos da propulsão nuclear tradicional (PWR), às barreiras tecnológicas e políticas ao seu desenvolvimento e ao enorme crescimento da indústria "offshore", avançando cada vez mais para exploração em águas profundas e demandando fontes de potência independentes do ar para diversos serviços submarinos.

Os SPIA não nucleares se baseiam, de modo geral em duas tecnologias distintas:

- ciclos fechados:
  - combustão interna
  - combustão externa
  - geração química de calor
- processos eletroquímicos: conversão direta de energia química em energia elétrica.

Estes processos requerem métodos de remoção de produtos de reação. O problema é particularmente importante no caso de processos de combustão. Outro problema é a armazenagem dos reagentes necessários, o que requer grandes volumes e necessidade de compensação de pesos durante seu consumo.

O processo de um ciclo fechado baseado em fornecimento de calor por combustão está sujeito ao fato de que a soma das massas dos gases admitidos (combustível e oxigênio) é igual à dos gases removidos ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ). Além disto, impurezas inertes no combustível (argônio no oxigênio líquido) e outros componentes do combustível (vanádio e enxofre) podem ocorrer nos gases de exaustão.



O vapor d'água é simplesmente condensado pelo resfriamento dos gases de exaustão pela água do mar. Para remoção do  $\text{CO}_2$ , são possíveis quatro métodos diferentes:

- aumento da pressão do processo, de modo que possa ser diretamente descarregado para o mar; neste caso os reagentes devem ser armazenados a alta pressão ou bombeados e os componentes nos quais agem devem ser projetados também para essa alta pressão (exemplo: motor Stirling suco);

- aumento da pressão do  $\text{CO}_2$  através de um compressor (exemplo: Turbina Walter);

- solução de  $\text{CO}_2$  na água, onde o  $\text{CO}_2$  vai para um tanque de água do mar sem pressão e após a saturação da água, ela é descarregada para outro tanque e daí bombeada para o mar, enquanto o primeiro tanque é novamente alagado; o oxigênio existente nos gases de exaustão não se dissolve na água e é retornado ao ciclo (exemplo: Diesel em ciclo fechado Phoenix); o sistema pode também ser dotado de um sub-sistema de gerenciamento de água (exemplo: Diesel em ciclo fechado da Thyssen/Cosworth);

- lavagem química; neste caso o  $\text{CO}_2$  é forçado através de um absorvedor (hidróxido de potássio, hidróxido de sódio) sendo removido sob a forma de carbonato (exemplo: Diesel em circuito fechado a argônio da MAN);

- armazenagem sob pressão (exemplo: Diesel em ciclo fechado GST da Maritalia/Fincantieri).

A armazenagem de  $\text{O}_2$  pode ser efetuada por processo criogênico ou em ampolas a alta pressão. O primeiro processo é mais complexo, porém permite maior compactação. Os combustíveis fósseis são armazenados sem problemas, como nos submarinos convencionais. Já o  $\text{H}_2$  tem seus requisitos de volume reduzidos se for armazenado como hidreto metálico, sendo liberado na forma gasosa pelo simples aquecimento do metal (hidreto de ferro-titânio, hidreto de sódio). A armazenagem criogênica ou sob pressão é inviável neste caso, devido ao grande volume requerido devido à baixa densidade do hidrogênio puro.

As dificuldades técnicas na armazenagem de reagentes e no descarte dos produtos de reação, se não inviabilizam, pelo menos complicam em muito o projeto de instalações de propulsão baseadas exclusivamente em SPiAs não nucleares, devido ao raio de ação requerido por submarinos militares, o que em geral leva à adoção de instalações de propulsão híbridas SPiA/convenção.

### 3 . 6 . 1 - Sistema " Walter "

H. Walter desenvolveu sua técnica entre 1936 e 1945.

Peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) concentrado a 80% era usado como oxidante. Sua decomposição num reator catalítico, gera vapor d'água e oxigênio livre ( $2H_2O_2 = 2H_2O + O_2$ ). O oxigênio assim gerado é usado numa câmara de combustão para queimar um combustível hidrocarboneto, produzindo  $CO_2$  e vapor d'água. Esta mistura é usada como fluido de trabalho para uma turbina de propulsão.

O peróxido de hidrogênio líquido é armazenado em bolsas plásticas fora do casco resistente. Conforme o  $H_2O_2$  líquido (densidade 1.33) é consumido, as bolsas colapsam e seu volume é recomposto pela água do mar. Um óleo leve é empregado como combustível, sendo armazenado fora do casco resistente. O submarino torna-se consideravelmente mais leve a medida que o  $H_2O_2$  é consumido. Devido à diferença de densidade entre a água do mar e o peróxido, a redução de peso é predominante e deve ser compensada pelos tanques de compensação do navio, que são maiores que os de um submarino convencional.

O peróxido é bombeado para o reator, onde é decomposto em  $O_2$  e  $H_2O_2$ . A temperatura da mistura é da ordem de  $450^\circ C$  e a pressão é a de alimentação da turbina. Esta mistura de vapor e oxigênio é injetada numa câmara de combustão simultaneamente ao óleo leve e água. A combustão continua gera uma mistura de vapor d'água e  $CO_2$ , que flui para a turbina através de um filtro de resíduos de combustão. Um condensador é usado para condensar o vapor d'água. Parte do condensado é descarregado para o mar e o restante é resfriado novamente e injetado na câmara de combustão. O  $CO_2$  é descarregado para o mar, onde se dissolve rapidamente.

A considerável potência requerida pelas auxiliares (bombas, etc.) é fornecida por um gerador acoplado ao eixo. Desde que o  $CO_2$  de exaustão deve superar a pressão de operação do navio, a turbina também opera contra esta pressão, resultando num alto consumo de peróxido e combustível.

A instalação de um compressor especial para a descarga de  $CO_2$  aumenta o diferencial de pressão na turbina, tornando o sistema menos dependente da profundidade de operação e reduz as taxas de consumo.

Adicionalmente a este processo direto, um método indireto foi desenvolvido, que inclui um circuito fechado de vapor, com um condensador para a turbina. O vapor é gerado num trocador de calor aquecido pela mistura de vapor e  $CO_2$  gerados na câmara de combustão. O vapor da mistura é condensado neste trocador de calor e é descarregado para o mar com o  $CO_2$ . A técnica indireta tem um consumo muito mais baixo, sendo entretanto sua instalação mais pesada e volumosa.

A figura 3.34 apresenta um diagrama de blocos de um sistema Walter direto e a figura 3.35 um sistema indireto.

O primeiro sistema Walter, o chamado sistema frio, foi

construído somente para testes, e desenvolvido até o emprego do processo direto. Foi instalado em 1939 no navio de teste V-80, um submarino experimental de 80 tons. O peróxido era somente decomposto e a turbina operava com uma mistura de vapor e oxigênio. O oxigênio livre era descarregado para o mar, deixando um rastro de bolhas. O consumo específico de peróxido era alto. O submarino era capaz de desenvolver 2000 SHP numa velocidade submersa de 26 nós.

O princípio Walter permite uma potência específica muito alta com baixos requisitos de peso e volume. No caso do processo direto, sem compressor, o consumo de peróxido é cerca de 2,35 kg/kWhr. Esta taxa decresce para 1,85 kg/kWhr se um compressor adicional é instalado. A técnica indireta pode chegar a 1,32 kg/kWhr. Estas figuras de consumo, comparadas com a correspondente a um motor Diesel (em torno de 0,3 kg/kWhr) tornam claro o fato de que é impossível transportar todo o peróxido suficiente para uma missão completa. Consequentemente, um sistema diesel-elétrico convencional é instalado para as faixas de velocidades de cruzeiro.

Após a guerra, a Marinha Inglesa desenvolveu um programa de pesquisa na propulsão Walter. Dois submarinos experimentais, Explorer e Excalibur chegaram a ser construídos. O primeiro destes navios era conhecido pelo pessoal da Marinha Inglesa como "Exploider", evidenciando as dificuldades envolvidas no manuseio de peróxido a bordo.

- alcance submerso de 144 milhas a 24 nós (máxima velocidade no sistema Walter);
- alcance submerso de 100 milhas a 4 nós em propulsão elétrica (motor de baixo ruído) - a velocidade máxima na propulsão elétrica era 10 nós;
- alcance na superfície de 7500 milhas a 10 nós com propulsão diesel direta.

O conceito Walter foi abandonado menos pelas dificuldades técnicas e mais pelo próprio conceito de missão do submarino no pós-guerra. Ele pretendia dotar o navio de uma alta velocidade submersa durante um curto período de tempo e a prioridade operativa do submarino moderno é um grande alcance submerso. O requisito de "sprint" de velocidade foi satisfeito através de maiores baterias, compostas por elementos de melhor qualidade, o que satisfazia simultaneamente o requisito de grande alcance submerso a velocidades mais reduzidas. A resposta mais adequada para os dois requisitos conflitantes veio com o advento da propulsão nuclear, sepultando definitivamente o princípio Walter.

O ciclo Stirling é um conceito de motor de combustão externa que, historicamente no século XIX, antecedeu os conceitos de combustão interna Otto e Diesel, sendo sua tecnologia incipiente, entretanto, superada pelos resultados práticos dos outros dois, na passagem para o século XX.

O motor Stirling é um motor de combustão externa, realizando um ciclo termodinâmico fechado, com alto potencial de eficiência e operação intrinsecamente silenciosa. As dificuldades tecnológicas de desenvolvimento, neste princípio, de motores com alta densidade de potência e confiabilidade adequada impediu a continuidade de seu uso. Os problemas incluem o desenvolvimento de selos adequados as altas pressões de operação desejadas por razões de eficiência e densidade de potência, e seleção de materiais para outros componentes adequados as altas temperaturas e aos gases de trabalho pouco usuais em geral empregados.

Considerável esforço de pesquisa e desenvolvimento foi aplicado ao projeto de motores Stirling durante as últimas duas décadas, visando aplicações que incluem transporte rodoviário, geração de potência e aeroespaciais, porém algumas das mais atraativas são navais, onde as características básicas do motor são bem adaptadas aos requisitos operacionais de submarinos.

O ciclo fechado pode operar com hélio ou hidrogênio como fluido de trabalho, entretanto, todos os motores experimentais atualmente utilizam hélio, apesar do hidrogênio permitir uma melhor eficiência. Este motor - representando o mais antigo princípio de motor de combustão - oferece algumas características de projeto interessantes:

- a chama contínua permite boa combustão (em oposição a ignição intermitente dos motores Diesel e Otto) e diminui emissão de gases de descarga "suos";
- dado que é indiferente a origem do calor, a aplicação de diferentes fontes de energia são possíveis;
- a combustão externa reduz consideravelmente as partes rotativas e o ruído de ignição típicos do motor Diesel, deste modo o ruído transmitido ao ar ("arborne noise") e a estrutura ("structureborne noise") são substancialmente reduzidos em comparação com outros motores de combustão.

A United Stirling, Suécia, com licença da Philips, iniciou um trabalho de desenvolvimento destes motores em 1968. Em 1988 uma instalação foi instalada no submarino Nacken e outra no submarino comercial Saga I. Estão atualmente em provas de mar.

A MAN, na Alemanha, começou em 1968 sob licença e acordo de cooperação com a Philips. Neste período ganharam experiência com um pequeno motor empregando um acionamento rômico e um sistema de combustão independente do ar com acumulador de calor,



desenvolvendo um motor de 6 cilindros em linha com potência de 250kw a 1000 rpm, com acionamento por vira-brequim, que é o maior motor Stirling atualmente existente.

O ciclo básico sem recuperação é apresentado pela figura 3.36, sendo composto de duas isotérmicas e duas isométricas.

O rendimento deste ciclo será:

$$\eta = \frac{Q_{12} + Q_{41}}{Q_{12} + Q_{41} + Q_{23} + Q_{34}} = 1 - \frac{(k-1) \ln e + (f_i - 1)}{(k-1) \ln e + (f_i - 1)}$$

Para relação de trabalhos, temos:

$$r = 1 - \frac{L_{12}}{L_{41}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

onde:  $k = C_p/C_v$ ,  $e = T_2/T_1$ ,  $f_i =$  razão de compressão

1 - 2 : compressão isotérmica

2 - 3 : recebimento de calor isométrico

3 - 4 : expansão isotérmica

4 - 1 : entrega de calor isométrica

L : trabalho

Q : calor

I : parede que permite a transformação

isométrica

II : fonte quente

III : fonte fria

IV : pistão

Utilizando recuperação de calor, este ciclo pode teoricamente alcançar o rendimento do ciclo de Carnot. Um dos problemas práticos de viabilização do ciclo é a dificuldade de manter constante a temperatura durante o recebimento e rejeição de calor. Sua grande vantagem é a elevada relação de trabalho em relação aos ciclos Otto, Diesel e Sabathé (misto).

A figura 3.37 representa um sistema que permite realizar teoricamente o ciclo Stirling, conforme o diagrama P x V apresentado, sendo composto por:

- I - cilindro
- II - pistão de potência
- III - pistão de deslocamento
- IV - regenerador
- V - fonte quente
- VI - fonte fria
- V1 - volume de fluido quando o pistão de potência está em ponto morto inferior
- V2 - volume de fluido quando o pistão de potência está em ponto morto superior.



A parte superior do cilindro é mantida na temperatura da fonte quente e sua parte inferior na temperatura da fonte fria. O regenerador é um meio poroso, geralmente constituído de finíssimos fios de material inoxidável e resistente a temperaturas elevadas. A isotermia 1-2 é realizada com o pistão de potência deslocando-se de PM2 para PM1, ficando o pistão de deslocamento imóvel na parte superior do cilindro. Esta isotermia é realizada com auxílio da fonte fria, para a qual o fluido de trabalho entrega o calor  $Q_{12}$ , consumindo o trabalho  $L_{12}$ . A isotermia é realizada com o pistão de potência parado em PM1 e o pistão de deslocamento indo de sua posição superior para a inferior. Com isso, o fluido de trabalho é forçado a passar pelo regenerador, recebendo o mesmo calor  $Q_{23}$ , ficando no final na temperatura da fonte quente. A expansão isotérmica 3-4 é realizada deslocando-se o pistão de potência de PM1 a PM2, ficando imóvel o pistão de deslocamento. Com auxílio da fonte quente, é fornecido ao fluido de trabalho o calor  $Q_{34}$ , sendo realizado o trabalho  $L_{34}$ . O ciclo é fechado com auxílio da isotermia 4-1, realizada com o pistão de potência parado em PM2, sendo o fluido de trabalho forçado a se deslocar através do regenerador pela movimentação para cima do pistão de deslocamento. Com isso o fluido de trabalho entrega ao regenerador o calor  $Q_{41}$ . Em condições teóricas o calor  $Q_{23} = Q_{41}$ , logo o ciclo recebe do meio externo somente  $Q_{34}$  e entrega  $Q_{12}$ , sendo portanto seu rendimento igual ao do ciclo de Carnot.

A realização prática do ciclo, conforme foi descrito, é bastante difícil, devido às grandes forças de inércia geradas pelo movimento descontinuo. Por esse motivo, os deslocamentos dos pistões nas tentativas práticas são obtidos por meio de mecanismos cujos movimentos são harmônicos.

Analisando os motores Stirling tentados pelos pesquisadores, conclui-se que eles sempre derivam de três categorias fundamentais, denominadas alfa, beta e gama, apresentadas pela figura 3.38, onde:

- I - câmara de compressão
- II - câmara de expansão
- III - regenerador

A fonte quente é fornecida por uma câmara de combustão montada sobre a câmara de expansão. Nela são queimados óleo diesel com oxigênio puro, armazenado sob pressão em fase líquida. A câmara é projetada para uma sobre-pressão que permite que o gás de exaustão possa ser descarregado diretamente para o mar, dispensando o uso de um compressor de descarga. Como fluido de trabalho, o próprio oxigênio pode ser utilizado, sendo recirculado internamente. A fonte fria é representada por uma camisa de água em torno da câmara de compressão, através da qual recircula o fluido de trabalho. Outra forma de obter-se fonte quente seria uma câmara onde ocorresse não a combustão, mas sim outro tipo de reação química fortemente exotérmica, como a que ocorre entre o lítio e o hexafluoreto de enxofre ( $SF_6$ ). Esta reação de combustão metálica é utilizada em sistemas de propulsão de

Nos primórdios do desenvolvimento do motor Stirling para propulsão de submarinos, o objetivo proposto era extremamente ambicioso: uma fonte de potência única deveria substituir tanto os diesel-geradores como a maioria das baterias, permanecendo apenas uma pequena quantidade para emergência. O SPIA deveria cobrir a faixa de potência completamente, desde as baixas velocidades até a máxima, tanto submerso como na superfície. Como resultado, os custos tornaram-se muito elevados e os requisitos técnicos difíceis de serem atendidos. Estes projetos nunca se concretizaram, mas geraram um conhecimento extensivo em motores Stirling e sistemas de armazenamento de combustíveis e oxigênio.

O objetivo atual é, em geral, menos exigente: o SPIA de longo raio de ação é dimensionado somente para os modos de operação a baixa velocidade. O sistema de propulsão completo consiste de três elementos:

- SPIA de baixa potência para operação submersa
- baterias chumbo-ácido de alta potência dando ao navio capacidade de alta velocidade submersa e também ampla reserva de energia para operação ultra-silenciosa e sobrevivência
- instalação diesel com esnorquel de alta potência e grande raio de ação, para recarga de baterias, operando com baixo coeficiente de indutância.

O motor Stirling para submarinos, desenvolvido pela KOCKUMS MARINE AB, Suecia tipo V4-275, apresentado pela figura 3.39 é equipado com uma câmara de combustão a alta pressão permitindo a descarga de gases de exaustão diretamente para o mar e recirculação interna de gás de exaustão usando oxigênio puro para o motor. Alguns dados típicos são apresentados a seguir:

peso.....	600kg
comprimento.....	700mm
largura.....	600mm
altura.....	1100mm
velocidade.....	2000 - 2400rpm
potência.....	70 - 80kw
combustível.....	diesel com baixo teor de enxofre
oxidante.....	oxigênio puro
consumo de oxigênio.....	0,85 - 0,95kg/kwh

O motor aciona um gerador elétrico que sempre opera em paralelo com as baterias do navio, possibilitando um controle de potência simples para o motor.

Um perfil de missão típico é apresentado pela figura 3.40. A operação inicia com as baterias totalmente carregadas e capacidade de armazenamento de  $O_2$  completa. O submarino opera com

os motores Stirling - sem descarga de baterias - até o segundo dia, quando um alvo é engajado durante 3 horas de operação descarregando as baterias. Após a conclusão do engajamento o fornecimento de potência retorna aos motores Stirling para novo período de patrulha, até uma nova fase de engajamento e assim por diante. A bateria é, consequentemente, descarregada de 50% após nove dias e quatro alvos engajados na área de operação sem haver em nenhum momento exposição do esnórquel (coeficiente de indescricao nulo). Quando todo o oxigênio é consumido, o submarino continua a operação como submarino convencional.

O exemplo apresentado é extremamente simplista, porém apresenta uma boa apreciação do potencial e do substancial aumento na eficiência e capacidade de sobrevivência em combate que pode ser esperado.

O sistema Stirling completo, incluindo tanques de oxigênio líquido, tanques de água de compensação e auxiliares, podem ser arranjados numa seção autônoma do casco, que pode ser instalada em submarinos existentes ou tomar parte em novos projetos. Deste modo é possível manter toda a capacidade do submarino convencional mesmo após a instalação do SPIA.

Uma seção de teste flutuante equipada com um gerador V4-275 completo, montado em calcamento resistente duplo, num módulo isolado acusticamente e um grande tanque de oxigênio líquido foi lançado pela Kockums em 1985 e vem sendo operado com sucesso por uma tripulação da Marinha Sueca. A seção de testes foi operada em paralelo com as baterias de um submarino operacional para verificar o comportamento dinâmico nas grandes mudanças de carga.

O sucesso de operação da seção de testes teve como desdobramento lógico a instalação de uma seção similar num submarino operacional, contendo dois geradores Stirling, dois tanques de O<sub>2</sub> líquido e demais auxiliares. O submarino sueco Nacken iniciou provas de mar em 1989. O alcance submerso foi aumentado de dias para semanas.

### 3 . 6 . 3 - Células de Combustível

As células de combustível são dispositivos nos quais um oxidante e um combustível são combinados quimicamente, produzindo eletricidade como produto de sua reação. A eficiência pode ser muito alta, não ocorrendo problemas de dissipação de calor comuns as máquinas térmicas em geral.

O conceito da célula de combustível é conhecido desde o início do século XIX, entretanto o desenvolvimento prático destas instalações se iniciaram em 1958. Eficiências da ordem de 70-80% podem ser atingidas, minimizando os requisitos de armazenamento do combustível e oxidante. Em muitos casos o produto da reação é água

Pura. Células de combustível já são utilizadas na produção de energia em instalações de terra e o DSRV, veículo submarino de salvamento da Marinha Americana é propelido por um sistema de células de combustível alcalinas ( $H_2-O_2$ ). Um sistema utilizando gasolina, óleo diesel ou JP5 como combustível está em desenvolvimento nos EUA pela empresa United Technologies, em pacotes de até 26MW, sendo extremamente complexo. Esta célula opera a 200°C com eficiência da ordem de 56%. Outras tecnologias incluem a célula de lítio-água do mar (que entretanto, produz hidrogênio gasoso como produto de reação) e de lítio-peróxido (que produz água).

Alguns projetos de aplicação de células de combustível a submarinos foram considerados. O mais desenvolvido destes projetos é o promovido pelo consórcio IKL/HDW/FS, que possui um protótipo em terra operando desde 1984 e se encontra instalada uma seção de casco, incluindo o sistema completo, no submarino operacional alemão tipo 206 U1. Há notícias de realização de provas de mar, porém poucas informações dos resultados obtidos. A figura 3.48 apresenta um diagrama de blocos de um sistema de propulsão de submarinos empregando células de combustível.

Em princípio, todas as reações de oxidação podem ser empregadas numa célula de combustível, mas considerações práticas levam às reações mais simples, com reagentes bem conhecidos. A combinação de hidrogênio e oxigênio para formação de água, a chamada hidrólise reversa, é a mais simples e portanto a mais utilizada. A célula alemã a utiliza, sendo o hidrogênio armazenado na forma de hidreto de ferro-titânio, de modo a reduzir os requisitos de volume.

A célula de combustível é basicamente um dispositivo de conversão de energia galvânica, isto é, converte energia química em energia elétrica, diretamente. Desenvolve um processo eletroquímico, que é definido como uma reação química na qual ocorre transferência de elétrons para um circuito externo.

Esquematicamente, uma célula de combustível de  $H_2-O_2$  pode ser representada conforme a figura 3.41:

reação na célula:  $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$

reação no anodo:  $H_2 = 2H^+ + 2e^-$

reação no catodo:  $2H^+ + 1/2 O_2 + 2e^- = H_2O$

A escolha do catalizador utilizado nos eletrodos depende do eletrólito empregado: níquel, prata ou platina podem ser utilizados quando o eletrólito é básico, como o hidróxido de potássio (KOH); carvão, de tungstênio, platina ou carbono se ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) e platina se ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ).

Sob carga, a voltagem de uma célula individual é da ordem de 1 Volt (1,229V para a célula  $H_2 - O_2$  anteriormente apresentada). Logo, torna-se necessário a associação de várias células em série para obter-se uma voltagem útil. Cada célula



individual contém os elementos necessários para sua operação contínua, implicando em meios de alimentação dos reagentes para a superfície dos eletrodos e de remoção dos produtos de reação e calor residual.

A vantagem de um processo eletroquímico em comparação a uma máquina térmica pode ser avaliada pela máxima eficiência que pode ser obtida pelos dois métodos (figura 3.43). O máximo trabalho (no caso de processo eletroquímico, energia elétrica) que pode ser obtido de um processo qualquer é dado pela variação isotérmica da energia livre de Gibbs  $dG$ , na forma:

$$dW = dG = dH - T \times dS$$

Desde que o máximo calor que pode ser recuperado deste processo é dado pela mudança isotérmica de entalpia  $dH$ , a eficiência térmica é dada por:

$$\text{eta} = \frac{dW}{dH} = \frac{dH - T \times dS}{dH}$$

Por outro lado, se a reação é usada para fornecer calor para uma máquina térmica, aplica-se a limitação de Carnot:

$$dW = dH \frac{(T_h - T_l)}{T_h}$$

e a máxima eficiência térmica se reduz a:

$$\text{eta} = \frac{T_h - T_l}{T_h}$$

Desde que  $T \times dS$  é, em geral, uma pequena fração de  $dH$  (exceto a temperaturas muito altas), a eficiência térmica de um processo eletroquímico pode ser elevada, particularmente nas baixas temperaturas. Por outro lado, a eficiência térmica de uma máquina de Carnot é mais baixa, só se aproximando do processo eletroquímico para temperaturas de operação muito altas. Estes altos valores de eficiência para os processos eletroquímicos podem ser explicados notando-se que nestes processos, em nenhum momento a energia é transferida sob forma de calor, logo o teorema de Carnot não se aplica neste caso.

A voltagem da célula é definida por:

$$V = \frac{dG}{nF}, \text{ onde}$$

$V$ ..... voltagem teórica da célula

$dG$ .....  $dH - T \times dS$

$n$ ..... número de elétrons transferidos na reação



As células de combustível podem ser empregadas com o suplemento a instalações de potência convencionais, ligadas diretamente à rede de distribuição elétrica como geração de base, de pico ou auxiliar, reduzindo perdas de transmissão e oferecendo vantagens em flexibilidade de operação. São especialmente atrativas onde a redução de ruído e de emissão de poluentes são críticas. Podem substituir baterias primárias e secundárias ou moto-geradores. Nestas aplicações, combustíveis sintéticos são os mais atraentes, já que podem ser processados gerando fluxo de

A tecnologia das células de combustível teve grande impulso com a engenharia aeroespacial, que tem requisitos similares ao emprego submarino, dada a ausência de ar atmosférico e a extrema compactação e confiabilidade necessárias.

As tabelas apresentadas a seguir, apresentam os sistemas eletroquímicos concebidos (tabela 3.45), os sistemas de células de combustível em avançado desenvolvimento (tabela 3.46) e os combustíveis sintéticos mais importantes (tabela 3.47). O oxidante utilizado pode ser o próprio ar, ou o oxigênio armazenado sob pressão ou por técnicas criogênicas.

Um pré-requisito para operação da célula de combustível é o suprimento contínuo de reagentes e a remoção dos produtos de reação e do calor residual. Desbalançamentos no volume do eletrólito causados por remoção excessiva ou por sua retenção devem ser evitados. A temperatura de operação deve ser mantida numa faixa restrita. Um método utilizado para este controle é pela recirculação do eletrólito (figura 3.44). O eletrólito aquecido, diluído, pela água gerada pela reação é circulado por uma célula de separação, onde a água é transferida como vapor através de uma membrana porosa para uma superfície de resfriamento, onde é condensada.

Um importante parâmetro de desempenho da célula de combustível é a densidade de corrente fornecida pelos eletrodos numa dada voltagem.

Ao contrário da maioria das máquinas térmicas, a eficiência de uma célula de combustível é maior nas cargas baixas e cai conforme a carga aumenta (figura 3.43).

- perdas ôhmicas devido à resistência elétrica nos eletrodos, eletrólito e condutores
- perdas de polarização, resultantes da irreversibilidade do processo dos eletrodos e perdas de voltagem devido aos gradientes de concentração dos reagentes.

Dois tipos básicos de perdas reduzem a voltagem de célula, e por conseguinte sua eficiência (figura 3.42):

F..... constante de Faraday

hidrogênio de modo simples, mesmo em pequenas instalações, sem redução significativa da eficiência.

Comparadas com as baterias, as células de combustível oferecem densidades de energia consideravelmente mais altas, com vantagens de que sua capacidade não é reduzida a temperaturas ambientes baixas, tendo características de recarga contínua. Sua operação é altamente silenciosa e sua manutenção mínima, além de grande confiabilidade e disponibilidade, vida útil e eficiência.

Na Alemanha, a SIEMENS AG desenvolveu uma célula de combustível compacta de 7kw, usando o hidróxido de potássio líquido (KOH) como eletrólito. Na célula, o hidrogênio e oxigênio reagem a temperatura de 70-80°C, resultando numa eficiência máxima de 70%. A alta eficiência associada à possibilidade da reação ser plenamente previsível e assim ocorrer em condições estequiométricas, permite a plena utilização do combustível e portanto a redução do problema de armazenagem de reagentes. O fato de que a eficiência aumenta com a redução da carga, permite que o sistema seja controlado com precisão.

A alta eficiência desta célula permite que somente pequenas quantidades de calor residual sejam geradas durante a conversão de energia. Este calor pode ser reciclado e usado para a retirada do hidrogênio dos tubos de hidreto metálico sólido e para conversão de oxigênio líquido em gás. É possível portanto, operá-la num submarino sem transmitir calor para fora do casco, isto é, sem rejeitar calor para o mar. A energia elétrica é gerada sem ruído, sendo as bombas de circulação de eletrólito as únicas partes móveis do sistema. A água pura, produzida pela reação pode ser facilmente descarregada para o mar ou armazenada a bordo, podendo inclusive ser utilizada no sistema de água.

O consórcio IKL/HDW/FS desenvolve um sistema de propulsão híbrido para submarinos, baseado na tecnologia de células de combustível da SIEMENS AG. O sistema visa o cruzeiro silencioso a baixas velocidades, evitando os ruídos de cavitação do propulsor e de separação e turbulências do escoamento em torno do casco. Foi desenvolvido um modelo funcional e um protótipo de produção. As prioridades mais altas foram baixo ruído, grandes profundidades de operação, a possibilidade de construção modular e a flexibilidade de aplicação, além da possibilidade de instalação em submarinos existentes com mínimas modificações. A integração do sistema é simples, pois a energia elétrica em corrente contínua por ele gerada pode ser levada diretamente para o quadro elétrico de distribuição do navio (figura 3.48).

A célula de combustível compacta da SIEMENS, em ligação série de várias células, pode atingir qualquer voltagem requerida. O ajuste fino é possível por meio de variações do número de placas nos conjuntos de células. Potências mais altas podem ser obtidas por meio de ligações em paralelo. A construção modular da bateria de células de combustível permite, por meio de controle elétrico,

a vantagem do sistema poder operar na eficiência ótima em cargas parciais.

A operação em paralelo no barramento principal de alimentação, permite o acionamento do MFP e da carga hotel como também o funcionamento em conjunto com as baterias. Dependendo da situação de voltagem disponível, a bateria pode ser recarregada ou fornecer potência adicional. As baterias cobrem a faixa de potências altas, enquanto as células de combustível cobrem a faixa de potência correspondente ao cruzeiro silencioso. Neste situação de baixa velocidade, as baterias carregadas podem ser desligadas do circuito, permanecendo disponíveis para as altas velocidades.

Em 1984 uma instalação de testes em terra tornou-se operacional. De 84 a 86 todos os componentes, sub-sistemas e o sistema propulsivo global foram testados, culminando com um teste de desempenho de 350 horas. Ao final de 87 foi completada a instalação da seção híbrida no submarino da Marinha alemã U1, tipo 206 e foram iniciadas as provas de mar. Até o presente não foram divulgados resultados.

### 3 . 6 . 4 - Motor Diesel em Ciclo Fechado

O princípio do motor Diesel em circuito fechado foi desenvolvido inicialmente durante a 2ª. Guerra Mundial na Alemanha, a mesma época do princípio Walter. O motor Kreislauf já operava como protótipo em 1942.

As vantagens do motor diesel sobre outros SPIA incluem a possibilidade de utilizar-se uma tecnologia de motores exaustivamente provada e combustíveis comuns. Em princípio, o desenvolvimento desta técnica consiste na adaptação e modificação de um motor diesel comum para operação em ciclo fechado. Sua principal desvantagem comparativa para uso militar consiste no alto nível de ruído emitido. Os motores Diesel podem ter seu ruído reduzido por técnicas de isolamento de ruído e vibrações, como o cálcamento resiliente e encapsulamento, mas logicamente, uma máquina que funciona baseada em uma sucessão de explosões será, numa análise final, mais ruidosa que outra que empregue conceitos de combustão contínua ou conversão de energia direta.

A descarga dos gases de exaustão sob pressão e outro problema que pode ser superado, porém com o custo de redução da eficiência do sistema.

Os diesel operam durante cruzeiro submerso com oxigênio puro, transportado a bordo na forma líquida ou gasosa. Durante a operação na superfície ou em esnórquel operam com ar atmosférico, sendo reconfigurados para operação em ciclo fechado quando em cruzeiro submerso. Nesta situação, o nitrogênio componente do ar atmosférico é substituído pelo CO<sub>2</sub> nos gases de descarga e o oxigênio do ar é substituído pelo suprimento de bordo. O MFP e as



baterias continuam presentes para propulsão silenciosa. A figura 3.49 apresenta o diagrama de blocos de um sistema diesel em ciclo fechado.

O oxigênio líquido pode ser armazenado em tanques cilíndricos externos ou internos ao casco. O volume dos tanques compensação deve ser dimensionado de modo que o peso total do oxigênio possa ser compensado pela água salgada. O excesso de  $\text{CO}_2$  deve ser forçado, por meio de um compressor, para o mar, contra a pressão devida a profundidade, onde se dissolve após ascender por curto período.

O sistema consiste basicamente de um motor Diesel no qual a parte inerte dos gases de exaustão ( $\text{CO}_2$ ) é enriquecida com oxigênio e retorna para a admissão do motor alimentando um novo ciclo de combustão. De modo a reproduzir as características do ar ambiente, além de adicionar oxigênio, é necessário incluir também um gás inerte monoatômico. Além da seleção criteriosa do gás monoatômico mais adequado é possível aumentar a eficiência do motor em comparação com sua operação no ar atmosférico. Os gases de exaustão são resfriados e forçados através de um absorvedor, onde o  $\text{CO}_2$  é dissolvido na água do mar, que também condensa o vapor d'água produto da combustão e do resfriamento. A quantidade de  $\text{CO}_2$  que pode ser dissolvida na água do mar depende principalmente da pressão do sistema, da pressão parcial do  $\text{CO}_2$  no ar artificial produzido e da temperatura da água do mar.

A peça chave deste sistema é o sub-sistema de gerenciamento da água, apresentado pela figura 3.50. Este utiliza a pressão ambiental da água do mar para admitir a água de lavagem dos gases de descarga para dentro do navio, através do absorvedor de  $\text{CO}_2$  e novamente para o mar. Somente bombas de pequeno diferencial de pressão são empregadas para produzir a circulação dentro do submarino. As unidades de transferência de água são subdivididas por um pistão de movimento livre, que alternadamente força a água do mar para o absorvedor ou a água saturada de  $\text{CO}_2$  para fora do submarino.

Outros meios químicos de absorção de  $\text{CO}_2$  podem ser utilizados, como metanol e hidróxido de potássio, entretanto, exigem que também se transporte estes produtos.

Os diferentes expoentes adiabáticos e os diferentes calores específicos dos gases passíveis de serem empregados no ciclo, levam a diferentes balanços térmicos e consequentemente a diferentes eficiências e consumo de combustível. O argônio possui muito boas propriedades para a combustão no processo Diesel. O atraso na combustão por ele induzido, leva a carregamentos mais favoráveis ao motor, podendo ser obtidas melhores eficiências, com uma considerável redução de ruído. Os motores Diesel utilizando argônio, requerem apenas pequenas alterações, sendo possível deste modo utilizar-se motores já provados e a ampla gama de potências disponível no mercado, simplificando extremamente os problemas relativos a manutenção e sobressalentes.

Os problemas relativos à perda de gases do ciclo devem ser levados em consideração. Com o uso de  $\text{CO}_2$  e argônio, nenhuma precaução especial precisa ser tomada, exceto durante a partida do motor. No ciclo  $\text{CO}_2$ , a quantidade de gás gerada durante a combustão deve ser retirada do processo através de um controle adequado.

Na operação submersa, a composição do fluido de trabalho do ciclo é essencialmente determinada pela mistura de oxigênio. O calor específico e o expoente adiabático do  $\text{CO}_2$  levam à redução da eficiência. A baixa temperatura do gás influencia a ignição e combustão antes da fase de compressão se completar. Em certos casos, o preaquecimento do gás após a condensação da água torna-se necessário.

No ciclo de argônio, as perdas deste gás podem ser recompletadas pelo oxigênio líquido, que é contaminado por uma pequena quantidade de argônio já que os dois produtos têm aproximadamente a mesma temperatura de ebulição nas pressões de operação aplicadas. Deste modo, com a mistura de  $\text{O}_2$ , uma pequena quantidade de argônio é automaticamente fornecida ao ciclo. Esta contaminação do  $\text{O}_2$  por argônio é própria do processo comercial de produção e liquefação do oxigênio.

Se um gás inerte como o nitrogênio é utilizado, a taxa de vazamento durante a operação deve ser compensada pela adição deste gás ao fluido de processo durante a operação.

Após o desenvolvimento do protótipo de Kreislauf, no período da segunda Guerra Mundial, houve uma certa descontinuidade na pesquisa do sistema. Em benefício de outros com menor emissão de ruído. Entretanto, a partir da década de 80 o interesse por este tipo de propulsão renasceu, principalmente devido às demandas da indústria "offshore", que caminha rapidamente para as grandes profundidades, viabilizando assim o uso econômico de submarinos civis. Simultaneamente as pesquisas para emprego comercial, voltou-se a pensar-se em submarinos militares, enfatizando-se neste caso, a redução do ruído próprio emitido, inerente à operação dos motores Diesel. A figura 3.49 apresenta o diagrama de um sistema de propulsão para submarinos militares utilizando motor diesel de ciclo fechado.

Exemplos destas aplicações práticas são o projeto PH-Phoenix - X02, da Perkins, que foi o primeiro motor diesel em ciclo fechado a propelir um submarino submerso de 120 tons, em 1978, na Inglaterra; o mini-submarino 3 gst 9, com motor Fiat-IVECO, de injeção indireta turbocargado, o primeiro a operar a plena potência a 350m de profundidade, em 1982, do Fincantieri (Itália); o protótipo em terra da Thyssen Nordseewerke, com tecnologia Cosworth, operativo em 1987, desenvolvido para a Norwegian Offshore Industry, com proposta para emprego também militar e o projeto 20 gst 48, da Fincantieri, totalmente desenvolvido para emprego militar, não sendo uma instalação



híbrida e sim a propulsão total no ciclo fechado diesel, própria para mono-submarinos.

A seguir, apresentaremos algumas características destas instalações:

#### - Projeto PH-X2

Este sistema, desenvolvido pela Perkins, Inglaterra, na década de 70, tem como característica, não usar outro gás monoaômico na composição do fluido de processo. Este é composto somente por  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ .

#### - Instalação de Testes da Thyssen Nordseewerke

O sistema é projetado para uma potência elétrica de saída de 120KW. O motor diesel é um modelo comum, não modificado, do tipo supercarregado.

A lavagem do  $\text{CO}_2$  é feita por dois absorvedores, cada um capaz de absorver os gases de exaustão correspondentes a 60KW, utilizando-se água salgada.

A água do mar é mantida a pressão constante, independente da profundidade de operação através do sub-sistema de gerenciamento de água, que é redundante. A pressão do gás no ciclo é de 2 bar/abs. Na composição do gás de ciclo, participa um percentual de argônio (+/- 1%).

Todo o sistema é montado numa base comum, com suporteção resiliente dupla, trabalhando com uma pressão da água do mar de 30 bar.

- 20 gst 48

Este projeto consiste de um conceito diferente. Não possui uma instalação híbrida, e sim uma propulsão total baseada no SPIA diesel ciclo fechado. Para viabilizar este conceito, que tem como maior dificuldade a possibilidade de armazenar-se grandes quantidades de  $\text{O}_2$ , de forma que o navio tenha uma autonomia útil para fins militares, foi imaginada uma solução original: o  $\text{O}_2$  seria armazenado na periferia do casco, isto é, a estrutura resistente não é composta por cavernas e chapamento e sim por tanques de formato toroidal soldados entre si, nos quais o  $\text{O}_2$  se encontra armazenado a 350 bar. Conforme o  $\text{O}_2$  vai sendo consumido, os tanques toroidais vão se enchendo com o  $\text{CO}_2$  proveniente da combustão, sendo periodicamente descarregado para o mar.

A praca de máquinas é composta por:

- 1 motor diesel de 32 cilindros, 400 HP fabricado pela Isotta Fraschini
- 2 diesel-geradores de 12 cilindros, 400 HP cada
- 1 motor elétrico de 800HP

### Suas características gerais são:

- comprimento total: 48m
- diâmetro externo: 5,25m
- armazenagem de 140.000 HP hora de energia disponível
- raio de ação a 8 nós: 4000 milhas
- raio de ação a 4 nós: 8000 milhas
- profundidade de operação: 400m

Durante o seu desenvolvimento, chegou-se às seguintes conclusões:

- o SHP do motor nas condições de operação independente do ar atmosférico é o mesmo das condições normais;
- o sistema de remoção de CO<sub>2</sub> não gera esteira perceptível;
- o desempenho do motor é independente da profundidade;
- os motores passíveis de serem utilizados podem ser de 2 ou 4 tempos, injeção direta ou indireta.

Para emprego em submarinos operacionais, o sistema deverá atender a dois requisitos básicos:

- baixo nível de ruído emitido
- descarga de CO<sub>2</sub> para o mar sem esteira apreciável.

O primeiro requisito dificilmente poderá ser atendido no mesmo grau de outros SPAs, como as células de combustível e até mesmo o motor Stirling, pelo próprio princípio de funcionamento do motor diesel. Entretanto, medidas de redução de ruído podem ser tomadas de modo a que o resultado final seja aceitável, tal como calcarento resiliente em base dupla, encapsulamento do motor, aumento do atrazo de ignição, etc. Um pequeno motor diesel, como o proposto pela Thyssen, tem um nível de ruído gerado semelhante a outros equipamentos extensivamente usados em submarinos militares. Por exemplo, os compressores de ar condicionado usuais tem um nível de cerca de 10dB inferior a um motor diesel de 6 cilindros em linha. O problema persiste nas baixas frequências transmitidas a estrutura, de difícil supressão.

O segundo requisito é mais simples de ser satisfeito, já havendo soluções técnicas comprovadas desde os submarinos Walter.

A Thyssen propõe para sua instalação o conceito de modularidade, para aplicação híbrida. Um módulo de 7m de diâmetro e 6m de comprimento pode alojar 2 diesel-geradores em ciclo fechado de 120 KW e cerca de 50.000 KWh de energia para um submarino de 2.000 tons. Isto permite um aumento no alcance submerso de 17 dias e uma máxima velocidade de 7 nós sem utilizar energia das baterias.

A filosofia adotada no projeto 20 gst 40, nos parece extremamente complexa para um submarino de terceira categoria (emprego costeiro), entretanto, as empresas que o desenvolvem tem projetos para unidades maiores, na faixa das 2000 ton. Caso o problema de emissão de ruído possa ser efetivamente resolvido, este conceito de propulsão pode tornar-se um sério competidor das instalações nucleares e convencionais.

### 3 . 6 . 5 - Turbina à Gás em Ciclo Fechado

A turbina a gás em circuito fechado se distingue pelo fato de que o fluido de trabalho é continuamente recirculado através do circuito selado, semelhante às instalações a vapor. Uma fonte de calor externa transmite sua energia através de um aquecedor de alta temperatura e o calor residual é rejeitado num resfriador a água do mar (fonte fria). Dado que o circuito é fechado, o fluido de trabalho e seu nível de pressão de operação pode ser selecionado para condições de trabalho otimizadas. Uma grande parte do calor residual pode ser recuperado através de um trocador de calor intermediário, possibilitando uma alta eficiência através da otimização do ciclo para as baixas razões de pressão o que permite simplificar as turbinas e compressores - os altos níveis de pressão aumentam as dimensões das máquinas. O nível de potência é alterado pela variação do nível de pressão, permitindo manter-se constante a temperatura de entrada na turbina, o que resulta em alta eficiência do ciclo numa ampla faixa de potências. A alta pressão e as condições de operação limpas permitem o projeto de trocadores de calor muito compactos e eficientes.

As vantagens do ciclo fechado incentivaram pesquisas nesta área para aplicação até mesmo em navios de superfície, tendo sido desenvolvidos projetos de instalações propulsoras de até 40.000 SHP nos EUA ao final da década de 70 (figura 3.51). Na Alemanha, a MTU iniciou estudos de um sistema com hidrogênio e oxigênio em 1979. Em 1983, a mesma empresa partiu para o desenvolvimento de uma instalação com combustível diesel e circuito fechado de  $O_2$ , utilizando uma câmara de combustão cerâmica, para aplicação num grupo gerador de 300KW.

O grande obstáculo à concretização destes projetos, reside no fato de que para uma instalação deste tipo seja eficiente e compacta, as temperaturas envolvidas devem ser necessariamente muito altas, surgindo daí sérios problemas relativos a materiais compatíveis com estas condições extremas. As altas temperaturas também tornam estas instalações de certa forma inadequadas ao emprego em submarinos, devido à sua acentuada assinatura térmica. Uma proposta de aplicação do sistema a submarinos é apresentada pela figura 3.52. Nela, o oxigênio e o combustível são



fornecidos à câmara de combustão, sendo os gases de exaustão condensados e reciclados.

### 3 . 6 . 6 - Turbina a Vapor com Combustão a Alta Pressão

Esta solução é representada pelo princípio adotado pela empresa Bertin & Cie, francesa para o chamado MESMA ("Module d'Energie Sous-Marine Autonome"), baseado no acoplamento de dois circuitos térmicos (figura 3.53):

- o primeiro é o circuito de geração de calor, que fornece ao segundo calor ao nível intermediário de temperatura (cerca de 700°C);

- o segundo é um ciclo a vapor Rankine, que aciona turbo-geradores com saída retificada.

A geração de calor é efetuada pela combustão do etanol com oxigênio. A escolha do combustível foi feita visando minimizar os problemas de corrosão causada pela ácido sulfúrico gerado pela combustão de hidrocarbonetos, que normalmente contém certa quantidade de enxofre, sujeira nos trocadores de calor devido às cinzas e acumulação de gases incondensáveis. O etanol é atomizado pelo estrangulamento do fluxo de oxigênio, criando condições favoráveis de baixa pressão.

Uma das principais características deste circuito é a condensação dos produtos de combustão (água e  $CO_2$ ). A maior parte do vapor é condensada na caldeira do ciclo Rankine. A parte restante do vapor e o  $CO_2$  são então condensados num trocador de calor resfriado a água do mar. Os trocadores são projetados de modo a manter separados a água e o  $CO_2$ , que podem ser armazenados em tanques separados. A água pode ser expandida até a pressão atmosférica e o  $CO_2$  mantido a alta pressão, no estado líquido.

A combustão ocorre a alta pressão (da ordem de 60 bar), permitindo a condensação do  $CO_2$  às temperaturas usuais da água do mar.

Um circuito de recirculação retorna parte dos gases resfriados à câmara de combustão, resfriando-a de modo a manter uma temperatura de 900°C e diluindo os gases de combustão até temperaturas de 700°C, visando com isto otimizar as dimensões da caldeira, a eficiência do ciclo Rankine e o emprego de materiais resistentes à temperatura usuais.

O oxigênio é armazenado em tanques criogênicos e pré-aquecido antes de entrar na câmara de combustão.

O dióxido de carbono pode ser armazenado a bordo, evitando a compensação de pesos ou descarregado de forma intermitente (sempre que a situação tática do submarino permitir) para o mar. Neste

caso não é requerido compressor, pois o CO<sub>2</sub> é armazenado a 60 bar, pressão usualmente superior às cotas de operação normais.

O ciclo Rankine é comum, composto por uma caldeira, turbina (que aciona um alternador com saída retificada), condensador resfriado a água salgada e bombas de alimentação. O fluido de trabalho deve ser escolhido conforme o nível de potência. Para instalações de cerca de 100 kW elétricos, fluidos orgânicos, como o tolueno, apresentam melhores resultados (menores rotações da turbina, maior eficiência) do que a água. Para potências da ordem de 200 kW ou mais, o vapor é a melhor opção, pois as rotações requeridas da turbina são viáveis, com alta eficiência isentrópica (até 76% para 200 kWe), evitando assim os problemas de corrosão, degradação ou toxicidade do fluido de trabalho.

Este conceito possui algumas vantagens, tais como:

- seu arranjo físico permite minimizar o comprimento das tubulações de oxigênio entre os tanques criogênicos e a câmara de combustão, o que aumenta sua segurança;

- utiliza tecnologias usuais, exceto para a câmara de combustão, a qual requer desenvolvimento especial; os níveis de temperatura e pressão são, entretanto, moderados, 700°C a 60 bar nos gases de combustão, 500°C a 20 bar no vapor, o que permite o uso de materiais convencionais;

- seu NRI é baixo, devido a combustão contínua, as máquinas principais são rotativas (e não alternativas como os motores diesel e stirling) e as possibilidades de gerenciamento do CO<sub>2</sub>.

A tabela 3.54 apresenta algumas características gerais de um módulo de 200 kWe.

### 3.6.7 - Acumuladores Eletroquímicos

As baterias chumbo-ácido comuns são muito pesadas, mas relativamente baratas. Alternativas para elas são as baterias prata-zinco e prata-cádmio, ambas mais leves e mais compactas, porém mais caras e menos tolerantes aos ciclos normais de utilização em submarinos. Para manter a capacidade destas baterias, elas devem ser totalmente descarregadas primeiramente e só então recarregadas. Todas apresentam perigos devido à produção de gases. A carga da chumbo-ácido produz hidrogênio, que em altas concentrações no ar é explosivo. Se houver contato com a água salgada ocorre a emissão de gás cloro, que é venenoso. Descarregas a altas "rates" envolvem geração de calor, que deve ser retirado. Carga muito rápida pode envenenar o eletrólito, que deve ser circulado mecanicamente dentro do elemento para manter a sua porção aquecida no topo do elemento, de modo que possa ser resfriado.



0 desenvolvimento das baterias chumbo-ácido tem sido espetacular após a 2ª. Guerra Mundial. Modernas baterias alemãs (VARTA, HAGEN) apresentam valores cerca de 60-70% superiores de energia por peso nas descargas rápidas e cerca de 20% nas descargas lentas, se comparadas a baterias da década de 50. As baterias descarregam muito menos energia nas descargas rápidas do que nas lentas e desenvolvimentos futuros podem se direcionar para contornar este problema.

Outras soluções alternativas para baterias são as sódio-sulfúrico, que se encontram atualmente sendo testadas pela indústria automobilística. Estas podem chegar ao dobro do valor de energia por peso das modernas baterias chumbo-ácido. Aplicada aos projetos de submarinos, este tipo de bateria poderia quadruplicar o alcance submerso na máxima velocidade.

Uma proposta para aumentar a capacidade de baterias no submarino é armazená-las externamente ao casco. Conforme a bateria é descarregada, seu eletrólito vai sendo "envenenado" pela reação galvânica. Neste arranjo, novo eletrólito é suprido continuamente aos elementos externos.

### 3 . 6 . 8 - Análise Comparativa

Considerando os requisitos de missão do submarino convencional francês classe AGOSTA, excluindo-se o coeficiente de inscrição, assumido como 1%, B05RAYON [38] comparou quatro concepções baseadas em SPiAs não nucleares :

- motor stirling com fonte de calor proveniente da combustão metálica lítio-hexafluoreto de enxofre ( $6Li+5F_2 = 6Li+Li_2S$ );

- célula de combustível de eletrólito polimérico sólido, com armazenagem criogênica de hidrogênio;

- célula de combustível de eletrólito polimérico sólido, com hidrogênio extraído do metanol através de um reformador;

- célula de combustível de eletrólito polimérico sólido, com hidrogênio armazenado em hidretos metálicos reversíveis.

Suas conclusões indicam que, para o mesmo tipo de missão, a adoção do SPiA praticamente dobra o deslocamento do submarino, e em certos aspectos, seu custo.

Resultados ainda mais desfavoráveis aos SPiA não nucleares podem ser obtidos se limitarmos sua utilização à área de patrulha em baixa velocidade (conceito de propulsão híbrida). Esta solução implica na instalação de um sistema de propulsão triplo (baterias, diesel-elétrico e SPiA), o que afeta o deslocamento e complexidade do submarino. A relação custo/benefício de um SPiA que somente

pode ser usado durante baixas velocidades de patrulha e muito desfavorável. Somente submarinos que operem em teatros que cubram uma pequena área, onde virtualmente não há o período de trânsito, podem se beneficiar destes sistemas. O mar Báltico é um exemplo de tais teatros, onde o SPIA e uma bateria auxiliar é suficiente. Daí o porque desta tecnologia estar mais avançada na Alemanha e Suécia.

Se o submarino é projetado para operar em teatros distantes e de grande área, o SPIA deve ser dimensionado para toda a missão, de forma a otimizar o seu uso. Atualmente, o único desenvolvimento de SPIA não nuclear com esta filosofia é aquele feito pela Maritália/Fincantieri, que entretanto envolve uma radical alteração na concepção da estrutura do submarino e cuja viabilidade só está demonstrada para pequenas unidades.

A figura 3.55 apresenta uma comparação entre as opções de SPIA em estágio mais avançado de desenvolvimento, que são as células de combustível, os motores diesel em ciclo fechado, as turbinas em ciclo fechado e os motores stirling.

De forma geral, podemos então concluir:

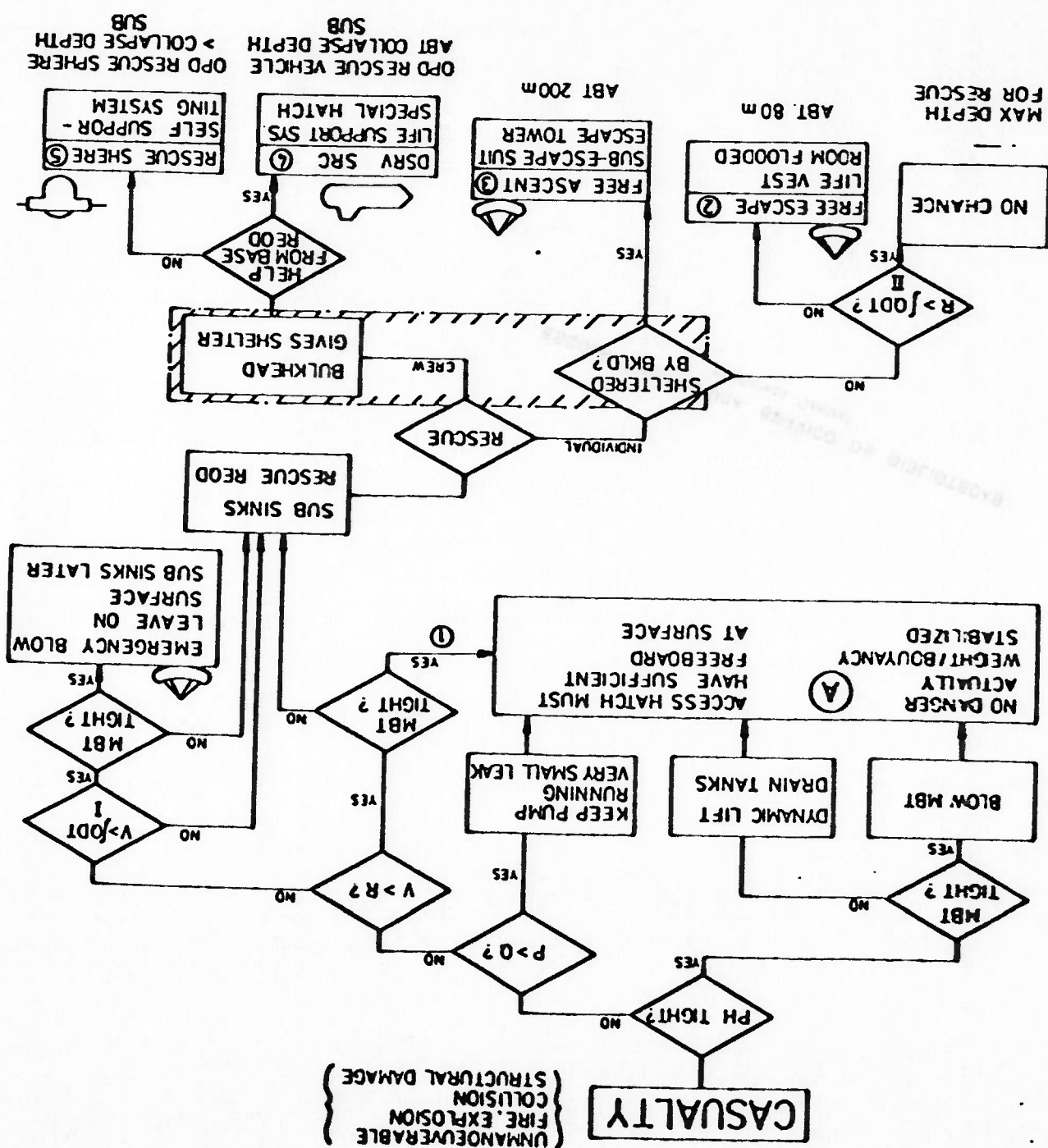
- a turbina Walter é uma opção descartada, tendo sido superada pelos SPIA modernos: seu desenvolvimento prático na década de 50 não teve sucesso!

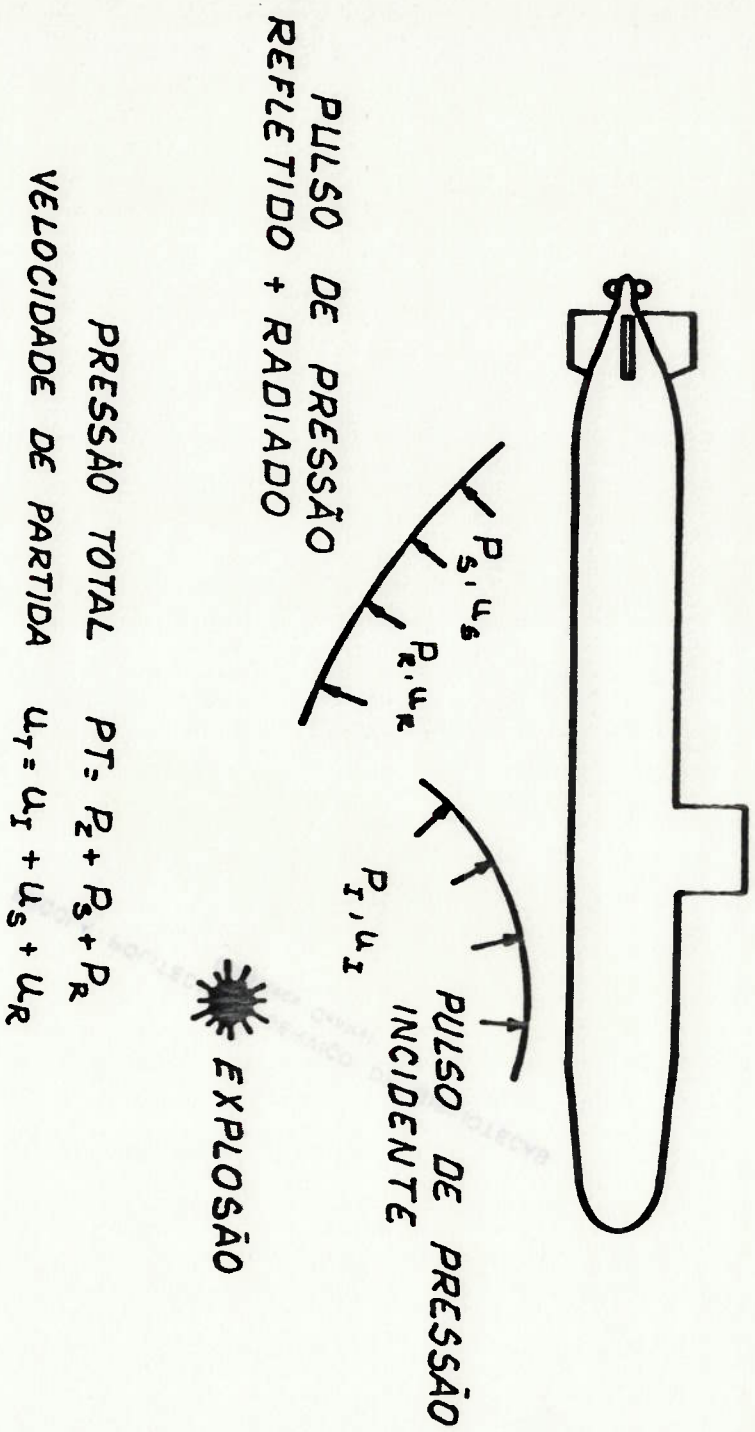
- os motores diesel de ciclo fechado são a melhor opção para propulsão de veículos não-militares e para adaptação de submarinos militares atualmente em operação; sua aplicação em conjunto com o conceito GST ("Gas Storage in Toroids") italiano é extremamente promissor!

- as baterias sódio-sulfúrico têm grandes perspectivas de emprego em submarinos a médio prazo, sendo descartadas as outras opções de baterias pela duvidosa viabilidade técnico-econômica, entretanto, seu resultado será melhorar substancialmente o desempenho dos submarinos convencionais, e não atingir a almejada independência do ar!

- o motor Stirling e as células de combustível são sérios competidores para ocupar lugar proeminente no desenvolvimento de futuros projetos de submarinos não-nucleares de pequeno porte, para operarem em águas restritas, ou seja submarinos de emprego costeiro.

P = Pump capacity [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 Q = Quantity of water per second through leak  $Q = A \sqrt{2gh}$  [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]  
 R = Room floodable by leak water [ $\text{m}^3$ ]  
 V = Volume of MBT [ $\text{m}^3$ ]  
 A = Effective area of leak [ $\text{m}^2$ ]  
 h = Depth of leak below surface (m)  $h = 9.81 \text{ m/s}^2$   
 {Qdt = Quantity of water in SUB during period I, starting with leak ending with moment the last man left SUB  
 {Qdt = Quantity of water in SUB during period II, starting with leak in pressure in SUB equals ambient pressure for opening access hatch.  
 This period must be short enough for leaving subsequently the SUB and ascending to surface without harm from decompression sickness



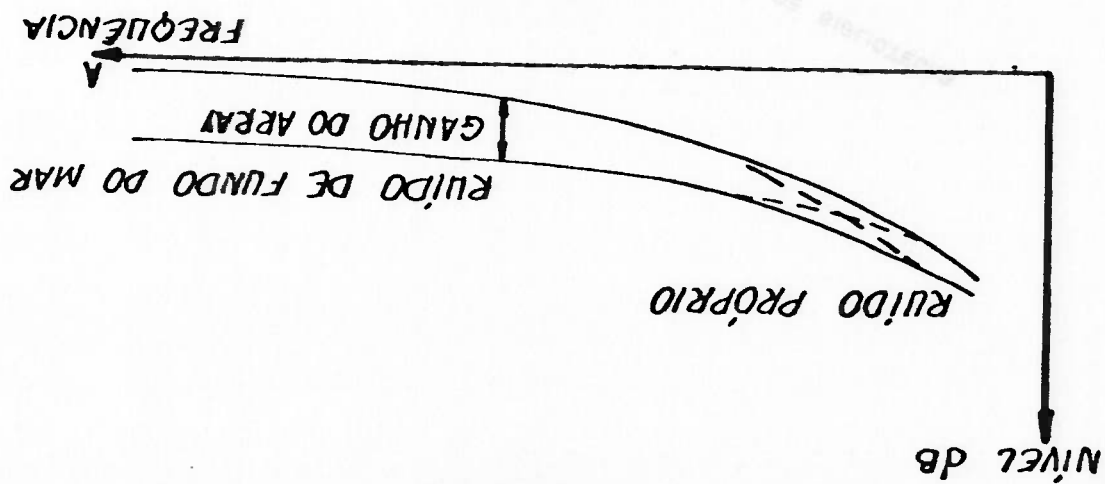


**SUBMARINO SUBMETIDO A CARREGAMENTO DE CHOQUE.**

**FIGURA 5.2**

# PROCEDIMENTO PARA ELABORAÇÃO DE CURVAS DE DETECÇÃO POR RUÍDO IRRADIADO

1º PASSO



2º PASSO

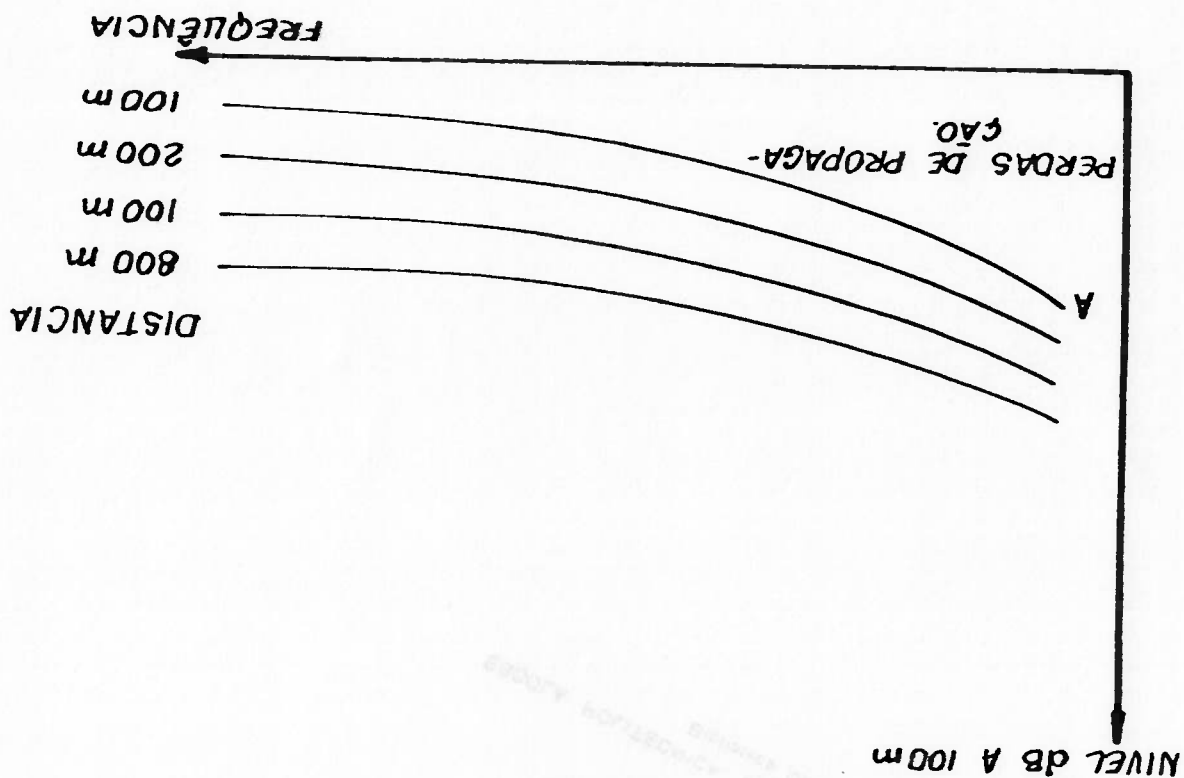


FIGURA 3.3



TENDENCIAS COMPARATIVAS DO NIVEL DE RUÍDO EM  
 BAUDA LARGA DE SUBMARINOS AMERICANOS E SOVIÉTICOS  
 FONTE: STEFANICK, "STRATEGIC ANTI-SUBMARINE WARFARE AND  
 NAVAL STRATEGY";

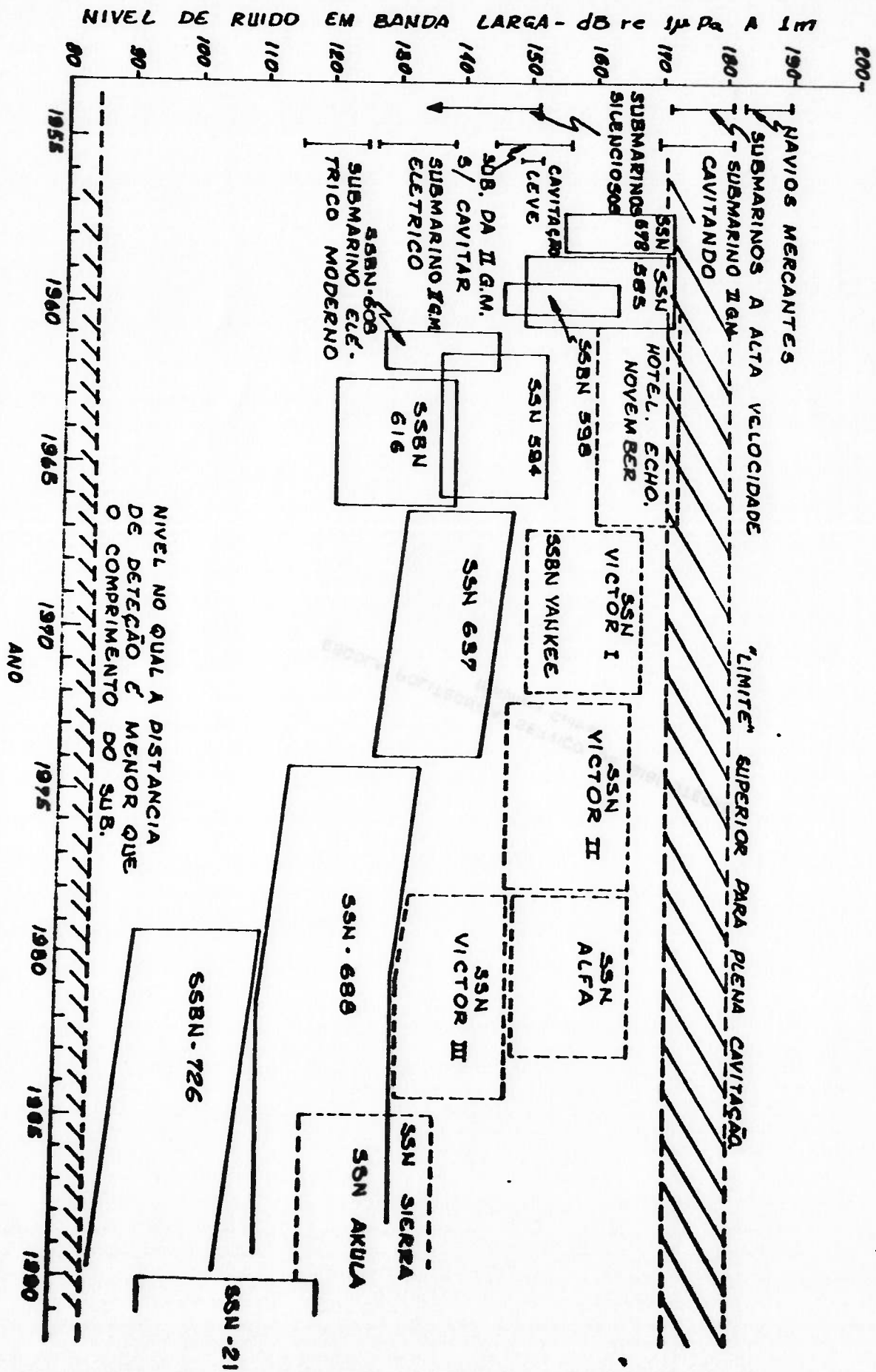


FIGURA 3.4

**FUNCOES DE TRANSFERENCIA**

**RUIDO TRANSMITIDO AO AR**

**POTENCIA ACUSTICA NO INTERIOR DO CASCO**



**MEDICAO**

**PRESSAO SONORA NA AGUA**

**RUIDO TRANSMITIDO A ESTRUTURA**

**VIBRACOES DE MAQUINAS**



**CALCULO E MEDICAO**

**FORCA NAS FUNDACOES**



**MEDICAO**

**PRESSAO SONORA NA AGUA**

**RUIDO TRANSMITIDO AO FLUIDO**

**PULSACOES DE PRESSAO NO INTERIOR DE TUBULACOES**



**CALCULO E MEDICAO**

**FORCA APLICADA AO CASCO**

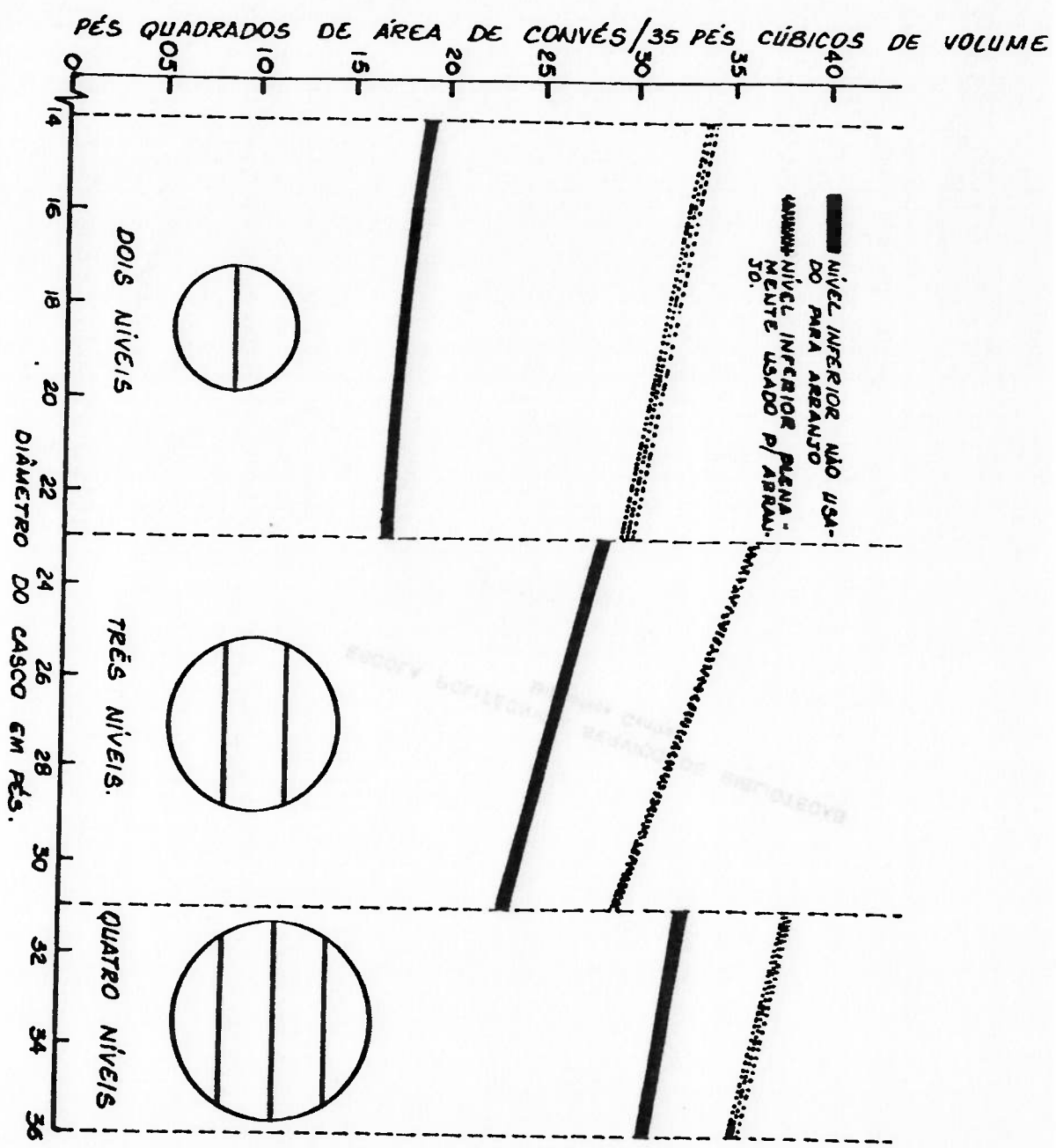


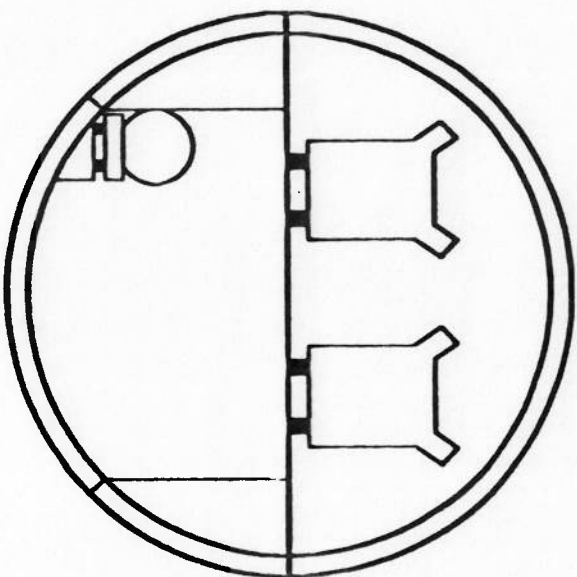
**MEDICAO**

**PRESSAO SONORA NA AGUA**

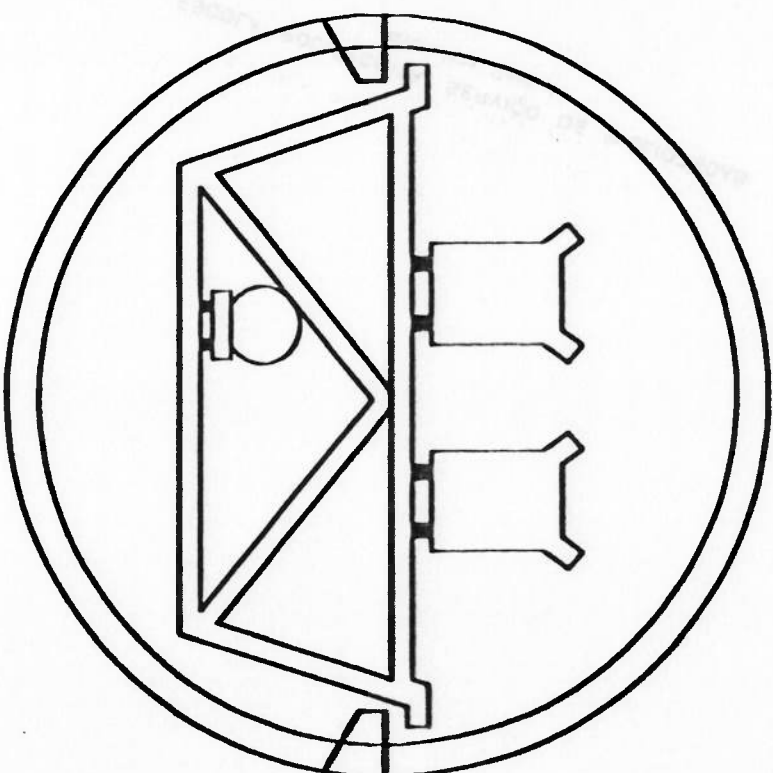
**FIGURA 3-5**

FIG. 3.6 VARIAÇÃO NA ÁREA ÚTIL DE CONVÉS COM O DIÂMETRO DO CASCO





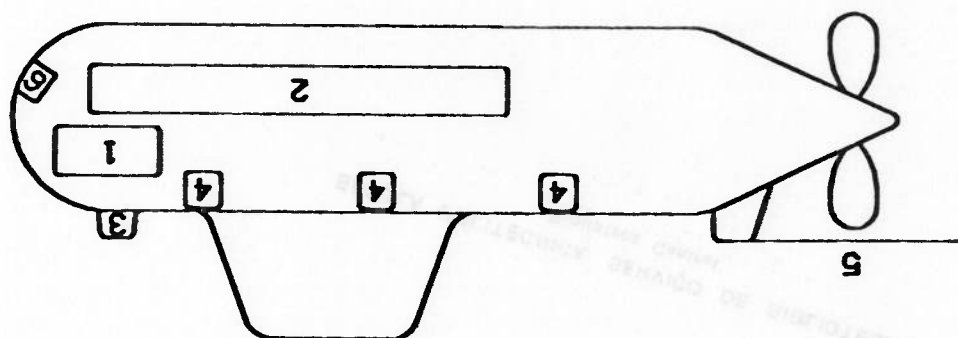
ARRANJO CONVENCIONAL



NOVO ARRANJO

Figure 3 . 7

# SISTEMAS DE HIDROFONES EM SUBMARINOS MODERNOS



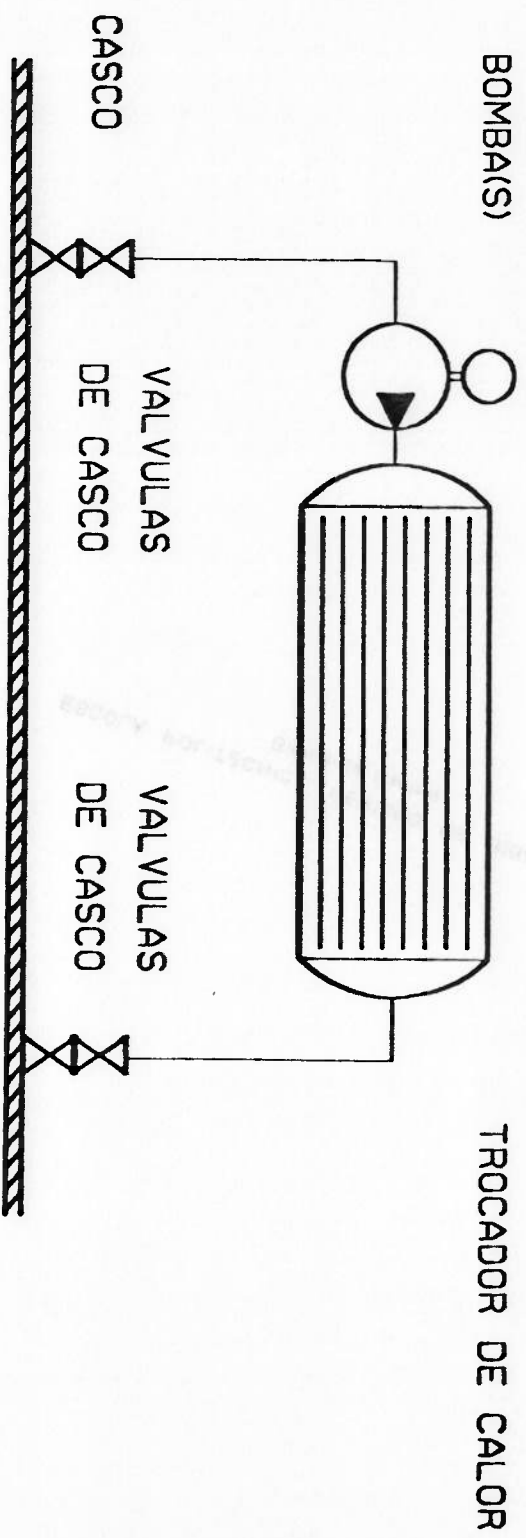
1. CILINDRO (OU ESFERICO)  
2. LATERAL

3. DE INTERCEPTACAO  
4. ARRAY DE MEDICAO DE DISTANCIA

5. REBOCAVEL  
6. SONAR ATIVO DE DETECAO DE MINAS

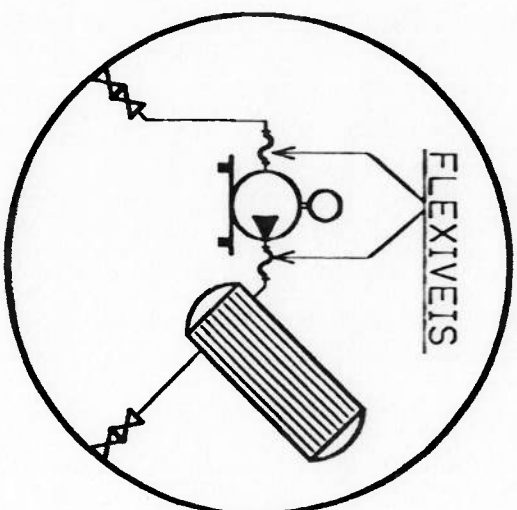
FIGURA 3.8



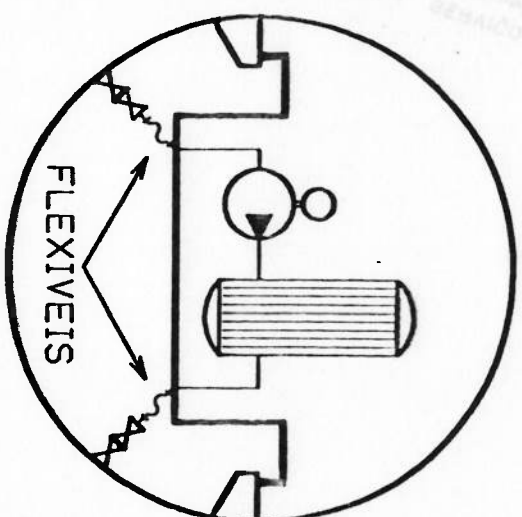


SISTEMA DE RESFRIAMENTO POR AGUA SALGADA

FIGURA 3.9



ARRANJO CONVENCIONAL



NOVO ARRANJO

Figure 3.10

FIGURA 3.12 TIPOS DE ARRANJO

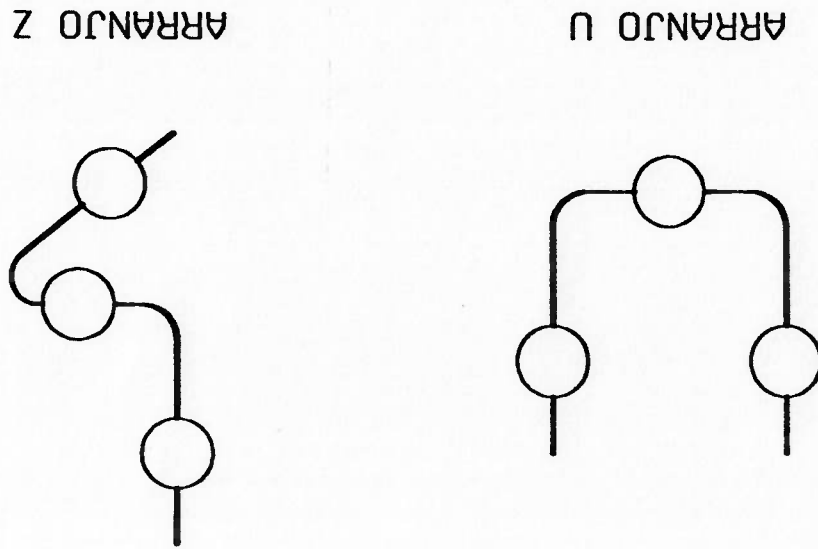


FIGURA 3.11 PROJETO DE JUNTAS FLEXIVEIS

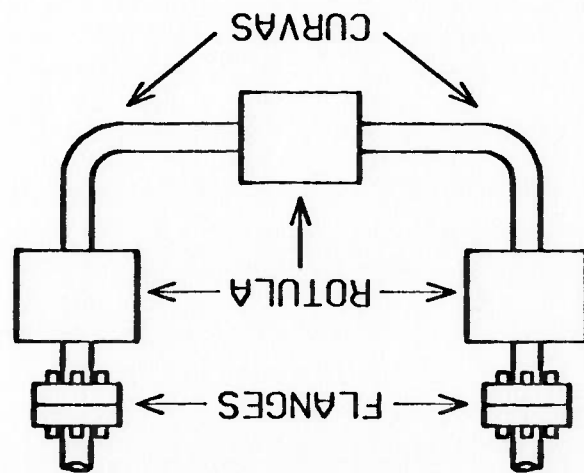
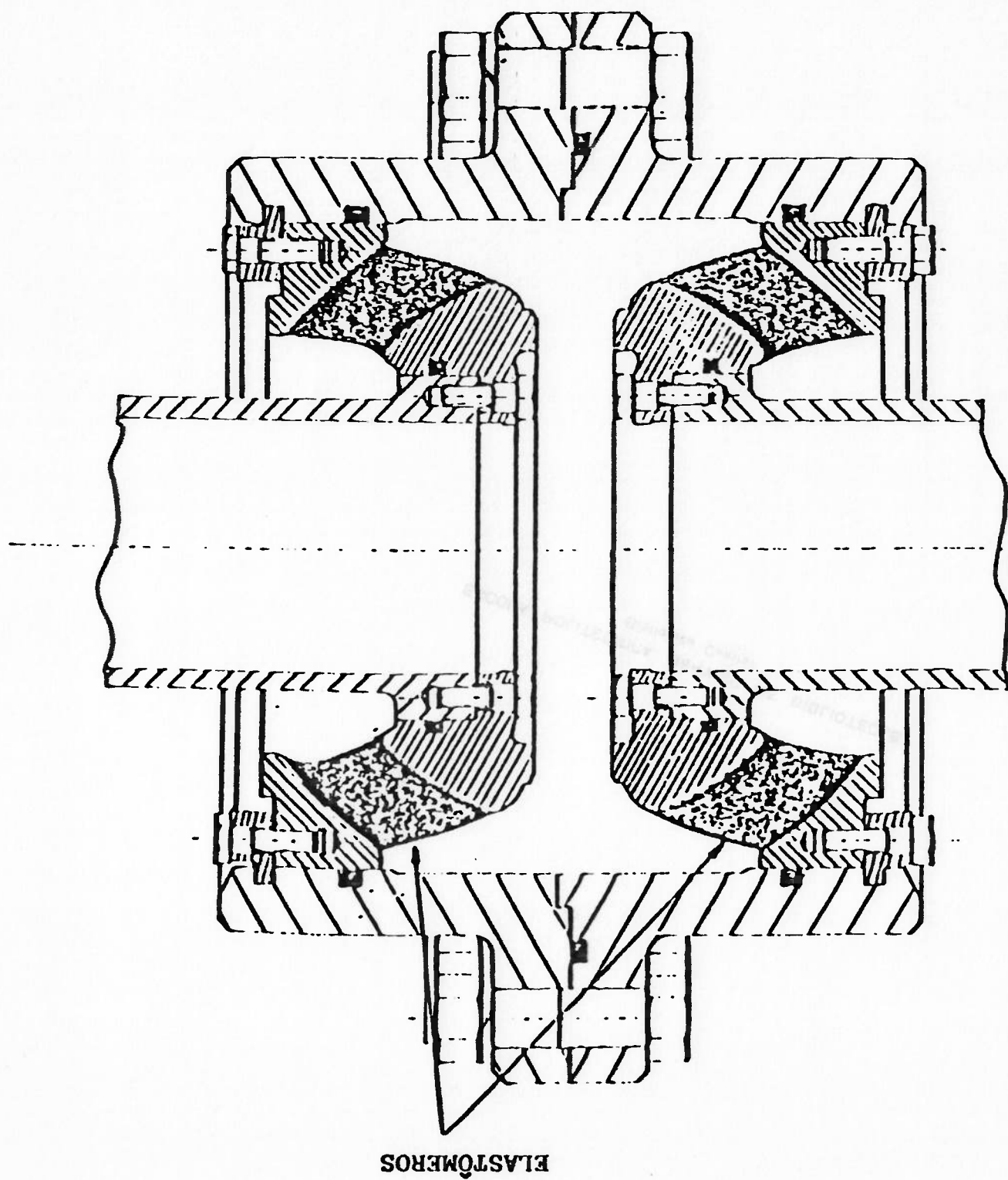


FIG. 3.13 - JUNTA FLEXÍVEL TIPO RÓTULA TÍPICA



# SISTEMA DE PROPULSAO CONVENCIONAL: DIAGRAMA DE BLOCOS

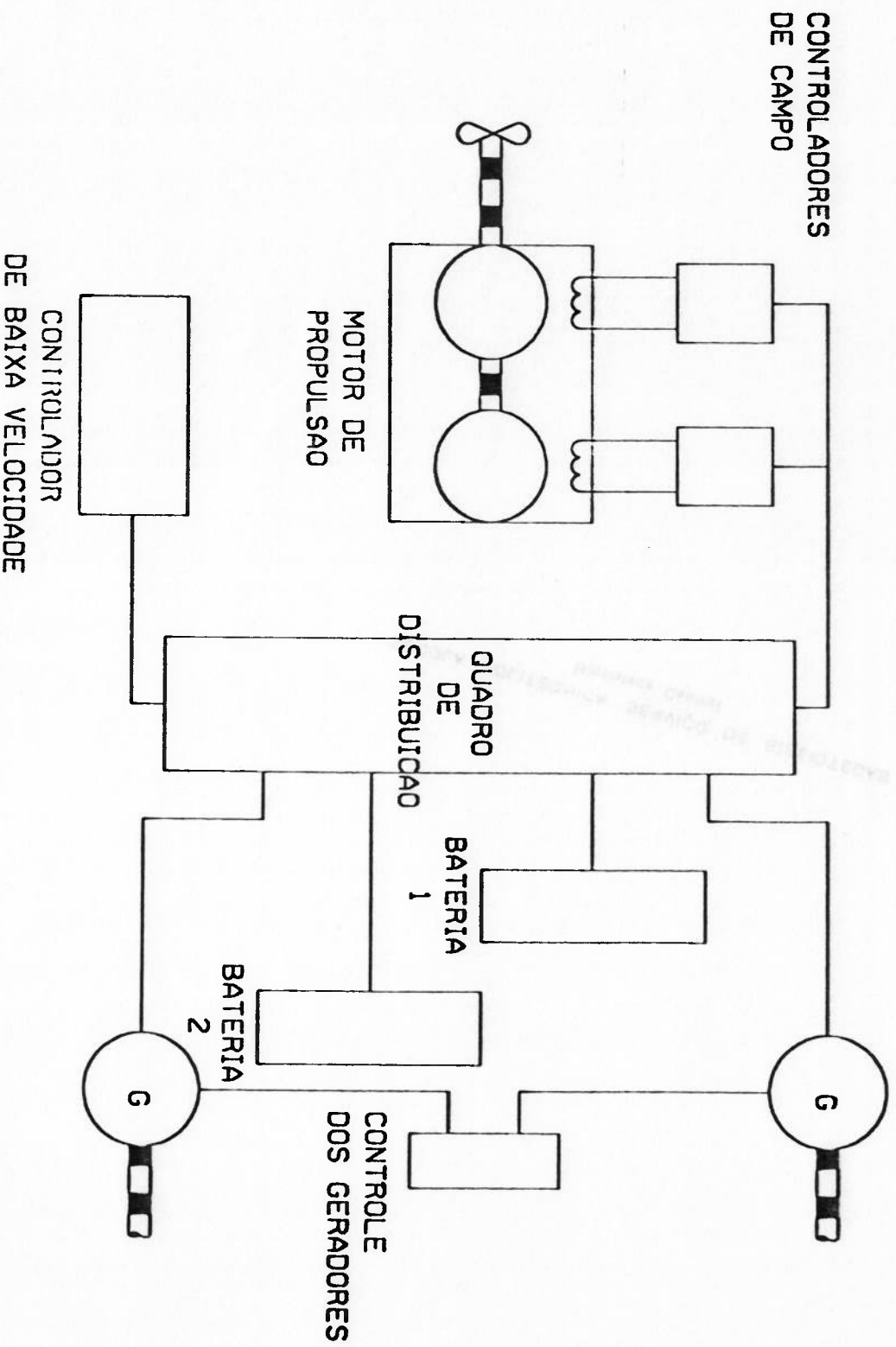


FIGURA 3.14



# SISTEMA DE PROPULSÃO CONVENCIONAL - CONCEITO DOS ANOS 70

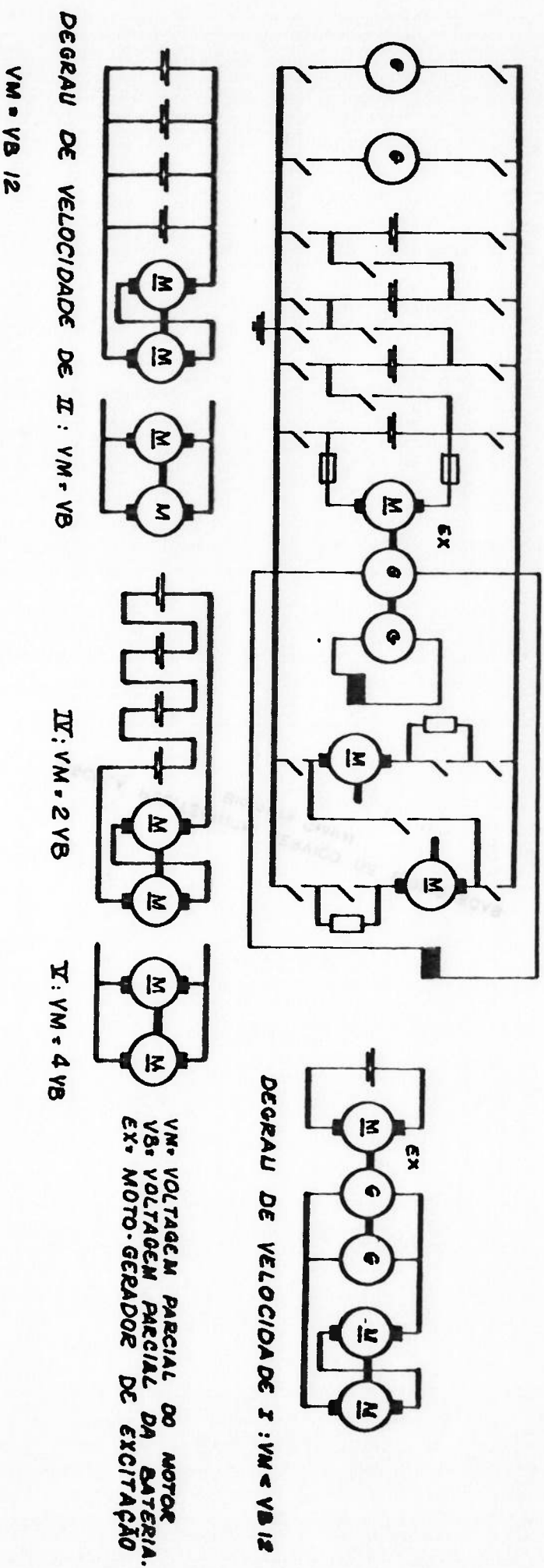
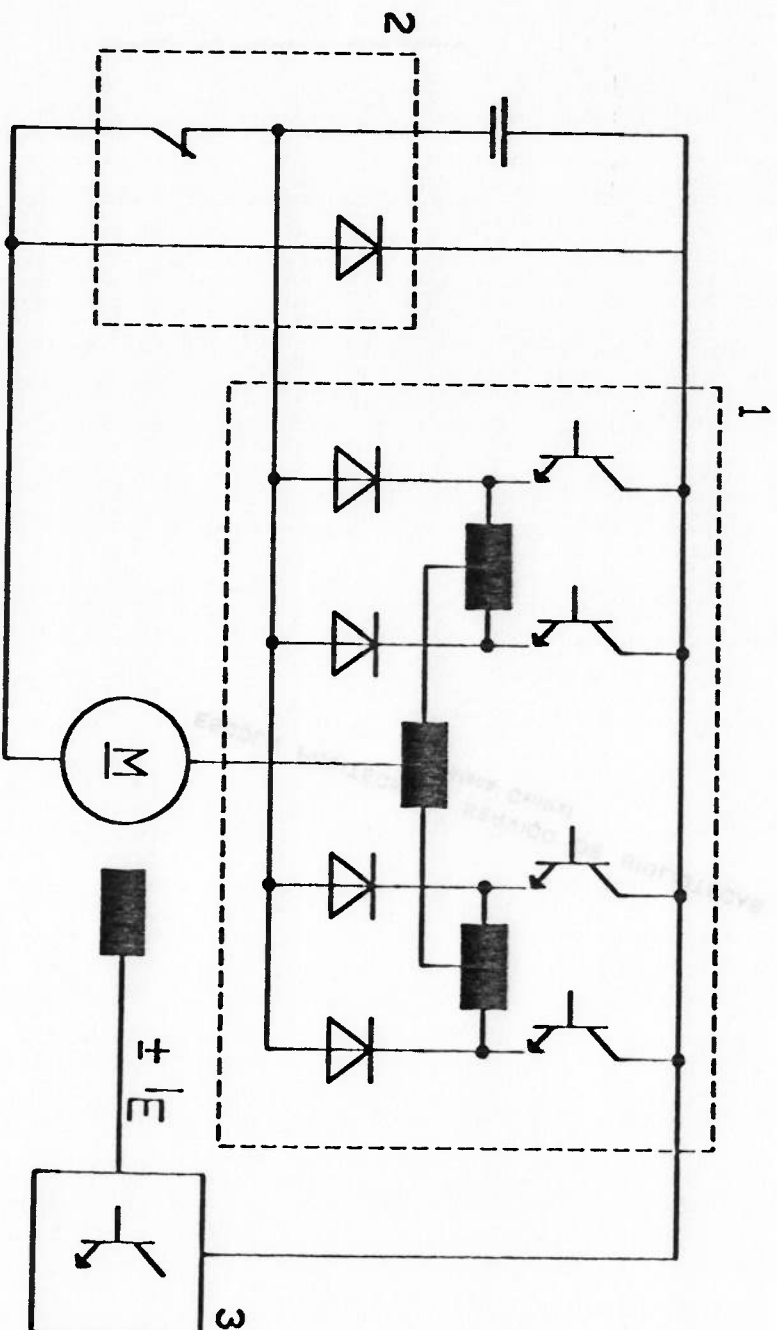


FIGURA 3.15

# CONVERSOR DE CORRENTE DE CAMPO E ARMADURA TIPO "CHOPPER"



- 1 = CHOPPER DE CORRENTE DE ARMADURA EM UM QUADRANTE COM TRANSFORMADORES
- 2 = MODULO DE REVERSAO
- 3 = CHOPPER DE CORRENTE DE EXCITACAO EM QUATRO QUADRANTES

FIGURA 3.17

Construção de um  
MSPMM  
(Permasyn da Siemens)

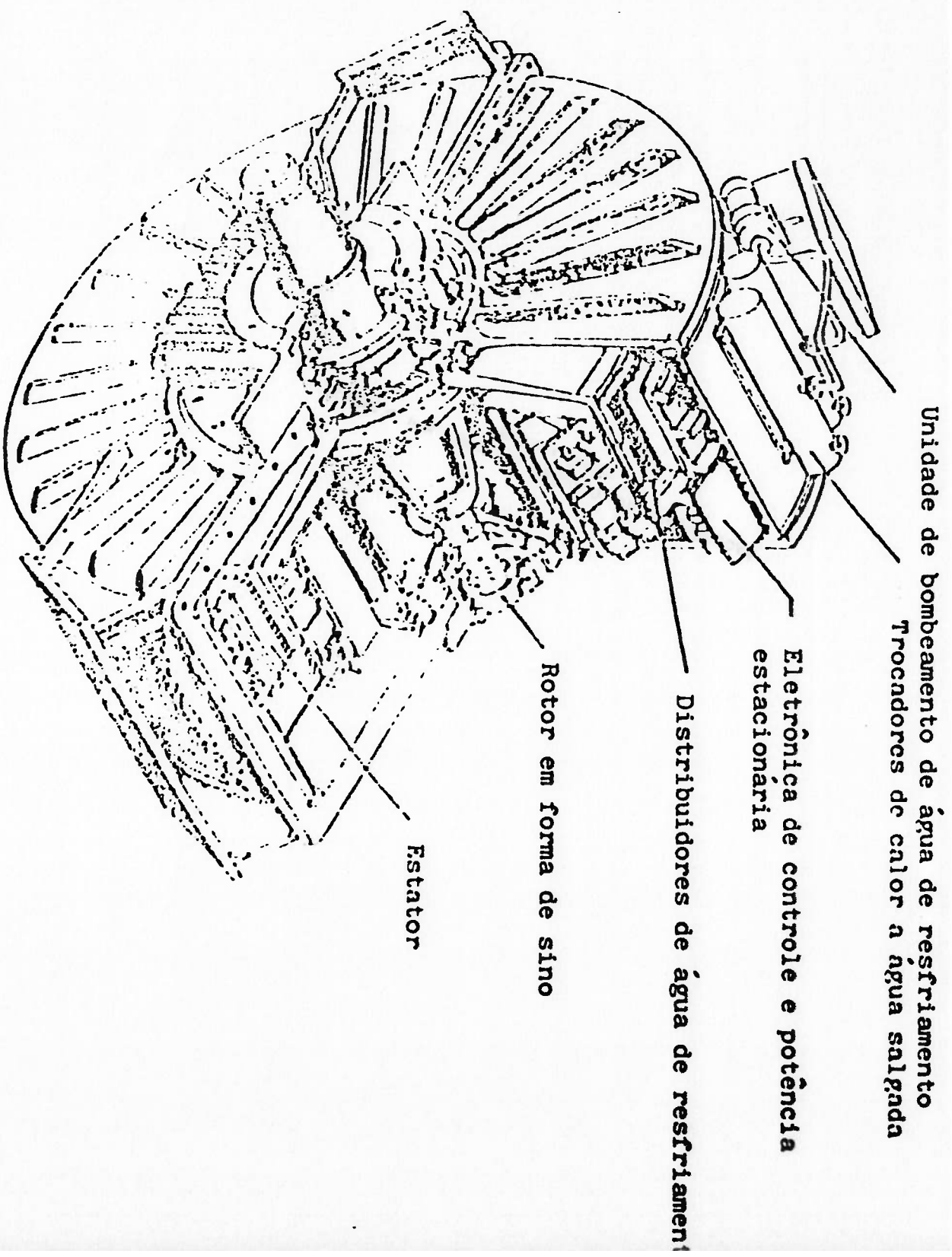


FIGURA 3.18

# SISTEMA DE PROPULSAO CONVENCIONAL - CONCEITO DOS ANOS 90

- 1= MSPMP
- 2= FONTES DE ENERGIA
- 3= DISTRIBUICAO ELETRICA (CARGAS HOTEL)

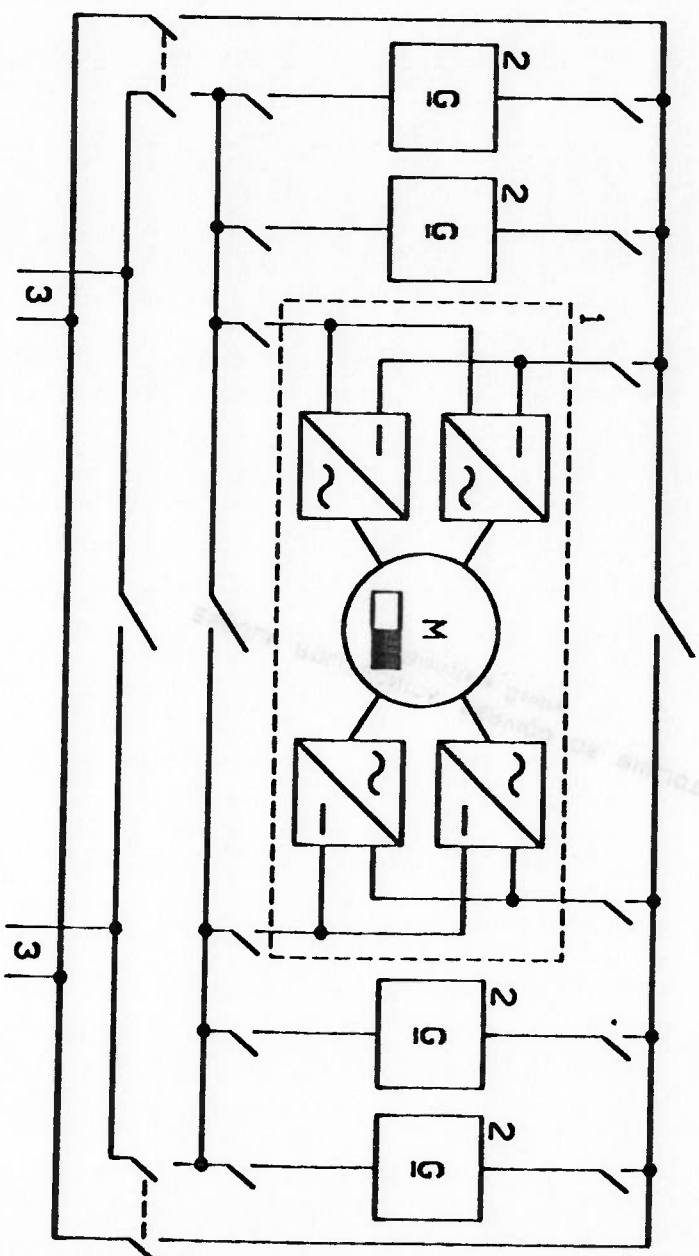
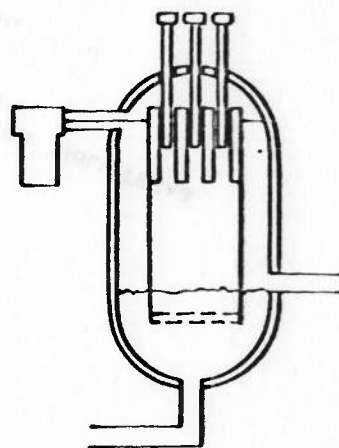


FIGURA 3.19

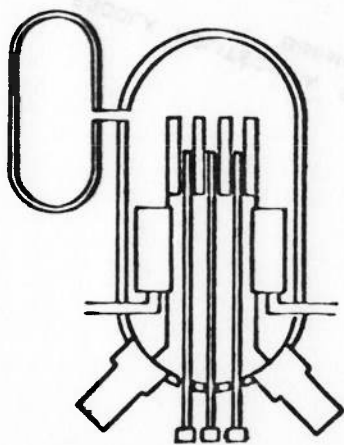
# REATORES DE ÁGUA LEVE

BWR

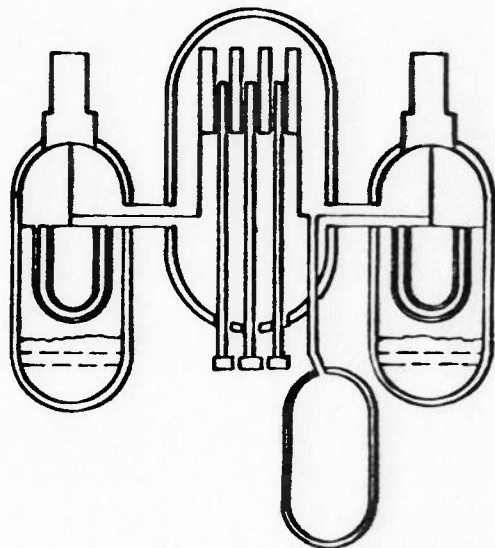


PWR

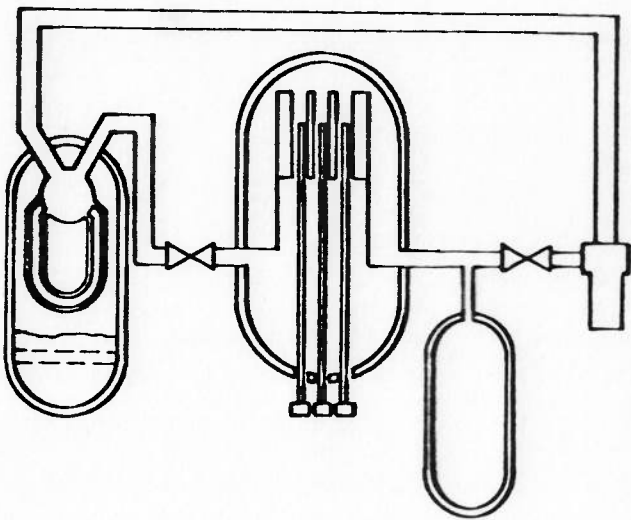
PRESSURIZADO  
EXTERNAMENTE



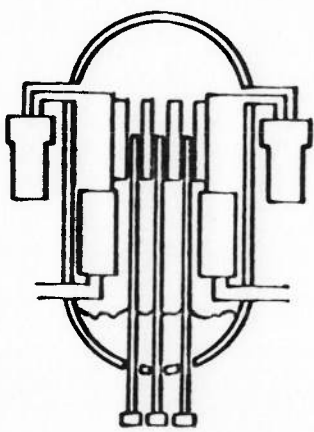
PWR ACOPLADO



PWR SEGREGADO



AUTO - PRES-  
SURIZADO





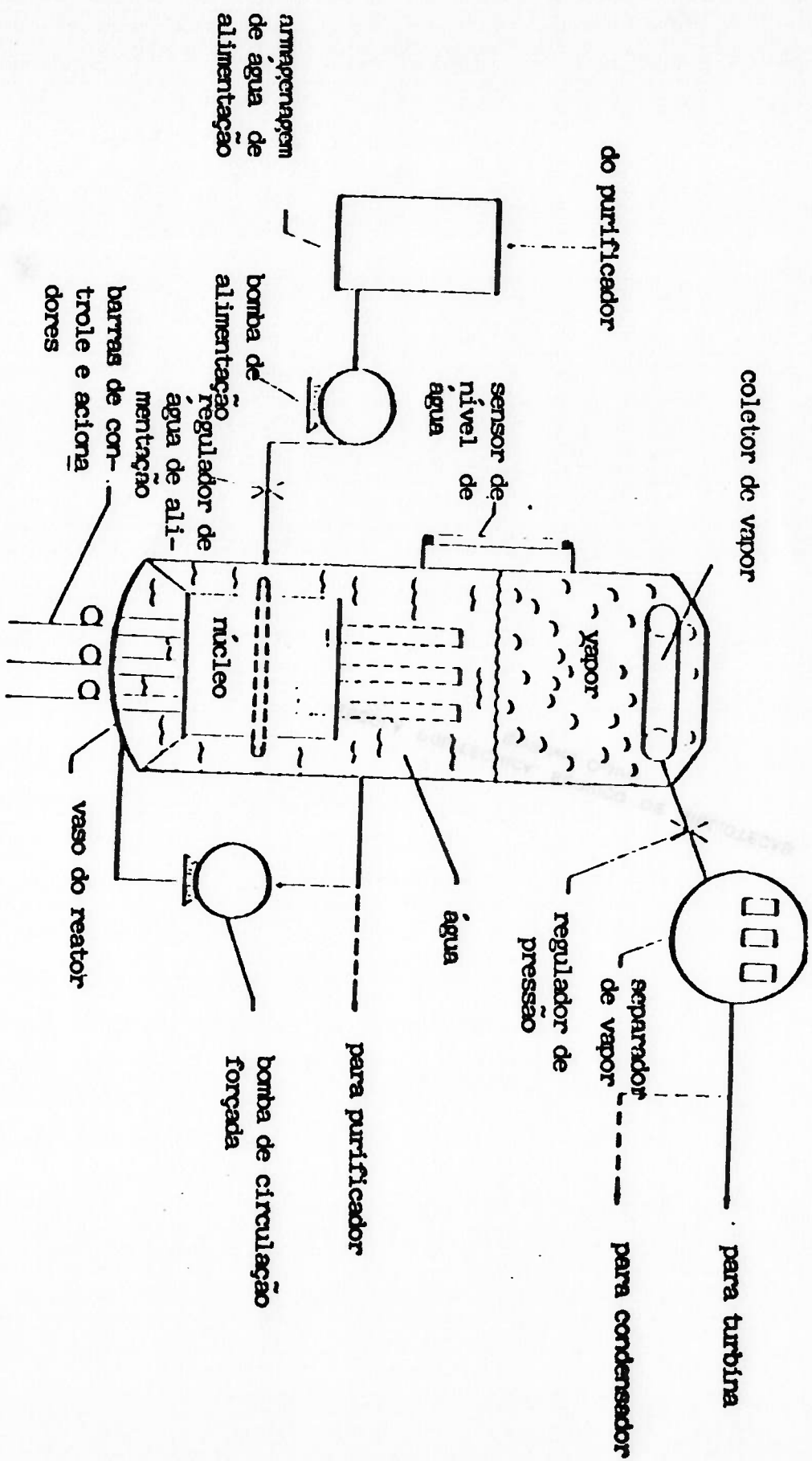


FIG. 3.21 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UM BWR

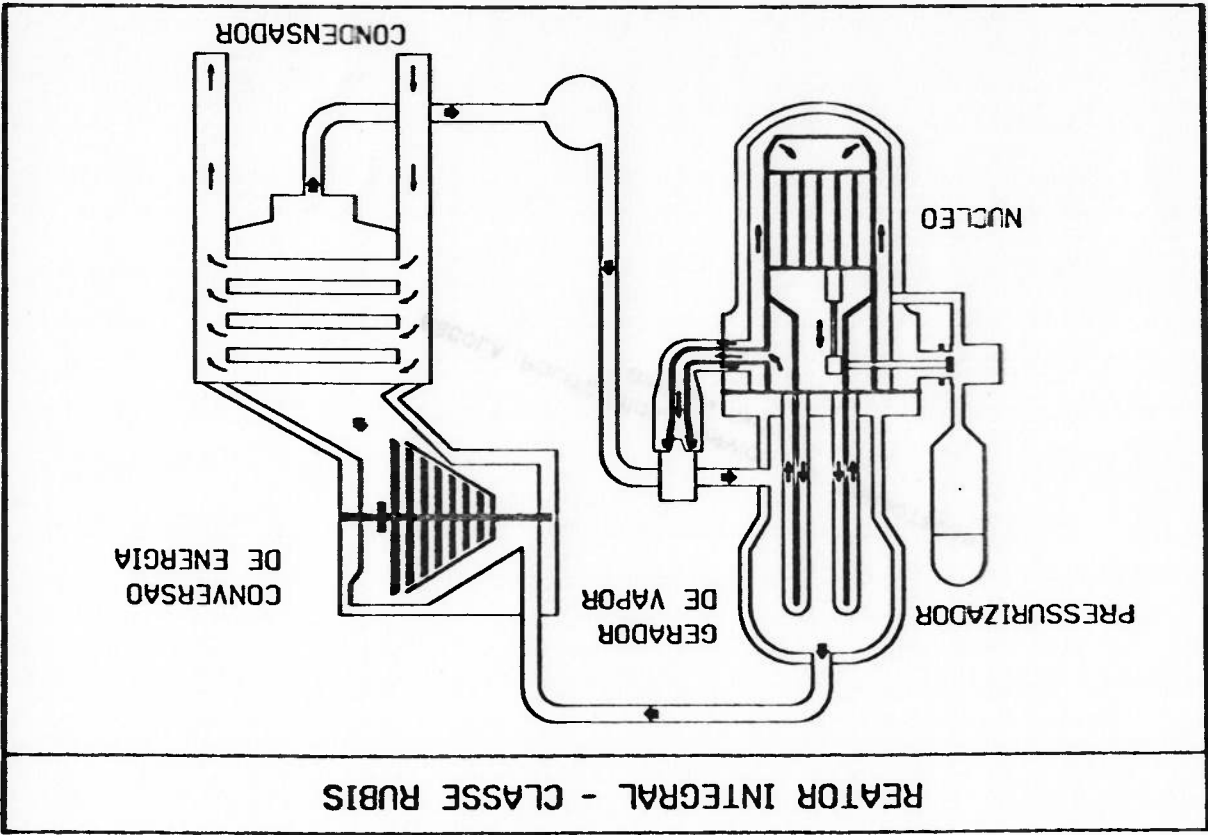


Figura 3 . 22

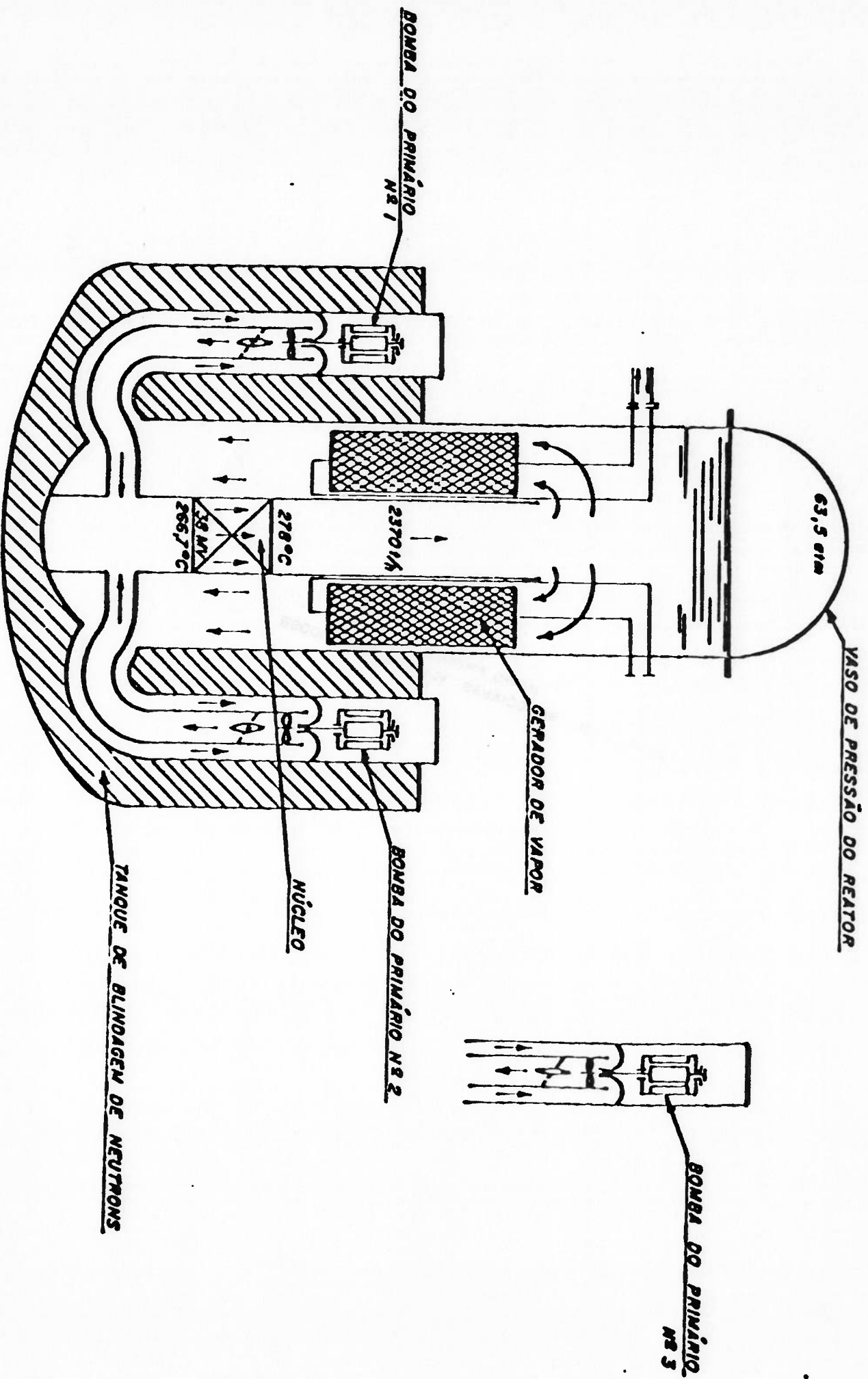


FIG. 3.23 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO  
REATOR PWR INTEGRADO NM " OTTO HAHN"

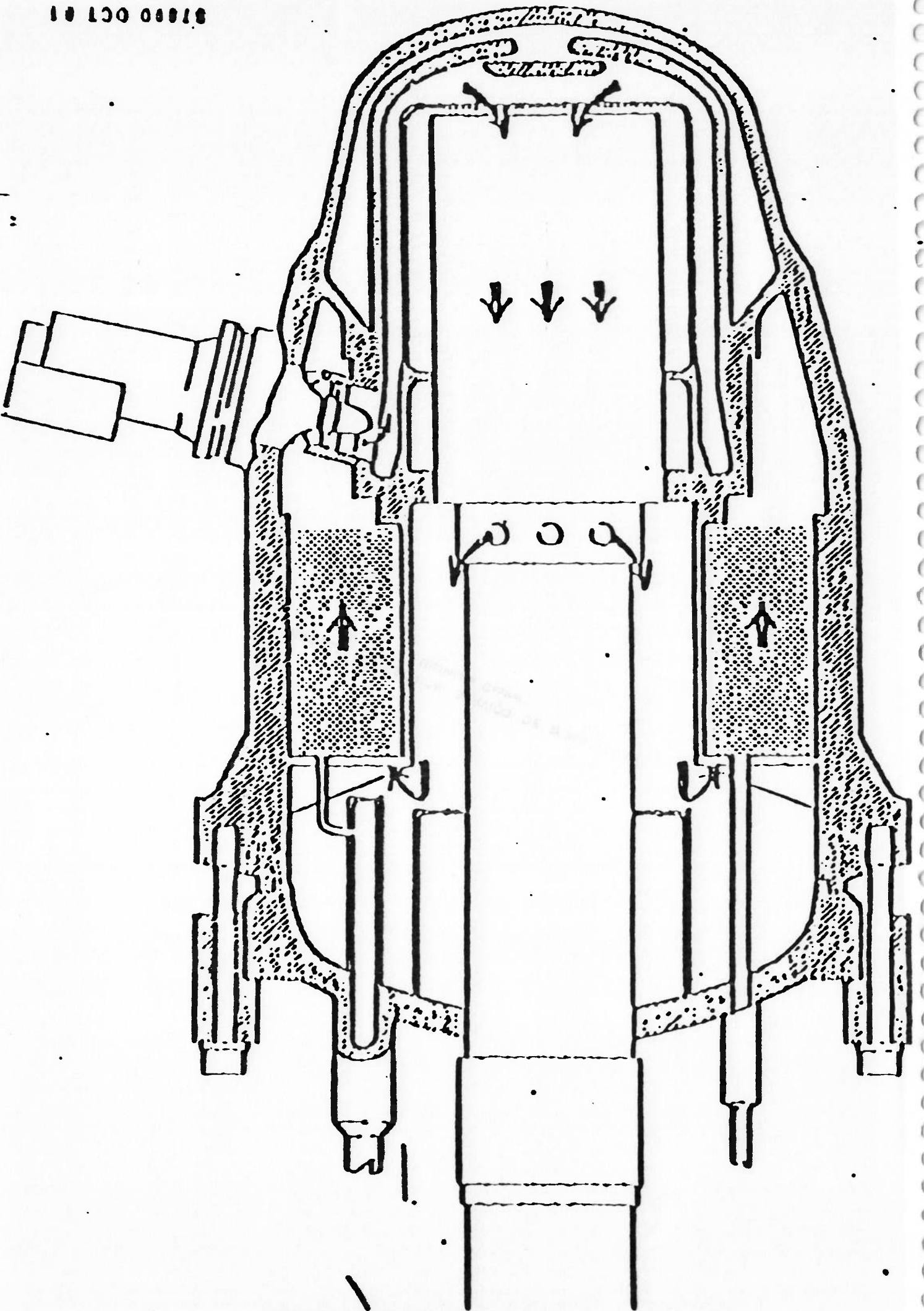


FIG. 3.2 4 - REATOR PWR INTEGRAL INCLIS

FIG. 3.25 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO REATOR PWR INTEGRADO "SCORE"

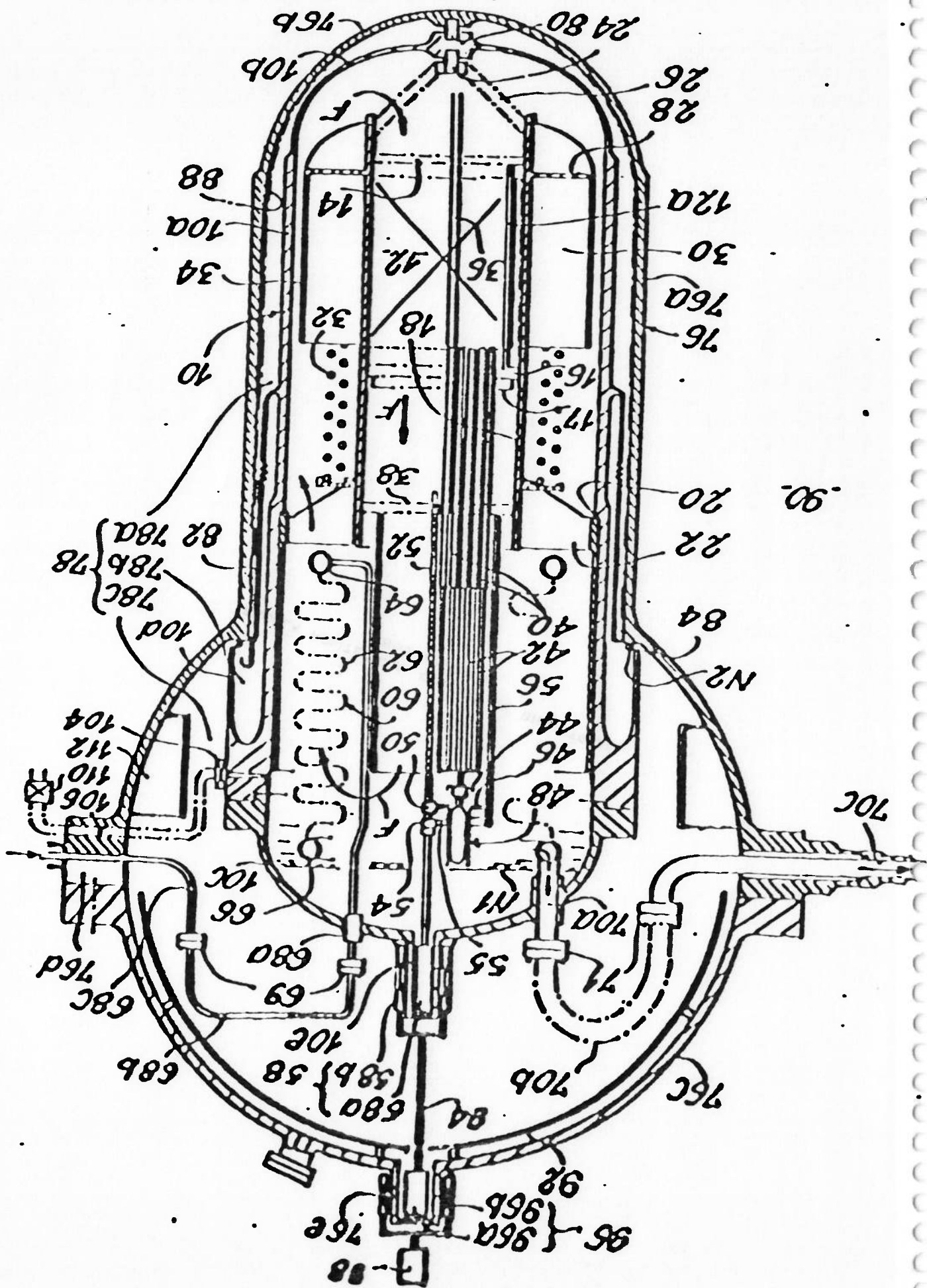




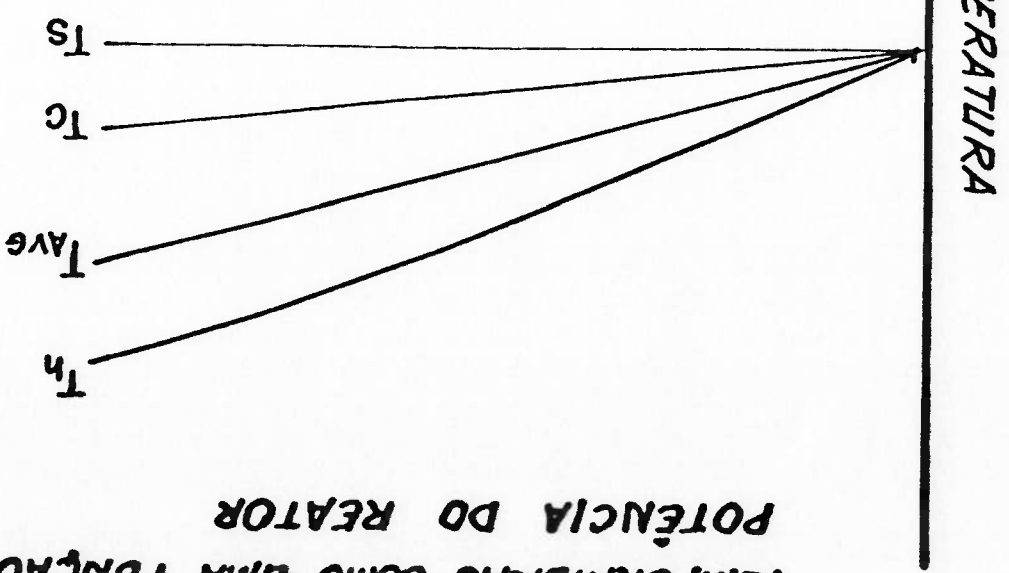
TABELA 3.26 - COMPOSTOS DE URÂNIO

COMPOSTO	MASSA ESPECÍFICA (g/cm <sup>3</sup> )	% DE URÂNIO (EM PESO)	MASSA ESPECÍFICA DO URA- NIO NO COMPOSTO (g/cm <sup>3</sup> )	TEMPERATURA LIMITE (°C)
U	19.1	100	19.1	1130
U <sup>6</sup> Fe	17.1	96.1	17.0	815
U <sup>3</sup> Si	15.6	96.2	15.0	930
UN	14.3	94.4	13.5	2650
UC	13.6	95.5	13.0	2350
U <sup>2</sup> C <sup>3</sup>	12.9	93.0	12.0	1775
U <sup>3</sup> Si <sup>2</sup>	12.2	92.6	11.3	1650
UC <sup>2</sup>	12.9	90.6	11.7	2500
UO <sup>2</sup>	10.9	88.2	9.6	2865
U <sup>3</sup> O <sup>8</sup>	8.4	84.5	7.1	2500
UAl <sup>12</sup>	8.1	81.5	6.6	1580
UZr <sup>2</sup>	10.3	55.3	5.7	600
UAl <sup>3</sup>	6.7	73.1	4.9	1350
UAl <sup>2</sup>	6.8	68.3	4.1	730

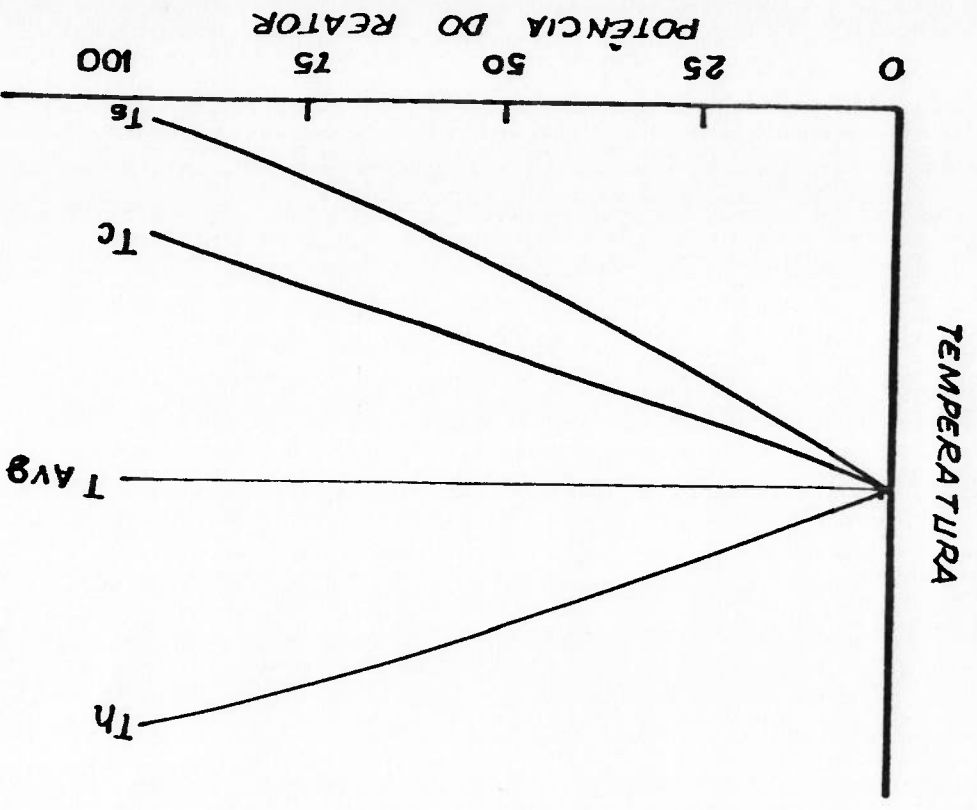
TABELA 3.27 - Esquematisacao dos Combustiveis de Urânio Mais Utilizados

Combustiveis de Urânio		
Metálicos	Ligas com alto teor de U	Umet U-Mo U-Ni
	Ligas com baixo teor de U ("dispersões metálicas")	U-Zr U-Zr-Hx U-A1
Cerâmicos		U O <sub>2</sub> U C, U N
Dispersões	Dispersões de combustíveis cerâmicos ("Cermets")	UO <sub>2</sub> -SS UO <sub>2</sub> -ZrY U <sub>3</sub> O <sub>8</sub> -A1 U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> -A1
	Dispersões de combustíveis metálicos	UA1X-A1 UZr-ZrY-4

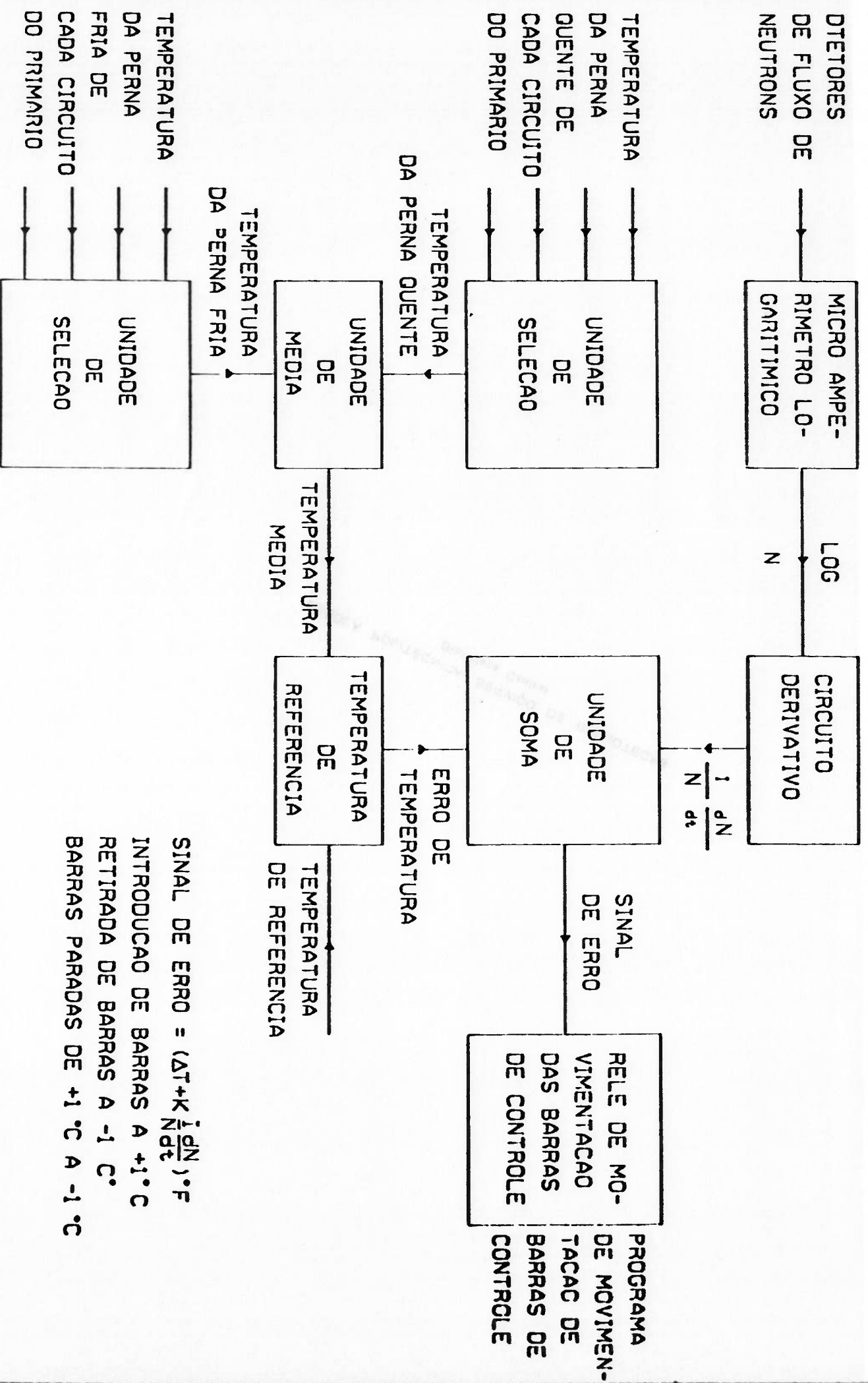
TEMPERATURAS COMO UMA FUNÇÃO DA  
POTÊNCIA DO REATOR



PROGRAMA DE TEMPERATURA DE VAPOUR CONSTANTE  
FIGURA 3.31



PROGRAMA DE TEMPERATURA MÉDIA CONSTANTE  
FIGURA 3.30



$$\text{SINAL DE ERRO} = \left( \Delta T + K \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \right) \cdot F$$

INTRODUCAO DE BARRAS A +1°C  
 RETIRADA DE BARRAS A -1°C  
 BARRAS PARADAS DE +1°C A -1°C

FIGURA3.32.-SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E POTENCIA DO PWR .

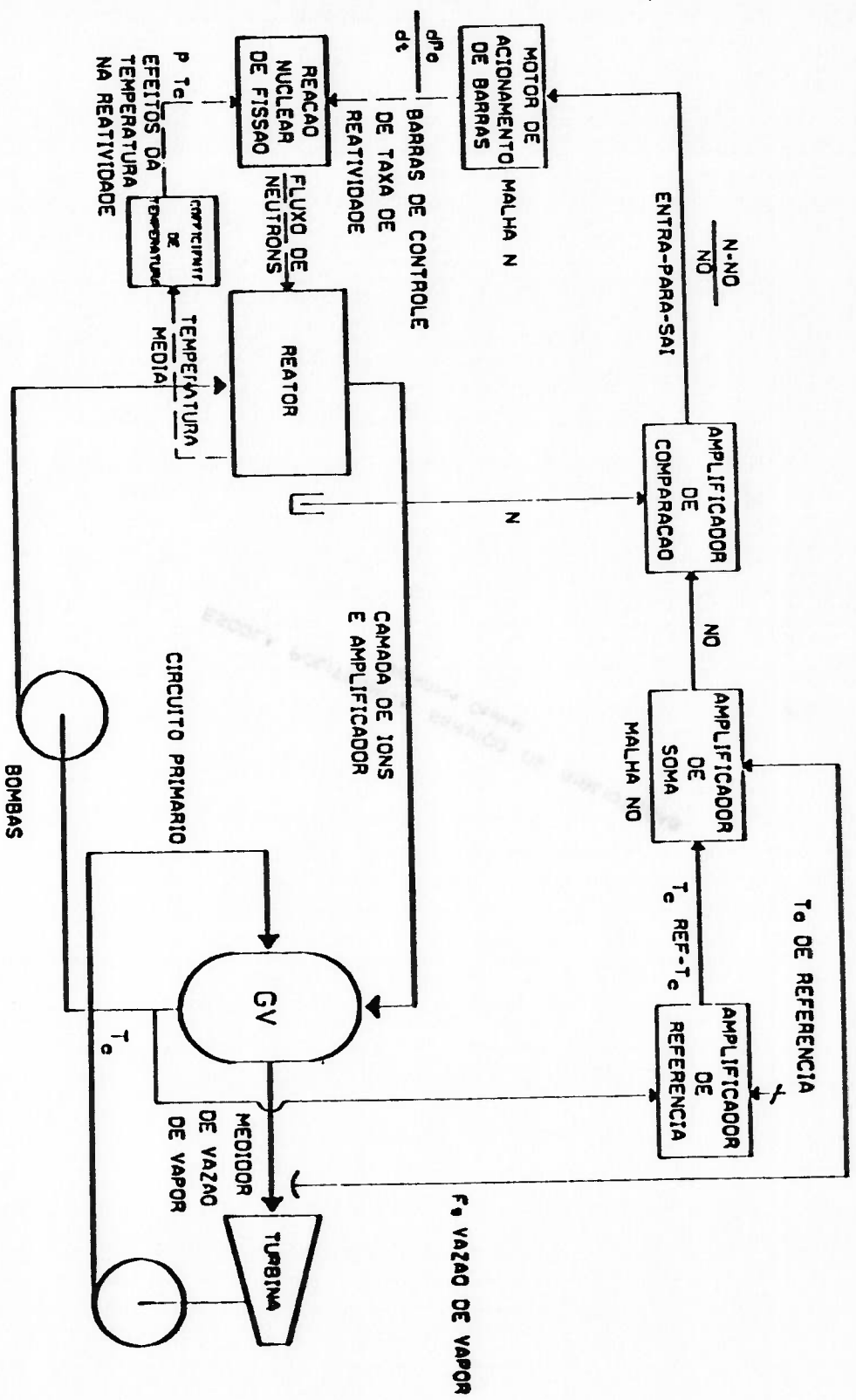


FIGURA 3.33 SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA E POTENCIA DO REATOR DE PROPULSAO.



FIGURA 3.35 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA WALTER INDIRETO

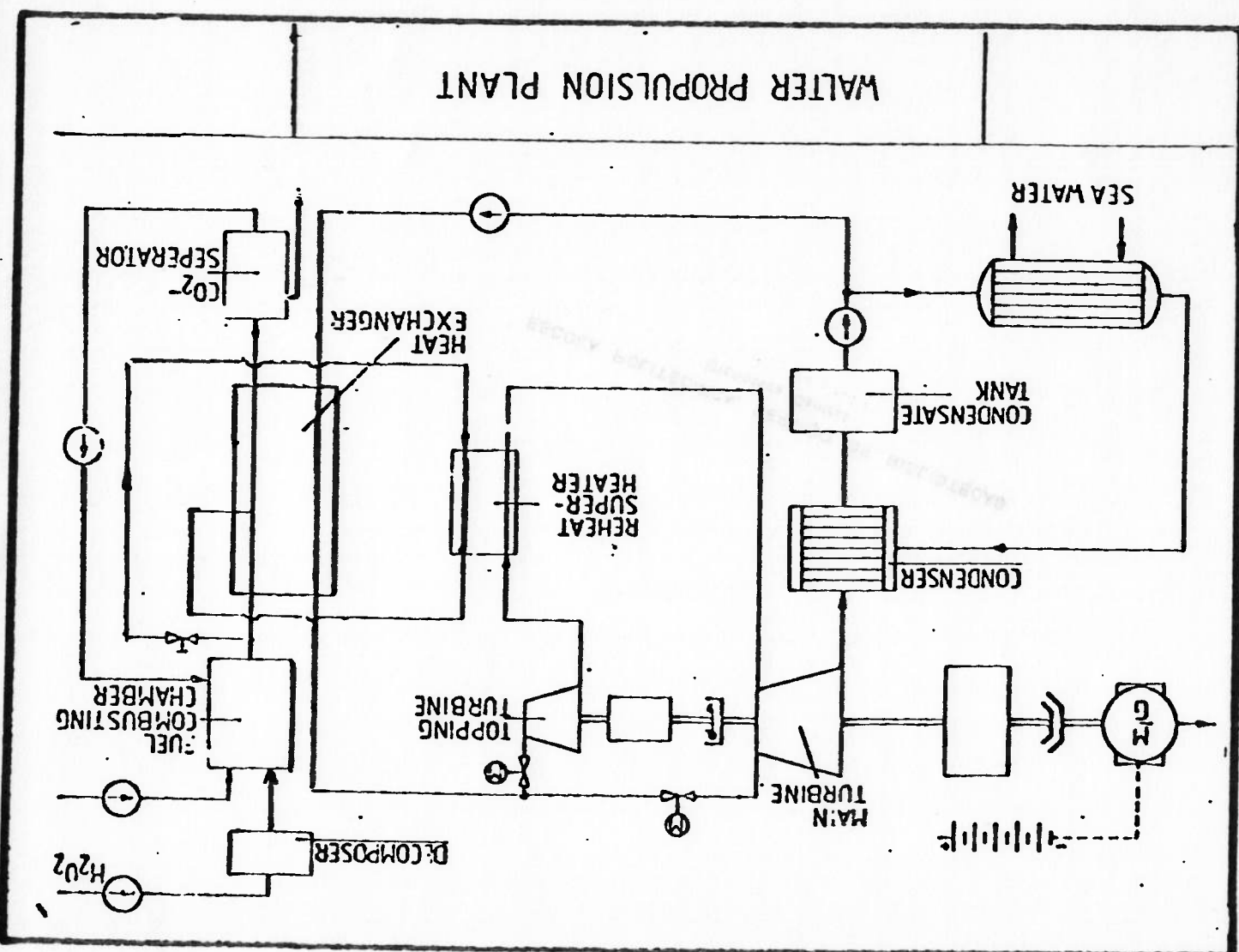
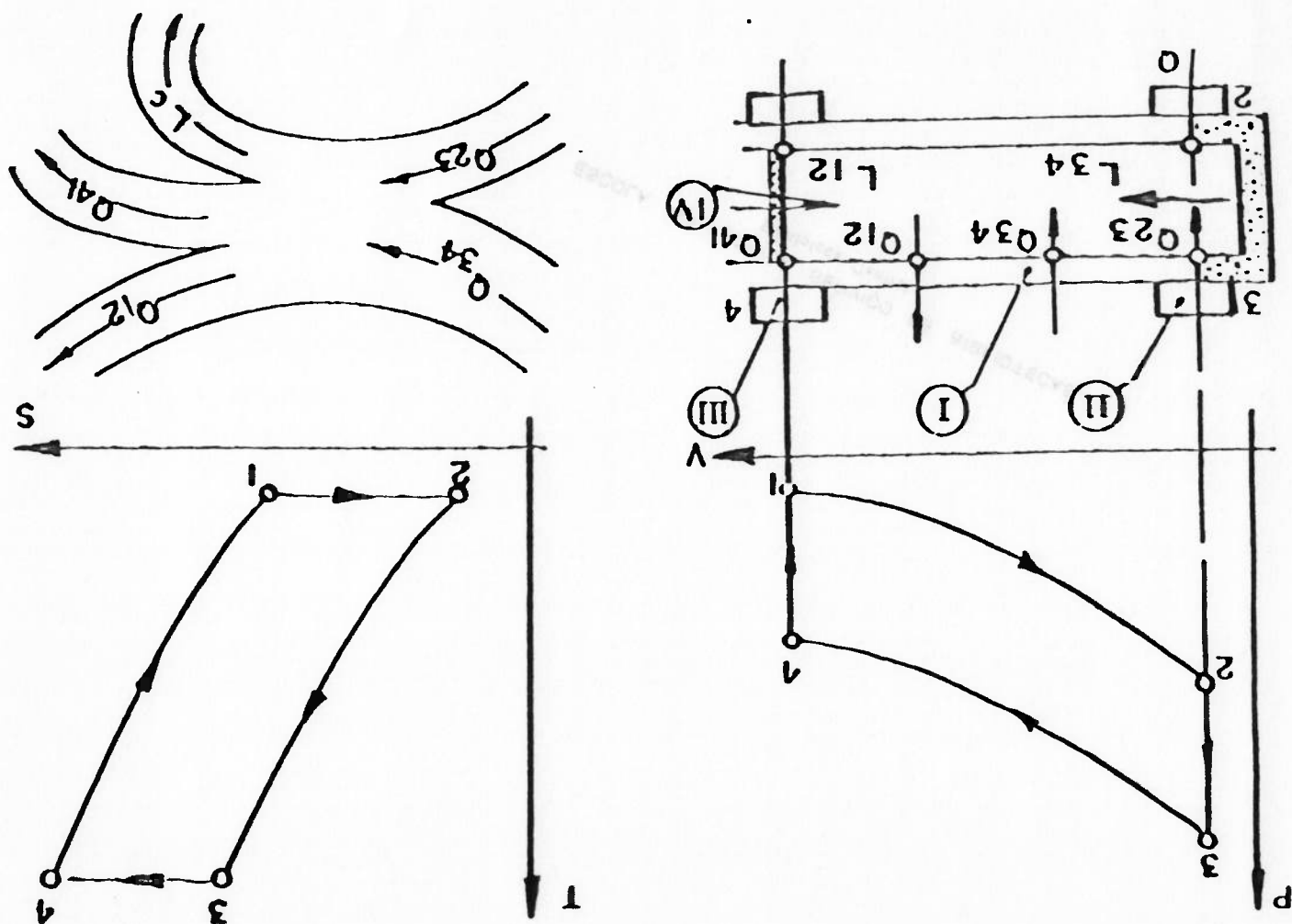


FIGURA 3.36 -CICLO PADRÃO DE AR STIRLING

1-2 - Compressão isotérmica, 2-3 - Recebimento de calor isométrica.  
 4-1 - Entrega de calor isotérmica.  $\dot{L}$  - trabalho.  $\dot{Q}$  - Calor. I-Pare-  
 de que permita a transformação isotérmica. II - Fonte quente. III -  
 Fonte fria. IV - Pistão.



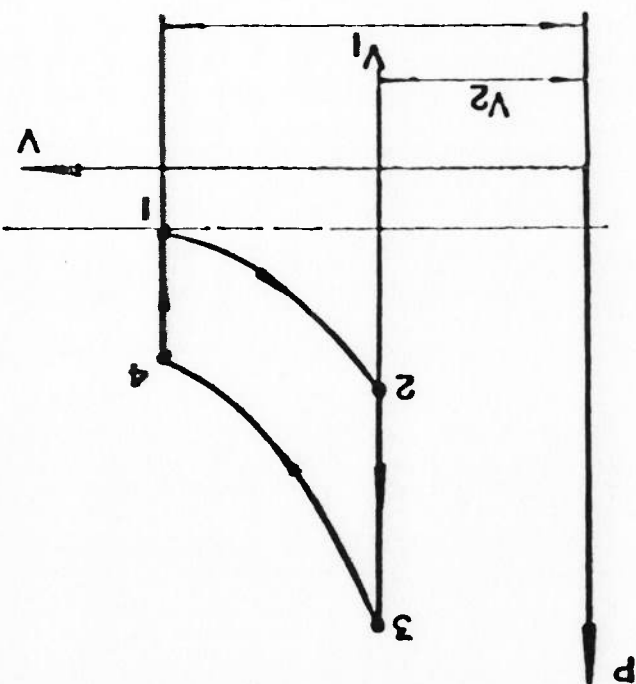
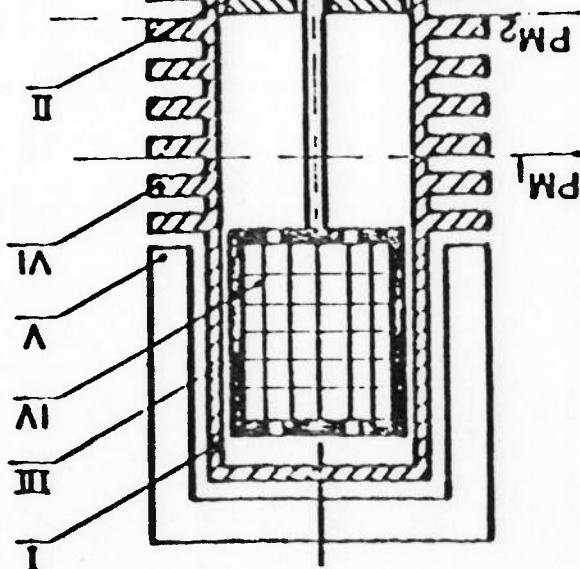
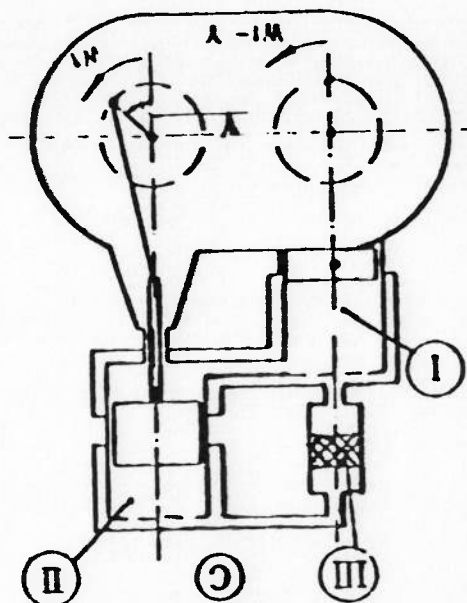
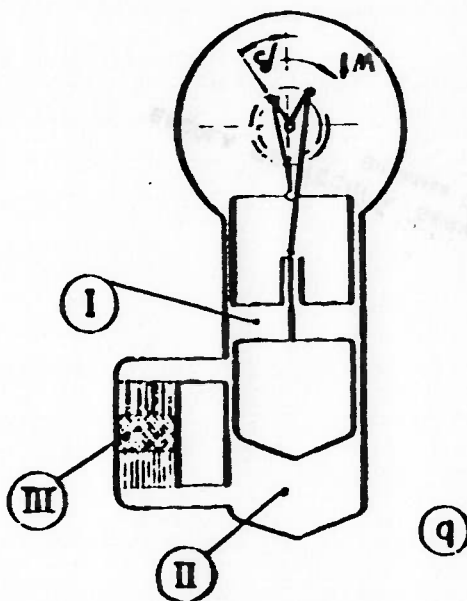


FIGURA 3.37 - Sistema para realização do ciclo Stirling  
I - Cilindro. II - Pistão de potência. III - Pistão de deslocamento. IV - Regenerador. V - Fonte quente.  
VI - Fonte fria. 1-2 - Com pressão isotérmica. 2-3 - Com pressão isotérmica. 3-4 - Expansão isotérmica. 4-1 - Expansão isotérmica.  $V_1$  - Volume do fluido quando II está em  $PM_2$ .  $V_2$  - Volume do fluido quando II está em  $PM_1$ .

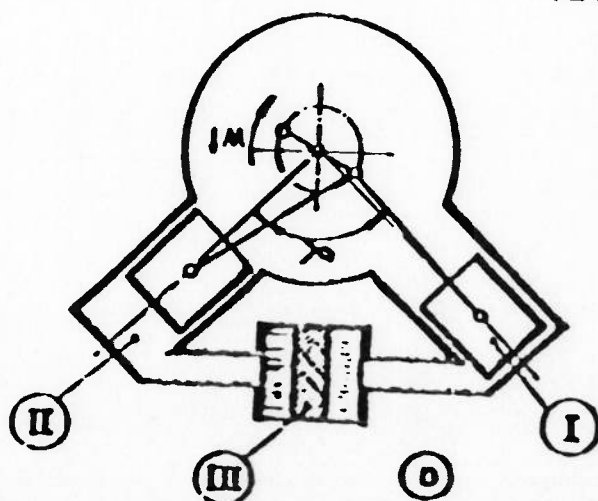
TIPO GAMMA  
FIG. 3.38c - I Câmara de compressão. II Câmara de expansão. III Regenerador.



TIPO BETA  
FIG. 3.38b - I Câmara de compressão. II Câmara de expansão. III Regenerador.



TIPO ALFA  
FIG. 3.38a - I Câmara de compressão. II Câmara de expansão. III Regenerador.



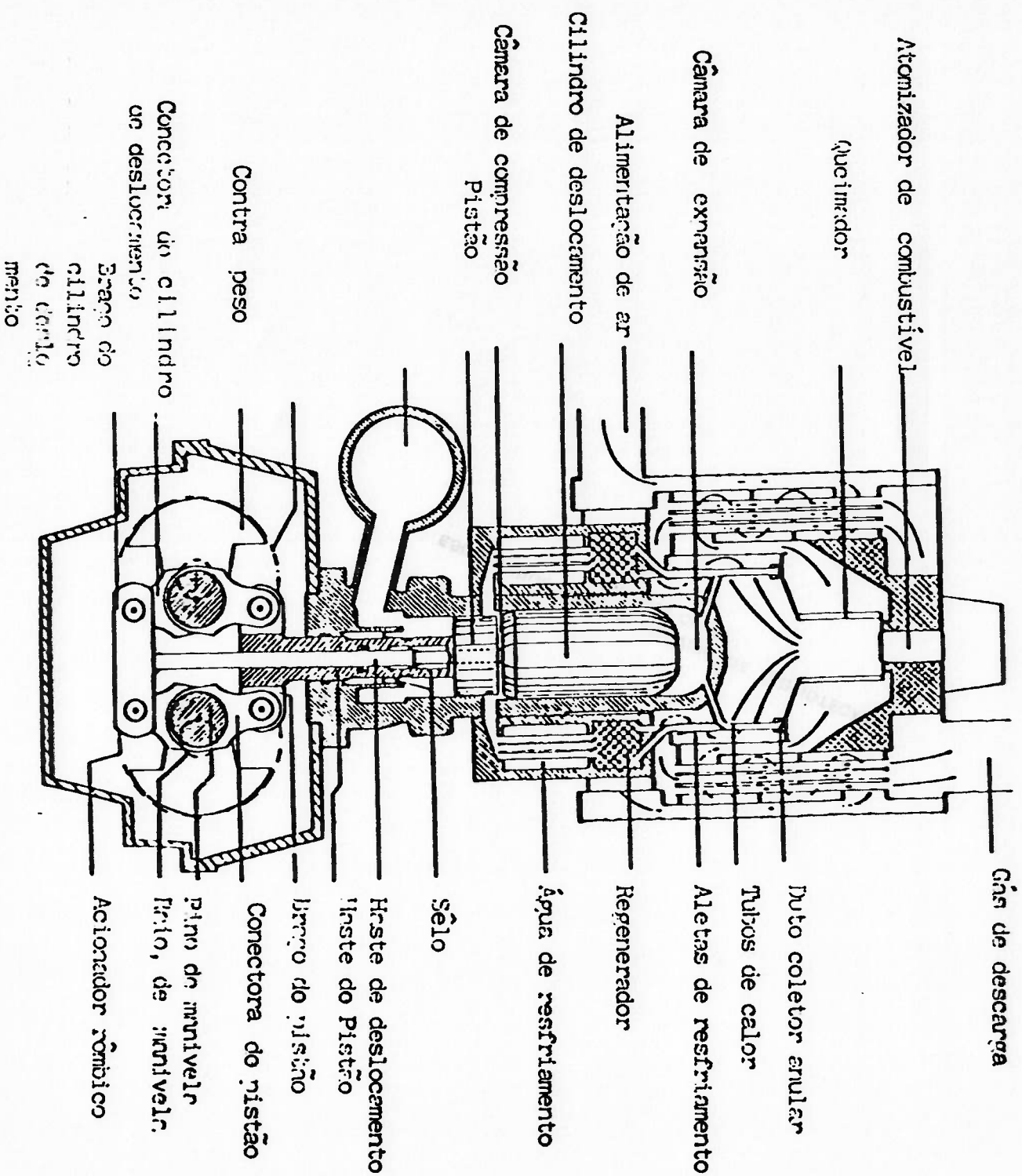
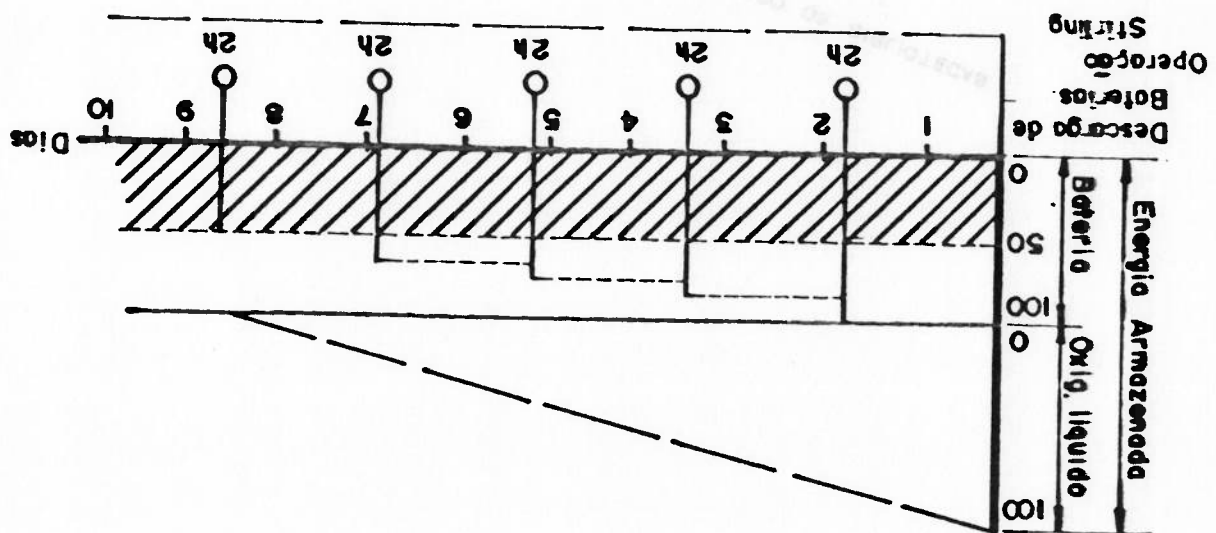


FIGURA 3.39 - MOTOR STIRLING SUTCO (Kochlums AB)





PERFIL DE MISSÃO HIPOTÉTICO PARA UM SUBMARINO  
COM PROPULSAO HÍBRIDA STIRLING.

# DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE UMA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL DE HIDRÓGENIO - OXIGÊNIO

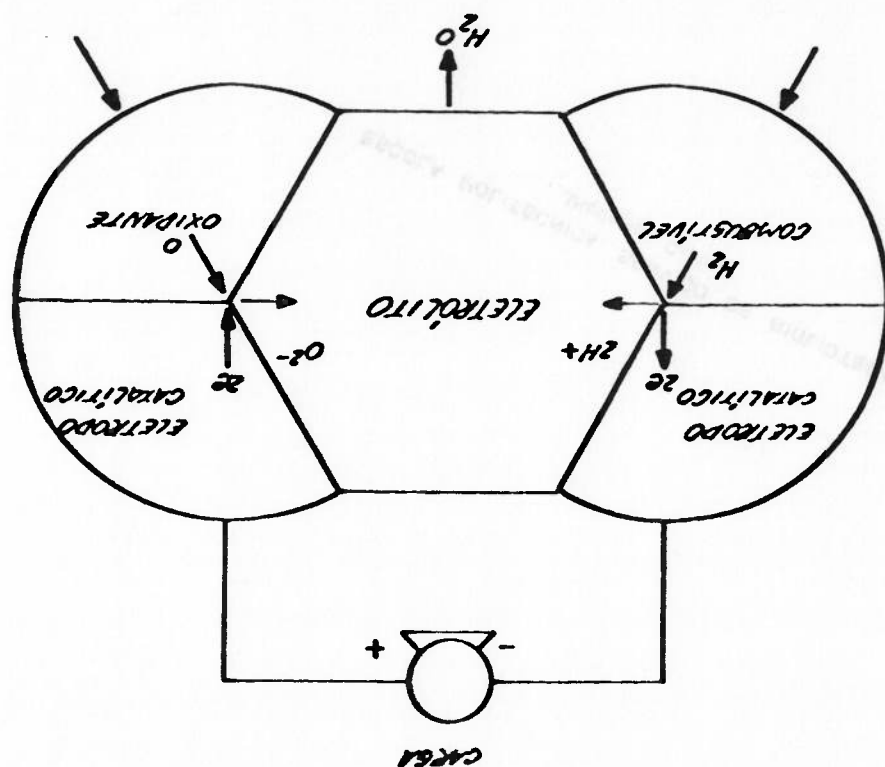


FIGURA 3.41

EFICIÊNCIA TÉRMICA

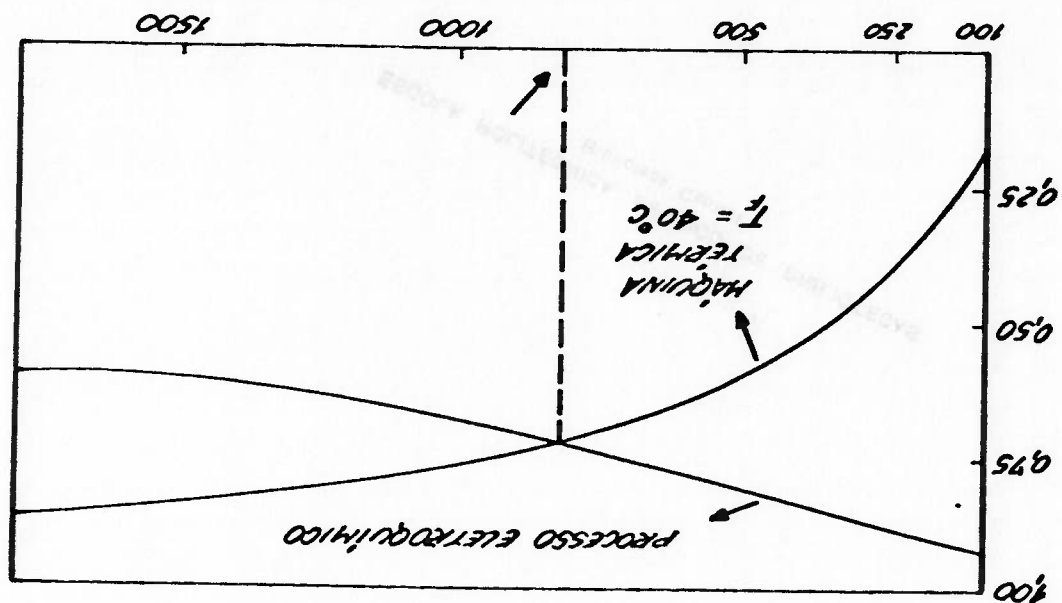


FIGURA 3.43 - EFICIÊNCIA DA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL  
TEMPERATURA DE OPERAÇÃO (°C)

# CIRCULAÇÃO DE ELETROLITO, REAGENTES E PRODUTOS DE REAÇÃO NUMA CÉLULA $H_2-O_2$

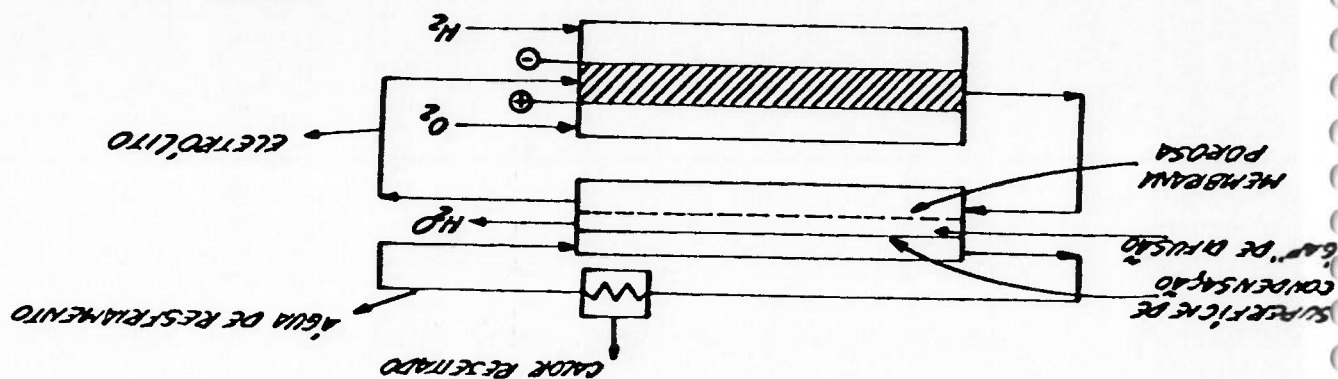


FIGURA 3.42 - PERDAS ELÉTRICAS NA CÉLULA DE COMBUSTÍVEL

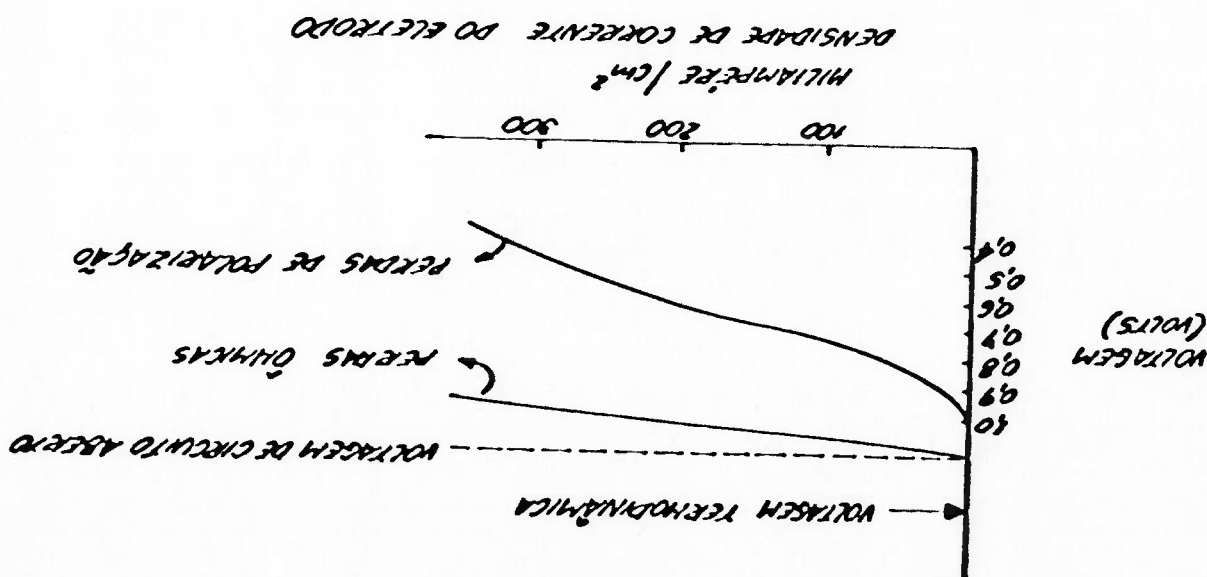


TABELA 3.45 - PRINCIPAIS SISTEMAS ELETROQUÍMICOS PARA CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Eletrólito	Transportador de Corrente	Temperatura de Operação	Catalizador	Reagentes	Estado de desenvolvimento
				Combust. Oxidante	
<hr/>					
Hidróxido de Potássio (KOH)	OH	20 - 90	Níquel Prata Platina	H <sub>2</sub> Hidrazina	Oxigén. H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> diversos sistemas desenvol.
<hr/>					
Ácido Sulfúrico (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )	H	20 - 50	Carbeto de Tungsténio, Platina, Carbone	H <sub>2</sub> Impuro *	Ar viabilidade demonstrada em laboratório
<hr/>					
Ácido Fosfórico (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )	H	70 - 175	Platina	H <sub>2</sub> Impuro *	Ar diversos sistemas desenvol.
<hr/>					
Carbonatos Alcalinos Fundidos	CO <sub>3</sub>	600 - 800	Níquel Prata	H <sub>2</sub> Impuro *	Ar viabilidade demonstrada em laboratório
<hr/>					
Óxido de Zircônio	O	700 - 1000	Oxidos metálicos	H <sub>2</sub> Impuro *	Ar viabilidade demonstrada em laboratório

\* refere-se a misturas contendo hidrogénio



TABELA 3.46 - SISTEMAS ELETROQUÍMICOS AVANÇADOS PARA CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

ORIGEM	ELETRÓLITO	REAGENTE	CATALIZADOR	REMOÇÃO DE ÁGUA E CALOR	CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS
Alstohm (França)	KOH	$N_2H_4 - H_2O_2$	prata/cobalto	circulação do eletrólito	eletrodos não poro- sos densamente com- pactados; revesti- dos com material ca- lizador
Engelhard Minerals and Che- micals (EUA)	$H_3PO_4$	$H_2$ impuro	platina	ar ou circulação de refrigerante	eletrodos hidrófo- bos, construídos em matriz, bipolares ; opera a pressão at- mosférica
Siemens AG (Alemanha)	KOH	$H_2 - O_2$	níquel/ prata	circulação do eletrólito	camada de cataliza- dor suportada em folha de asbestos ; opera a 1 atm
Varta AG (Alemanha)	KOH	$H_2 - O_2$	níquel/ prata	circulação do eletrólito	eletrodos de níquel carbonizados, reve- stidos com cataliza- dor; opera a 1 atm
Pratt and Whitney (EUA)	KOH	$H_2O_2$	platina/ prata	resfriamento evaporativo	construção em ma- tíz
Pratt and Whitney (EUA)	$H_3PO_4$	$H_2$ impuro	platina	ar (natural ou forçada)	

TABELA 3.47 - COMBUSTÍVEIS SINTÉTICOS PARA CELULAS DE COMBUSTÍVEL

Combustível	Forma de armazenagem	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Riscos	Poder calorífico KWh/kg ; KWh/l	Processo de conversão
<hr/>					
Hidrogenio (1)	gás comprimido	-	gás inflamável	0,298      0,71	nenhum
<hr/>					
Hidreto reversível (hidreto de Ferro - titânio) (2)	sólido	5,47	-	0,643      3,53	aquecimento libera H <sub>2</sub>
<hr/>					
Hidreto não reversível (hidreto de Cálcio - CaH <sub>2</sub> ) (3)		1,57	sólido inflamável	3,75      6,38	reação com água
<hr/>					
Metanol	líquido	0,72	líquido inflamável	6,30      4,99	vaporização em presença de água (200°C)
<hr/>					
Amônia anidra	líquido comprimido	0,60	líquido venenoso	6,23      3,77	craqueamento térmico a 750°C
<hr/>					
Hidrazina	líquido	1,03	-	3,46      3,56	nenhum

Notas:

- (1) - pressão de 200 atm incluí peso e volume de cilindro tamanho 1-A  
 (2) - hidreto particular citado como exemplo  
 (3) - baseado no hidrogênio gerado pela reação com água

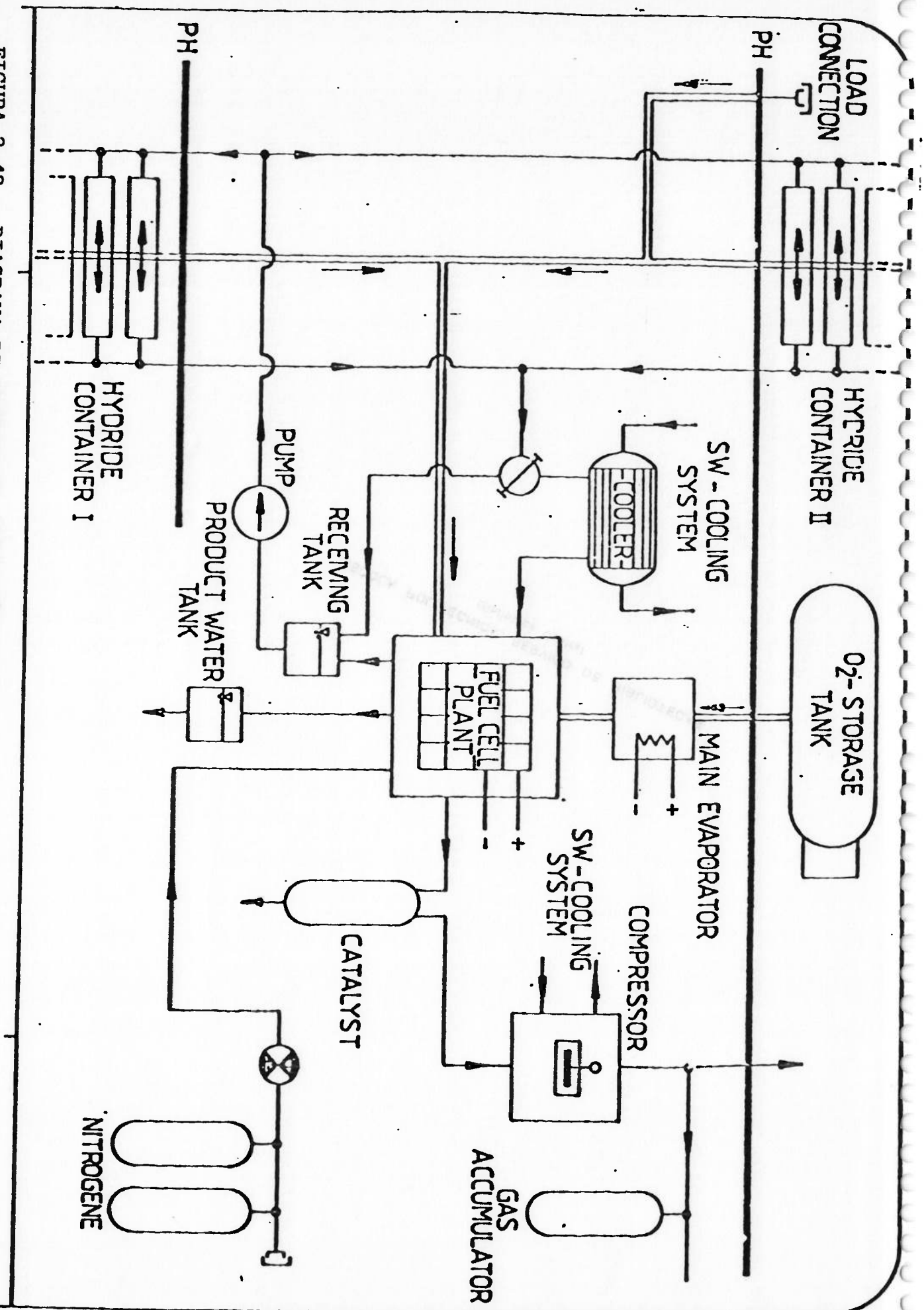


FIGURA 3.48 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE INSTALAÇÃO DE CC

FIG. 3.49

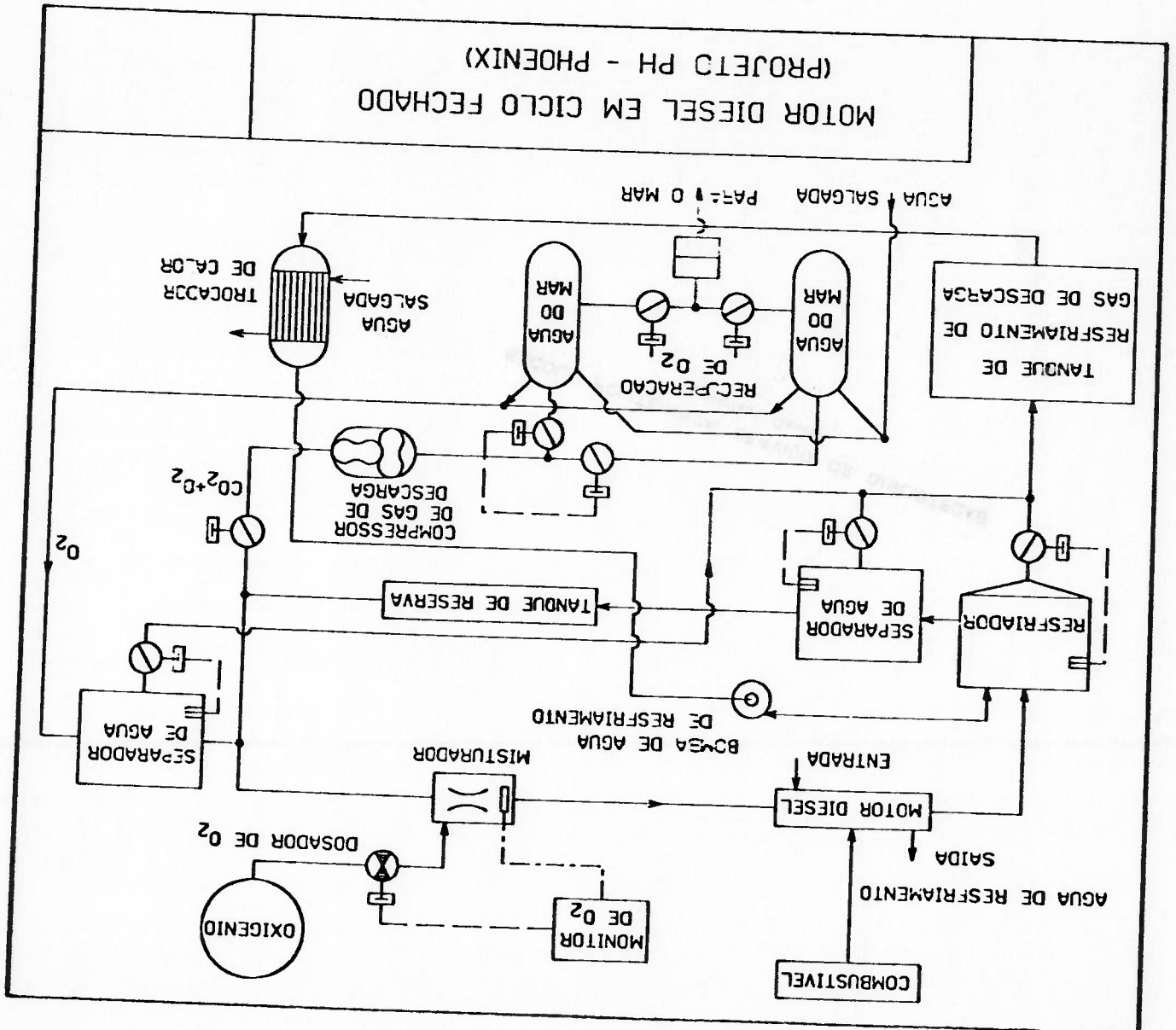


FIGURA 3.52

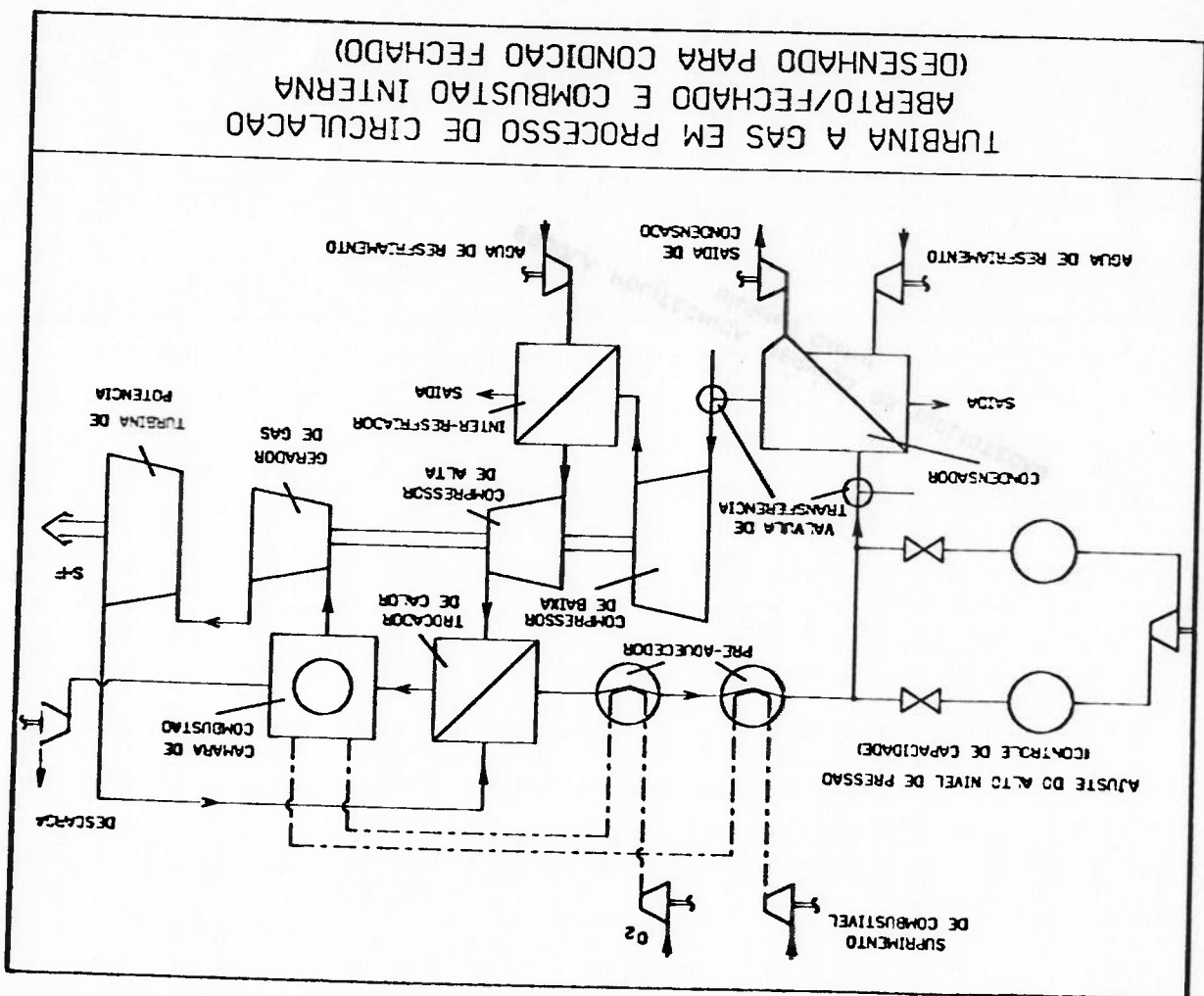






TABELA 3.54 - PARÂMETROS PRINCIPAIS DO MÓDULO M.F.S.M.A DE

200 KWe

Circuito de geração de calor	
Pressão na câmara de combustão (bar).....	60
Vazão de combustível etanol (kg/h).....	110
Vazão de oxigênio (kg/h).....	228
Potência térmica (kw).....	500
Temperatura dos gases de combustão (°C).....	700
Ciclo a vapor	
Potência mecânica da turbina (kw).....	245
Potência elétrica do alternador (kw).....	225
Potência elétrica auxiliar	
(incluindo focas as bombas e recirculadores de gases).....	25
Potência elétrica líquida (kw).....	200
Eficiência líquida (%).....	25

# COMPARACAO ENTRE SPIA NAO-NUCLEARES

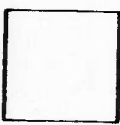
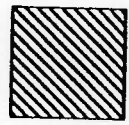
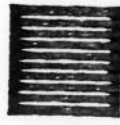

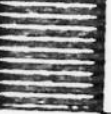









		= POSITIVO
		= SATISFATORIO
		= NEGATIVO
CELULAS DE COMBUSTIVEL		ASSINATURAS
MOTOR DIESEL EM CICLO FECHADO	1	INFLUENCIA NO DESLOCA- MENTO DO SUBMARINO
	1	LIMITACAO NA PROFUNDI- DADE DE OPERACAO
	1	LIMITACAO NO DESEMPENHO
		LOGISTICA (CONSUMIVEIS)
		ADAPTABILIDADE PARA DE- SENVOLVIMENTO 100% IA
		ADAPTABILIDADE PARA OPERACAO DA
		TEMPO DE DESENVOLVIMENTO
	1	CUSTO DE DESENVOLVIMENTO
		CUSTO INICIAL DA INSTALA- CAO
TURBINA A GAS EM CICLO FECHADO	2	
	2	
		
	3	
		
	2	
		
	2	
		
	2	
		
	2	
		
	2	
		
	2	
		
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	
	2	

FIGURA 3.55

## CAPÍTULO 4

## IMPACTO DAS MODERNAS TENDÊNCIAS

## 4.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

Os efeitos das diversas tendências apresentadas no capítulo anterior, que em sua grande maioria conduzem ao crescimento das dimensões dos submarinos, podem ser sumarizadas pelos gráficos 4.1 (submarinos convencionais), 4.2 (submarinos nucleares de ataque) e 4.3 (submarinos nucleares lançadores de balísticos). Ao longo dos anos é evidente um contínuo aumento no deslocamento dos submarinos.

Tanto os estados-maiores que especificam, como as empresas de engenharia e estaleiros que projetam submarinos tendem a buscar o atendimento de requisitos adicionais através do aumento do deslocamento dos navios, ao invés de buscar soluções de compromisso.

Há entretanto hoje já um relativo consenso de que esta tendência deve ser revertida, principalmente por razões de custo, mas também por razões tático-operativas, pois, conforme já foi visto, em numerosas situações é desvantajoso ser grande. Algumas marinhas já perceberam este fato de forma muito clara e têm estabelecido, a parte dos diversos outros requisitos, um limite máximo para o deslocamento e dimensões principais dos submarinos em processo de obtenção, que não pode ser excedido. Esta seria uma definição de certa forma redundante, mas constitui-se sobretudo um desafio aos projetistas que devem esforçar-se ao máximo para uma solução de compromisso balanceada, dentro de um envelope de dimensões físicas restrito.

O aumento das dimensões do navio eleva consideravelmente os custos, aparte de outras desvantagens. É previsível que em futuro breve áreas de conhecimento como análise de sistemas, visando a determinação objetiva de relações custo/benefício ("cost-effectiveness"), engenharia de valor ("value engineering") e técnicas de "projeto-visando-custo" ("design-to-cost") ganhem crescente importância no campo de submarinos, dado que os recursos financeiros tendem a cada vez mais serem reduzidos.

As necessidades incontroláveis de redução de custos (e portanto, de dimensões) conduzem até mesmo a análises críticas mais detalhadas de determinados requisitos de desempenho, tais como velocidades máximas, alcances totais, alcances submarinos,

autonomia, profundidades de operação, número de tubos de torpedos, número de torpedos reserva, nível de resistência a choque, etc., que em geral são definidos de forma nem sempre muito criteriosa.

Nos itens a seguir abordaremos alguns aspectos referentes à metodologia de desenvolvimento do projeto e critérios para seleção e avaliação de sistemas de propulsão para submarinos, para posteriormente tentar fazer algumas projeções sobre as características principais dos diversos tipos de submarinos do futuro, conforme seus sistemas de propulsão.



## 4. 2 - METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DE PROJETO

A fase de projeto compreende as atividades concernentes à conceitualização da população. Os requisitos pré-estabelecidos devem ser avaliados em profundidade, de modo que o conceito de população seja perfeitamente coerente e integrado ao conceito do navio como um todo.

Algumas partes componentes desta fase são atividades como as listadas a seguir:

- estudos de viabilidade para seleção das opções de população, definindo os riscos de desenvolvimento;
- otimização do sistema através de estudos paramétricos;
- determinação das características de descrição e de desempenho do sistema;
- avaliação dos riscos de engenharia, cronograma e custos como um auxílio ao processo decisório;
- preparação de requisitos de disponibilidade e confiabilidade;
- definição das necessidades de infraestrutura;
- estabelecimento de critérios básicos para comparação das opções viáveis;
- preparação de cronogramas de andamento físico e custos;
- contínua busca de desenvolvimento dentro e fora do grupo de projeto;
- orientação sobre técnicas e tendências.

Uma extensa gama de tarefas são conexas à elaboração dos conceitos da população, como:

- conceitualização e projeto dos componentes da população com auxílio de instalações experimentais, tendo em vista também desenvolvimentos futuros;
- determinação dos sistemas operacionais;
- arranjo dos componentes principais;
- segurança do sistema;
- normas e regulamentações;
- garantia da qualidade;
- análises qualitativas e quantitativas de modos de falha

e efeitos:

- análises de confiabilidade;

- desenvolvimento e testes de sistemas especiais que mostrem-se necessários devido a suas características de tecnologia de ponta.

Atenção especial deve ser dada ao fato de que as soluções de engenharia adotadas para a instalação propulsora não devem comprometer o balanceamento e a coerência do projeto e o conceito operacional do navio como um todo.

No processo de seleção de um sistema de propulsão, deve-se sempre levar em conta tanto a eficiência como a eficácia das diversas possibilidades tecnológicas candidatas. Como eficiência, entendemos uma medida do desempenho do sistema associada ao seu custo, ou seja, uma avaliação de como o sistema satisfaz suas necessidades geradoras. A eficácia, no nosso entendimento, seria uma medida da disponibilidade, confiabilidade e operabilidade do sistema, ou seja, uma avaliação de quando e em que condições de contorno o sistema satisfaz suas necessidades geradoras.

Um sistema naval não deve ser apenas avaliado pelo seu desempenho, e sim pelo produto desempenho x aprestamento x emprego. DESEMPENHO é aqui entendido como a medida física que descreve as possibilidades do sistema, se em perfeito funcionamento e corretamente empregado. APRESTAMENTO é a medida que descreve a capacidade do sistema de estar pronto quando solicitado e permanecer pronto enquanto necessário. EMPREGO é contribuição da componente humana ao funcionamento do sistema. Isto significa que nem sempre um sistema de excelente desempenho estará disponível todo o tempo requerido, devido a problemas de operação, manutenção e reparo e nem sempre a tripulação poderá operá-lo de forma eficiente.

No caso de submarinos, um excelente desempenho, medido por altas velocidades, grandes raios de ação e baixos coeficientes de arrasto, pode ser sombreado por falhas frequentes, longos períodos de manutenção, restrições operativas e custos totais ao longo da vida útil elevados. De forma inversa, desempenhos apenas aceitáveis podem ser compensados por outros fatores.

Deve-se portanto sempre considerar atentamente os perfis de missão, as áreas de operação e as ameaças militares a enfrentar preconizadas para o submarino, bem como as prováveis resistências técnicas, econômicas, sociais e políticas ao seu desenvolvimento.

A definição clara e precisa das missões que se pretende realizar com o submarino é de fundamental importância para a seleção de sua instalação propulsora. O estabelecimento de perfis de missão realistas, considerando suas durações, modos de operação e frequência de operação em cada um deles, níveis de degradação de desempenho aceitáveis e tarefas principais e secundárias a serem executadas é indispensável para uma seleção criteriosa. Além disso, a clara definição da disponibilidade operacional, através do detalhamento do ciclo de vida útil planejado, e da confiabilidade esperada para o submarino, em termos de probabilidade de sucesso no cumprimento dos perfis de missão preconizados sem prejuízo à segurança do navio, seus tripulantes e meio ambiente, são parâmetros de grande importância para o processo de seleção de instalação propulsora e de seus componentes.

A distância das bases nas quais o submarino irá operar as áreas de operação bem como as condições ambientais locais, tais como temperaturas (ar e água), densidade, salinidade na principalmente profundidade, tem significativa importância na definição do espectro de operação e dos requisitos de desempenho da população.

Os requisitos associados à mobilidade estratégica (capacidade de projeção de poder nas áreas de operação) e à mobilidade tática (capacidade de manobra na área de operação) são especificados para o cumprimento das missões preconizadas são fatores decisivos na seleção da instalação propulsora.

Como exemplo, a instalação propulsora ideal para submarinos que operam em águas rasas e próximo de suas bases é radicalmente diferente daquela de operação em águas oceânicas distantes.

As características das ameaças previsíveis ao submarino, consubstanciadas por outros submarinos, navios de superfície e aeronaves anti-submarinos e campos minados, associado ao desempenho de seu armamento (torpedos, mísseis, cargas de profundidade, foguetes, minas, etc.) e sensores (acústicos, magnéticos, térmicos, etc.), influenciarão decisivamente na especificação das características do submarino como um todo e de sua instalação propulsora em particular.

Exemplos são a velocidade e faixa de profundidades de operação dos torpedos inimigos influenciando na velocidade e profundidade de operação do submarino, assinatura acústica dos submarinos inimigos, influenciando nas curvas limite de ruído irradiado, sensibilidade dos sensores para detecção de anomalias magnéticas do inimigo influenciando nas contra-redidas magnéticas ("degaussing", uso de materiais diamagnéticos), etc.

Restrições técnico-econômicas são associadas à capacidade industrial e financeira do país projetista. A seleção do sistema propulsor será limitada aquelas opções passíveis de serem desenvolvidas tecnicamente, dentro das possibilidades de financiamento do contratante.

Na análise de custo/benefício das diversas opções possíveis benefícios paralelos, oriundos da capacitação técnica que o desenvolvimento do projeto e construção trazem para setores extra-Marinha deverão ser verificados.

Restrições sócio-políticas são oriundas do público externo à marinha contratante, que poderá se contrapor ao desenvolvimento de uma solução técnica que potencialmente possua riscos de acidentes mais ou menos graves à população e ao meio-ambiente - em geral restritas às opções nucleares. Restrições deste tipo também podem ser provenientes de outros países, sob a forma de bloqueio de importações e de transferências de tecnologia, quando estas são indispensáveis ao desenvolvimento de determinada opção de população.

Um critério de avaliação de instalações de propulsão para submarinos militares deve privilegiar sempre a maximização das figuras de profundidades de operação e tempos de imersão, operação submersa com baixo ruído irradiado, bem como a redução do calor emitido para a água do mar.

Os sistemas de propulsão somente podem ser avaliados como parte do sistema completo e nunca sem considerar o projeto do navio como um todo. No caso de sistemas alternativos não-nucleares, a armazenagem de reagentes ( $O_2$ ,  $H_2$ , etc.) é de grande importância para alcançar-se a autonomia e raio de ação submersos requeridos. O volume de reagentes armazenados influencia o projeto do casco, fluidez e trim. As formas do submarino tem er contrapartida influência na potência propulsiva e auxiliar requerida. Nos sistemas nucleares, a blindagem biológica e os sistemas de segurança tem impacto semelhante.

A seguir apresentaremos algumas figuras de peso na avaliação de diferentes sistemas de propulsão:

a ) dados de projeto:

- eficiência;
- relação peso/potência;
- consumo específico de combustível;
- consumo específico de combustível;
- substâncias secundárias;
- produtos de reação;
- potência máxima;
- materiais.

b ) características de desempenho:

- partida a frio;
- partida a quente;
- mudanças de carga;
- desligamento.

c ) confiabilidade e disponibilidade operacional:

- complexidade;
- riscos de segurança;
- custo e duração dos períodos de manutenção;
- vida útil.

d ) detectabilidade:

- ativa;
- passiva.



Visando reduzir o grau de subjetivismo da avaliação, pode-se adotar uma figura de mérito caracterizada por um funcional a

Consideramos, entretanto, que os resultados obtidos por esta metodologia são extremamente sensíveis às características específicas da pessoa que a utiliza, devido ao alto grau de subjetivismo na aferição dos pesos  $k_i$ , apesar de poder-se adotar critérios objetivos para os fatores  $f_i$ .

$f_i$  = medida do atendimento do critério  
 $k_i$  = peso relativo do critério de avaliação

$$F = k_1 f_1 + k_2 f_2 + \dots + k_n f_n, \text{ onde}$$

Uma figura de mérito simples poderia ser definida como:

Uma análise comparativa entre os diversos sistemas de propulsão requer a avaliação do grau com que são atendidos os diversos requisitos de instalação, através de figuras de mérito que traduzem, entretanto, um elevado grau de subjetividade na sua aplicação, ou então, de uma maneira mais objetiva, ser feita através do desenvolvimento de estudos de viabilidade de submarinos considerando-se cada uma das tecnologias levantadas, a partir dos mesmos requisitos de missão especificados. O projeto de menores dimensões e custo, nestas condições de igualdade de requisitos, será o mais eficiente no cumprimento das missões preconizadas.

- sistemas elétricos;
- sistemas de resfriamento;
- sistemas pneumáticos;
- sistemas hidráulicos;
- sistemas de governo do navio;
- sistemas de controle.

#### g) integração de sistemas:

- necessidades de infraestrutura;
- disponibilidade do combustível;
- armazenagem do combustível;
- manipulação do combustível;
- armazenagem de rejeitos;
- custos de desativação.

#### f) avaliação logística:

- riscos de desenvolvimento;
- duração do desenvolvimento;
- custos de desenvolvimento;
- custos específicos de energia;
- custos de licenciamento e comissionamento.

#### e) viabilidade técnica e econômica:

ser otimizado. Este funcional seria modelado matematicamente com base em certas hipóteses, pré-definidas que abrangiam características de missão, áreas de operação, desempenho do submarino e custos. Exemplo da modelagem de um funcional deste tipo é apresentado a seguir, onde busca-se determinar a área efetiva de patrulha por submarino e os custos por área patrulhada.

Seja  $C$  a duração em dias do ciclo operativo do submarino, composto por  $A$  dias no mar e  $R$  dias de manutenção; seja  $T$  a duração do período de trânsito até a área de patrulha (em um só sentido) e  $P$  a duração da patrulha:

$$C = A + R$$

$$A = P + 2T$$

Seja  $n$  o número de submarinos em patrulha e  $N$  o número total de submarinos disponíveis (em patrulha + em trânsito + em manutenção); seja  $M$  o número de áreas de patrulha simultâneas,  $J$  o número de bases de submarinos disponíveis e  $D_{MJ}$  a distância entre a área  $m$  e a base  $j$ ; seja  $V_p$  velocidade de avanço do submarino em patrulha e  $V_t$  a velocidade de avanço em trânsito, em nós:

$$T = D_{MJ} / (24 V_t)$$

$$n = M * (C/P) = M * ((A + R)/(A - 2T))$$

Considerando-se que para cada submarino em patrulha teremos 1 em trânsito e 1 em manutenção:

$$N = 3n$$

Seja  $CI_p$  o coeficiente de inscrição em patrulha e  $CI_r$  o coeficiente de inscrição em trânsito; seja  $d_p$  a probabilidade de detecção do submarino quando operando na cota periscópica e  $d_r$  a probabilidade de detecção do submarino quando operando em mergulho profundo e  $D$  a probabilidade total de detecção do submarino ao longo da duração  $A$  da missão (assumindo que os eventos de detecção sejam independentes):

$$D = 2 \left( (1/A * CI_r * d_r) + (1/A * (1 - CI_r) * d_r) \right) + \left( (P/A * CI_p * d_p) + (P/A * (1 - CI_p) * d_p) \right)$$

Seja  $S_m$  a superfície da área de patrulha, representada por um quadrado de lado  $L$  milhas; consideremos que o submarino, ao longo de seu período de patrulha, percorra a área em  $X_m$  pernadas de  $L$  milhas de comprimento, estando cada pernada afastada da seguinte por uma distância  $s$ , caracterizada pelo alcance sonar eficaz:

$$X_m s + X_m L = 24 V_p P$$

$$X_m s = L$$

$$s X_m^2 + s X_m - 24 V_p P = 0$$

$$S_m = (X_m * s)^2$$

Seja  $\$$  o custo inicial do submarino,  $\$$  os custos de

operação e manutenção e  $\$$ , o custo inicial, ambos divididos pelos dias de mar totais ao longo da vida útil; seja  $A_0$  o número de dias de mar médio por ano e  $U$  a vida útil do submarino em anos; assumindo que os custos de operação e manutenção ao longo da vida útil sejam iguais ao custo inicial, teremos:

$$\$0 = (\$ / U) / A_0$$

$$\$1 = (\$ / U) / A_1$$

Seja  $F$  a probabilidade do submarino executar a missão com sucesso, ou seja, a confiabilidade do sistema submarino.

Assumindo  $J = 1$ ,  $D_1 = D_2 = \dots = D_{n-1}$  e  $S_1 = S_2 = \dots = S_n$ , a "superfície efetiva da área de patrulha"  $AP'$  por cada  $n$  submarino operativo, o custo por dia de patrulha  $\$P'$  e o custo por área patrulhada  $\$S'$ , teremos:

$$AP' = M \times S_n / n \times (1 - D) \times F$$

$$\$C' = \$1 + \$0$$

$$\$S' = \$P' \times A / AP'$$

Assumindo valores típicos para submarinos convencionais:

$$A = 45 \text{ dias} ; R = 15 \text{ dias}$$

$$M = 3 ; J = 1 ; D_1 = D_2 = D_3 = 1800 \text{ milhas}$$

$$V_1 = 6 \text{ nós} ; V_T = 12$$

$$CIP = 0,1 ; CIP_T = 0,2 ; S = 20 \text{ milhas}$$

$$d_F = 0,9 ; d_T = 0,1 ; F = 0,73$$

$$\$ = US\$ 150.000,000$$

$$U = 30 \text{ anos} ; A_0 = 200 \text{ dias/ano}$$

$$C = 60 \text{ dias} ; T = 8,3 \text{ dias} ; P = 26,3$$

$$n = 7 ; N = 21 ; S = 335.000 \text{ milhas}^2$$

$$D = 0,475 ; \$_0 = \$1 = US\$ 25.000,00$$

$$S_n = 315.000 \text{ milhas}^2$$

$$AP' = 52.000 \text{ milhas}^2 / \text{submarino}$$

$$--> \$P' = US\$ 50.000 / \text{dia} / \text{submarino}$$

$$--> \$S' = US\$ 61 / \text{milha}^2 / \text{submarino}$$

teremos:

$$A = 63 \text{ dias} ; R = 28 \text{ dias}$$

$$M = 3 ; J = 1 ; D_1 = D_2 = D_3 = 1800 \text{ milhas}$$

$$V_1 = 9 \text{ nós} ; V_T = 18$$

$$CIP = 0,01 ; CIP_T = 0,05 ; S = 20 \text{ milhas}$$

$$d_F = 0,9 ; d_T = 0,2 ; F = 0,73$$

$$\$ = US\$ 600.000,000$$

$$U = 30 \text{ anos} ; A_0 = 200 \text{ dias/ano}$$

$$C = 91 \text{ dias} ; T = 4,2 \text{ dias} ; P = 54,7$$

$$n = 5 ; N = 15 ; S = 926.000 \text{ milhas}^2$$

$$D = 0,201 ; \$_0 = US\$ 100.000,00$$

$$AP' = 324.00 \text{ milhas}^2 / \text{submarino}$$

$$--> \$P' = US\$ 200.000 / \text{dia} / \text{submarino}$$

teremos:

--> \$5' = US\$ 39 / milhas<sup>2</sup>/submarino

Depreende-se então que, apesar do custo inicial de um submarino nuclear ser da ordem de quatro vezes o custo de um submarino convencional, dentro das hipóteses feitas, seu custo de missão, expresso em US\$ por milha patrulhada, pode ser cerca de 35% inferior.

Apesar do modelo apresentado ser extremamente simplificado, ele indica o potencial que esta metodologia possui como ferramenta para uma análise comparativa entre sistemas de propulsão para submarinos, baseada em critérios estritamente objetivos.

#### 4 . 5 - DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE PROJETO E CONSTRUÇÃO

A instalação de propulsão de submarinos requer uma grande variedade de características, algumas delas comuns a todas as instalações de propulsão navais e outras que são únicas ou de particular importância para submarinos. De um modo genérico, a independência da atmosfera, independência da pressão externa, alta densidade de potência, extrema resistência mecânica ao choque e operação silenciosa são metas que devem ser buscadas no maior grau possível. De modo a sistematizar a análise dos requisitos de projeto e operação, os dividiremos em 6 classes distintas:

##### - requisitos de desempenho

##### - velocidades características :

- . máxima
- . trânsito
- . patrulha
- . silenciosos
- . "hovering"
- . superfície
- autonomia e raio de ação
- . submerso
- . total
- . coeficiente de indexação
- manobra da instalação
- . partida a frio
- . partida a quente
- . deslizamento
- . reversão
- . variações de carga
- assinatura térmica
- assinatura magnética
- assinatura acústica
- . ruído de máquinas
- . ruído de hélice

##### - requisitos ambientais externos

- pressão hidrostática devido à profundidade
- temperatura, densidade e salinidade do mar
- movimentos do navio no mar
- operação nas regiões polares

##### - requisitos ambientais internos

- ruído na faixa de audição
- pressão, temperatura e umidade
- qualidade do ar
- níveis de radiação

##### - requisitos de segurança



Apresentamos a seguir uma análise e descrição individual de cada uma das classes supra-citadas.

- projeto e desenvolvimento
  - construção
  - comissionamento
  - operação
  - manutenção
  - modernização e atualização
  - descomissionamento
- requisitos de custo
- dimensões principais
  - pesos e centros
  - arranjo físico
  - equilíbrio e estabilidade
  - vias de acesso de pessoal
  - rotas de remoção de equipamentos
- requisitos de arquitetura naval
- garantia da qualidade
  - infraestrutura técnica
  - infraestrutura industrial
  - técnicas de edificação e montagem
- requisitos de infraestrutura (projeto e construção)
- modos de operação
  - normas
  - procedimentos
  - emergência
  - arranjos funcionais
  - controle e monitoração
  - número de operadores
  - disponibilidade e confiabilidade
  - manutenção
  - controle de avarias
  - vida útil
  - ciclo de atividades
  - apoio logístico integrado
- requisitos de operação
- resistência ao choque
  - proteção e combate a incêndios
  - proteção contra alagamentos
  - envelope de velocidades de segurança
  - proteção contra curto-circuitos
  - proteção contra acidentes nucleares
  - compartimentagem e estanqueidade

Nesta classe, consideraremos as velocidades típicas e os níveis de potência a elas associados, autonomia e raios de ação com as respectivas medidas de discreção, características de manobra e características de emissão própria de energia, determinadas pelas chamadas "assinaturas" acústica, térmica e magnética.

#### a) Velocidades Características

A velocidade máxima está associada à máxima potência que pode ser desenvolvida pelo acionador do eixo propulsor, motor elétrico ou turbina, basicamente. Nas instalações não-nucleares, tem característica intermitente, pois o tempo que o acionador pode operar a seu nível de potência máximo é limitado pelas características de sua fonte de energia motriz, como a máxima "rate" de descarga das baterias ou o volume estocado de reagentes (combustível e comburente nas fontes de energia baseadas em combustão, produtos químicos, nas baseadas em outras reações).

As instalações nucleares têm a capacidade de desenvolver sua potência máxima por tempo praticamente indefinido devido à altíssima densidade de energia do combustível nuclear. Entretanto, nenhum perfil de missão para submarinos requer a velocidade máxima por tempo extremamente longo, pois nesta situação a capacidade dos sensores acústicos do navio fica quase que totalmente comprometida devido ao ruído do escoamento ao longo do casco e cavitação no hélice (esta situação de "cegueira" ocorre para velocidade acima de valores em torno de 15-20 nós). Logo, o requisito da instalação de desenvolver sua potência máxima está sempre associado a um período determinado. No caso de submarinos convencionais este tempo é de ordem de 1 hora, devido às limitações das baterias chumbo-ácido usuais. O valor absoluto desta velocidade máxima é função de missões preconizadas para o navio. O submarino convencional moderno de melhor desempenho neste item é o TR-1700 (Argentina, projeto alemão) com 25 nós por 1 hora. O submarino experimental, também convencional, Albacore (EUA) atingiu 33 nós utilizando baterias prate-zinco. Este último exemplo, ressalta outro aspecto importante, no caso de submarinos com acionamento elétrico, que é o tempo necessário para recarga das baterias após o "sprint" de velocidade - as baterias prate-zinco, apesar de terem uma densidade de energia muito alta, têm um tempo de recarga extremamente longo, inviabilizando seu emprego em unidades operacionais. A recarga de baterias em submarinos convencionais somente pode ser efetuada em condições dependentes do ar atmosférico (em esnórquel ou na superfície). Já os submarinos dotados de SPIA podem realizá-la em submersão. O tempo envolvido na operação de recarga será uma função das características de carga das baterias, da potência instalada dos geradores elétricos, da velocidade de submersão durante a recarga (carga propulsiva) e da energia consumida pelos demais utilizadores (carga hotel). Nas instalações

nucleares, a velocidade máxima pode ser mantida por um tempo praticamente ilimitado. Seu valor absoluto pode atingir mais de 40 nós (classes Alfa e Avula, UR55), porém os valores usuais estão em torno de 30 nós.

A velocidade de trânsito é associada ao período que o submarino se desloca de seu ponto de partida inicial até a área onde vai efetuar sua missão. Deve ser a mais alta possível, mantendo porém o nível de ruído próprio emitido razoavelmente baixo, restando assim um mínimo aceitável de capacidade de detecção pelos seus sensores acústicos e de probabilidade de ser detectado pelo inimigo. No caso de submarinos não nucleares, seu valor deve ser compatibilizado com o raio de ação desejado e no caso ainda de propulsão convencional ou híbrida soma-se a restrição do coeficiente de indisscrição máximo admissível.

A velocidade de patrulha é associada ao período que o submarino permanece na área de execução de sua missão. Seu valor é normalmente baixo, visando minimizar a emissão de ruído próprio, de modo a otimizar o desempenho de seus sensores acústicos e reduzir a probabilidade de detecção pelo inimigo, devendo entrar em ação, ser alta o suficiente para que uma razoável área marítima possa ser coberta pelo navio, reduzindo assim o número de submarinos necessários para a missão requerida pela marinha como um todo.

A velocidade silenciosa é aquela na qual o submarino pretende ser praticamente imune à detecção acústica passiva do inimigo, normalmente associada à navegação em áreas marítimas com presença inimiga muito forte (águas restritas, zonas de convergência, áreas de cobertura de comboios e freixas-tarefa, etc.). Tem um valor absoluto muito baixo (2 a 4 nós), no entanto deve ser alta o suficiente para permitir o controle de governo e profundidade do navio através das superfícies de controle (lemes verticais e horizontais).

O "hovering", ou velocidade nula é uma condição possível somente aos submarinos mais modernos, com sistemas de compensação e trim sofisticados. Para a instalação propulsora sua influência resume-se na indisponibilidade de utilizar-se meios de circulação de água do mar para sistemas de resfriamento dependentes da pressão dinâmica resultante do movimento do navio, meios estes normalmente já não disponíveis na velocidade silenciosa.

A velocidade de periscópio é limitada pela resistência mecânica dos mastros, pelo aumento da resistência ao avanço decorrente na influência da interface mar/ ar (surgimento de resistência de ondas) e pela capacidade do sistema de controle de profundidade, já que nesta situação surgem forças hidrodinâmicas que tendem a fazer o submarino emergir, sendo estas forças diretamente proporcionais à velocidade. Nas instalações convencionais existe ainda um compromisso entre esta velocidade e a velocidade de trânsito visando otimizar o alcance total (raio de ação) e o coeficiente de indisscrição.

A velocidade na superfície nos submarinos modernos é uma consequência, já que a propulsão é projetada para operação submersa. Seu valor é baixo, dado que nesta condição há um grande aumento na resistência ao avanço devido as ondas geradas. Era um requisito importante para os submarinos anteriores ao tipo XXI alemão. A faixa de 12-15 nós é típica para submarinos modernos.

A variedade de velocidades operacionais é difícil de ser obtida por uma instalação única. No caso de instalação nuclear existem dispositivos para garantir a velocidade silenciosa como o acionamento do motor elétrico por baterias auxiliares, no caso de transmissão turbo-elétrica, ou um motor elétrico auxiliar montado diretamente no eixo (EUA) ou com transmissão por polias (GB) no caso de acionamento direto. Nas modernas instalações convencionais este problema foi eliminado pelos dispositivos avançados de controle de campo e armadura do MFP. O conceito de propulsão híbrida surge neste contexto visando otimizar o desempenho do sistema nas diversas velocidades. O princípio Walter quando aplicado em 1940, visava fornecer a velocidade máxima, ficando as outras velocidades a cargo da instalação convencional. Os híbridos baseados em célula de combustível, motor Stirling, Diesel em ciclo fechado e fonte nuclear de potência (AHS) visam ter um SPIA para a velocidade de patrulha e reduzir a inscrição durante o trânsito, deixando a velocidade máxima para a instalação convencional. O uso de instalações híbridas para submarinos se assemelha, em filosofia, ao uso das instalações combinadas em navios de superfície (CODOG, CODOD, COGOG, etc.).

#### b) Autonomia e Raio de Ação

São definidos dois tipos de alcance (raio de ação) determinados pela condição de operação de instalação:

- raio de ação submerso (operação independente do ar)
- raio de ação total (operação periodicamente dependente do ar)

O raio de ação submerso para submarinos convencionais é uma função das características de descarga e da quantidade de elementos de bateria utilizados. O tempo de descarga é inversamente proporcional à potência fornecida pelo elemento. Para submarinos convencionais modernos temos tipicamente estes valores variando na faixa de 1 hora a velocidade máxima até 100 horas a velocidade de 4 nós (silenciosa) considerando uma descarga máxima de 80% de capacidade das baterias (condição normalmente adotada em projeto). As instalações nucleares tem um raio de ação submerso teoricamente ilimitado para qualquer velocidade. Entretanto, devemos notar que fatores alheios à instalação propulsora limitam este raio de ação submerso, tais como a necessidade de manter comunicações confiáveis e rápidas utilizando a faixa de HF e a necessidade de ajuste do sistema de navegação inercial através da recepção de sinal de satélite (NAVSTAR ou GPS) ou outros meios convencionais de navegação (astronômica, costeira ou eletrônica).



Estes fatores requerem navegação à cota periscópica e exposição de mastros à superfície por curto intervalo de tempo, entretanto, com comprometimento da disscrição. Os sistemas híbridos com SPIA para velocidades baixas e moderadas levam a raios de ação submersos muito maiores que os convencionais, porém com a limitação do volume armazenado de reagentes, execução feita ao sistema com fonte nuclear, que tem raio de ação submerso limitado para velocidades moderadas.

O raio de ação total está associado a um modo de operação mista. O navio navega submerso (independente do ar) durante determinado tempo e velocidade, e durante outro período na cota periscópica, em outra velocidade determinada (dependente do ar). A relação entre estes tempos define o coeficiente de disscrição:

$$CI = tp / (tp + ts), \text{ onde}$$

$$CI = \text{coeficiente de disscrição}$$

$$tp = \text{tempo na cota periscópica (dependente do ar)}$$

$$ts = \text{tempo submerso (independente do ar)}$$

A velocidade de avanço é a velocidade média ponderada durante todo o período de operação mista:

$$Vm = Vs.(1 - CI) + Vp . CI, \text{ onde}$$

$$Vm = \text{velocidade de avanço}$$

$$Vs = \text{velocidade submerso}$$

$$Vp = \text{velocidade a cota periscópica}$$

No caso de um submarino convencional, o problema de determinação do raio de ação total é um problema multivariável, devendo ser resolvido através da otimização a partir de critérios baseados nos requisitos específicos preconizados. As características da instalação propulsora devem ser levadas em conta da seguinte forma:

- a potência requerida é uma função polinomial da velocidade, determinada a partir de estudos de resistência ao avanço nas condições submersas e na cota periscópica;

- o tempo submerso é uma função das características de descarga do elemento e do critério de máxima descarga admissível, normalmente adotado como 80% da capacidade total do elemento;

- o tempo em esnórquel é uma função da taxa de descarga durante o período anterior submerso, pois a relação entre energia cedida na carga em esnórquel e a energia descarregada no período submerso é uma função da taxa de descarga, que varia de 1,26 para descargas rápidas (altas velocidades submersas) até 1,12 para descargas lentas (baixas velocidades submersas); GABLER [1];

- a potência disponível para descarga é uma função do número e das características de descarga dos elementos de bateria e do rendimento do MEP;



- a potência disponível para carga é função do número, potência e consumo específico dos diesel-geradores, da capacidade total de óleo combustível do navio, da velocidade em esnórquel e do rendimento do MEP.

Como no caso das velocidades, são admitidos diferentes coeficientes de indícios máximos admitíveis para as diferentes condições de operação. Geralmente são adotados valores em torno de 15% para o CI em trânsito e inferiores a 10% para patrulha como requisitos de projeto de submarinos convencionais.

Para instalações nucleares os valores de CI tendem a zero. O possível pequeno valor encontrado se deve a razões alheias à instalação propulsora. Um aspecto interessante a ser verificado é o fato de todos os submarinos nucleares possuírem uma pequena instalação convencional para propulsão em emergência que pelas suas características de baixa potência, opera com valores de CI altos, da ordem de 50% e a baixas velocidades e limitado raio de ação total e submerso.

Os sistemas de propulsão híbrida atuais visam basicamente reduzir substancialmente o valor de CI, sem necessariamente haver aumento no raio de ação total.

Quanto à autonomia, normalmente ela não é associada a características da instalação propulsora, de acordo com o conceito usualmente adotado em engenharia naval, entretanto, alguns pontos são relevantes. A autonomia de um submarino está geralmente ligada a necessidades humanas, como a capacidade de armazenamento de gêneros, produção e armazenamento de água potável e de lavagem e capacidade de regeneração de ar ambiente além da própria resistência física e psicológica da tripulação. Os modernos projetos de submarinos prevêem autônomo de ordem de 60 a 90 dias, independentemente da instalação propulsora. A determinação deste número dependerá fundamentalmente da missão preconizada. Submarinos para defesa costeira não requerem grande autonomia, já os para determinação estratégica devem tê-la em grande escala. A autonomia requerida para categoria intermédia (submarinos para controle de área marítima) dependerá da distância das áreas marítimas a serem defendidas e pretendendo empregar-se a disponibilidade de bases de apoio, estando inserida no contexto estratégico a máquina como um todo. O impacto do armazenamento de gêneros e água na propulsão é somente indireto, pois faz com que o deslocamento aumente, consequentemente aumentando a potência propulsiva requerida e aumento da carga hotel devido ao crescimento das câmaras frigoríficas. Quanto à necessidade de produção de água, deve-se notar que os submarinos convencionais em geral utilizam grupos destilatórios que empregam como fonte quente a água de resfriamento dos motores diesel, restringindo sua operação a condição de esnórquel ou superfície. Modernamente tem se desenvolvido grupos destilatórios de osmose reversa que possibilitam operação quando submerso, aproveitando inclusive a pressão hidrostática disponível devido à profundidade para sua operação. Nas instalações nucleares, a disponibilidade de vapor

elimina aquela restrição, porém estas instalações requerem grande consumo de água de suprimento para a instalação propulsora, além de requererem grandes volumes de água armazenados para sistemas de alimentação em emergência dos geradores de vapor e de resfriamento em emergência do reator. A capacidade de regeneração contínua do ar ambiente (eliminação de CO<sub>2</sub> e outros poluentes e introdução de O<sub>2</sub>) é requerida pelos SPiAs, aumentando consequentemente o volume e carga total do submarino. A obrigatoriedade de operação em esnorquell, possibilitando a renovação periódica do ar ambiente, reduz este requisito em submarinos convencionais. Alguns submarinos nucleares adotam a solução de produção direta de O<sub>2</sub> através de hidrólise de água de mar, reduzindo grandemente os requisitos de estocagem sob pressão, entretanto, através de grande consumo de energia elétrica e das dificuldades de manipulação de grandes quantidades de perigoso H<sub>2</sub>, sub-produto do processo, que entra em combustão espontânea quando sua concentração no ar supera determinado limite.

A eliminação do hidrogênio do ar ambiente é especialmente importante em SPiAs que possibilitam carga de baterias em submersão, pois neste caso, diferentemente das instalações convencionais, a carga é feita sem renovação do ar ambiente pelo sistema esnorquell.

Quanto aos aspectos referentes à resistência da tripulação, a elevação do grau de automação da instalação e a redução das atividades de manutenção feita pelo pessoal a bordo contribuem grandemente para o aumento da autonomia sob este aspecto.

### c) Manobra da Instalação

Como manobra da instalação entendemos basicamente sua resposta a transientes críticos postulados e as suas características de controle de velocidade. Como transientes críticos, consideraremos:

- partida a frio;
- desligamento;
- partida a quente;
- reversão em emergência ("crash reversal");
- variações de carga severas.

Os requisitos da instalação são definidos como tempos máximos de resposta e, no caso da reversão, em distância percorrida pelo navio para parar.

Para propulsão convencional, os aspectos de partida a frio, desligamento e partida a quente não são relevantes, pois os procedimentos são simples e os tempos envolvidos são curtos.

No caso da propulsão nuclear o problema é bem mais complexo, pois os procedimentos de partida a frio e desligamento são demorados, exigindo longos períodos de aquecimento e de resfriamento. Os reatores nucleares de emprego naval possuem o

importante requisito de possibilitar a partida a quente com rapidez, diferentemente dos reatores estacionários (e instalações empregados como "carregadores de baterias" em instalações híbridas), que em geral não são submetidos a bruscas variações de carga. Quando um reator tem sua potência reduzida bruscamente através da inserção de suas barras de controle ocorre o fenômeno do "envenenamento" por xenônio e outros produtos de fissão de menor importância. Este fenômeno consiste no crescimento da concentração destes produtos por decaimento radioativo na região inativa do núcleo. Estes elementos têm a propriedade de grande seção reta de absorção de nêutrons. Logo após o desligamento, a concentração de xenônio cresce muito, impedindo que logo após seja elevado novamente o nível de potência. É necessário esperar-se longo tempo para que o xenônio tenha seu decaimento radioativo, reduzindo sua concentração, para ser possível tornar o reator novamente crítico. Este tempo, num reator naval, não pode ser longo, ou seja, o reator deve poder ser tornado crítico com qualquer concentração de xenônio e além disto, esta concentração não deve impedir o reator de atingir sua potência máxima.

Os SPIN não-nucleares que utilizam turbina como acionador possuem procedimentos de partida a frio e desligamento condicionados pelas taxas de aquecimento e resfriamento admissíveis para este tipo de máquina, mais demorado do que a instalação convencional. Os sistemas Stirling, Diesel em ciclo fechado e células de combustível tem características de partida a frio, desligamento e partida a quente semelhantes à instalação convencional.

O critério de distância percorrida para a parada do navio é definido como um múltiplo do comprimento do navio, na faixa de 5 a 10 vezes, dependendo da velocidade inicial considerada.

Os motores elétricos possuem um procedimento de reversão relativamente mais simples, através da inversão da polaridade da tensão de campo e armadura, possuindo a propriedade de frenagem dinâmica através de absorção de energia pelo produtor, fazendo o motor funcionar em transiente como gerador. Num submarino convencional, esta energia pode ser retornada para as baterias, já na propulsão nuclear turbo-elétrica ou outro SPIN no qual o motor é acionado diretamente por um gerador, esta dissipação deve ser feita via bancada de resistências de frenagem. Ao ser desligado o motor de propulsão, a rotação do hélice cai rapidamente para um valor entre 60 - 70% do valor ao início da manobra. Neste momento se inicia o processo de frenagem. O torque de frenagem deve ser maior que o torque negativo absorvido pelo hélice devido ao movimento para vante do navio, atingindo um valor máximo entre 0,6 e 1,2 do valor nominal ao início da reversão. Dependendo da velocidade inicial, este máximo ocorre em torno de 10% da velocidade nominal. A partir daí a rotação cai rapidamente, anulando-se para um valor de torque negativo da ordem de 40 - 80% do valor nominal inicial e em seguida o torque se carga volta a crescer, agora com a rotação do hélice já invertida, até a parada total do navio. Nesta manobra o motor elétrico sofre fortes

solicitações, devendo a inversão de polaridade do campo e da armadura ser feita segundo um programa bem estabelecido de modo que os valores de corrente não atinjam os limites dos condutores e das resistências de frenagem. Os tempos envolvidos para a inversão da rotação são da ordem de 1 minuto e para parada total da ordem de 2 minutos.

Os tempos envolvidos para a reversão de turbinas são maiores, pois a ordem de reversão, o vapor deve ser desviado para o condensador, aguardando-se que a rotação caia a um valor próximo de zero e aí então volta-se a introduzir vapor, agora na seção de marcha-a-ré da turbina. A potência a ré é muito tempo nesta condição, pois ocorrerá uma queda no vácuo do condensador devido à alta temperatura e pressão do vapor na exaustão da turbina de marcha-a-ré. Para o reator nuclear esta manobra também é extremamente exigente, já que há uma redução brusca da potência demandada e logo a seguir uma elevação rápida. Os problemas de concentração de xenônio transitente são aí muito graves.

Quanto às características de variações de carga, a reversão é a mais crítica. Entretanto, alguns comentários devem ser feitos acerca das acelerações. No caso de acionamento do eixo por motor elétrico, observa-se que a distância percorrida e tempo gasto para alterar-se a velocidade do navio para um nível mais alto é pouco sensível à taxa de variação de tensão no motor elétrico. Entretanto, taxas altas de aumento de tensão introduzem grandes solicitações, através de picos de corrente de armadura indesejáveis. O resultado final do comportamento do navio é praticamente o mesmo para acelerações da ordem de 100 volts/seg a 50 volts/seg, sendo entretanto os picos de corrente da ordem de 20% maiores. Considera-se então que valores incrementos de tensão da ordem de 50 volts/seg são compatíveis com o desempenho operacional do submarino.

## 2.3 Assinatura Térmica

Os problemas relativos à assinatura térmica, caracterizada pelo padrão de emissão infra-vermelha do navio só se tornaram importantes recentemente com o desenvolvimento de sensores térmicos extremamente sensíveis, que possibilitaram a detecção do submarino por este meio. A propulsão convencional em operação de descarga de baterias ocorre a temperaturas baixas, mesmo para altas "rates", não chegando a 100°C. O mesmo ocorre com o motor elétrico, que opera a temperaturas ainda mais baixas. São necessários sistemas de resfriamento para altas "rates" de descarga (resfriamento dos bornes das baterias) e altas potências (resfriamento do MEP). Os motores diesel, que são grandes dissipadores de calor, só operam na cota periscópica e aí a descrição do navio já está muito comprometida por outros fatores não-térmicos (ruído, exposição dos mastros na superfície, etc.).

Os SPIA que utilizam fontes quentes para sua operação

(nuclear, Stirling, Diesel em ciclo fechado) ter assinatura térmica muito acentuada. Os modernos sensores infra-vermelho têm grande capacidade de detectar pontos de alta temperatura através do espectro de frequências que emite - quanto mais alta a temperatura, mais fácil detectar o emissor, pois as frequências emitidas serão mais altas.

Por esta razão, a instalação nuclear é a termicamente mais indistreta devido às altíssimas temperaturas no interior do combustível (da ordem de 2500°C). Os sistemas casados em combustão desenvolvem temperaturas da ordem de 1000°C.

Outro aspecto importantíssimo para a assinatura térmica é o rendimento da instalação propulsora. Uma baixa eficiência nos processos de transformação de energia significa uma grande quantidade de calor rejeitada para fonte fria e rejeitada para o ambiente interno. Ao final de todos os processos de transferência de calor, este calor residual irá inevitavelmente para a água do mar, alterando localmente o padrão de temperaturas do oceano, o que também é passível de detecção. Os sistemas nucleares devido ao seu baixo rendimento térmico, principalmente os PWR, onde os processos de troca de calor ocorrem a temperaturas relativamente baixas, possuem grande indistretção térmica. Uma maneira de tentar reduzir este efeito é descarregar a água de resfriamento diretamente na esteira do hélice, de modo que o turbinohomagemnto acelere a dissipação do calor.

#### e) Assinatura Magnética

Os sensores de detecção magnética (MAD - "Magnetic Anomaly Detector") são usualmente utilizados por aeronaves e sua capacidade de detecção é restrita a submarinos operando a pequena profundidade, devido a baixa intensidade dos campos envolvidos. O requisito de pequena assinatura magnética é extremamente importante para submarinos projetados primordialmente para operar em águas rasas, como é o caso dos submarinos alemães (Mar Baltico). Uma prova deste fato é o desenvolvimento de projetos utilizando acos não magnéticos, de alto custo, pela Alemanha. Nos navios projetados para operar em águas profundas, este requisito tem relativamente menor importância. O meio tradicional de redução de assinatura magnética é a utilização do sistema "degaussing", cujo princípio é gerar um campo magnético de igual intensidade e sentido oposto ao gerado pelo navio, a anular seu efeito. Isto é obtido através de campos gerados por bobinas elétricas dispostas ao longo do navio nas três direções. A intensidade do campo resultante é ajustada pela corrente nas bobinas. Este sistema é extremamente complexo, tanto em seu projeto como em sua operação, ocupando grande volume no navio e exigindo ajustes contínuos, dada as características extremamente variáveis do campo magnético gerado pelo navio. A sua real necessidade, analisada com base na relação custo-benefício é discutível.

Além do sistema "degaussing" e do uso de materiais diamagnéticos (acos austeníticos, titânio), outra medida para



redução da assinatura magnética é a desmagnetização, processo efetuado em instalações especiais em porto.

Para efeito de comparação entre os diversos meios de redução de assinatura magnética, podemos considerar, para uma aeronave voando à mínima altura (30m), que as segundas profundidades podem ser consideradas seguras, isto é, valores mínimos de operação do submarino para que não seja detectado:

- 30m, para submarino utilizando acs diamagnéticos, com "degaussing" e anualmente desmagnetizado;
- 100m, para submarino com "degaussing" e anualmente desmagnetizado;
- 150m, para submarino anualmente desmagnetizado.

Um problema associado ao "degaussing" é seu grande consumo de energia. Para um submarino convencional, sua instalação implica num aumento de 10 a 20% da carga hotel, o que tem grande impacto no projeto (maior peso de baterias = maior deslocamento = maior potência requerida = maior MEP, etc.)

#### e) Assinatura Acústica

As fontes mais importantes da assinatura acústica são geralmente a hélice, máquinas de propulsão e auxiliares e ruído do casco e ruído hidrodinâmico.

#### a) Ruído de Máquinas

Os níveis e características gerais do ruído emitido dependem do tipo de máquina. Para um observador humano, o ruído captado na água é muito semelhante ao ouvido no ar.

Os componentes do ruído de máquinas podem ser divididos em três categorias:

- tons discretos, com frequência definida e relacionada com a rotação da máquina;
- tons discretos, com frequência definida mas não relacionada com a rotação da máquina;
- ruído aleatório.

Ruídos do primeiro tipo ocorrem em máquinas rotativas e alternativas. Existe sempre um componente fundamental, de frequência igual à de rotação, e vários harmônicos. Motores elétricos e geradores apresentam sempre harmônicos de frequência igual à de rotação multiplicada pelo número de pólos. Ruídos de transformadores possuem tom fundamental com frequência igual ao dobro da frequência de alimentação.

Ruídos do segundo tipo decorrem de ressonâncias de partes da máquina ou da fundação, excitadas por atritos e impactos (em válvulas de comando, eixos de cames), e não mudam portanto de frequência quando a velocidade de rotação é alterada. Em alguns

casos, um ruído deste segundo tipo possui tantos componentes discretos que o ouvido não é capaz de distingui-los e portanto, os classifica como do terceiro tipo.

O terceiro tipo aparece em partes tais como mancais e em máquinas de funcionamento intermitente como as de acionamento de lemes.

Evidentemente, o ruído de qualquer máquina é sempre composto por estas três parcelas. Todos estes ruídos têm início como vibração e transformam-se em ruído na água da seguinte maneira: A máquina transmite vibração ao seu jazente; a vibração no jazente faz com que o chapameento vibre; e esta vibração causa variação da pressão (ruído) na água. O ruído na estrutura também caminha através do casco até atingir a região do sonar. Esta vibração é captada pelos transdutores e causa interferências (ruído no sonar).

As principais ferramentas para minimização da parcela da assinatura acústica gerada pelas máquinas são:

- redução do ruído na fonte;
- isolamento da fonte;
- amortecimento.
- Arranjo da fonte afastada do casco

Poucas máquinas de emprego geral são projetadas e construídas visando operação silenciosa. Máquinas para emprego em submarinos, tanto em sua aquisição quanto em recondicionamentos, devem ser submetidas a requisitos especiais.

A primeira medida é o balanceamento estático e dinâmico segundo tolerâncias estritas. O desbalanceamento de máquinas rotativas e alternativas gera vibrações com frequência igual à de rotação. Além de indesejáveis sobre o ponto de vista de desastes e quebra de peças por fadiga, estas vibrações provocam emissão de ruídos. Para minimizá-las, deve-se especificar balanceamento de forças e momentos de todos os componentes rotativos e balanceamento final do conjunto em condições de funcionamento. Ser como instalação, relocação ou nova sintonização de absorvedores dinâmicos.

Em segundo lugar, deve-se exercer um cuidadoso controle de tolerâncias em peças móveis. Ajustes mal feitos, eixos ovalizados etc. são causas frequentes de ruídos. Em bombas, ventiladores e turbinas, a passagem de pás, palhetas e impelidores próximos às carcacas causa flutuações de pressão que podem ser suavizadas por camamento das pás ("skewing"), usinagem criteriosa e imposição de escoamentos sem mudanças bruscas de direção. Em máquinas alternativas, o jogo de pistões dentro de cilindros é uma fonte de ruído, que pode ser minimizado pela substituição de anéis e/ou retífica para obtenção de ajustes adequados. Mancais de rolamento são também fontes de ruído indesejável, que pode ser minimizado por instalação

cuidadosa, substituição de mancais defeituosos ou desgastados e emprego de mancais especiais com baixa emissão de ruído. Em máquinas elétricas, escovas e anéis coletores desgastados, geram ruídos. Núcleos e enrolamentos frequentemente apresentam-se frouxos e tender a gerar excentricidades e desbalanceamento quando aquecidos e sob carga. Um reparo bem conduzido pode sanar muitas destas deficiências.

Uma maneira bastante efetiva de se reduzir o ruído gerado por máquinas é o isolamento da fonte. Este termo refere-se a separação entre a máquina e a estrutura do navio através do emprego de elementos resistentes, tais como calcos de borracha, conexões de tubulações flexíveis, cabos elétricos flexíveis e suportes de tubulações resistentes.

O isolamento, e portanto a quantidade de ruído irradiado da máquina para a água, é função das características do calco. O isolamento, na maior parte da faixa de frequências de interesse, varia inversamente com a frequência natural do sistema máquina-calcos, isto é, quanto menor a frequência natural (quanto mais flexíveis os calcos), melhor o isolamento. Esta frequência natural depende do peso do equipamento, da quantidade de borracha do calco e de sua forma. Torna-se portanto necessário dispor de uma gama variada de calcos flexíveis, com diferentes cargas nominais e características para suportar o grande número de máquinas a bordo.

Quando a máquina montada sobre calcos flexíveis é ligada a tubulação e duto, é também necessário inserir elementos que tornem esta união flexível. Estes elementos devem :

- atenuar a vibração ("structureborne noise") propagada da máquina para a tubulação;
- atenuar o ruído propagado através do fluido bombeado.

Estas funções devem ser desempenhadas no mesmo local, uma vez que existe um acoplamento entre esses dois tipos de transmissão de ruído. Se apenas um dos caminhos for interrompido, o ruído é transmitido pelo outro.

Junta ou uniões flexíveis proporcionam atenuação de vibrações pelo uso de elementos de borracha entre as partes metálicas. Os tipos mais eficientes reduzem o ruído no fluido ao proporcionar um alívio de pressão, proveniente de pulsações, na sua seção resistente.

Geralmente as mangueiras flexíveis desempenham a mesma função. Sua parede flexível isola as duas seções de tubulação e sua flexibilidade proporciona alívio de pressões pulsantes. Tais mangueiras são frequentemente instaladas em "V" para reduzir pulsações longitudinais no fluido. Esta configuração consiste geralmente de duas mangueiras ligadas entre si por um cotovelo rígido.

Para buscar reduzir ainda mais o ruído que passa de tubulações para o casco, os suportes de tubulação são geralmente revestidos de borracha internamente. Seu projeto é tal que, após dessa função, eles também servem como amortecedores de vibração da tubulação. Por essas mesmas razões, penetrações em anteparas devem também ser projetadas como suportes resilientes.

A fixação elétrica deve também ser encarada como caminho de transmissão das vibrações da máquina para o casco. Todavia sua flexibilidade inerente é suficiente para uma boa isolamento, desde que o seu último suporte acima dos calcos não esteja muito próximo do primeiro suporte no casco, e que entre estes dois pontos a distância descreva um arco e não uma reta.

Os sistemas de isolamento da fonte são efetivos na redução do ruído irradiado, mas é essencial que sejam mantidos em todo estado de conservação. Não poder haver curto-circuitos de ruído. Quando se usar conexões ou mangueiras flexíveis, estas devem ser posicionadas entre a máquina e primeiro suporte de tubulação. Não se deve permitir o contato das máquinas com bancadas, armários, corrimãos, estrados, etc.

Caso o elemento de borracha do calco esteja quebrado, rachado, pintado ou deteriorado, o isolamento será prejudicado. A distorção dos calcos por instalação mal feita pode ter o mesmo efeito.

Com o tempo, os calcos de borracha apresentam fluência e borraça é visco-elástica, embora a pré-tensão antes da instalação minimize o fenômeno. Quando numa inspeção se verifica que a altura do calco é inferior e mínima recomendada, este deve ser substituído.

Um outro requisito importante é a equalização de cargas nos calcos de uma mesma máquina. Um sinal de problemas é a constatação de que alguns dos calcos estão mais comprimidos que outros, caso em que a atenuação pode não estar sendo adequada. A correção desse problema pode ser conseguida através de calcamento ("shimming") e re posicionamento de calcos.

A maior parte do ruído de máquinas irradiado para a água provém da excitação da estrutura do navio pelas vibrações geradas no equipamento. Uma parcela, todavia, deve-se a excitação da estrutura pelo ruído emitido do equipamento para o ar. Esta parcela pode ser ponderável quando a máquina em questão irradia altos níveis de ruído no ar. Como no caso do ruído transmitido pela estrutura, é desejável nestes casos isolar a máquina do casco, mediante a instalação de dispositivos intermediários. Entre outras medidas, enclausuramento da máquina e tratamento acústico do compartimento podem resolver o problema.

Qualquer que seja o caminho de propagação, o fato é que o casco é o elemento final da cadeia que leva a transmissão do ruído de máquinas para a água. As vibrações deste casco vão gerar o

Ruído na água. O casco é um sistema mecânico complexo, com muitas frequências naturais de vibração. O ruído de máquinas excita muitas destas frequências, podendo resultar numa amplificação da excitação.

O método clássico de redução de vibração em sistemas ressonantes é através de amortecimento. Materiais amortecedores de vibração são, em alguns casos, aplicados a jantes de máquinas vibratórias para reduzir a energia transmitida pela estrutura e outros pontos do navio; são também aplicados a anteparas e convézes para reduzir o ruído irradiado para compartimentos; e, finalmente, ao casco para reduzir o ruído irradiado para água. Também usual aplicar estes materiais ao chapéamento na região do sonar, para reduzir o ruído que provém tanto da estrutura como da água.

O amortecimento tem o efeito de reduzir a amplitude de vibração na frequência de ressonância da estrutura. Há vários fenômenos que permitem obter fisicamente o amortecimento desejado. Fricção é um exemplo. Flexão de certos materiais dissipativos é outro. Certos materiais visco-elásticos apresentam alta dissipação quando sob tensão.

## b) Ruído do hélice

O hélice produz ruído através de três mecanismos básicos: ruído na frequência de passagem das pás, cavitação e vibração auto-excitada das pás ("singing").

A primeira parcela ocorre devido a rotação do hélice, que gera na água um campo de pressões giratório ao redor de cada pá. Quando este campo passa próximo ao casco ou a um apêndice, ele gera no local um pulso. O resultado final são forças aplicadas de frequência fundamental igual ao número de pás multiplicado pela frequência de rotação do eixo. O chapéamento e o casco então vibram, gerando todo o ruído na água como no ar, além de transmitir, através da estrutura, vibrações até pontos distantes.

Ruídos de cavitação ocorrem sempre que o hélice opera acima de uma certa rotação crítica, chamada de rotação de injeção de cavitação. Estes ruídos são causados pela formação e pelo colapso de bolhas de vapor em locais de, respectivamente, baixa e alta pressão.

A vibração auto-excitada das pás pode, em alguns casos, ocorrer devido a excitação de vibrações por vórtices formados no bordo de fuga das pás. Este problema é difícil de ser evitado no projeto; muitas vezes a substituição do hélice por um "irmão gêmeo" faz com que cesse a ocorrência. Em alguns casos, o afinamento do bordo de fuga também é uma solução.

De uma maneira geral, o ruído dos hélices a baixas velocidades não é importante em face do ruído de máquinas. Acima da velocidade crítica a situação se inverte.



A determinação de requisitos para a assinatura acústica é feita através da especificação de "curvas limite de ruído irradiado" para cada equipamento individualmente. As características destas curvas dependem do tipo de máquina e de sua potência. Deverão ser definidos os limites de ruído "airborne" e "structureborne" separadamente e associados as diferentes condições de operação normais. Deve-se evitar que as frequências de passagem das pás do hélice excitem frequências naturais de equipamentos, estruturas ou tubulações.

O projeto hidrodinâmico do hélice deverá ser elaborado visando a redução da cavitação e de energia introduzida pelas frequências de passagem de pás, aplicando-se o conceito de "high skew" e grande número de pás (usualmente 7, nos submarinos modernos).

#### 4.5.2 - Ambiente Externo

Como requisitos ambientais externos consideraremos os efeitos do mar, com suas características físicas, químicas e dinâmicas, sobre os diversos componentes da instalação propulsora, tais como pressão, temperatura, densidade, salinidade e os movimentos do navio decorrentes do estado do mar.

#### a) Pressão hidrostática

A pressão de coluna d'água devido à profundidade de imersão é primordial para o projeto estrutural do casco resistente, como é óbvio, porém também tem grande importância para a instalação propulsora, pois variados equipamentos e tubulações estão a ela submetidos, tais como sistemas de resfriamento e descarga de efluentes. Este contato com a pressão externa é feito através de penetrações no casco resistente, que são um problema crítico do ponto de vista de segurança do projeto estrutural.

É primordial a definição dos valores de pressão hidrostática a serem considerados no projeto do casco resistente, a saber :

- pressão de cálculo (PC)
- pressão de teste (PT)
- pressão de operação (PO)

A diferença entre a pressão de operação e a de cálculo é chamada "lâmina d'água de segurança", e seu valor será função da norma de projeto utilizada (B55500 inglesa, BV1041 alemã, DD59110 americana, por exemplo), sendo influenciada pela hierarquia das falhas estruturais postuladas e pelos modelos matemáticos utilizados para a determinação das profundidades de ocorrência destas falhas. A pressão de teste tem um valor um pouco superior a de operação, sendo função do comprimento do submarino e da

velocidade máxima prevista para navegação na cota máxima de operação. O valor da lâmina d'água de segurança varia de 50 a 100% da profundidade de operação.

Para tubulações e equipamentos, são definidas as seguintes categorias de pressão:

- pressão nominal de serviço: é a máxima pressão de operação normal do sistema (PNS);
- pressão de teste: é a pressão aplicada durante os testes de aceitação do elemento ou sistema; o teste é executado para demonstrar estanqueidade e funcionamento (PT);
- pressão de cálculo: máxima pressão especificada para que o elemento ou sistema possa suportar (com alta probabilidade) - é usada como base para os cálculos de resistência mecânica (PC);
- pressão de ruptura: é a pressão na qual os componentes são inicialmente sujeitos após a construção para demonstrar que sua resistência é adequada (PR).

Estas pressões se encontram em torno dos seguintes valores:

$$\begin{aligned} \text{PNS} &= 1,6 * \text{P0} \\ \text{PT} &= 1,25 * \text{PNS} \\ \text{PC} &= 1,2 * \text{PT} \end{aligned}$$

Outra pressão típica é a devida à operação na cota periscópica (15 - 20 m) - alguns sistemas que só operam nesta situação (esnorquel por exemplo) podem ter sua pressão nominal de serviço por ela determinada, à exceção de suas peritracões, obviamente.

Os SPIA baseados em combustão independente do ar atmosférico tem na contra-pressão um grande problema para exaustão dos gases de descarga.

#### b) Temperatura, Densidade e Salinidade

Se considerarmos toda a faixa de temperaturas que é possível encontrar-se nos oceanos, teremos de -2 a 27 graus centígrados. As altas temperaturas só são encontradas nas regiões equatoriais e mesmo assim, numa camada superficial. Os seguintes perfis de temperatura (em °C) podem ser considerados como típicos para as diversas regiões climáticas do globo:

superfície	polar	temperada	tropical	equatorial
500 m	0	8	24	27
300 m	0	8	24	27
200 m	0	6	18	26
100 m	-2	7	14	25
50 m	-2	8	8	14
10 m	0	4	6	10

No projeto de alguns sistemas, é muitas vezes necessário especificar-se uma combinação de temperatura e pressão. Nestes casos, deve ser adotados valores realísticos, isto é, altas pressões (profundidades) com baixas temperaturas e altas temperaturas com baixas profundidades. A temperatura assumida para o projeto é de extrema importância no caso de trocadores de calor em geral e em especial de condensadores de turbinas. Um valor muito alto leva a superdimensionamento (vácuo excessivo) e um valor muito baixo, a desempenho insatisfatório em águas quentes (tropicais e equatoriais). A temperatura assumida deve levar em conta, de uma forma realista, as áreas de operação previstas para o submarino. Nas instalações a vapor, a potência máxima disponível é extremamente sensível a variações da temperatura da água de resfriamento do condensador principal, alterando suas condições de vácuo e consequentemente a queda de entalpia na turbina. Um valor típico de temperatura de projeto seria 18 graus centígrados.

A densidade e salinidade são fatores intimamente relacionados. Os valores de densidade geralmente adotados são:

minima : 1007 kg/m<sup>3</sup>  
projeto: 1025 kg/m<sup>3</sup>  
maxima : 1033 kg/m<sup>3</sup>

Os valores de salinidade normal variam entre 32 e 37 ppm. Estas propriedades, de extrema importância para o equilíbrio do submarino e desempenho de seus sensores acústicos, têm menor importância para a instalação propulsora, sendo a densidade utilizada no cálculo de máquinas hidráulicas e trocadores de calor e no projeto de sistemas de proteção catódica contra a corrosão.

#### c) Movimentos do navio no mar

São os movimentos aos quais o navio é submetido, supondo seu comportamento como corpo rígido. São associados ao chamado "seakeeping" e às solicitações provenientes de manobras do submarino.

Os referidos movimentos se revestem de grande importância no projeto do navio, pois os efeitos causados por fatores externos tais como ondas, ventos e correntes podem provocar movimentos periódicos com duração de alguns segundos, associados a grandes amplitudes, implicando em acelerações relativamente altas.

Nos navios de superfície constituir condições normais de projeto mas em submarinos representam condições atípicas. Um submarino profundamente imerso (mais de 50m) se encontra completamente imune aos efeitos de superfície, mas na cota periscópica estes efeitos são bastante sensíveis e na superfície as solicitações são grandes. As características de "seakeeping" de um submarino emerso são pessimas, pois o projeto hidrodinâmico de seu casco vise otimizar seu desempenho submerso.

Todos os sistemas, equipamentos e componentes devem ser

verificados quanto às suas condições operacionais e de segurança quando o submarino estiver submetido às condições de movimentos nas especificadas. Os itens montados em bases resistentes flexíveis devem ser analisados cuidadosamente, verificando - se os deslocamentos resultantes e as deflexões nos calços, que poder ter sua vida útil comprometida pela aplicação contínua dos movimentos especificados. Tanques e outros equipamentos com superfície livre líquida devem ser verificados quanto a aspectos como controle de nível e da aspiração de bombas, pois problemas como cavitação severa (com resultante emissão de ruído) e até perda de aspiração podem ocorrer devido à redução do NPSH disponível. As condições de escoamentos efetuados por gravidade podem ser eliminadas e até mesmo serem invertidos. Especial atenção deve ser dada aos sistemas de lubrificação, principalmente aqueles com metacais lubrificados a anel pescador. Sob o ponto de vista estrutural, as solicitações devido aos movimentos no mar não são críticas pois os níveis de aceleração envolvidos são muito inferiores às solicitações devido ao choque.

Os seguintes valores podem ser considerados como uma orientação geral:

Amplitude	Período
jogo ("roll")	30s
banda ("list")	15s
caturo ("pitch")	10s
trim	30s
arfagem ("heave")	3m
guinada ("yaw")	15°/seg
	5s
	30s

Os movimentos referem-se ao centro de gravidade do navio, sendo os movimentos dos equipamentos serem obtidos pela composição harmônica, considerado-se sua posição relativa. As seguintes combinações devem ser consideradas:

- banda e trim
- banda e caturo
- jogo e trim
- jogo e caturo

### d) Operação sob as calotas polares

O requisito de operação nas regiões polares tem os seguintes impactos sobre a instalação propulsora:

- verificação do comportamento dos materiais utilizados para sistemas em contato com o ambiente externo quando a temperatura a frio (temperaturas da ordem de -20° submerso e -40° a superfície);

- necessidade de sistema de aquecimento na válvula de cabeça do esnorquel, de modo a evitar o seu travamento devido ao acúmulo de gelo;

- necessidade de aquecimento do ambiente interno dos compartimentos habitáveis;

- resistência mecânica da superestrutura e vela aumentada para evitar danos em equipamentos e tubulações posicionadas fora do casco resistente durante a operação de rompimento das camadas de gelo superficiais.

#### 4.5.3 - Ambiente Interno

Esta classe de requisitos visa assegurar as condições necessárias à saúde e ao conforto físico e mental da tripulação, incluindo:

- ruído na faixa de audição;
- condições climáticas internas;
- qualidade do ar ambiente;
- níveis de radiações ionizantes (para instalações nucleares).

#### a) ruídos audíveis

As frequências de ruído que podem acarretar perturbações à audição do ser humano situam-se entre 300 e 4800 Hz. Dentro desta faixa de frequências devem ser tomados cuidados de modo que os níveis não exceder determinados valores pré-estabelecidos, tais como:

65	70	estações de controle de máquinas
110	120	praca de máquinas desgarradas
85	90	praca de máquinas guarnecidas
NRC	dB	

0 NRC ("noise reduction coefficient") aplica-se à medições em banda de oitava.

#### b) Clima interno

Os seguintes valores de temperatura e umidade do ar podem ser considerados como referência:

pracas de máquinas guarnecidas	30°	sem limite
pracas de máquinas desgarradas	50°	sem limite
estações de controle de máquinas	20-23°	sem limite
	ou 30°	< 50%
temperatura umidade		

Os valores de referência deverão ser mantidos para qualquer temperatura da água do mar dentro da faixa requerida pelo projeto. Em geral, deve ser previsto isolamento térmico na superfície interna do casco nos compartimentos habitáveis de modo a evitar



sobrecarga do sistema de ar condicionado nas situações extremas (insolação direta em operação na superfície e temperaturas polares). Cuidados especiais devem ser tomados com a radiação de calor dos equipamentos de propulsão: isolamento térmico e melhoria de sua eficiência são meios de reduzi-la.

A pressão interna deve ser mantida o mais próximo possível da atmosférica. Este requisito é de particular importância para máquinas que aspiram ar do ambiente (motores de combustão em ciclo aberto, compressores de ar) e as que descarregam (acionamentos pneumáticos). A faixa de variação da pressão é em geral admitida como de 1,2 a 0,8 bar. Um aspecto ainda mais importante do que a faixa de variação da pressão é a sua taxa de variação no tempo mais danosa ao ser humano do que os valores absolutos superiores e inferiores. Variações superiores a 1,8 mbar/seg provocam tonturas mal-estar, vômitos, desmaios e cegueira temporária. Durante a operação em esnornuel, a válvula de cabeça é fechada e imediatamente quando seu sensor de água salgada permanece em contato com a água do mar durante um certo tempo ajustável (0 a 11 seg. em geral) de acordo com o estado do mar, protegendo assim o suberino do embarque exagerado de água. O valor do fluxo de ar aspirado pelas máquinas em funcionamento neste período, associado ao volume de ar ambiente disponível no interior do casco resistente, podem levar a que o valor limite de taxa de queda de pressão seja atingido. Deste fato depreende-se que existe um limite máximo para a capacidade instalada de motores diesel e compressores de ar associada a um certo volume de deslocamento dos compartimentos estanques do casco resistente onde estas máquinas estão instaladas, para submarinos que possam operar com esnornuel. Este valor se encontra na faixa de 1,5 a 2,0 kw/ton, dependendo das características de consumo de ar das máquinas. Existem também dispositivos automáticos de corte de combustível para os motores quando a pressão atinge um valor limite mínimo (800 mbar) e os compressores devem ser acionados quando a pressão atinge o limite superior (1200 mbar).

### c) Qualidade do ar ambiente

A emissão de poluentes por componentes da instalação propulsora é em muitos casos impossível de ser totalmente eliminada, entretanto estes produtos devem ter sua concentração no ar ambiente rigidamente controlada. Estes poluentes podem ser tóxicos ( $CO_2$ ,  $CO$ ), combustíveis ( $H_2$ ) ou corrosivos (gás sulfídrico clorídrico). Além disto, os limites de concentração de  $O_2$  devem ser mantidos estritamente na faixa de 18 a 22%. Os problemas de contaminação do ar ambiente se tornam de extrema importância quando o emprego de SPIA que capacita o submarino a grandes períodos de imersão sem possibilidade de renovação do ar ambiente. O limite de concentração de alguns poluentes gerados pela instalação de máquinas são apresentados a seguir:

Poluente	Fonte	Concentração Máxima
$H_2$	baterias	2%

Para o estabelecimento de doses limites aceitáveis, devem ser consideradas diferentes condições como irradiação controlada, doses planejadas, emergências e acidentes. Para tal, devem ser considerados diferentes fatores de ocupação dos diversos compartimentos. Outro aspecto importante é a definição do perfil de atividades do tripulante ao longo de toda sua vida. O tempo máximo de embarque em unidades operativas, os períodos operativos considerados nos ciclos de atividades do submarino, a duração diária dos quartos de serviço bem como a frequência de operação em postos de combate (guarnecimento de postos de serviço sem revezamento) devem ser levados em conta para determinação das doses acumuladas e taxas periódicas (anual, mensal, diária, horária). Um exemplo desta prática é dada pela Marinha francesa, que limita a idade máxima (45 anos) e o tempo de embarque contínuo (2 anos) dos tripulantes. Dever ser também diferenciadas as exposições externa e interna. A radiação interna é resultante da incorporação

- radiação direta proveniente do núcleo do reator (nêutrons livres, decaimento de produtos de fissão);
  - radiação resultante da ativação de materiais estruturais;
  - radiação resultante dos fluidos que são ativados pela radiação direta do núcleo do reator;
  - vazamento de produtos de fissão dos elementos combustíveis para a água de resfriamento;
  - vazamento de água de resfriamento contaminada para o vapor do secundário via gerador de vapor.
- As radiações ionizantes têm as seguintes origens:

Este é um problema exclusivo das instalações nucleares. Seu grau de importância pode ser avaliado pelo percentual de peso da instalação devido à blindagem biológica, que chega a 30% numa instalação tradicional de grande potência e até 60% numa de pequena potência tipo AMP5.

#### d) Radiações ionizantes

Sistemas de monitoração e eliminação destes poluentes devem ser previstos. Em geral, os meios de eliminação são baseados em reações químicas, cor ou sem presença de catalizadores ou a utilização de absorvedores.

compostos	refrigeração, aerossóis	500 ppm
halogenados	combustão, respiração	3%
CO <sub>2</sub>	combustão	25 ppm
CO	combustão	25 ppm
hidrocarbonetos	graxas, óleos, solventes	25 ppm
Cloro	baterias	0,5 ppm
arsina	baterias	0,01 ppm
estibina	baterias	0,02 ppm
amônia	vapor contaminado pela água de instalações a vapor tratada com hidrazina	25 ppm

de material radioativo por ingestão, inalação ou pela existência de ferimento. As áreas do navio devem ser classificadas em categorias com limites de taxa de dose associadas, tais como:

- I - sem restrição : < 0.0057 mrem/hora
- II - de radiação : < 0.57 mrem/hora
- III - de alta radiação : < 20 mrem/hora
- IV - de altíssima radiação : < 100 mrem/hora
- V - acesso proibido : taxas maiores

A área de acesso proibido é o compartilhamento do reator em funcionamento. Após o seu desligamento o acesso pode ser permitido quando a taxa de dose cair abaixo dos 100mrem/hora. Como área de alta radiação teremos normalmente as passagens pelo compartilhamento do reator. A praça de máquinas e estações de controle são áreas de radiação.

Os perigos de contaminação interna devem ser reduzidos através de filtros de alta eficiência testados para remover no mínimo 99,95% de partículas de tamanho semelhante ao existente na fumaça do cigarro, além de filtros de carvão ativado de alta eficiência para remoção de radioisótopos instalados no sistema de ventilação. O uso de mostradores luminosos radioativos deve ser proibido para evitar a que a radioatividade ambiental seja mascarada.

O método utilizado para satisfazer-se os níveis limite de dose preconizados e através de blindagens biológicas. Os materiais utilizados para blindagem são o próprio ar, água, hidrocarbonetos (óleo diesel), aço estrutural, concreto, chumbo e compostos conhecidos como HRS ("heat resistant shielding") a base de sílica ou polietileno, impregnados de hidrogênio e boro. As blindagens devem ser calculadas com base no nível de máxima potência do reator e verificadas para as condições de acidentes (caso em que as doses admissíveis serão maiores). As penetrações de tubulações e cabeças devem ser projetadas com extremo cuidado visando minimizar o efeito de "streaming" de radiação. Nas proximidades destas penetrações, a taxa de dose limite deverá ser superior e considerada para a blindagem como um todo, pois é praticamente impossível eliminar totalmente este efeito.

Um aspecto interessante a ser observado quanto ao peso da blindagem, refere-se ao fato de que demonstra-se que o peso total de uma blindagem projetada para uma taxa de dose máxima admissível igual à mínima letal não é substancialmente inferior ao peso no caso do projeto ser feito para uma dose máxima admissível baixa, como a assumida para os compartimentos ser restrição. Conclui-se então que reduções no peso da blindagem através de simples aumento do valor da taxa de dose máxima admissível não são efetivas. O melhor meio de tentar-se reduzir o peso de blindagem é utilizar-se de arranjos que aproveitem componentes com outras funções para compo-la, tais como tanques de óleo combustíveis, tanques de compensação, cofres e espaços não guarnecidos.

Como requisitos de segurança, consideraremos aqueles ligados à capacidade de resistir a ataques (resistência ao choque), a acidentes comuns a todos os tipos de sistemas de propulsão (incêndio, alagamentos, colisões, curto-circuitos), a acidentes específicos de cada tipo de instalação, tais como os nucleares e o chamado "envelope de velocidades de segurança" que previne o navio de ultrapassar a sua cota de operação ou venha a superfície involuntariamente.

#### a) Resistência ao choque

Choques são solicitações impulsivas causadas por explosões submarinas sem contato. As solicitações devidas a impactos diretos não são verificadas porque é totalmente impossível projetar o casco de modo que possa suportá-las. Entretanto, a ocorrência de impacto direto é extremamente improvável, sendo inclusive o armamento anti-submarino (torpedos, minas e cargas de profundidade) projetado para destruir o alvo pela onda de choque gerada pela explosão sem contato. Como regra as solicitações devido a colisões são menos severas que as devido a choques, não sendo portanto verificadas.

Cada explosão submarina está associada a uma determinada severidade, que na sua forma mais simples é expressa pelo fator de choque SF, definido como:

$$SF = W^{1/2} / D, \text{ onde}$$

W = carga explosiva equivalente em kg de TNT

D = distância entre a carga e o casco em metros

Quanto maior for o fator de choque SF maior será o carregamento imposto ao casco e aos itens internos. Aumentando-se SF, chegaremos a um valor que acarretará no rompimento do casco e consequente alagamento incontrolável, dado que o mesmo é projetado exclusivamente para a pressão de colapso, definida pela cota de operação e lâmina d'água de segurança. Este valor de SF é chamado SF letal.

Os valores das amplitudes dos pulsos de choque para os itens internos ao casco não são, porém, proporcionais ao fator de choque SF. As relações lineares ocorrem somente para ataques com baixa severidade (SF pequenos), quando as tensões e deformações estão na faixa elástica dos materiais. Para ataques mais severos começam a aparecer deformações plásticas e as amplitudes dos pulsos de choque são menores que as esperadas caso se mantivessem as relações proporcionais. Como uma aproximação para o efeito não linear, se define o fator do nível de choque SLF definido como:

$$SLF = \text{sen} \{ (\pi/2) * (SF / SF_{\text{letal}}) \}$$

sendo as características cinéticas (deslocamentos, velocidades e acelerações) dos movimentos induzidos pelo choque diretamente proporcionais a SLF, que varia de 0 a 1.

O fenômeno físico do choque é extremamente complexo. Para contornar estas dificuldades teóricas, o uso intensivo de experimentação é indispensável. Para definir critérios e metodologias claras para a abordagem do problema, diversas marinhas desenvolveram normas de projeto, nas quais são definidos espectros de resposta ao choque. Através destes espectros são definidos os parâmetros (período, amplitude) dos pulsos de choque padronizados associados, bem como os modelos de análise aplicáveis (BR 3021 inglesa, BV 1043 alemã, por exemplo). Os pulsos padronizados têm a forma geral de duplo seno, sendo o primeiro pulso de grande amplitude e curta duração e o segundo de menor amplitude e maior período de aceleração imposta ao casco. Os valores das amplitudes e períodos são determinados através do espectro de choque, sendo uma função de alguns fatores:

- massa do equipamento em questão;

- sua localização em relação ao casco;

- frequência fundamental da estrutura do equipamento;

- fator de choque (SF) e fator de nível de choque (SLF).

A localização do equipamento, determinará o grau de choque, podendo ser considerados, em ordem decrescente de severidade da seguinte forma:

- itens montados no casco resistente ou em anteparas e

conveses a pouca distância do casco;

- itens montados em anteparas, a grande distância do casco;

- itens montados em conveses, a grande distância do casco.

Como grande distância entende-se distâncias superiores a um metro.

A severidade do pulso também será inversamente proporcional à massa e frequência fundamental do equipamento.

## b) Incêndios

A ocorrência de incêndio a bordo de submarinos é extremamente perigosa, pois além dos danos que normalmente são provocados, a contaminação do ambiente restrito do navio, obriga-a vir à superfície, tornando-se totalmente indistinto e portanto vulnerável. Medidas de projeto devem ser tomadas de modo a prevenir sua ocorrência, principalmente em equipamentos elétricos (proteção contra centelhamento e curto-circuito) e controle de gases combustíveis (vapores de hidrocarbonetos,  $H_2$ ). Materiais que desprendam gases tóxicos quando em combustão devem ser evitados (cuidados especiais na seleção dos materiais para isolamento térmico, acústico e elétrico). Os agentes extintores também devem ser selecionados com este critério: o  $CO_2$  agrava o problema de contaminação de ar - Halon deve ser preferido, sendo também mais



eficiente. O uso de água salgada é restrito à contida nos tanques de compensação, sob risco de perda de flutuabilidade. Sistemas fixos de Halon devem ser utilizados em pracas de máquinas e extintores portáteis nas estações de controle.

### c) Alagamentos

Um vazamento de 1 cm<sup>2</sup> provoca uma vazão de água de alagamento, variável com a profundidade, de aproximadamente:

1,5 m <sup>3</sup> /hora	-	2 m
5,0 m <sup>3</sup> /hora	-	20 m
10,0 m <sup>3</sup> /hora	-	100 m
14,5 m <sup>3</sup> /hora	-	200 m

Baseado nestes valores é definido o "tamanho crítico de vazamento" ("critical hole size"), determinado pela máxima área de vazamento que a(s) bomba(s) de esgoto do navio é capaz de controlar. Esta figura de mérito é variável com a profundidade, pois também a vazão das bombas é variável com a pressão de descarga.

As penetrações no casco resistente e as tubulações a elas associadas são a origem mais provável de vazamentos. Destas, as associadas aos sistemas de resfriamento são as mais críticas devido aos seus grandes diâmetros. Em submarinos convencionais encontram-se tubulações de diâmetros da ordem de até 10 in (+/- 500 cm<sup>2</sup>) e em nucleares até 16 in (+/- 1300 cm<sup>2</sup>). Percebe-se que grandes vazamentos nestas linhas, a grandes profundidades, fazem com que o navio perca sua reserva de flutuabilidade (normalmente de 7% a 15% de seu deslocamento de superfície) em tempos da ordem de alguns segundos, ficando impossível de emergir. Estes tempos são inferiores ao tempo de reação das contra-medidas utilizadas. O uso intensivo de elementos flexíveis em tubulações criam pontos potencialmente perigosos, pois estes elementos são em geral juntas de elastômeros. Visando minimizar estes riscos actua-se o critério de fechamento duplo de todas as penetrações e grandes coeficientes de segurança para estes elementos (da ordem de 5x a pressão de ruptura). Utiliza-se uma válvula de casco de fechamento rápido e menor grau de estanqueidade (borboleta, tipo "gate"), visando um primeiro momento reduzir a vazão de emborcação de água e uma válvula de "back-up" de fechamento mais lento porém com excelentes características de estanqueidade visando então eliminar o vazamento, como a tipo esfera. As linhas mais críticas exigem uma análise estrutural dinâmica para verificação de sua resistência ao choque.

### d) Envelope de velocidades de segurança

Se o submarino opera próximo a sua máxima profundidade de imersão, ele é ameaçado pelo surgimento de vazamentos a baixa velocidade, e por falhas no controle de profundidade nas altas velocidades (velocidades de aumento da profundidade preponderante

sobre o tempo de reação de medidas corretivas). Vice-versa, falhas no controle de profundidade a baixas velocidades e vazamentos, obviamente limitados, nas altas velocidades oferecem menor perigo.

Do mesmo modo, altas velocidades próximo à superfície são arriscadas devido ao perigo de emergência involuntária, com riscos de colisão e detecção. Consequentemente há um envelope de segurança que limita o valor da velocidade para determinadas profundidades.

São restritas as seguintes condições :

- máxima velocidade na superfície e em esnórquel;
- máxima velocidade a profundidades menores que 30% da máxima;
- máxima velocidade a profundidades acima de 80% da máxima;
- mínima velocidade a profundidades maiores que 60% da máxima.

Os perigos resultantes do embarque de água na profundidade máxima podem ser reduzidos através de possibilidades de esgotar em emergência dos tanques de lastro por ar comprimido a alta pressão (>200 bar) ou por dispositivos especiais (reação de hidrazina com a água do mar, por exemplo) instalados nos tanques.

#### e ) Curto-circuitos

A proteção contra curto-circuitos é extremamente importante em instalações com transmissão elétrica, devido às altas amperagens e voltagens com que opera o circuito de propulsão. É uma preocupação constante no projeto dos equipamentos elétricos. Um curto-circuito é um grande risco de incêndio, além de um perigo aos operadores. Disjuntores especiais, com acionamento pneumático, dispositivos de extinção de arco e alta resistência ao choque são empregados modernamente.

O grau de proteção recomendado para painéis elétricos, segundo a BV-030 alemã é:

- IP 23: quando localizados em praça de máquinas;
- IP 21: quando localizados em estações de controle.

#### f ) Acidentes nucleares

Acidentes nucleares são uma classe especial de acidentes, com consequências em escala superior aos anteriormente citados, pois estas não se restringem ao navio e à sua tripulação, propagando-se para o meio ambiente através da eventual liberação de materiais radioativos. Os sistemas de segurança são projetados de modo a minimizar a probabilidade de ocorrência deste evento catastrófico.

Quatro casos específicos são considerados para representar

as quatro categorias genéricas de acidentes postulados:

- perda de regulação: inserção de rampa de reatividade positiva no reator (retirada inadvertida das barras de controle);
- perda de fluxo de refrigerante: desligamento das bombas de resfriamento do reator;
- perda da fonte fria: completa perda do circuito secundário;
- perda de refrigerante: rompimento total da tubulação de resfriamento do reator.

Todos estes eventos são considerados como sendo inicializados a partir da condição de potência máxima.

Os sistemas de controle e segurança da instalação devem ser capazes de levar o reator a um desligamento seguro, impedindo a ocorrência de liberação de produtos de fissão para as áreas habitáveis do navio ou para o meio externo.

## 2.5.5 - Operação

Consideramos neste item, os requisitos associados à condução da instalação e às características do ciclo de vida completo do submarino.

Os aspectos ligados à condução envolvem:

- modos de operação e arranjos funcionais, incluindo as condições de operação degradadas, as características de controle e monitoração, gerenciamento (número e atividades dos operadores);

- manutibilidade e controle de avarias, incluindo as definições das atividades de manutenção preventiva e corretiva passíveis de serem executadas a bordo com o navio no mar, e previsão de modos de falha e acidentes possíveis e as medidas a serem tomadas para reparar ou contornar os seus efeitos.

As características do ciclo de vida do submarino dever consideram:

- vida útil prevista;
- previsões de crescimentos futuros e modernização;
- definição do ciclo de atividades, composto por períodos operativos (PO), períodos de manutenção geral (PMG), períodos de docagem de rotina (PDR), períodos de grandes reparos (PGR) e períodos de atualização e modernização (PAM);
- definição do conceito do sistema de apoio logístico integrado, incluindo o sistema de manutenção programada (SMP), dotações de sobressalentes e suas linhas de suprimento; fornecimento de itens consumíveis (combustível, reagentes químicos, gases industriais, água, gêneros, etc.) e

infraestrutura de suporte, como oficinas e máquinas essenciais para reparo e manutenção e instalações para instalação durante os períodos não operativos.

Os modos de operação do submarino são caracterizados pelas diversas situações operativas pelas quais o navio pode passar. A cada modo estão associadas velocidades típicas (consequentemente determinada carga para a propulsão), determinado arranjo funcional dos componentes da propulsão e determinado balanço energético (térmico, elétrico, hidráulico, pneumático, químico, etc.). Como arranjo funcional, consideramos a condição ligado/desligado de cada equipamento individualmente, bem como as diversas combinações série/paralelo possíveis. Exemplos de modos de operação normais seriam:

- afastamento ou aproximação de portos
- trânsito;
- patrulha;
- silencioso;
- velocidade máxima;
- cota periscópica/esnornquel;
- fundeado;
- atracado;
- "hovering";
- superfície.

Além dos modos normais, têm-se também os modos degradados, normalmente associados a situações de emergência devidas a falhas de equipamentos ou acidentes. Sua definição depende bastante da postulação dos eventos inicializadores respectivos.

A disponibilidade de instalação como um todo está associada à variedade de arranjos funcionais que possibilitam diversos modos de operação degradados. Na aplicação do princípio de redundância passiva em sistemas sub-sistemas e equipamentos deve ser estabelecido o tempo necessário para atuação de unidade redundante. No caso de redundância ativa as unidades devem ser segregadas de modo que os efeitos de falhas e acidentes em uma delas não se propaguem às outras, devendo ser separadas e mutuamente independentes. O princípio de redundância com diversidade funcional deve ser considerado sempre que houver potencial de falha em modo comum. Devem ser estabelecidos valores mínimos de disponibilidade média para a instalação com um todo (considerando-se modos normais e degradados) e para sistemas, sub-sistemas ou equipamentos, fazendo-se distinção para os considerados críticos (envolvidos em modos de falha comum e propagação de acidentes).

As condições para confiabilidade devem considerar a probabilidade de ocorrência de modos de falha críticos em sistemas, sub-sistemas, equipamentos ou componentes não redundantes durante um período operativo (confiabilidade crítica) e o tempo médio de espera para sua ocorrência, que deve ser um múltiplo da vida útil de instalação, no caso de não-reparabilidade

ou então do intervalo entre substituições periódicas no caso destas serem previstas. Deve-se notar que análises de confiabilidade quantitativas são de difícil viabilização para sistemas complexos. A abordagem para a instalação como um todo é normalmente qualitativa.

Modernamente existe a tendência para adoção do conceito de controle integrado de plataforma baseado em Sistemas Distribuídos de Controle Digital (SDCD), utilizando-se a tecnologia VLSI ("Very Large System Integration"). Grandes empresas da área de eletrônica naval, como a FERRANTI inglesa, SABEM francesa, SEPA italiana, SAAB sueca e SALZGITTER alemã, estão desenvolvendo projetos utilizando este conceito, já largamente empregado no controle de armas, não existindo, porém, atualmente nenhum submarino operativo utilizando-o. A arquitetura deste tipo de sistema baseia-se em controladores locais coordenados e supervisionados por um computador central, interligados por vias de dados ("data bus"). Neste sistema se encontram integrados o controle de propulsão, de auxiliares, de governo e profundidade, de compensação de pesos e lastro. As dificuldades de desenvolvimento deste tipo de sistema se prende às suas características de tecnologia de ponta, associadas aos rigorosos requisitos de confiabilidade para emprego em submarinos, exigindo diversas redundâncias e a garantia de passagens para modos de controle degradados (semi-automático, manual) com rapidez e segurança de modo que a disponibilidade da instalação não seja afetada, além de sua inerente complexidade.

Os modos de controle automático, fazem com que a necessidade de operadores seja bastante reduzida para as condições normais. Entretanto, as condições de operação degradadas e o controle de avarias impedem que este fato tenha uma relação direta com uma redução substancial da tripulação. Além disto, um certo tradicionalismo do meio naval faz com que haja grande resistência à redução da participação humana no controle e monitoração da plataforma.

Atualmente há uma tendência para a redução das atividades de manutenção preditiva e preventiva, realizada pela tripulação durante o período operativo, a um mínimo, aliviando assim sua carga de trabalho, sendo porém requeridos períodos de manutenção mais frequentes e prolongados. As capacidades de execução de manutenção corretiva por meios próprios do navio deve ser definida pois tem grande impacto no projeto, influenciando as dimensões dos espaços alocados para armazenagem de sobressaltes e ferramentas e áreas de oficinas, bem como a definição do número de tripulantes. Os reparos a serem efetuados a bordo devem ser programados, de forma que os equipamentos e seu arranjo físico permitam a sua execução, prevendo-se acessos e espaços para desmontagem. Com as atividades de controle de avarias, cujo escopo é mais amplo do que exclusivamente a instalação propulsora, os problemas são similares. Para que sejam previstos pesos, áreas, volumes, arranjo e materiais adequados, os modos de falha e acidentes devem ser definidos, bem como as medidas a serem tomadas em cada caso. Estas



previsões envolvem espaços para países de sobressalentes, ferramentas, graxas, tintas, controle de avarias e oficinas com dimensões compatíveis com a filosofia adotada.

A vida útil do submarino é normalmente postulada como de 20, 25 ou 30 anos, como é comum para navios em geral. Este número, entretanto, é extremamente teórico, sendo poucas vezes utilizado como um dado de projeto efetivo. A vida útil dos diversos componentes mecânicos, sendo garantida a disponibilidade de sobressalentes e manutenção planejada, é em geral bem maior. O período de vida útil será importante no projeto de equipamentos sujeitos a fadiga de baixo ciclo. Na prática, o grande limitante da vida útil de submarinos é a obsolescência de seus sistemas e a elevação exponencial de seus custos de manutenção e operação. Para que estes efeitos inevitáveis sejam postergados, uma previsão criteriosa de crescimentos futuros (substituição ou inclusão de sistemas ou equipamentos) considerando-se as possibilidades de modernização e reposição a curto e médio prazos deve ser feita. A definição da vida útil é também importante para os cálculos de custos do navio ("through life costs").

No decorrer da vida útil do submarino devem ser previstos Ciclos de Atividades, de longa duração (alguns anos, 5 por exemplo). Cada Ciclo de Atividades deverá ser composto por um Período Operativo (PO) e de um Período de Manutenção Geral (PMG), a ser realizado ao final do PO, com duração em torno de um ano. O PO será dividido em ciclos básicos, compreendendo um Período de Operação (PDO), da ordem de 2-3 meses e um Período de Manutenção (PDM), da ordem de um mês. Os Períodos de Docagem de Rotina (PDR) são realizados anualmente. Ao término de um ciclo de atividades, é realizado um Período de Grandes Reparos (PGR), e na metade da vida útil o Período de Atualização e Modernização (PAM).

Para os PDO, devem ser estabelecidas as frequências e durações totais dos diversos modos de operação normais e de emergência.

O Apoio Logístico Integrado (ALI) é definido como a abordagem unificada e integrada das atividades técnicas e gerenciais necessárias a:

- estabelecer considerações logísticas que influenciem os requisitos e o projeto do submarino;
- definir os requisitos de apoio logístico que são relacionados com o projeto, de forma otimizada;
- obtenção das estruturas de apoio;
- prover o apoio requerido durante a vida útil do navio, a um custo mínimo.

Os elementos do ALI são:

- Sistema de Manutenção Planejada (SMP);
- mão-de-obra e pessoal;
- equipamentos de apoio e testes;

- adestramento e equipamentos de treinamento (simuladores, modelos, etc.);
- informações e dados técnicos;
- recursos computacionais de apoio;
- embalagem, manipulação, armazenagem e transporte;
- sistema de abastecimento;
- facilidades de porto.

#### 4.5.6 - Infraestrutura

Neste item, consideraremos os seguintes requisitos:

- Sistema de Garantia da Qualidade (SGQ), tanto de projeto como de construção e comissionamento do submarino;
- Infraestrutura de apoio técnico e experimental ao projeto;
- Infraestrutura industrial, tanto de estaleiro construtor como dos fornecedores de sistemas, sub-sistemas, equipamentos, componentes e matérias-primas, bem como as técnicas de construção, edificação e montagem.

As características de complexidade, grau de confiabilidade e custos do submarino, além do emprego intensivo de tecnologias de ponta ou de desenvolvimento recente, fazem com que um excelente 560 seja requerido, envolvendo todas as fases de projeto, qualificação, construção e aceitação final. Todos os princípios e funções básicas da garantia da qualidade são de grande importância neste caso. Há a tendência moderna de aplicar-se para o submarino uma filosofia de 60 similar à adotada pelas indústrias nuclear e aeronáutica. Durante o projeto, o conceito de controle de configuração é amplamente aplicável. Exatidão, atividades de controle de ensaios e testes de qualificação na fábrica (FAT: "factory acceptance tests"), no cais (HAT: "harbour acceptance tests") e no mar (SAT: "sea acceptance tests") são requeridas devido às rígidas tolerâncias e especificações. Estas atividades são apoiadas por uma infraestrutura de pessoal e material que deverá ser prevista e estar disponível ao longo do projeto e construção do submarino e em particular da instalação propulsora. Para as atividades de qualificação e aceitação, os serviços de organismos de classificação ligados à marinha contratante são também requeridos.

A complexidade do projeto, envolvendo tecnologias de ponta, materiais especiais e requisitos específicos requer uma infraestrutura técnica envolvendo qualificação de pessoal, recursos computacionais (CAE: "Computer Aided Engineering", CAD: "Computer Aided Design"), modelos em escala criacionais e não operacionais, bancadas experimentais para validação de modelos de cálculo e processos (incluindo facilidades de tanques de provas) e desenvolvimento de protótipos de sistemas, sub-sistemas,

equipamentos e componentes. Uma estrutura gerencial integrando aspectos de projeto, de construção, comerciais, financeiros, logísticos e de cronograma é indispensável. O processo de obtenção dos equipamentos principais, de grande porte e complexidade, tem um prazo de obtenção (especificação, contratação, detalhamento, fabricação e qualificação) muito longo o que exige que o processo de aquisição seja deflagrado ainda numa fase inicial do projeto. Este é um exemplo da importância da integração técnico-gerencial.

A definição dos requisitos de infraestrutura industrial para fabricação de equipamentos e componentes é limitada pelas características do parque industrial acessível (nacional ou estrangeiro) e pelas possibilidades técnico-econômicas de desenvolvimento em prazos compatíveis com o cronograma do projeto. A disponibilidade desta infraestrutura a curto e médio prazo deve ser explicitada ainda nas fases iniciais do projeto, pois tem grande influência no seu desenvolvimento já a nível conceitual. A infraestrutura para construção está associada aos procedimentos de edificação e montagem previstos, que devem ser compatíveis com as características disponíveis, a curto e médio prazo, do estabelecimento. Envolve dispositivos especiais ("jigs", estruturas auxiliares de montagem, etc.), equipamentos para manobra de peças (guindastes, pontes-rolantes, "synchro-lift", aparelhagem de empurrar, etc.), locais de trabalho (galpões, diques flutuantes cujos secos, carreiras, etc.). Os métodos de montagem influenciam de forma relevante o projeto de equipamentos e seu arranjo físico e o processo de obtenção de alguns itens de infraestrutura (diques flutuantes, "synchro-lift", por exemplo) são demorados. Estes fatos exigem que a abordagem dos aspectos de construção se iniciem já na fase conceitual do projeto. Técnicas de construção em blocos em galpões e posterior união destes e lançamento ao mar e diques flutuantes ou "synchro-lift" são modernamente empregadas.

#### 4.5.7 - Arquitetura

Neste item consideraremos o impacto da instalação em diversos aspectos do projeto referentes a arquitetura naval, tais como direções principais (compimento, deslocamento), arranjo físico e equilíbrio vertical, longitudinal e transversal (balanceamento peso/empuxo, compensação de pesos, distâncias vertical e longitudinal entre o CG e o CB). O compimento da região de máquinas de um submarino corresponde, grosseiramente, às seguintes porcentagens de comprometimento do casco resistente:

- nuclear PWR	: 50%
- convencional	: 30-40%
- híbrido	: 40-50%
- mono-submarino	: 50%

Dadas as características de arranjo tipicamente linear dos equipamentos principais da propulsão, existe pouca flexibilidade

Para determinação do comprimento requerido, fixada uma determinada instalação.

O sistema de transmissão elétrica, normalmente utilizado em praticamente todos os tipos de instalação (exceto as nucleares, onde a maioria dos projetos adota transmissão direta) requer maior comprimento e volume para acomodar todos os componentes da propulsão, que são em maior quantidade e mais pesados. Permite, entretanto, uma certa flexibilidade de arranjo, pois não é necessário o alinhamento dos geradores com o eixo propulsor, nem há restrições ao posicionamento relativo entre eles.

O diâmetro do casco resistente, em geral, não é determinado por requisitos da instalação propulsora - a resistência predominante é dada pelo arranjo de tubos de torpedos e torpedos reserva. Exceto a esta regra são algumas instalações nucleares onde as dimensões do vaso do reator com suas barras de controle e os requisitos de desnível entre bocais do reator e do gerador de vapor visando a circulação natural podem ser imperativos. Nos SPIA que requerem armazenamento de gases de processo ( $O_2, H_2$ ) sob pressão ou criogênico, o arranjo dos vasos de estocagem podem ser os limitantes.

Quanto ao deslocamento, podemos considerar que o peso da instalação propulsora contribui com cerca de 25-30% do deslocamento de superfície do submarino.

O princípio básico que norteia o arranjo físico é a máxima compactação possível, sem entretanto ser comprometida a acessibilidade e manutenção dos diversos equipamentos. Este princípio é plenamente aplicável a submarinos de terceira categoria (emprego costeiro), entretanto, para os de segunda e primeira, algumas outras considerações devem ser feitas.

O emprego intensivo de modernas técnicas de redução de ruído e aumento de resistência ao choque, além dos atuais sistemas de controle de ar e de controle de plataforma automatizados, requerem volumes e áreas muito maiores do que os projetos das décadas anteriores. O calcamento resistente de equipamentos requer espaços, não só para o arranjo dos calcos e das bases, como também folgas para acomodar os deslocamentos previstos para o conjunto calçado sob os pulsos de choque preconizados. A compactação de painéis eletrônicos é limitada pelas necessidades de acesso para operação e manutenção e de dissipação de calor, envolvendo aí sistemas de resfriamento. O interfaceamento homem-máquina em consoles de controle e também exigente com relação a áreas e volumes. Para reduzir-se as solicitações devido ao choque, os equipamentos devem ser instalados o mais longe possível do casco resistente, o que requer maiores diâmetros.

A associação destes diversos fatores, faz com que o moderno submarino tenha restrições de volume mais severas que as de peso, em oposição aos projetos mais antigos, onde as restrições de peso eram as determinantes do deslocamento do navio. Atualmente o

casco resistente tem suas dimensões afetadas de forma mais acentuada pelos requisitos de áreas e volumes do que pelo balançamento peso/empuxo. Este fato é demonstrável pelos modernos projetos de submarinos nucleares, de deslocamento extremamente elevados (SEAWOLF, LOS ANGELES, OHIO, americanos - OSCAR, AKULA, TYPHOON, soviéticos - TRAFALGAR, VANGUARD, ingleses).

A estabilidade estática do submarino submerso requer que o centro de gravidade (CG) esteja abaixo do centro de flutuação (CB) de um determinado valor definido por critérios estabelecidos por normas (BV 1033 alemã por exemplo) da ordem de 20-40 cm dependendo do deslocamento. Nos submarinos convencionais, este requisito é atendido facilmente pela locação dos grupos de baterias nas partes mais baixas do casco. Nos outros tipos de instalação, deve haver no arranjo físico a preocupação de que este requisito seja atendido.

A compensação de pesos devido à redução das quantidades de itens consumíveis a bordo ao longo da missão, é extremamente crítica para SPIA's não-nucleares chegando, na maioria dos casos, a inviabilizar o seu emprego como único sistema de propulsão para submarinos militares.

O equilíbrio longitudinal é extremamente crítico no projeto de submarinos. A distância longitudinal entre CB e CG deve ser mínima, de modo que seja viável compensá-la através do posicionamento adequado das margens adotadas para o lastro fixo e lastro de comissionamento (margem para crescimentos futuros). Os valores destas margens seriam da ordem de  $\pm 4\%$  e  $0,5\%$  do deslocamento de superfície respectivamente, segundo critérios alemães. A prática indica que valores de distância longitudinal entre o CB e o CG maiores que 5% do comprimento do casco resistente inviabilizam o projeto. A posição dos centros dos equipamentos principais da propulsão, itens de grande peso, tem influência direta no equilíbrio longitudinal.

#### 4.5.8 - Custo

As análises de custo devem ser feitas baseadas no cumprimento da missão, e não somente no custo do submarino individualmente. Nesta filosofia, fica claro se a maneira mais econômica de cumprir determinada missão é através de um submarino de grande porte e capacidade de vários de porte e capacidade inferior, ou ainda até a combinação de submarino com outros meios (aeronaves, navios de superfície, baterias de mísseis em terra, etc.). Entretanto estas análises antecedem o projeto do submarino e não serão abordadas.

Considerando-se um determinado programa de obtenção de uma classe de submarino, os custos de sua instalação propulsora devem ser analisados dentro do conceito de custo ao longo de toda a vida ("through life costs") e deve ser considerado o número total de



unidades previstas pelo programa. Os custos totais corpe-se de custos de projeto e desenvolvimento, construção, comissionamento, operação, manutenção, modernização e descomissionamento. Devem ser também incluídos os custos de obtenção dos diversos itens de infraestrutura de apoio. Destes devem ser abatidos os ganhos marginais obtidos pela obtenção de tecnologia e outros empregos da infraestrutura. Para exemplificar as escalas de custos envolvidas apresentamos a seguinte tabela comparativa:

custo aproximado (10<sup>6</sup> US\$)

55K (classe de 2000 tons)	210
55n (população 4MPS 1000)	253
55N Los Angeles (USA)	700
55N Trafalgar (GB)	440
55N Amethyste (França)	370

A opção por sistemas de população não corretionais, implica em altos custos de projeto e desenvolvimento, principalmente devido à obtenção de infraestrutura, não computada na tabela acima. Uma forma saudável para a economia do país construtor é a amortização destes custos através da transferência de tecnologia, infraestrutura e experiência de projeto adquirida para outros setores, civis ou militares. Esta possibilidade é bastante concreta e efetiva no caso da população nuclear, cuja capacitação implica automaticamente na capacitação para pequenas centrais núcleo-elétricas e dos SPIA não nucleares. A longo emprego na indústria "offshore", em futuro próximo. Além disto, a capacitação técnica e industrial necessária para o projeto e construção de submarinos, de aplicação ampla, contribui para a amortização destes custos. Os custos de operação podem ser reduzidos pela diminuição da tripulação e pelo uso intensivo de simuladores em terra, que permitem que as operações de adestramento sejam muito mais eficientes. Os custos de manutenção podem ser reduzidos pelo estabelecimento de um sistema planejado de manutenção preditiva e preventiva. A adequada utilização de possibilidades de modernização e reopercionalização futuras podem reduzir custos pela utilização destes serviços através da existência de margens adequadas e pela ampliação da vida útil. Os custos de descomissionamento são significativos para instalações nucleares devido à contaminação radioativa dos equipamentos, estruturas e componentes que tiveram contato permanente ou eventual com os produtos de fissão. Este custo pode ser extremamente elevado. Para reduzi-lo, um planejamento ainda na fase de projeto é necessário. Um outro custo relevante para instalações nucleares é a disposição do combustível exaurido, o chamado "lixo atômico". Problema ainda não satisfatoriamente resolvido por nenhum país no mundo.

## 4. 6 - SUBMARINOS NAO-NUCLEARES

## 4. 6. 1 - Submarinos Convencionais

O submarino de casco simples, que continuará a ser o preferido, torna-se a cada vez mais num submarino de casco duplo em muitas porções de seu comprimento. Esta tendência continua ainda mais forte no que concerne às versões híbridas. O problema de balanceamento de pesos (excessos de pesos exigindo aumento de volumes) com o qual se tem lidado na maior parte dos projetos até o presente, tende a inverter-se em problema de balanceamento de volumes (excesso de volumes exigindo aumentos de pesos) devido aos requisitos especiais cada vez mais exigentes.

Estes "deficits" de pesos podem ser transformados em aumentos na cota máxima de operação e no caso de algumas versões híbridas, principalmente na forma de suprimento de energia independente do ar.

Vizualiza-se dois tipos básicos de submarinos convencionais do futuro, definidos basicamente pelas suas cinensões principais:

- submarinos de porte médio, de aproximadamente 1700 m<sup>3</sup> de deslocamento na superfície (figura 4.4) com as seguintes características:

- formas curtas e "bojudas", CCR relativamente baixa razão comprimento diâmetro (L/D), da ordem de 7.5;
- um Centro de Informações de Combate (CIC) com área cerca de 50% superior aos projetos atuais, de forma a acomodar o crescente número de unidades eletrônicas;
- arranjo de dois convéses na maior parte de seu comprimento, à exceção da praça de máquinas;
- evolução do atual Centro de Informações de Combate para Centro Integrado de Comando;
- redução da relação peso de baterias/deslocamento na superfície para cerca de 17%;
- aumentos da ordem de 40%, cor relação aos projetos atuais, na profundidade máxima de operação;
- redução no coeficiente de inscrição na velocidade de patrulha silenciosa da ordem de 20%, com relação aos projetos atuais;
- carga mista de armas (torpedos e mísseis anti-navio), elevado número de tubos (8-6) e relativamente pequeno número de armas reserva;

• autonomia de no máximo 60 dias

- submarinos com deslocamento na superfície da ordem de 2500 m<sup>2</sup>, para marinhas oceânicas específicas, capazes de operar por longos períodos (figura 4.5)

• formas alongadas, com L/D da ordem de 9

• aumento da área de comando e controle de armas e grande número de sensores, conduzindo a crescimento do CIC em 100%;

• arranjo de dois conveses na maior parte do comprimento, incluindo algumas regiões da praca de máquinas;

• evolução do atual Centro de Informações de Comando para Centro Integrado de Comando;

• redução da relação peso de baterias/deslocamento na superfície para cerca de 15%;

• aumentos da ordem de 60%, com relação aos projetos atuais, na profundidade máxima de operação;

• redução no coeficiente de indisscrição na velocidade de patrulha silenciosa da ordem de 50%, com relação aos projetos atuais;

• carga mista de armas (torpedos e mísseis anti-navio), relativamente pequeno número de tubos (6-4) e elevado número de armas reserva;

• sistema de ejeção de armas por impulso de água;

• instalação de hidrofones rebocáveis ("towed arrays");

• instalação de antepara estanque;

• tripulação relativamente numerosa e acomodações suficientes para pessoal adicional;

• grande alcance total;

• autonomia ampliada de 70-90 dias.

#### 4.6.2 - Submarinos Híbridos

A pesquisa e desenvolvimento das diversas tecnologias de sistemas de propulsão independentes do ar (SPIA) têm demonstrado que os sistemas não nucleares não têm condições, a não ser em

empregos especiais, de serem a única planta propulsora para submarinos militares operacionais, B015RAYON [36], pois seus requisitos para armazenagem dos produtos químicos indispensáveis ao seu funcionamento (oxidantes, combustíveis, etc.) não são compatíveis com as restrições de volume destes navios. Além disso, o consumo destes produtos ao longo da missão complica a concepção do sistema de compensação de pesos do navio se esta tiver a duração usual das missões militares.

Entretanto, o desenvolvimento dos SPIA estimulou a busca de meios econômicos de aumentar a capacidade do submarino convencional. A integração da tecnologia dos SPIA com os submarinos convencionais modernos nos leva aos arranjos de propulsão híbridos. Este fato já tinha sido demonstrado em 1940 pelos submarinos alemães dotados de propulsão Wälder, GABLER [45], que possuíam também uma instalação propulsora convencional em paralelo ao SPIA.

Dado que a grande virtude do submarino convencional é sua discreção, a implementação de um SPIA visando melhorar sua mobilidade e autonomia deve ser possível, sem entretanto ser comprometido este atributo.

O requisito de operação independente de ar por períodos prolongados é satisfeito pelos vários SPIA em diferentes graus, porém somente aqueles baseados na energia nuclear podem tornar estes períodos ilimitados. Os níveis de potência necessários para prever as altas velocidades de avanço típicas dos SNA estão acima da capacidade atual de todas as tecnologias de SPIA emergentes em nossos dias, entretanto, a capacidade para cruzes submarinos de duração prolongada, inalcancável para os submarinos convencionais é possível utilizando-se arranjos híbridos com os SPIA atuais.

Considera-se portanto, que os sistemas de propulsão híbrido são uma opção extremamente atraente para submarinos que operem na região intermediária do espectro de missões, ou seja, que requeiram moderadas velocidades e grande autonomia, preservando-se a capacidade de alta velocidade por períodos restritos. A figura 4.6 ilustra o conceito de submarino híbrido.

O padrão de operação de um submarino deste tipo compõe-se de um período de trânsito a velocidades de moderadas a altas sob propulsão convencional, um período de patrulha a baixas velocidades sob propulsão independente do ar, mantendo a capacidade de desenvolver altas velocidades por intervalos curtos de tempo. Como pode-se perceber então, o submarino híbrido opera na área de patrulha de forma similar ao submarino nuclear de ataque, sendo sua "fraqueza" o período de trânsito.

Para marinhas em que os prováveis cenários de conflito se encontrem a distâncias relativamente curtas das suas bases de submarinos, como é o caso dos países do Báltico (Suécia, Alemanha) ou ainda, em sendo estas distâncias mais longas, se puder garantir que elas serão vencidas sem ameaça aérea e submarina considerável

(o que seria muito difícil de garantir), o submarino híbrido é um substituto de menor custo, e desempenho quase equivalente, ao submarino nuclear de ataque. Não é por coincidência que os dois países anteriormente citados são líderes na tecnologia dos SPIA.

Podemos considerar, baseado na análise comparativa anteriormente apresentada, que as células de combustível (CC) e o motor diesel em ciclo fechado (DCC) são as duas opções de SPIA com melhores possibilidades de emprego em futuro próximo. O primeiro tem a vantagem de menor assinatura acústica e o segundo a vantagem de menor custo. Descartamos o motor stirling porque tem custos consideráveis as CC, porém assinatura acústica mais desfavorável.

Visando aumentar substancialmente o alcance submarino durante o trânsito e/ou patrulha e minimizar o risco de detecção híbridos do futuro deverão ter as seguintes características:

- operação submerso sob baterias em toda a faixa de velocidades até a máxima;
- operação submerso sob CC ou DCC até cerca de 40% da velocidade máxima;
- operação em esnorquel até cerca de 60% da velocidade máxima.

Tais submarinos poderiam atender aos requisitos de operação oceânica e sob o gelo. Suas características principais seriam as seguintes:

- deslocamento da ordem de 2500-3000 m<sup>3</sup>;
- formas alongadas, com L/D da ordem de 10;
- autonomia de 70 dias;

- metade de seu período de missão o submarino operaria em baixas velocidade, no modo independente do ar e o restante no modo independente de indústrias / esnorquel, resultando numa redução do coeficiente de indução ao longo de toda missão de ordem de 50% (com relação ao submarino convencional de maior porte citada no sub-tema anterior);

- em comparação com um submarino convencional de mesmo porte haveria uma pequena redução na duração/alcançe submerso e velocidade máxima.

O arranjo geral destes tipos de submarinos são apresentados pela figura 4.7.

#### 4.6.3 - Mono-Submarinos

Quando se considera as características operacionais dos



submarinos costeiros, que requerem pequenas autônorias, raios de ação e relativamente baixas velocidades, associadas a alta discriminação, podemos considerá-los como um campo extremamente favorável ao emprego dos SPIA não-nucleares na forra pura, ou seja, desempenhando sua missão completa no modo independente do ar.

Para esta utilização, as reduzidas assinaturas das instalações de células de combustível tornam-nas a opção mais atrativa. Tais mono-submarinos seriam navios de deslocamento na faixa de 700-1200 m<sup>3</sup>, velocidades de até 10-15 nós, diâmetros da ordem de 5-6 m, 6 tubos de torpedos, número total de 12 torpedos, autonomia de 30-40 dias e alcance de 5000-7000 milhas.

O desenvolvimento de mono-submarinos oceânicos, na faixa dos 2000-2500 m<sup>3</sup>, parece-nos pouco provável, pelo menos num futuro previsível, pois tais navios teriam alcances bem inferiores (e custos bem mais elevados) aos equivalentes com propulsão híbrida, tornando sua relação custo/benefício muito desfavorável.

#### 4. 7 - SUBMARINOS NUCLEARES

##### 4. 7. 1 - Submarinos Lancadores de Mísseis Balísticos

O desenvolvimento da tecnologia de mísseis, aumentando significativamente o seu alcance, faz com que não seja mais necessário para os modernos SSBN transitarem para áreas de lançamento distantes. O conceito atualmente adotado é o dos chamados "bastiões", que são áreas marítimas próximas e altamente defendidas por meios anti-submarino, onde os SSBN permanecem durante todo o seu tempo de missão.

Este conceito torna desnecessária a capacidade de desenvolver altas velocidades, privilegiando a redução das assinaturas, capacidade de sobrevivência e possibilidade de transportar o maior número possível de armas.

De fato, é esta tendência que se observa nos mais modernos projetos de SSBN, que transportam 24 mísseis (8 a mais que os usuais 16) e têm deslocamentos muito elevados (25.000 ton para a classe soviética "Typhoon", 18.000 para a classe americana "Ohio", 15.000 para a classe inglesa "Vanguard" e 12.700 para a classe francesa "Le Triomphant"), sendo relativamente lentos (velocidades da ordem de 20 nós).

As baixas velocidades máximas e prioridade na minimização de ruído, associado a grande deslocamento favorecem o desenvolvimento de reatores que criem exclusivamente em circulação natural para esta classe de submarinos.

Deve-se notar que o conceito de "bastião" possui algumas desvantagens, pois implica em longos períodos de vôo dos mísseis e consequentemente a uma perda de precisão e aumento da vulnerabilidade a ação dos modernos sistemas anti-míssil em desenvolvimento (chamado programa "Guerra nas Estrelas", nos EUA). Estas deficiências fazem-nos concluir que não serão descartados SSBN menores e mais velozes no futuro.

##### 4. 7. 2 - Submarinos Lancadores de Mísseis de Cruzeiro

A operação dos SSBN esteve restrita por mais de duas décadas aos soviéticos. O desenvolvimento recente de mísseis de cruzeiro de pequeno porte (tais como o americano "Tomahawk"), capazes de serem lançados pelos tubos de torpedos ou de pequenos silos verticais arranjados na região dos tanques de lastro dos submarinos de ataque (instalados nas unidades mais novas da classe americana "Los Angeles") têm dado uma nova dimensão a esta classe de submarinos.

Uma das missões navais na qual o navio de superfície seria

insubstituível e a projeção de poder sobre terra. O desenvolvimento desses modernos mísseis de cruzeiro muda radicalmente este quadro, passando o submarino a competir diretamente com os combatentes de superfície também nesta área.

#### 4 . 7 . 3 - Submarinos de Ataque

Não se visualiza um arrefecimento na tendência para SSN de cada vez maiores deslocamentos (e custos) num futuro próximo. As dimensões principais dos submarinos nucleares de ataque do futuro tendem a igualar as dimensões dos SSBN mais antigos, na faixa dos 7000-9000 tons. São exemplos desta tendência as classes americana "Seawolf" (9100 tons) e soviética "Akula" (8300 tons). A tendência contrária, em direção a navios de menor porte é representada pelos híbridos nuclear/convenção e pelos mono-submarinos nucleares, a serem discutidos nos sub-ítem posteriores.

O que se pode prever é uma busca por maior equilíbrio entre as prioridades de projeto assumidas por ocidentais e soviéticos. Dos ocidentais espera-se uma melhoria das capacidades de sobrevida associada ao aumento nas velocidades máximas e profundidades de operação. Dos soviéticos espera-se reduções significativas nas assinaturas, principalmente acústica, e melhoria nas capacidades de detecção. Note-se que, conforme já foi visto, a implementação destas melhorias dificilmente é levada a cabo sem aumentos no deslocamento.

A introdução de mísseis de cruzeiro lançados pelos tubos de torpedos ou por silos verticais da SSN uma nova dimensão estratégica, virtualmente transformando-os em SSGN. Tais SSN passam a ter elevado potencial de dissuasão. Seu poder foi recentemente demonstrado no conflito do Golfo Pérsico.

#### 4 . 7 . 4 - Submarinos Híbridos Nuclear/Convencionais

Os desenvolvimentos em propulsão nuclear de submarinos nos últimos 30 anos têm objetivado a maximização da potência útil entregue ao eixo propulsor, de modo a atingir-se altas velocidades máximas mantidas. O resultado deste enfoque são instalações pesadas, volumosas e caras, cujo emprego em submarinos de porte relativamente pequeno ( $\approx 2500 m^3$ ) é inviável.

A tecnologia dos PWR, baseada em reatores de alta pressão e alta densidade de potência, conduz a necessidade de sistemas complexos para sua operação segura e desempenho ótimo, o que requer altos custos de capital iniciais e altos custos de operação e manutenção, limitando a disponibilidade desta tecnologia a um grupo restrito de marinhas, capazes de arcar com tais gastos.

Com a escalada de custos das sucessivas gerações de

submarinos nucleares de ataque (SSN), sua relação custo/benefício no desempenho da maior parte das missões a ele inicialmente atribuídas tem sido severamente questionada. O reconhecimento da utilidade da propulsão independente do ar a níveis de potência inferiores aqueles fornecidos pelos PWR tem estimulado o desenvolvimento de tecnologias alternativas de baixo custo e baixa potência, anteriormente apresentadas. Apesar destas tecnologias apresentarem uma razoável independência do ar atmosférico, sua dependência na armazenagem de oxidante a bordo impede uma efetiva autonomia quando comparadas com o alcance ilimitado, do ponto de vista da propulsão, de uma opção baseada em reator nuclear.

Duas opções deste último tipo têm sido apresentadas a discussão pelo meio naval:

- o conceito AMP5, canadense, tipicamente voltado para aplicação em instalações híbridas, no conceito chamado "tin-tin", ou seja introdução de uma seção contendo o SP1A num projeto de submarino convencional já existente;

- o conceito SCORE, francês, voltado para aplicação em mono-submarinos, que será discutido no sub-ítem seguinte.

O AMP5 ("Autonomous Marine Power Source") consiste num reator resfriado e moderado a água leve, a baixa temperatura e pressão, produzindo potência relativamente baixa, acoplado a um ciclo a vapor Rankine de baixa temperatura que gera potência elétrica. Seu projeto incorpora diversos dispositivos de segurança intrínseca e passiva, mínima complexidade e simplicidade de operação (pequeno número de operadores). Seu conceito de emprego é o de um "carregador de baterias" que, contrariamente aos diesel-geradores, funciona com o submarino na condição submerso.

A figura 4.8 apresenta um diagrama esquemático do conceito AMP5. Todas suas cargas auxiliares são alimentadas pelo seu próprio quadro de distribuição, enquanto as cargas elétricas do submarino, incluindo o motor de propulsão, são alimentadas pelos grupos de baterias. A instalação híbrida preserva uma grande capacidade de baterias, para "sprints" de alta velocidade e curta duração e manter a capacidade dos diesel-geradores.

A diferença notável entre a configuração híbrida e a instalação PWR de alta potência é a presença dos grupos de baterias do submarino entre a instalação de geração de energia nuclear e a carga de propulsão. As baterias efetivamente atenuam os transientes normais de variação de carga associados à propulsão e operação dos demais sistemas do submarino, simplificando em muito os requisitos de projeto e operação da instalação nuclear.

Foram desenvolvidas três séries para diferentes faixas de potência:

- o AMP5 100, com 1.5 MW de potência térmica e 100 kW de potência elétrica nominal (variável com a temperatura da água de

resfriamento dos condensadores), temperatura média do refrigerante de reator de 90°C (85°C na saída dos GV, 95°C na entrada), pressão de primário de 200 kPa, fluido de trabalho do secundário (freon R-113); esta instalação seria adaptada a pequenos submarinos, basicamente para emprego civil (figura 4.9);

- o AMP5 400, com 5,5 Mw de potência térmica e potência elétrica na faixa de 300-500 kW, cujos parâmetros principais são apresentados pela tabela 4.10 e arranjo físico pela figura 4.11; esta instalação seria adaptada a submarinos na faixa de 1500 toneladas, tais como os Tipo 209;

- o AMP5 1000, com 10,8 Mw de potência térmica e potência elétrica na faixa de 1400-1700 kW, cujos parâmetros principais são apresentados pela tabela 4.12 e arranjo físico pela figura 4.13; esta instalação seria adaptada a submarinos na faixa de 2000 toneladas, tais como os TR-1700.

É interessante notar que as versões 100 e 400 adotam custo halogenado (R-113) como fluido de trabalho do secundário, pois as temperaturas do primário são muito baixas, inviabilizando o emprego do usual vapor d'água (eficiência muito baixa). Já na versão 1000, as temperaturas mais elevadas do primário permitem o emprego da água como fluido do secundário.

Resalta-se também a adoção de dispositivos de segurança intrínseca e passiva, tais como:

- uso de combustível em dispersão metálica U-Zr-H, provido elevado coeficiente de reatividade negativa e alto grau de retenção de produtos de fissão;

- uso de sistema passivo de resfriamento do reator pós-desligamento (remoção de calor residual).

#### 4.7.5 - Mono-Submarinos

O que torna as instalações propulsoras nucleares pesadas e volutas não são, necessariamente, suas características inerentes e sim o fato de que são inviavelmente projetadas para a velocidade máxima do submarino. O conceito de mono-submarino nuclear nasce da possibilidade de projetar-se uma instalação propulsora nuclear de pequeno porte, desde que a mesma seja dimensionada para a velocidade de trânsito, resguardando-se a capacidade de desenvolver maiores velocidades por intervalos restritos de tempo através de grupos de baterias, que poderiam alimentar o motor elétrico de propulsão em paralelo aos turbinogeneradores do circuito secundário.

Poderíamos chamar este conceito de "CONAB - Combine Nuclear And Battery", em analogia aos sistemas combinados de propulsão de navios de superfície. A instalação nuclear



proporcionaria, na sua máxima potência, o acionamento turbo-elétrico do eixo para uma velocidade de trânsito da ordem de 15 nós, compatível com a manutenção de razoável capacidade de escuta dos sensores acústicos passivos, com o grupo de baterias permanecendo em flutuação. Nas eventuais situações de interceptação de alvos ou evasão pós-ataque, de duração da ordem de 1 hora, o MEP passaria a ser alimentado também pelo grupo de baterias, atingindo-se assim a velocidade máxima, da ordem de 20 nós. Após o "sprint" de velocidade, o submarino passaria a operar em velocidade de patrulha, da ordem de 10 nós, dedicando a potência remanescente do reator para a recarga das baterias. A figura 4.14 apresenta um diagrama de blocos desta instalação propulsora.

O MSPMM é especialmente adequado a este tipo de aplicação, pois como já vimos, possui um relativamente elevado número de polos que podem ser alimentados por fontes de energia independentes. Dizeres que a potência requerida para a velocidade de trânsito (gerada pela instalação nuclear) corresponde a 50% da potência requerida para a velocidade máxima (gerada pela instalação nuclear + baterias). Neste caso, se o MSPMM de propulsão possuir 20 polos, 10 seriam alimentados pelos turbo-geradores e 10 pelas baterias.

A solução apresentada pela França, usa um pequeno PWR integral, auto pressurizado, operando exclusivamente em circulação natural, baseado no conceito SCORE, desenvolvido pela Technicatome, FAJEAU [155] e BOISRAYON [38]. A figura 4.15 apresenta um diagrama esquemático desta instalação. Suas características básicas, bem como as do submarino em que seria instalada, são apresentadas pela tabela 4.16.

O conceito de pequeno submarino nuclear de ataque SSN, em oposição aos atuais grandes (e cada vez maiores) SSN, é derivado dos desenvolvimentos apresentados nos dois últimos sub-ítem, o submarino híbrido nuclear/convenção, na linha do AMP5, e o mono-submarino nuclear, na linha do SCGE.

Estes dois desenvolvimentos parecem-nos ser aqueles mais representativos do futuro da arma submarina, refletindo nitidamente as modernas tendências do projeto de submarinos e materializando uma solução de compromisso que otimiza os requisitos operacionais dentro de custos aceitáveis para as marinhas de médio porte.

O SSN não seria, logicamente, um substituto para os SSN no amplo espectro de missões hoje atribuído a essa classe de navio de guerra. Estes continuariam a ter relevante papel na estratégia naval, indispensáveis quando se requer emprego em áreas marítimas distantes ou projeção limitada de poder sobre terra. Não seria também substituto dos pequenos submarinos convencionais costeiros, pois seus custos seriam muito elevados para um emprego secundário. Estes últimos certamente são o melhor emprego para os SPIA não-nucleares. O que os SSN substituirão no próximo século serão os submarinos convencionais oceânicos, simultaneamente reduzindo a quantidade de SSN requeridos pelas marinhas de maior porte.

Considerando as filosofias básicas de projeto das duas soluções apresentadas (AMP5 e SCGE), acreditamos que o conceito híbrido tem mais possibilidades de se concretizar em espaço de tempo mais curto, dada a confiabilidade que a manutenção da instalação convencional proporciona. Este fator é muito importante no caso de introdução de novas tecnologias num meio tradicionalmente conservador como é o naval. O sucesso das instalações híbridas abrirá o caminho para os mono-submarinos nucleares.

# SUBMARINOS CONVENCIONAIS

## deslocamento x ano

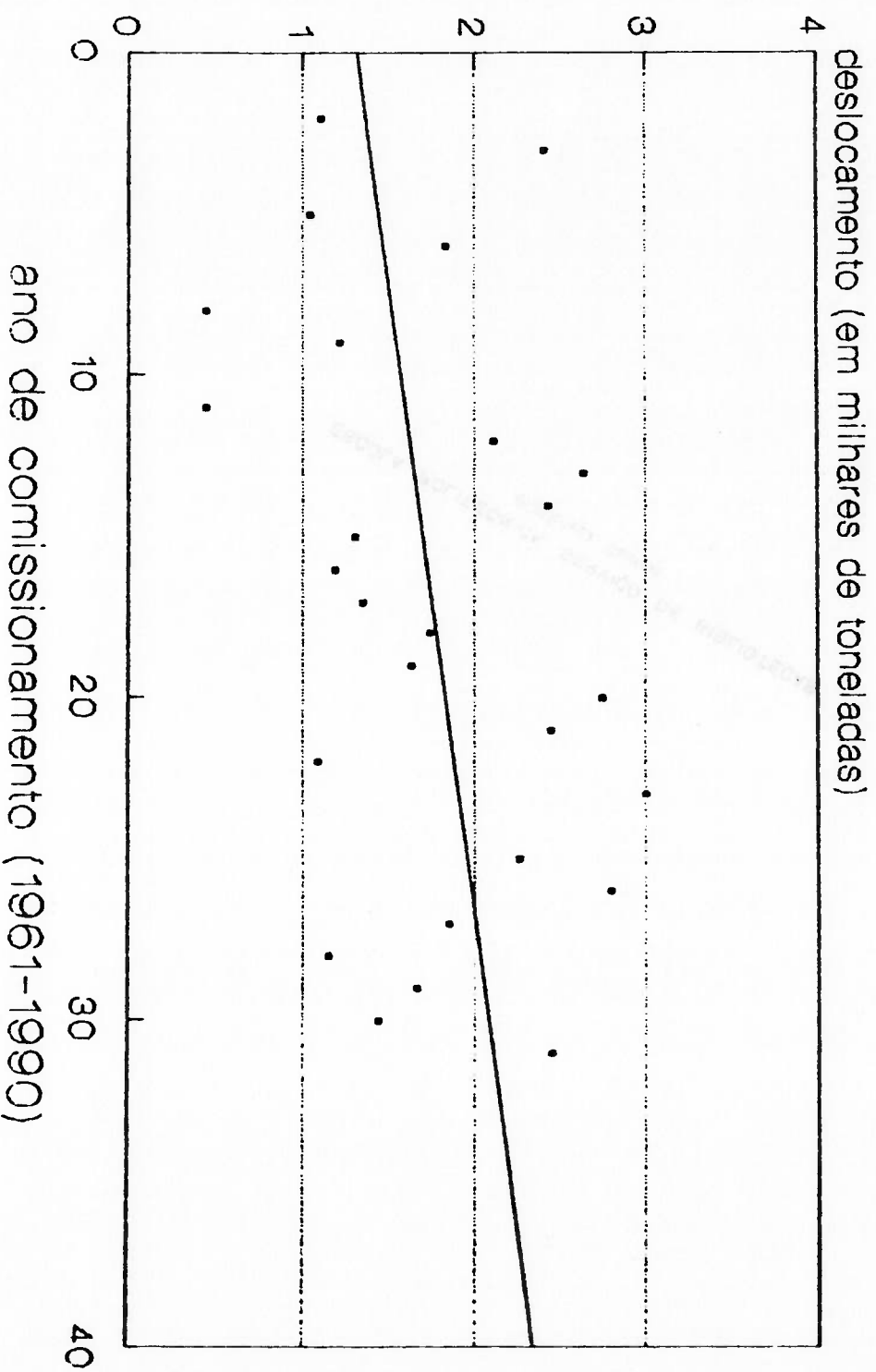


FIGURA 4.1

# SUBMARINOS NUCLEARES DE ATAQUE

## deslocamento x ano

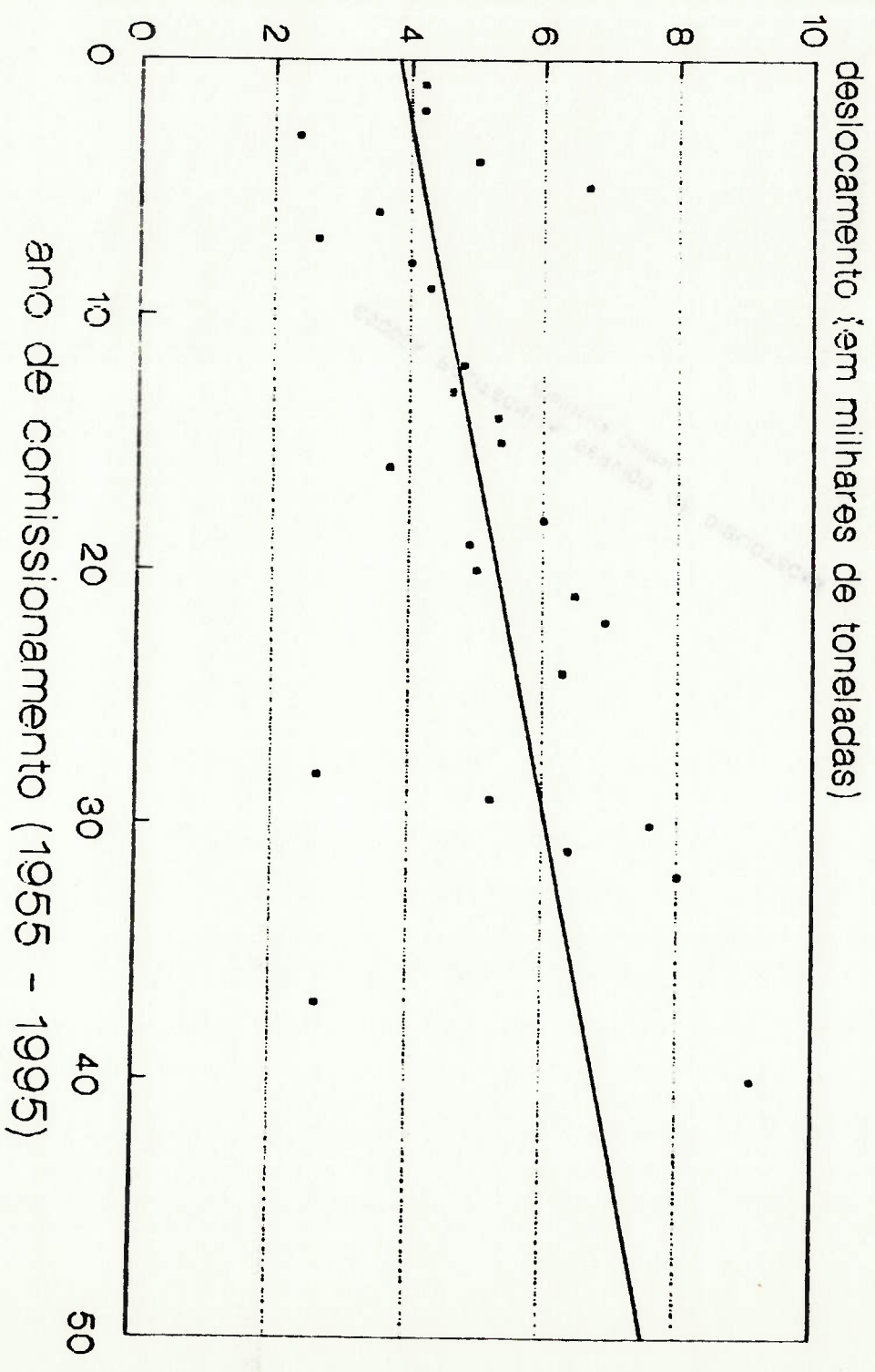


FIGURA 4.2

# SUBMARINOS NUCLEARES BALISTICOS

## deslocamento x ano

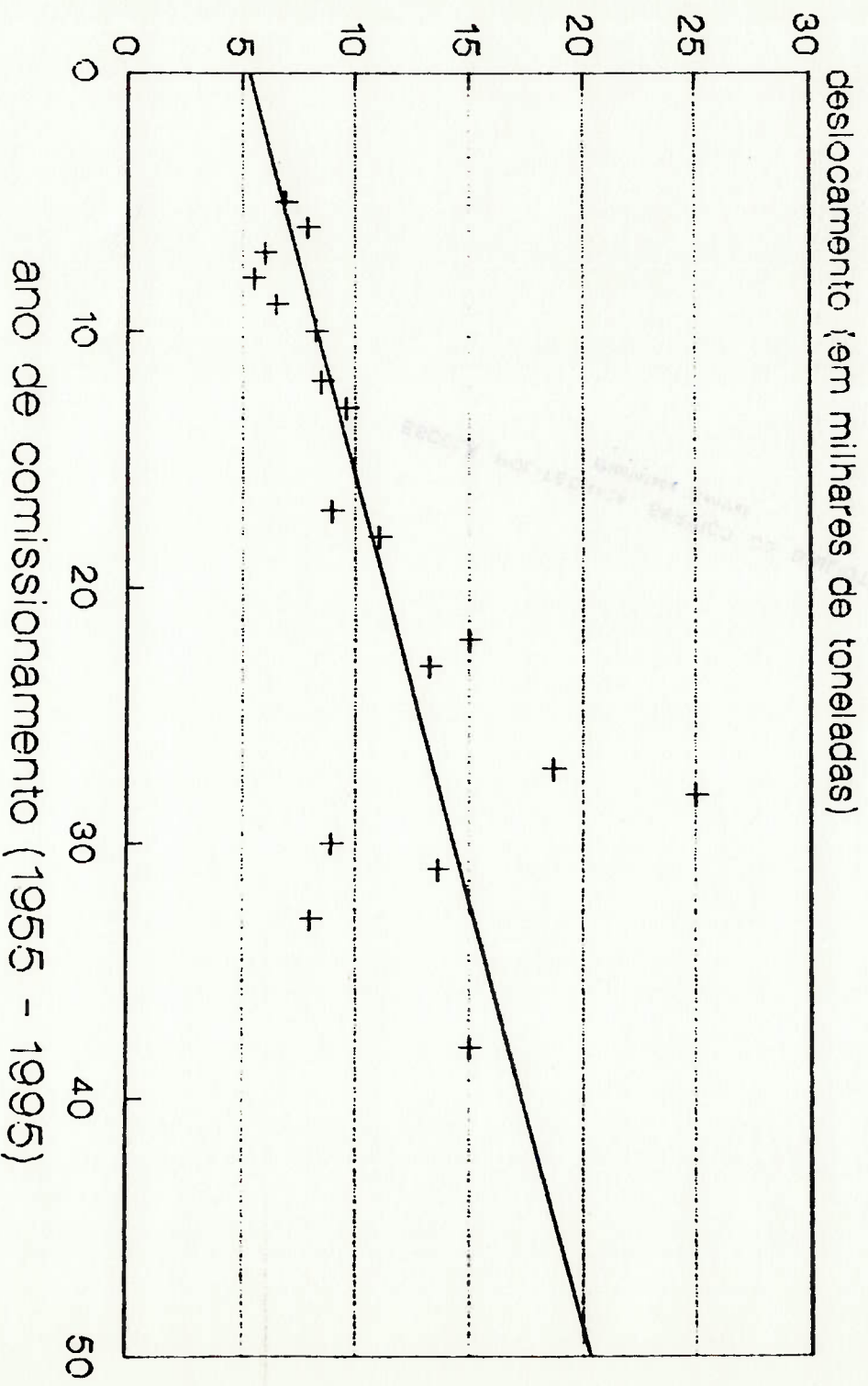


FIGURA 4.3



T TANQUES  
 B BATERIAS  
 SP SISTEMA DE PROPULSAO  
 DG DIESEL GERADORES  
 SA SISTEMAS AUXILIARES  
 CE COMPARTIMENTO DE ELETRONICA  
 CC COMPARTIMENTO DE CONTROLE  
 CIC CENTRO DE INFORMACOES DE COMBATE  
 CC/DCF SPIA  
 H HIDROGENIO  
 O OXIGENIO  
 AR ARGONIO  
 TR TORPEDOS RESERVA  
 TT TUBOS DE TORPEDOS  
 ST SISTEMA DE TORPEDOS  
 AC ACOMODACOES

FIGURA 4.7 - PROJETO HIBRIDOS COM CELULAS DE COMBUSTIVEL E DIESEL EM CICLO FECHADO

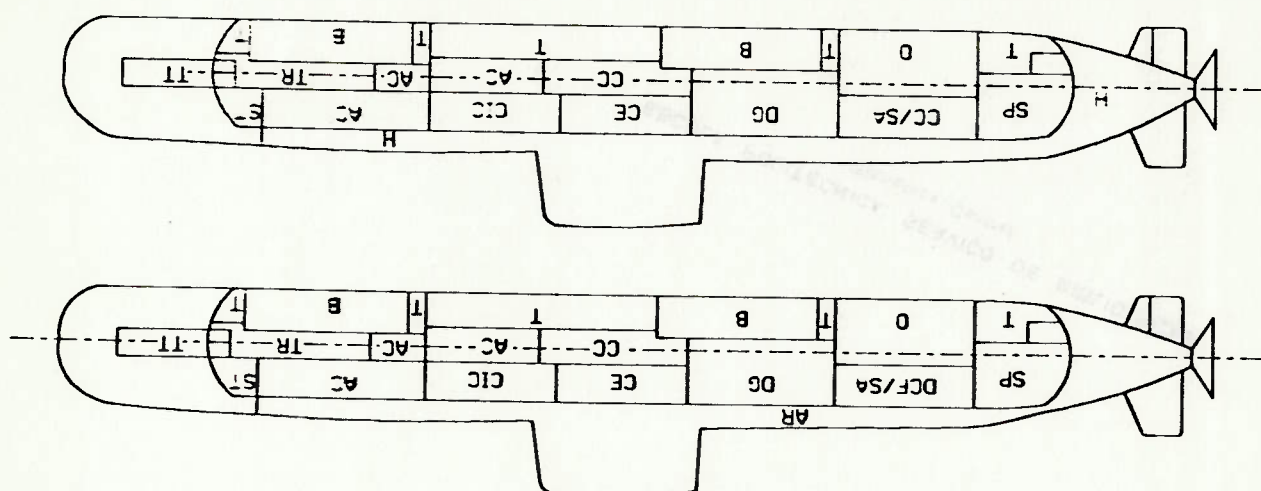


FIGURA 4.5 PROJETO CONVENCIONAIS

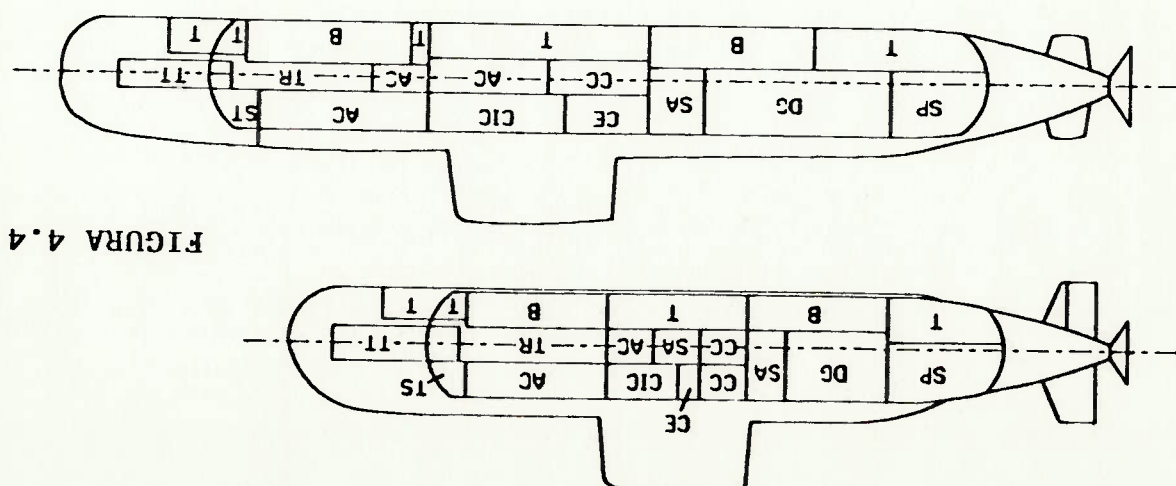


FIGURA 4.4

# CONCEITO DE PROPULSÃO HÍBRIDA

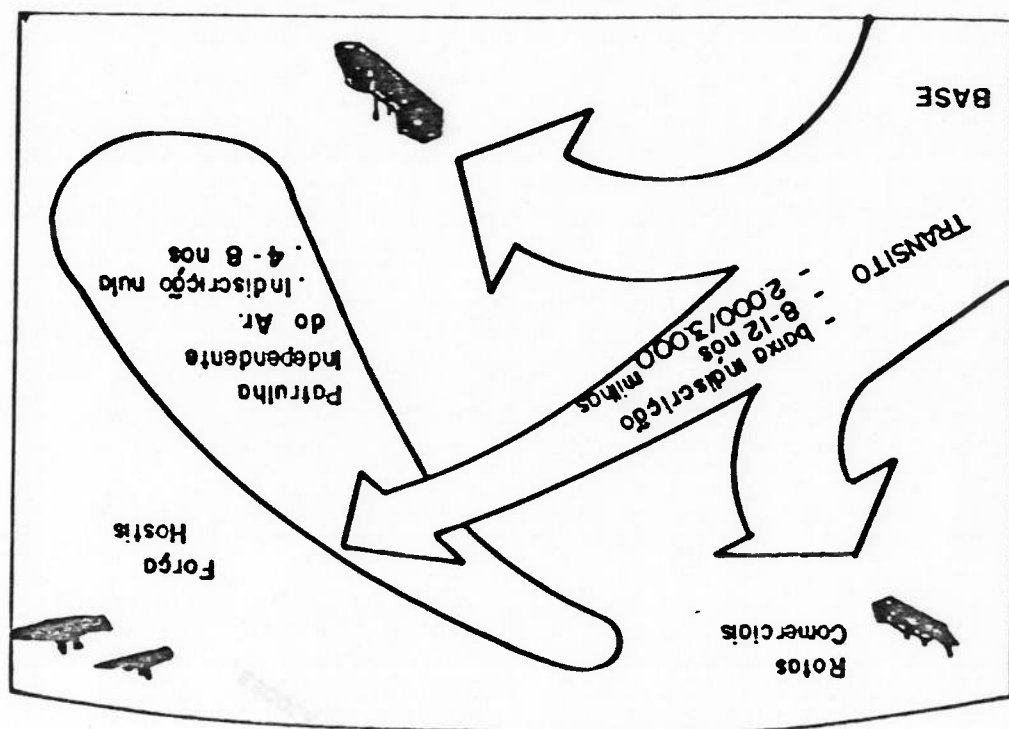
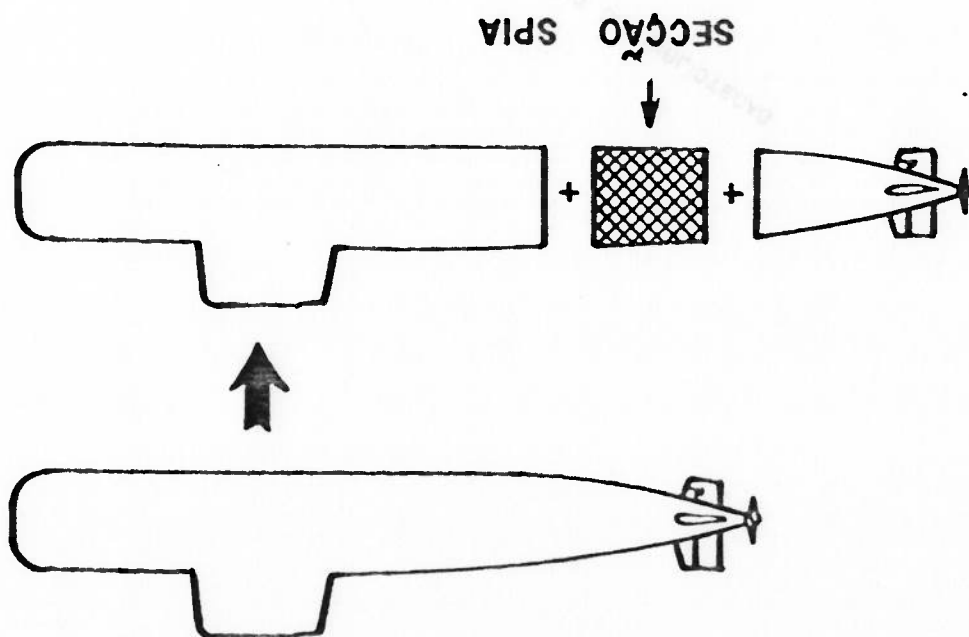


FIGURA 4.6 - CONCEITO DE SUBMARINO HÍBRIDO

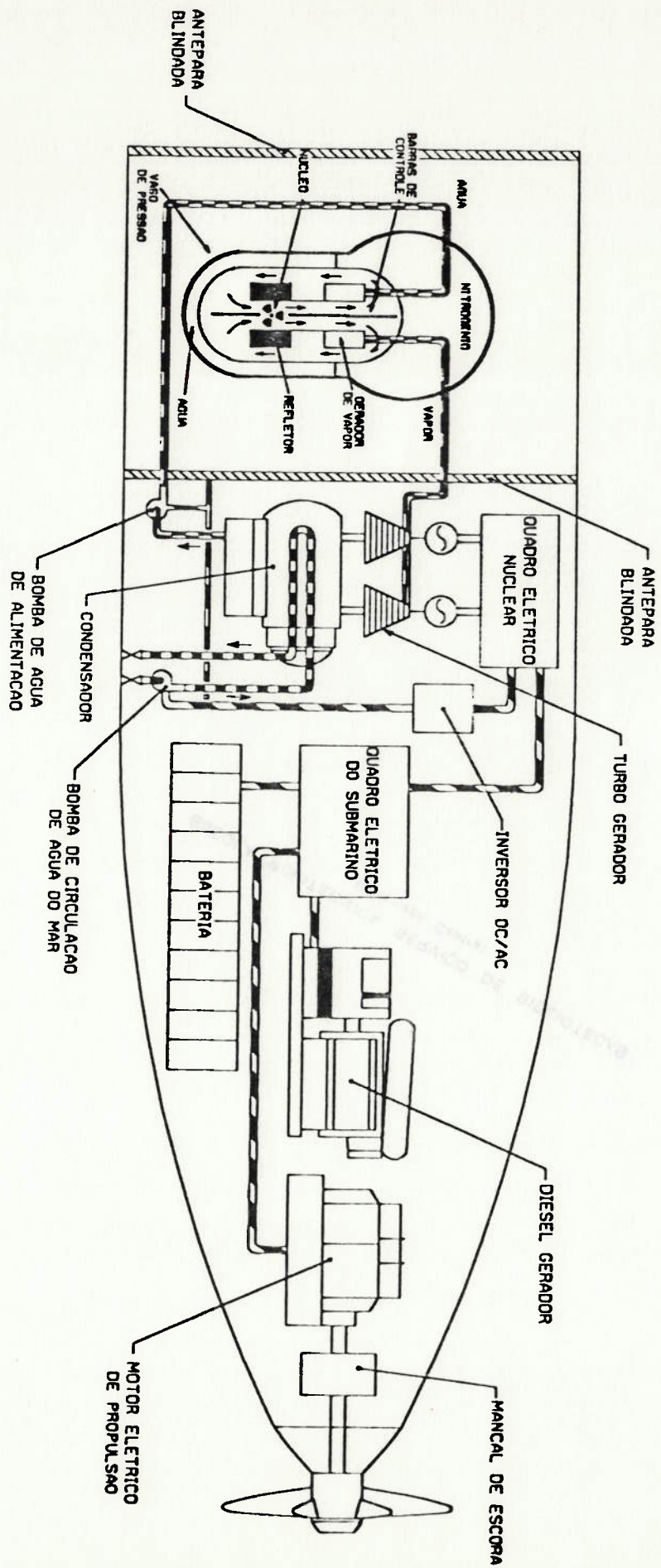


FIGURA 4.8a- DIAGRAMA ESQUEMATICO DE INSTALACAO HIBRIDA NUCLEAR CONVENCIONAL

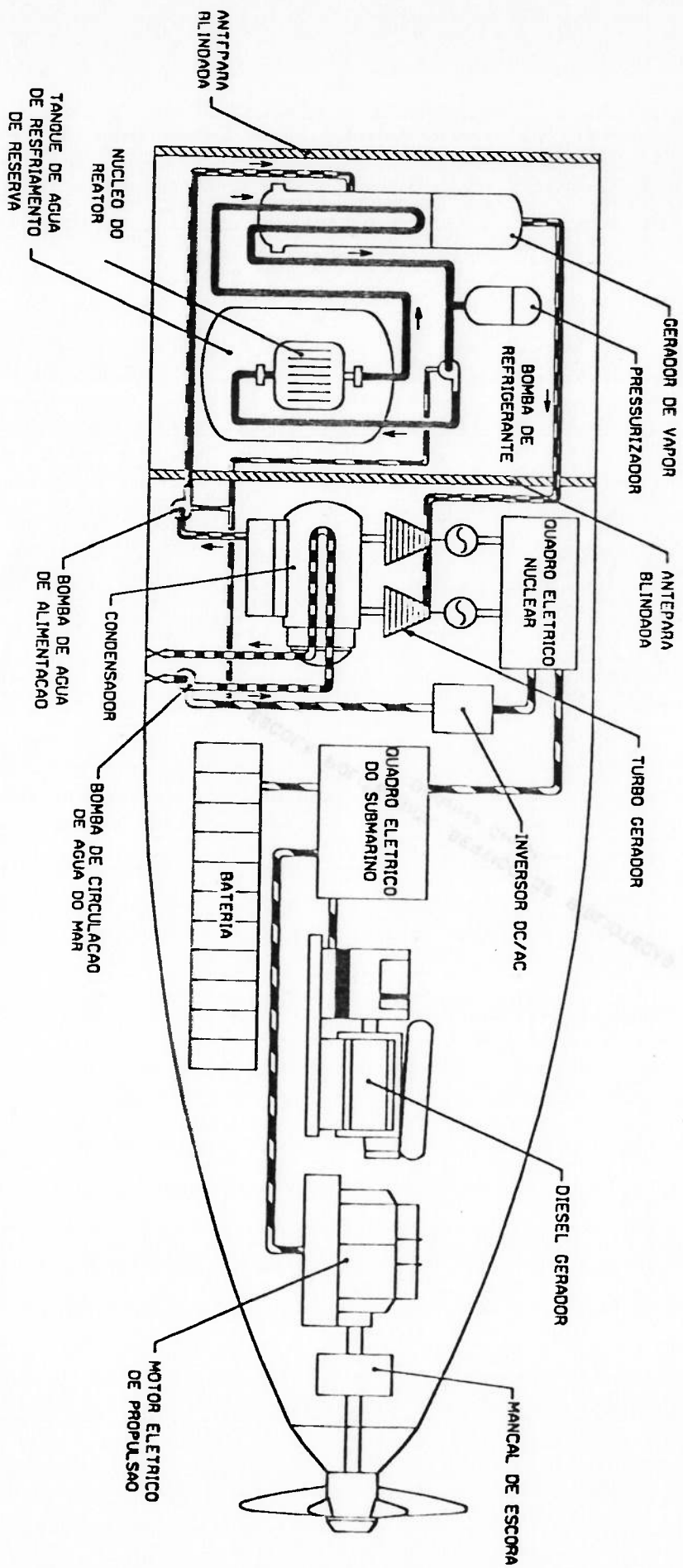
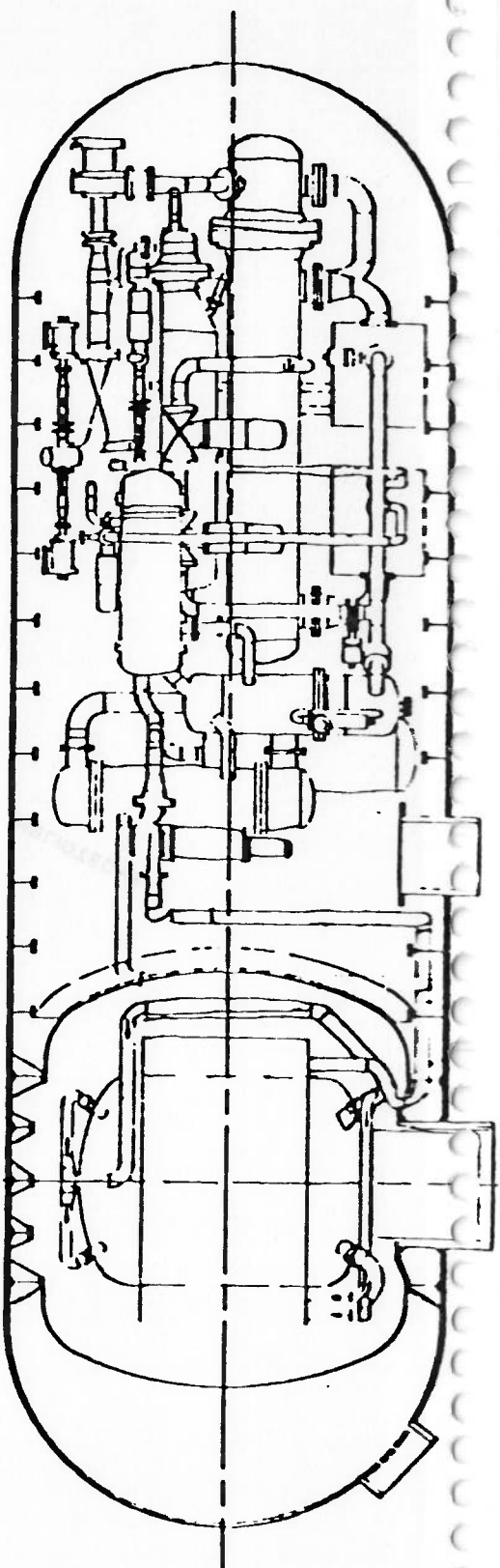


FIGURA 4.8b- DIAGRAMA ESQUEMATICO DE INSTALACAO HIBRIDA NUCLEAR CONVENCIONAL



ENERGY CONVERSION SYSTEM

REACTOR HEAT SOURCE

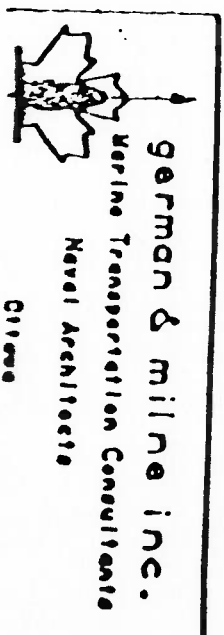
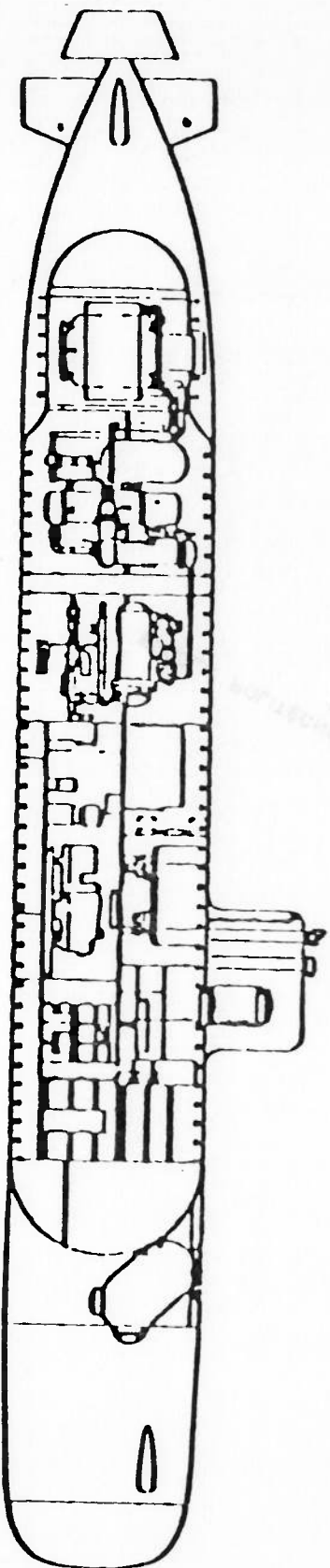


FIGURA 4.9 - PEQUEÑO SUBMERSÍVEL CIVIL DOTADO DE AMPS 100



# PARÂMETROS PRINCIPAIS DO AMP5 400

## DESEMPENHO

Potência térmica do núcleo.....3,5MWt  
 Potência elétrica líquida para as baterias  
 @ 0°C de temperatura da água do mar.....530KWe  
 @ 20°C de temperatura da água do mar.....400KWe  
 @ 30°C de temperatura da água do mar.....230KWe  
 Eficiência líquida.....11,42 %

## REATOR E PRIMÁRIO

Altura do núcleo (combustível).....56 cm  
 Diâmetro equivalente do núcleo.....56 cm  
 Tipo de combustível.....U-Er-ZrH<sub>2</sub>  
 Encamisamento.....Incalloy 800 H  
 No. de elementos combustíveis.....480  
 Massa de U-235.....23 kg  
 "Burn-up" do combustível.....3500 MWd  
 Pressão de operação.....17 bar  
 Temperatura de saída de refrigerante.....166°C  
 Vazão mássica de refrigerante.....41 kg/s  
 Densidade de potência do núcleo.....45 kW/l

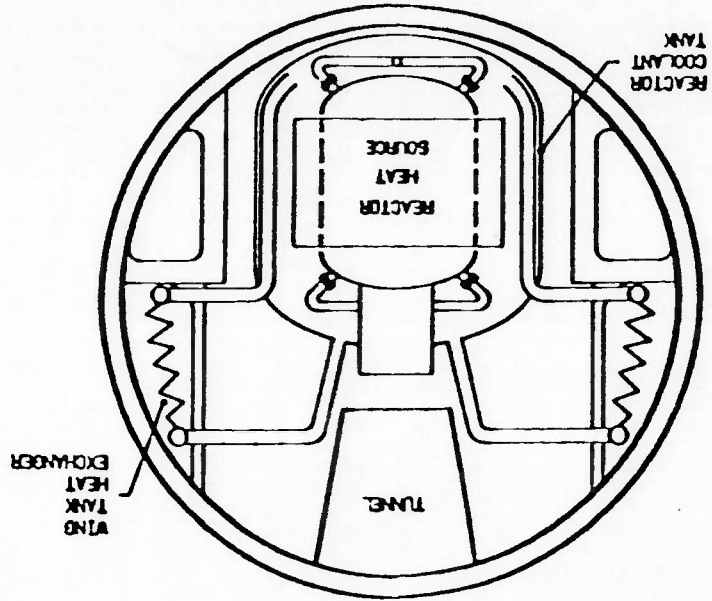
## SECUNDÁRIO

Fluido de trabalho.....Freon R113  
 Temperatura do vapor.....149°C  
 Pressão na admissão da turbina.....12,4 bar  
 Pressão no condensador.....0,66 bar  
 Temperatura no condensador.....35°C  
 Temperatura de água salgada nominal.....20°C  
 faixa.....0-30°C

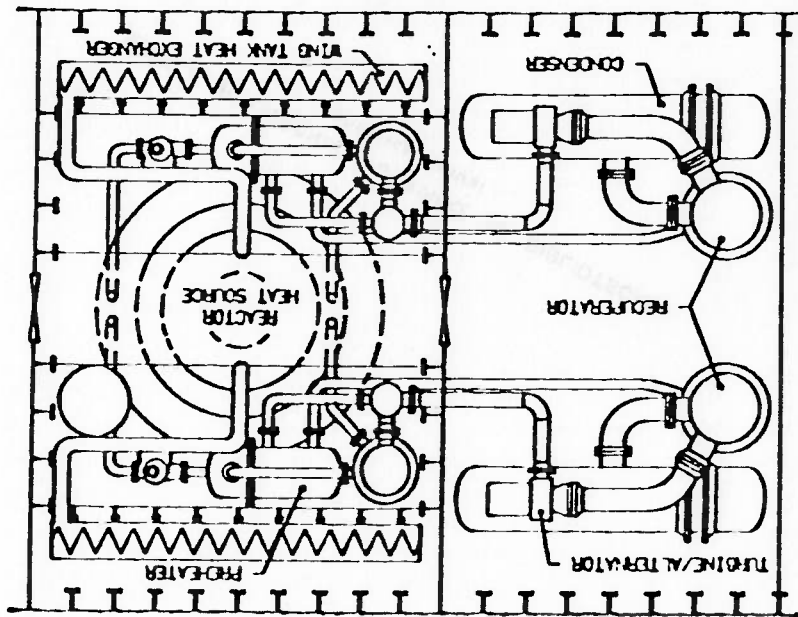
TABELA 4.10 - PARÂMETROS PRINCIPAIS DO AMP5 400

FIG. 4.11 - ARRANJO GERAL DO AMPS 400

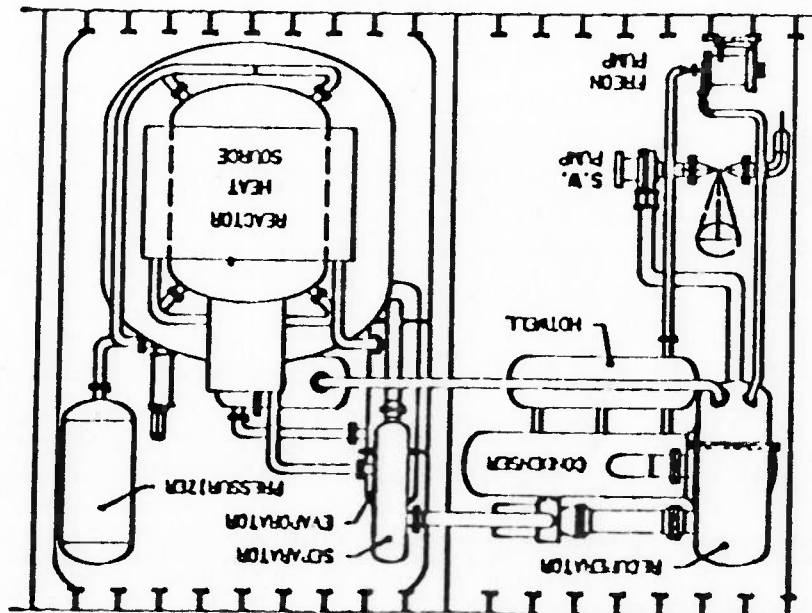
SECTION SHOWING PASSIVE COOLING LOOP



PLAN VIEW



ELEVATION



# PARÂMETROS PRINCIPAIS DO AMP5 1000

## DESEMPENHO

Potência térmica do núcleo.....	10,8MWt
Cargas elétricas auxiliares.....	186Kwe
Potência elétrica líquida para as baterias	
@ 0-15°C de temperatura da água do mar.....	1700Kwe
@ 30°C de temperatura da água do mar.....	1432Kwe
Eficiência líquida.....	15,7 %

## REATOR E PRIMÁRIO

Combustível.....	U-235, 2
Intervalo de recarga de combustível.....	8-10 anos
Encamamento.....	Incalloy 800 H
No. de elementos combustíveis.....	1275
Pressão de operação.....	3,67 MPa
Temperatura de saída de refrigerante.....	207°C
Vazão mássica de refrigerante.....	125 kg/s
Densidade de potência do núcleo.....	44 kW/l

## SECUNDÁRIO

Fluido de trabalho.....	Vapor saturado
Temperatura do vapor.....	181°C
Pressão na admissão da turbina.....	1000KPa
Pressão no condensador.....	10,3KPa
Temperatura no condensador.....	47°C
Vazão mássica de água salgada.....	133,8 Kg/l
Vazão mássica do vapor.....	4,1 Kg/l

TABELA 4.12 a - PARÂMETROS PRINCIPAIS DO AMP5 1000

SUMARIO DE PESOS DO AMPS 1000

AMPS TONELADAS

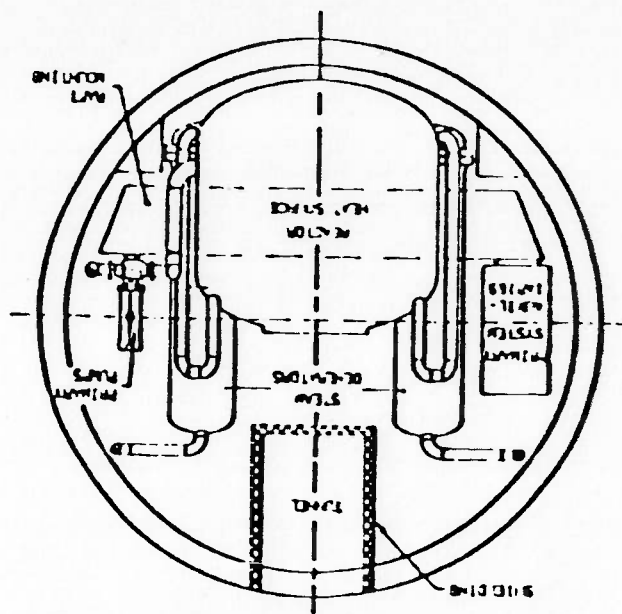
Reator e primário.....	80
Secundário.....	49
Blindagem primária.....	43
Elétrica e controle.....	7
Accessórios e acabamento.....	10
TOTAL (AMPS)	189

INTEGRAÇÃO AO SUBMARINO

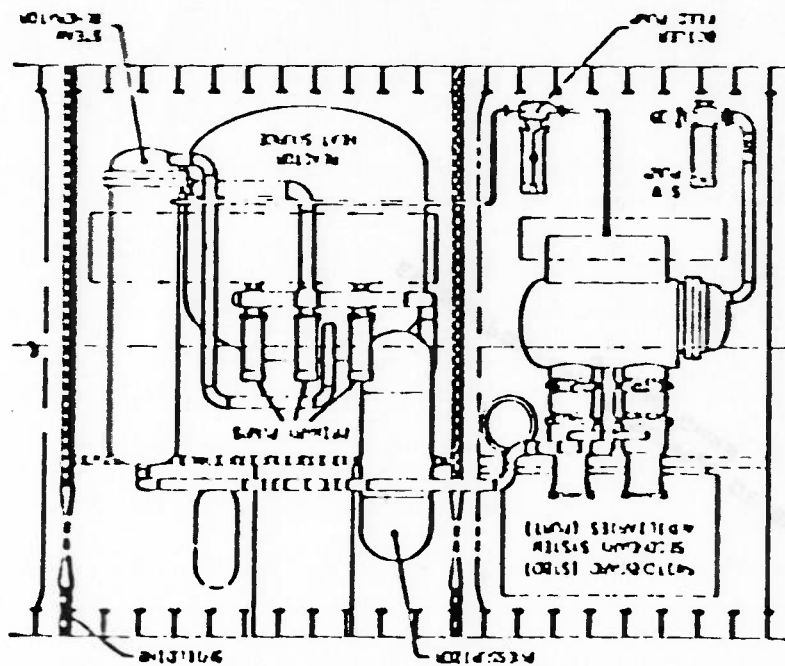
Extensão do casco (12 m comp. e 7,5 m diam.).....	120
Extensão secundárias	
(anteparas, corredor de passagem, convêses).....	26
Suportes.....	50
Blindagem secundária (anteparas e corredor).....	130
Modificações de sistemas do submarino.....	10
Regeneração de ar.....	7
TOTAL (INTEGRAÇÃO DO SUBMARINO)	325

TOTAL GERAL.....514

FIGURA 4.12 b PARÂMETROS PRINCIPAIS DO AMPS 1000



(9) Evaluation



(a) Plan View

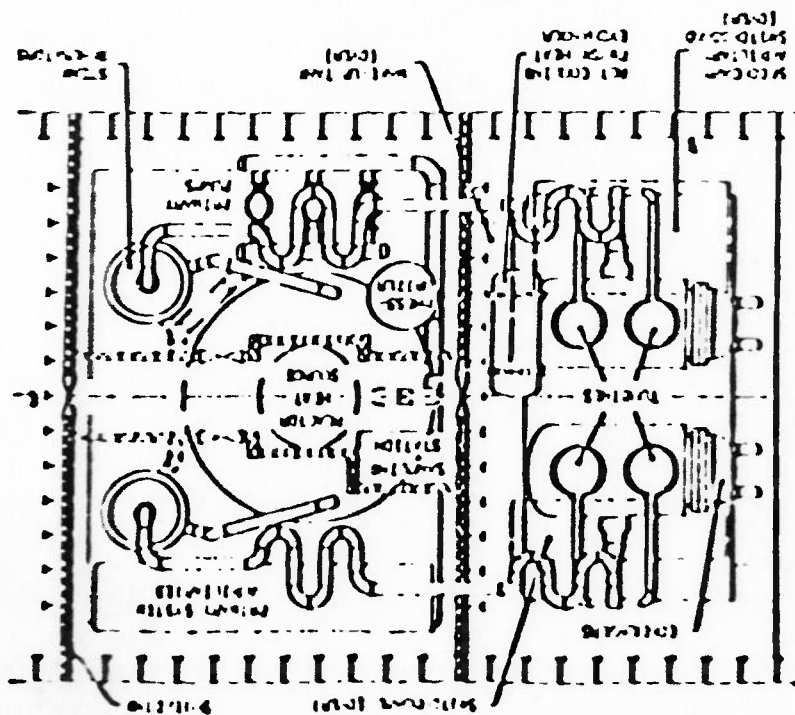
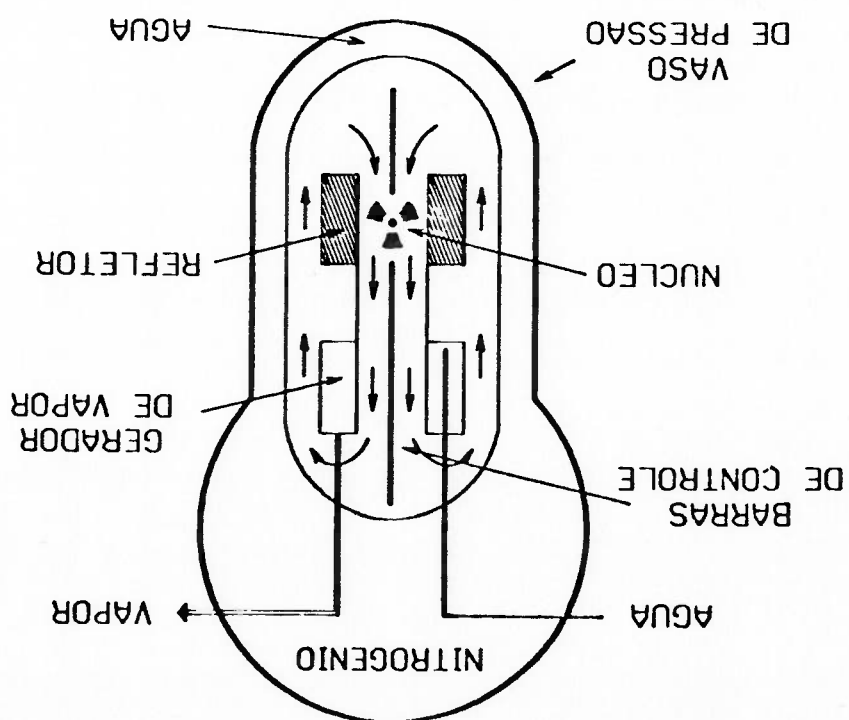
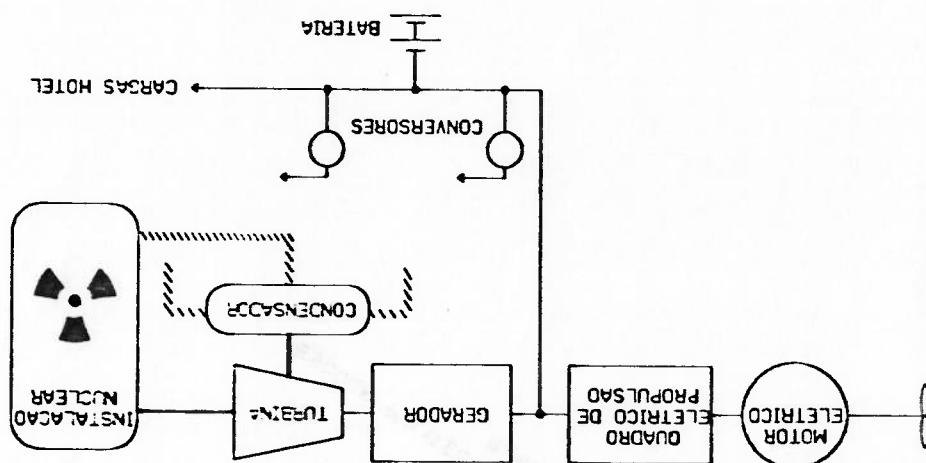




FIGURA 4.14 : Diagrama esquemático da instalação 'SCORE'.



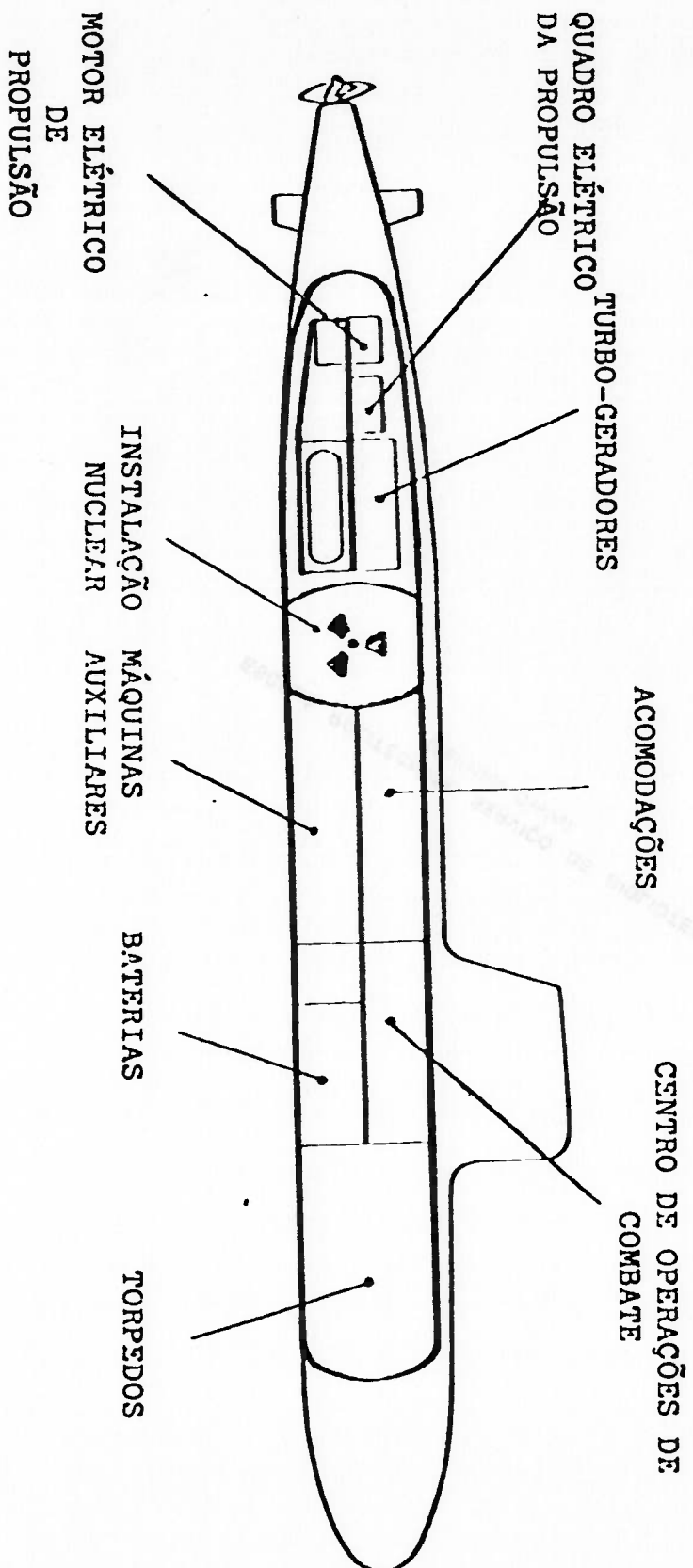


FIG. 4.15 - SUBMARINO NUCLEAR COSTEIRO

TABELA 4.16 - PARÂMETROS PRINCIPAIS DO SUBMARINO NUCLEAR

COSTEIRO NA 2000 (STCAN - França)

Diâmetro do casco resistente (m).....	5,3
Comprimento total (m).....	60
Deslocamento de superfície (ton).....	1050
Velocidade máxima mantida (1 hora).....	18 nós
Velocidade de trânsito.....	13 nós
Taxa de indutricção em trânsito (%).....	0
Autonomia (dias).....	40
Raio de acção (milhas).....	12500 @
(13 nós)	
Altura do vaso do reator SCORE (m).....	4
Diâmetro do vaso do reator SCORE (m).....	2,5
Peso do reator SCORE (tons)	
(incluindo blindagem radiológica).....	40

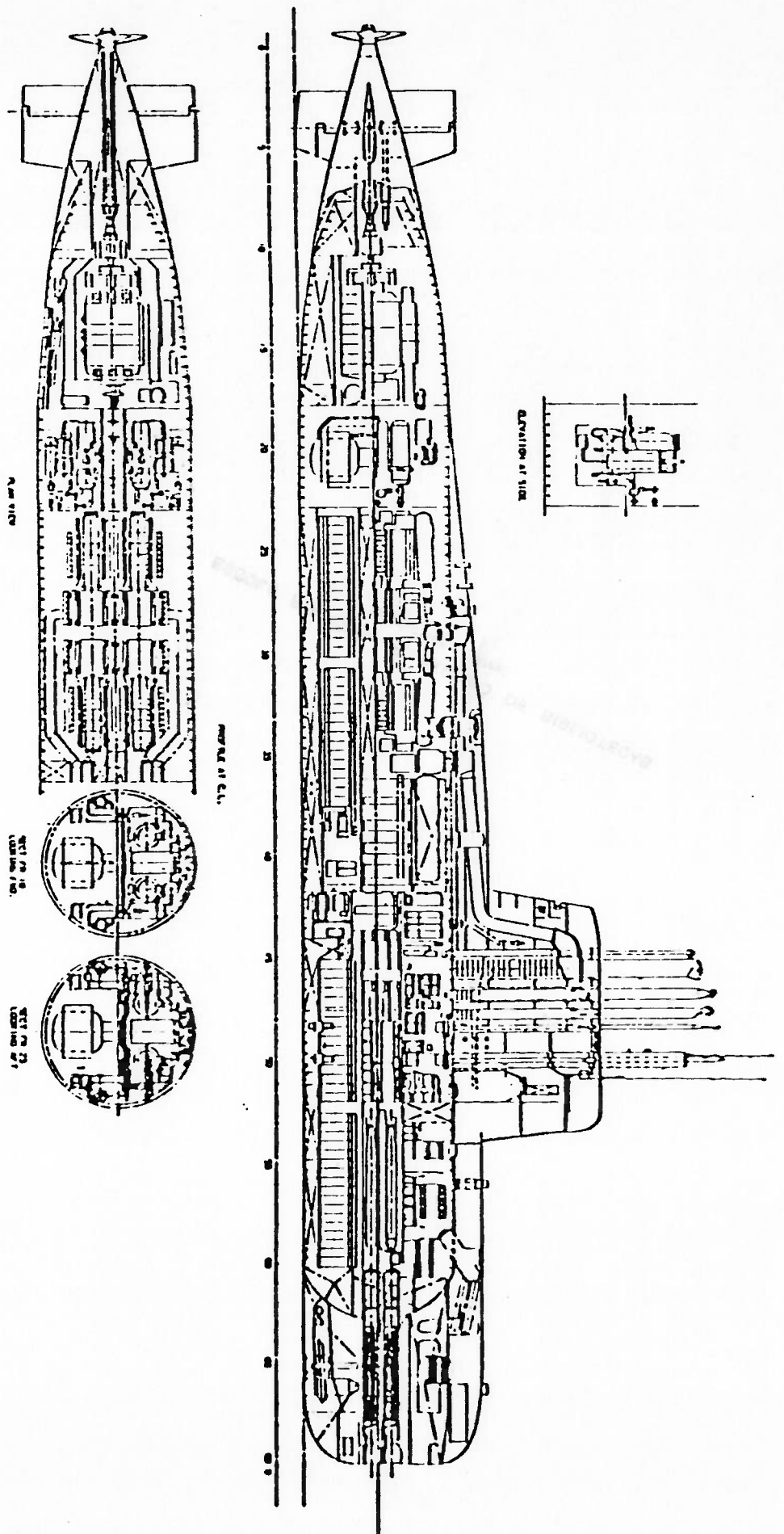
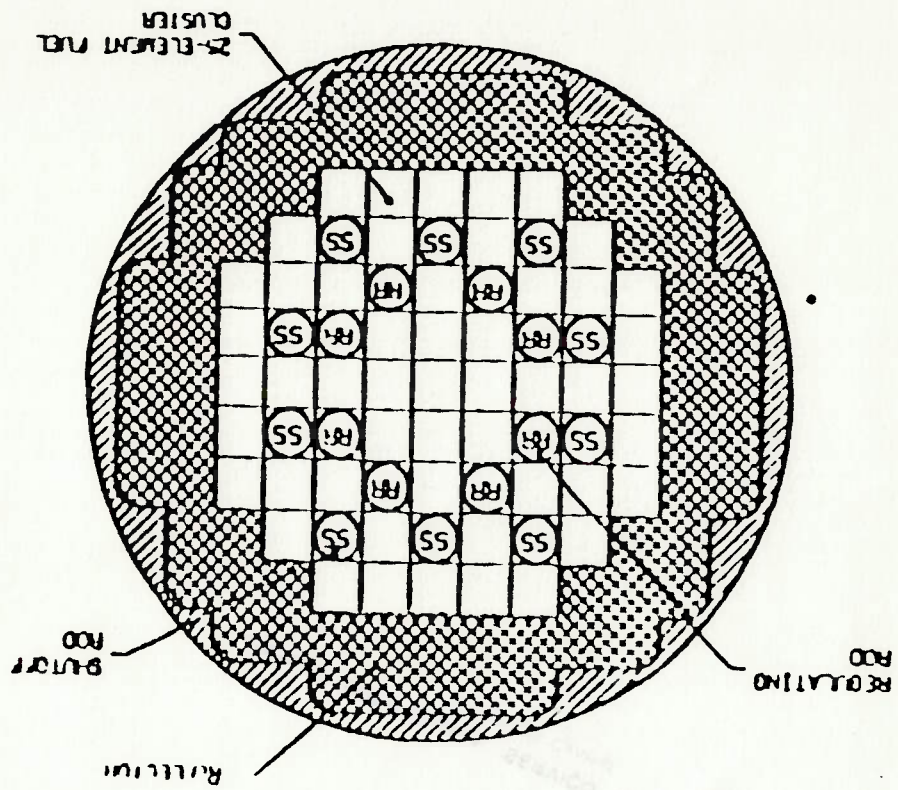
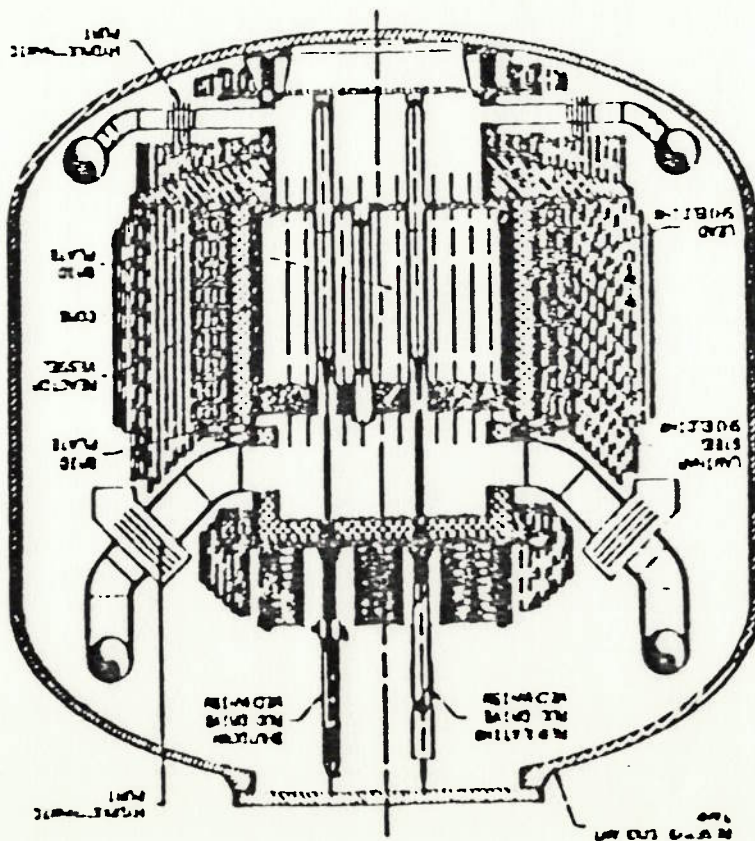


FIGURA 4.17 - ARRANJO GERAL DO SUBMARINO CONVENCIONAL TR-1700 CONVERTIDO EM HÍBRIDO (AMPS 1000)

FIGURA 4.18 - PLANTA DO NÚCLEO



CONJUNTO REATOR/TANQUE RESERVA DE REFRIGERANTE





## CAPÍTULO 5

## CONCLUSÕES

## 5.1 - CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

O começo desta década, a última do século XX, tem visto mudanças enormes e não previstas no cenário de defesa da Europa Ocidental, EUA e URSS. Mudanças significativas estão prestes a acontecer em muitas outras partes do mundo. No curto espaço de 24 meses nós temos visto o fim da Guerra Fria entre os "primeiros dois mundos", 50 anos desde o seu início, com o fim da II Guerra Mundial; o ressurgimento dos conflitos no Oriente Médio, movendo e movendo em conjunto, as Nações Unidas, de um modo verdadeiramente notável; tensões com consequências desconhecidas em torno das margens do Oceano Índico, da África do Sul via Arábia e Sub-continente Indiano até a Indonésia; as ainda relativamente calmas margens ao sul dos oceanos Atlântico e Pacífico.

O futuro dos navios de superfície foi discutido por FULLER (1967) e a conclusão foi que esses seriam a base da deterrence tática para qualquer nação, com respeito à sobrevivência de seu Sistema de Transporte Marítimo (STM), através do controle do mar e da projeção de poder através de mar. Para atender ao requisito essencial de estabelecimento e manutenção do STM, o poder militar deve poder ser deslocado, de forma confiável, dos pontos de produção aos pontos de consumo. Sem dúvida alguma os navios de superfície têm um papel e um futuro.

Ao longo do presente trabalho, procurou-se discutir o futuro dos submarinos, sob diversos aspectos técnicos, as previsíveis mudanças a curto prazo nas políticas de defesa dividindo da "pax" americana que se inicia após o fim da guerra fria e do conflito do Golfo Pérsico, torna necessário refletir-se também sobre o papel a ser desempenhado pelos submarinos no futuro, tanto como parte da deterrence tática, como de deterrence estratégica.

Através da sua história, o desenvolvimento do submarino foi dominado pela disponibilidade de materiais. Desta forma, a aplicação de novas tecnologias e evolução das tecnologias presentes deverá ser considerada para gerar uma previsão das respostas que o submarino poderá fornecer para as missões de uma Marinha. A partir desta previsão poderão ser esboçadas conclusões sobre o futuro do submarino na guerra naval.

A Força de Submarinos da Marinha Americana fornece-nos uma visão: "The submarine is the most cost-effective warship in any

Navy". Será esta afirmativa verdadeira ou, em caso negativo, qual é o seu papel?

## 5 . 2 - A PERSPECTIVA HISTÓRICA

Alguns podem considerar que a história não é um assunto dentro do escopo da engenharia, outros, que ela seria irrelevante para prever o futuro. Entretanto, o problema do desenvolvimento de qualquer sistema de armas reside no fato de experiências de uso real são raras e, portanto, deve-se confiar na teoria, exercícios em tempo de paz e projeções históricas. Como todos os meios navais, o submarino é, simultaneamente, produto evolucionário de seu passado e consequência da inovação revolucionária. Sua história, em termos técnicos e operacionais, bem como a interação entre estes dois aspectos, tem sido crítica para o seu desenvolvimento. Tal interação é parte do desenvolvimento de todos os sistemas navais, mas em nenhum deles tem sido tão relevante como na guerra submarina. Isto é consequência de três restrições físicas dominantes:

- pressão hidrostática, levando a profundidades de operação da ordem de somente dois ou três comprimentos do navio, raramente acima de quatro ou cinco, mesmo para os menores navios - uma lâmina de água relativamente fina, porém requerendo soluções para complexos problemas estruturais, com fatores de segurança muito pequenos;

- equilíbrio estático - o peso deve ser igual ao empuxo durante todo o tempo e em todas as condições; e

- suprimento de oxigênio para conversão de energia e sobrevivência da tripulação.

## 5 . 2 . 1 - Antes de 1900

Uma breve retrospectiva dos séculos anteriores mostra que o homem realizou várias tentativas para sobreviver e combater sob as águas mas o sucesso foi impedido por deficiências do material que:

- tornavam a construção simples e confiável de uma estrutura pressurizada externamente impossível;

- a simples existência de penetrações no casco dificultavam sobremaneira a manutenção da estanqueidade; e

- impediam a criação de uma fonte de energia independente do homem ou das forças naturais.

## 5 . 2 . 2 - 1900-1950: Os Primeiros 50 Anos

Na virada do século XX os problemas materiais mais imediatos puderam ser resolvidos:

- tornaram-se disponíveis chapas e reforçadores de aço com qualidade consistente para a construção do casco pressurizado externamente;

- os requisitos associados a outras áreas de engenharia levaram ao desenvolvimento de fechamentos para aberturas do casco, penetrações e selos de alta pressão eficientes;

- o advento do motor de combustão interna e o desenvolvimento dos sistemas elétricos de corrente contínua e das baterias de acumuladores chumbo-ácido geraram um efeito sistema de propulsão submerso.

Ainda assim, foi a notável persistência de John Philip Holland que conduziu ao primeiro submarino de sucesso - o HOLLAND IV, um projeto que não estaria fora de lugar em qualquer escritório de projeto de submarinos moderno. De fato, sua concepção de engenharia permaneceu sem competidores até 1950, ou seja, constituiu-se num verdadeiramente excepcional fundamento técnico para o desempenho das funções básicas dos sistemas de plataforma dos submarinos. Permaneciam ainda as funções dos sistemas de combate, que envolver comunicações, navegação submersa, sensores para detectar, localizar e classificar o alvo e as armas necessárias para destruir o inimigo. Igualmente era necessário conhecer a ameaça imposta pelo inimigo, a detectabilidade própria através das assinaturas, principalmente acústica e o efeito das explosões submarinas.

Durante a I Guerra Mundial houve pouco progresso técnico. O principal esforço foi dar metodologia ao projeto e confiabilidade ao produto, que era um conceito muito novo, com cerca de uma década de surgimento, e então produzir o maior número de submarinos possível. Os principais avanços foram a substituição de gasolina pelo diesel como combustível, muito mais seguro, dos motores e o uso excepcionalmente efetivo do primitivo torpedos contra navios de superfície e, particularmente, mercantes, como parte do ataque alemão ao STM aliado.

O período entre guerras viu algumas extraordinárias inovações, especialmente na França e Grã-Bretanha, que foram, em parte, introduzidas como que para "reconciliar" o submarino com as Marinhas dominadas pelas doutrinas das esquadras de superfície. Esta orientação é tomada, extranhamente, apesar do grande sucesso dos submarinos alemães contra o STM aliado durante a I G.M., o que só poderia ser explicado pelo fato de que os estrategistas navais da época acreditavam que aquilo nunca voltaria a ocorrer. Desta forma, o objetivo foi explorar a surpresa tática do "navio submersível" com grandes canhões, aeronaves para ampliar suas

áreas de vigilância e propulsão a vapor para transítos de superfície a alta velocidade.

Somente durante o final do período entre guerras surgiram os projetos "convencionais", para bloqueio costeiro e ações anti-navio nas regiões oceânicas mais próximas, no teatro de operações europeu, com as grandes distâncias do Oceano Pacífico criando submarinos de maior porte nos EUA e Japão. A inovação técnica, entretanto, era esparsa, sendo talvez a mais significativa a lenta introdução dos processos de soldagem na fabricação do casco e o início do uso efetivo de sistemas acústicos para detecção de submarinos e localização de navios. O desempenho na superfície ainda dominava como o meio eficiente de atingir as áreas de patrulha e a recarga diária de baterias era ainda feita à noite, na superfície. É de surpreender que, apesar de terem sido feitos alguns experimentos visando dar ao submarino a capacidade de operar os motores em imersão, foi dispendido pouco esforço para completar o trabalho e empregar operacionalmente algum tipo de dispositivo para tal função. Deste modo, quando iniciou-se a II G.M., todos os eventuais beligerantes estavam equipados com efetivos e simples submarinos, porém essencialmente corvetas ou fragatas "submersíveis", e, apesar dos significativos sucessos da campanha contra o tráfego marítimo, vários afundamentos de grandes navios de superfície e ousadas operações especiais, pouco foi feito além de um grande programa de construção de irressistivelmente exito.

Após os sucessos aliados com o radar, a vigilância aérea e a escolta de comboios, a Marinha Alemã sofreu grande pressão para reduzir a necessidade de emergir para carregar baterias. O esnorquel surgiu e foi empregado com sucesso, porém muito tarde. Houve também tentativas na Alemanha de produzir um submarino de alta velocidade, independente do ar atmosférico usando a tecnologia WALTER, baseada em turbinas a peróxido de hidrogênio, derivada da tecnologia emergente dos foguetes e também de criar um submarino convencional de maior autonomia e profundeidade de operação - o tipo XXI. Houve também o início num novo conceito para um torpede melhor.

Assim, ao fim do primeiro meio século de história do submarino, estes compunham grandes esquadras, tinham propulsão convencional, sensores simples, torpedos essencialmente idênticos aos da I G.M. e canhões de médio calibre. De forma geral, eram basicamente evoluções dos conceitos da primeira década.

## 5 . 2 . 3 - 1950-2000: Os Últimos 50 Anos

Nos anos imediatamente posteriores à II G.M., quatro avanços tecnológicos tiveram um impacto vital nas funções do submarino como peça fundamental do aspecto militar do STM das nações:

- o lançamento de armas nucleares, que necessitava evitar a vulnerabilidade das aeronaves tripuladas e as restrições de alcance das bases fixas em terra - um sistema de lançamento baseado em transporte marítimo tinha o potencial de mobilidade, segurança, discreção e tempo de emprego prolongado e, muito importante, uma base de lançamento fora do território do país. Aeronaves baseadas em porta-aviões eram uma solução, mísseis lançados de navios de superfície era outra, mas a primazia iria para os submarinos, se eles pudessem ser independentes do ar atmosférico e pudessem lançar os mísseis submarinos;

- a energia nuclear, que tinha o potencial de dotar o submarino de independência do ar, desde que se pudesse ser compactada numa densidade de potência aceitável, incluindo a biologia;

- a produção de chapas de aço de grande espessura, alta resistência e boa qualidade, capazes de serem soldadas sem perdas nas suas propriedades e livres de defeitos e, então, a construção de cascos grandes o suficiente para acomodar sistemas de lançamento de mísseis e reatores nucleares - os diâmetros aumentaram de 4-7 metros para 10-13 metros;

- o maior conhecimento da propagação do som na água e através do aço, incluindo as interfaces, meios de reduzi-la e, igualmente importante, detectar, localizar e classificar alvos por meios acústicos.

Por conseguinte, os primeiros dez anos desta segunda metade do século XX viu o surgimento do verdadeiro submarino, baseado na energia nuclear para propulsão independente do ar atmosférico, associado a sistemas de navegação também independentes da superfície do mar, capazes de transportar mísseis balísticos para uma posição de lançamento precisamente determinada, virtualmente em qualquer local dos oceanos. Avanços igualmente significativos na guerra anti-submarina foram requeridos para fazer frente aos submarinos lançadores de balísticos inimigos, bem como para proteger os amigos. A exceção das águas costeiras, que requeriam os melhores navios mineiros e varredores de minas, tornou-se óbvio que o veículo anti-submarino mais efetivo seria outro submarino, daí a rápida evolução dos submarinos nucleares de ataque.

Apesar de algumas tentativas de empregar mísseis em submarinos de propulsão convencional, o programa de propulsão nuclear americano logo tornou todos os outros sistemas pouco efetivos. Entretanto, a habilidade da comunidade de engenharia americana em resolver os outros problemas, menos divulgados, incluindo projeto do casco, ruído, controle ambiental, navegação, lançamento submerso de mísseis e, até mesmo, remoção de lixo, não deve ser subestimada. Havia também o grande problema de organização do projeto, produção e emprego de submarinos - o primeiro uso intensivo das redes PERT/CPM e do computador para planejamento e controle foi o projeto dos submarinos lançadores de mísseis Polaris.



Outras nações também tiveram grandes desenvolvimentos, particularmente a URSS, com uma variedade de projetos, alguns dos quais continuaram a explorar o emprego dos mísseis de cruzeiro contra as grandes esquadras de superfície. De fato, parece que os soviéticos são capazes de manter dois grupos de projeto independentes, desenvolvendo muitas inovações, incluindo cascos de titânio e sistemas nucleares com fluidos de resfriamento diferentes da água. A Grã-Bretanha rapidamente adotou a propulsão nuclear, inicialmente adotando um projeto próprio e posteriormente usando tecnologia americana, mas também desenvolveu significativo esforço em sistemas de propulsão independentes do ar atmosférico baseados em turbinas a peróxido de hidrogênio e motores diesel em ciclo fechado. Também projetou e construiu submarinos para emprego do sistema de mísseis balísticos Polaris americanos, equipados com explosivos nucleares britânicos.

Os anos 50 e 60 não viram somente grandes programas de construção, mas também muitos projetos explorando novos sistemas de combate e métodos de propulsão. Mesmo o projeto de torpedos foi atacado e, após alguns conceitos abortados, grandes progressos foram feitos uma vez que reconheceu-se que teriam que ser em verdade mísseis submarinos, guiados de grande velocidade e que constituiriam-se num importante problema de projeto.

Grandes avanços foram obtidos na acústica submarina, os quais cada vez mais aproximam-se do objetivo maior da redução de ruído - ser tão silencioso quanto o ruído de fundo do ambiente submarino - e nos sonares passivos, tanto na aquisição como no processamento de sinais. Progressos satisfatórios e suficientes foram feitos na área de comunicações, de modo a permitir que os submarinos pudessem efetivamente cumprir suas longas missões com confiabilidade, principalmente as de deterência estratégica.

## 5. 2. 4 - Os Requisitos Operacionais

Os primeiros 50 anos de história do submarino viram muitas argumentações e contra-argumentações sobre o papel militar e eficácia do submarino, incluindo, nos primórdios, que o fato de ele ser discreto e operar oculto seria "deselegante" dentro dos princípios da guerra de então. Foi encarado de diferentes maneiras pelos Estados-Maiores e altos comandos, que não possuíam, naquele tempo, especialistas em submarinos, que na verdade eram praticamente inexistentes.

Tendo em mente que todos os requisitos militares na área marítima, são, em última instância, afetos à proteção do STM, a contribuição do submarino neste período limitava-se a duas capacidades:

- vigilância discreta, mantendo olhos e ouvidos na direção dos movimentos dos navios inimigos, sem mostrar-lhes sua própria posição, o que era clandestino, porém legal; e

- ataque direto contra os setores mais vulneráveis do STM, essencialmente navios mercantes em rotas comerciais, o que, se fosse feito sem aviso, era considerado ilegal pelo Direito Internacional.

Por conseguinte, o uso operacional do submarino em ambas as Guerras Mundiais foi voltado para a exploração da tecnologia disponível, com pouco estímulo à exploração de novos avanços. Este fato é plenamente demonstrado pela falta de pesquisa em novos sistemas de energia, a exceção de algumas iniciativas alemãs próximo ao término da II G.M., na área de Controle, Comando, Comunicações e Informações (C3I) e, especialmente, em torpedos.

Mesmo após o fim da II G.M., os planejadores navais devotaram pouco tempo na busca de novos empregos para os submarinos. Os esforços foram concentrados no emprego do poder aéreo, resultado dos sucessos obtidos nas operações no Pacífico, os quais levaram ao conceito americano de esquadra de ataque ("Strike Fleet"), com suas corvetas/fragatas de escolta e grupos de apoio logístico, contraposto aos navios de superfície equipados com mísseis, soviéticos.

Em 1950, início do segundo período, as possibilidades e o potencial de sistemas de propulsão baseados em energia nuclear fizeram os planejadores navais perceber que o verdadeiro submarino poderia ter novos papéis de determinância estratégica e tática. Eles poderiam ser os navios capitais do futuro. Entretanto, é relevante notar que as maiores potências continuaram com o desenvolvimento das "Strike Fleets", baseadas em navios-aeródromos dotados de aeronaves de asa fixa, talvez reconhecendo a importância do fator "visibilidade" na credibilidade que qualquer sistema voltado para a determinância deve inspirar. A energia nuclear foi explorada, porém para aumentar o raio de ação e o volume disponível para armazenar combustível de aviação.

Ainda assim, a disputa principal encontrava-se em explorar o "novo" submarino no seu papel estratégico e ao longo do resto do período o submarino de propulsão nuclear tem tido um claro e brilhante futuro, sendo o veículo principal para o lançamento submerso de mísseis balísticos de longo alcance. Adicionalmente, a URSS percebeu o mérito do submarino lançador de mísseis anti-navio para o ataque às "Strike Fleet". Daí o projeto e construção de submarinos nucleares de ataque e fragatas com grandes capacidades

de guerra anti-submarino e diversas instalações de vigilância instaladas no leito dos oceanos.

Quase que em separado, o emprego dos submarinos de propulsão convencional (SSK) passou a estar sob contínuo e forte debate. Como veículo, ele é certamente mais barato para adquirir, manter e operar, além de ser muito silencioso quando submerso. Entretanto, sua autonomia submerso tem sido muito limitada e a carga de baterias usando os altamente ruidosos motores diesel é inevitável. Apesar disto, apenas os EUA os dispensaram, com os demais países que possuem SSBN e SSN considerando-os como complementos úteis e baratos aos seus submarinos de propulsão nuclear, primordialmente em missões de vigilância e treinamento.

Adicionalmente, muitas outras marinhas consideram os SSN como elementos importantes para atendimento de seus requisitos de deterrence tática. Este grupo de usuários obteve suas unidades de fontes ocidentais e orientais, com alguma transferência de tecnologia e construção local. Os principais fornecedores eram, inicialmente a Grã-Bretanha, então a França e, finalmente, em larga escala, a Alemanha e recentemente a Suécia. A URSS tem sido a principal fonte do bloco oriental, mas números significativos provêm da China Popular.

O mundo, entretanto, está agora no final deste período de estabilidade, se não de relações internacionais estáticas, e o futuro do submarino ao início de seu segundo século terá que responder a duas questões separadas:

- como suas capacidades adaptam-se numa marinha moderna, num momento que a Guerra Fria termina, ou pelo menos está suspensa temporariamente?

- enquanto a deterrence estratégica exercida pelos SSBN permanecer confiável perante as pressões pela limitação da proliferação de armas nucleares e entendimentos para redução de armas estratégicas, será um SSN ou SSK lançador de mísseis de cruzeiro tão eficaz e confiável como um navio-aeródromo, ou mesmo um velho encouraçado, para a deterrence tática?

Os projetos atuais de submarinos de propulsão nuclear têm suas raízes nos anos 60. O custo econômico de criar uma nova geração e descomissionar de forma segura a antiga são ambos elevados e ameaçam o orçamento para os navios de superfície. Apesar das tripulações serem pequenas, as pressões demográficas sobre os recursos humanos de alta qualidade necessários para operar e manter estes submarinos são fortes.

Para resumir o potencial do submarino como parte do setor militar do STM de uma nação, a simples análise apresentada pela figura 6.2 pode ser extremamente útil. Ela mostra que o submarino pode ter uma relação custo/benefício altamente favorável, complementando o navio de superfície nas situações onde suas

vantagens superam as suas desvantagens e onde as oportunidades superam as ameaças ao seu emprego.

### 5 . 3 - REQUISITOS FUTUROS

#### 5 . 3 . 1 - Operacionais

Todas as nações com acesso ao mar devem estar preparadas para proteger o seu Sistema de Transporte Marítimo (STM). Este deve incluir sua "economia oceânica", ou seja, pesca, minerais e, principalmente, petróleo e gás. Para regulamentar esta área tem surgido, vagarosamente, regras, acordos e conceitos de Direito Internacional, a partir de várias conferências das Nações Unidas, especialmente a 3rd Conference on the Law of the Sea (1982). Os Requisitos Operacionais podem ser resumizados como a doutrina de deterrence tática, que inclui controle de áreas raritimas e projeção de poder a nível tático no mar territorial e na Zona Econômica Exclusiva ("Exclusive Economic Zone - EEZ").

O submarino nunca pode ser o único meio de deterrence tática, pois esta necessita de "credibilidade" e "visibilidade". Constitui-se, entretanto, num complemento indispensável às forças de superfície, capaz de monitorar movimentos hostis na sua área oceânica. O desenvolvimento de armas anti-navio e anti-submarino baseadas em torpedos e mísseis guiados dá ao submarino uma potente capacidade ativa de defesa do STM. O afundamento do cruzador argentino Belgrano, durante o conflito das Malvinas teve consequências táticas desproporcionais à perda do navio, a medida que endossou o emprego, pela Grã-Bretanha, de uma deterrence tática específica a qual provou ter credibilidade e visibilidade.

Sob o aspecto da deterrence estratégica, o submarino nuclear será o único meio de transporte de sistemas de lançamento de mísseis balísticos confiável dado a vulnerabilidade dos demais meios aéreos e terrestres aos impactos dos programas do tipo "Guerra nas Estrelas".

Deste modo, o submarino tem a capacidade de satisfazer os requisitos operacionais para proteção do STM, através de deterrence tática, constituindo-se os "olhos e ouvidos" na EEZ e nas suas áreas adjacentes, exercendo vigilância antecipada e ameaça oculta, e de deterrence estratégica, constituindo-se na base de lançamento submarina de mísseis balísticos.

#### 5 . 3 . 2 - Tecnológicos

Uma análise dos requisitos operacionais e do "estado-da-arte" da tecnologia para deterrence estratégica baseada em submarinos mostra que estes estão plenamente compatíveis. Sistemas altamente eficazes estão em construção na Grã-Bretanha, EUA,



Francia e URSS. Apesar de algumas melhorias marginais, esta geração atenderá aos requisitos operacionais até pelo menos os próximos 30 anos.

Sob os aspectos de deterência tática, existem questões que refletem primordialmente com os problemas associados a custos - existe um crescente entendimento que os grandes benefícios obtidos pelo emprego da energia nuclear, a qual criou o verdadeiro submarino, tem levado a custos econômicos crescentes:

- custos iniciais - apesar da instalação propulsora constituir-se em somente cerca de um terço do custo unitário do submarino, devido ao significativo "overhead" do sistema de combate, os custos finais são maiores, pois a propulsão nuclear requer navios maiores; mesmo pensando no SNA RUBIS, francês, que é um excelente exemplo de controle no crescimento das dimensões principais durante o projeto, ele não pode ser considerado como um submarino pequeno; além disto, a fabricação, construção, montagem e comissionamento de uma instalação nuclear é muito mais complexa que uma instalação convencional;

- custos de operação - eles são elevados pela necessidade de operadores e pessoal de manutenção altamente especializados e de instalações complexas para recarga de combustível;

- custos de descomissionamento - estes são de certa forma desconhecidos, mas geram preocupações principalmente devido a associação irracional e desinformada aos problemas dos rejeitos de alto nível gerados no reprocessamento de combustível.

#### 5. 4 - DESENVOLVIMENTOS PARA O SÉCULO XXI

##### 5. 4. 1 - Propulsão

O principal desenvolvimento esperado é o de um sistema independente do ar atmosférico que seja menor e mais barato que os atuais sistemas de propulsão nuclear de alta potência. Esforços significativos estão sendo dispendidos em três sistemas não-nucleares de geração de energia: as células de combustível, o motor Stirling e os motores diesel em ciclo fechado, aos quais devem ser adicionados meios de prover e armazenar de forma simples e segura o combustível e o oxidante. Existem também esforços no sentido de viabilizar o conceito de instalações nucleares de baixa potência intrinsecamente seguras, simples de operar, recarregar de combustível e descomissionar e de relativamente baixo custo ao longo do ciclo de vida útil.



## 5 . 4 . 2 - Controle de Submersão

Mesmo com todos os avanços tecnológicos, os submarinos ainda têm que operar dentro de uma lâmina de água muito restrita. Usar este limite de forma segura e silenciosa, a velocidades baixas e altas, requer muito melhor controlabilidade, da forma do casco através das superfícies de controle ao piloto automático. Os diversos aspectos da automação têm aí grande potencial.

## 5 . 4 . 3 - Gerenciamento de Energia

Afastando-nos das grandes instalações nucleares com seu praticamente ilimitado suprimento de energia, os demais sistemas de geração de energia independentes do ar demandarão um controle muito mais estrito do consumo de energia. A produção e o consumo de energia não é só inerentemente ruidosa, como também toda energia produzida deve ser removida por condução através do casco ou via condicionamento de ar ou outro sistema de resfriamento ativo, também pesado, ruidoso e caro.

## 5 . 4 . 4 - Controle Ambiental

A atmosfera de um submarino submerso pode ser rapidamente habitável por um tempo infinito, desde que seja disponível quantidades adequadas de energia. Entretanto, sua análise e controle é difícil e requer muita mão-de-obra. Novos sistemas de controle baseados em inteligência artificial simplificarão e reduzirão a energia requerida, mantendo ao mesmo tempo melhor qualidade do ar ambiental.

## 5 . 4 . 5 - Integração de Dados

O submarino possui dois tipos de problemas de gerenciamento de dados. A física do sonar na água e os prolongados tempos envolvidos no processo de acompanhamento de navios inimigos resultam na necessidade de analisar, armazenar, avaliar e apresentar ao comando uma enorme quantidade de dados gerados pelos sensores. O gerenciamento e integração destes dados não é somente um problema de "hardware" e "software", mas também de conceitos operacionais se deseja-se evitar complexidade e incerteza. O segundo problema é o controle e gerenciamento da plataforma em situações normais e de emergência, capaz de suportar longos períodos de operação sem anormalidades e ter respostas muito rápidas a incêndios e alagamentos. Novamente, sistemas de controle baseados em inteligência artificial têm grande potencial nesta área.

#### 5 . 4 . 6 - Interfaces Homem/Máquina

O ambiente físico e operacional no qual os submarinos operam apresenta grandes exigências não só para o projeto e produção do material, como também sobre a tripulação. Muito tem sido feito com relação aos vários sub-sistemas mas a questão global permanece ainda por ser considerada. O homem deve estar no último controle e deve ter tempo para pensar - logo necessita de interfaces com a máquina que sejam claras, simples e óbvias e nas quais ele possa acreditar, especialmente em emergência.

#### 5 . 4 . 7 - Disponibilidade, Confiabilidade e Manutenibilidade

Esta área requer um balanceamento entre navio e base dentro dos quatro níveis de manutenção e o impacto de um bem projetado sistema de Apoio Logístico Integrado (ALI) a ser estudado em diversos termos. Um programa de ALI será eficaz em termos de custo ao longo do ciclo de vida do navio desde que o programa selecionado seja usado sob o controle do projetista e do operador.

#### 5 . 4 . 8 - Produção

O projeto e construção de um submarino sem dúvida é a atividade mais complexa no ramo da engenharia naval. Para reduzir os custos unitários e os custos ao longo do ciclo de vida, bem como aumentar a confiabilidade, manutenção e disponibilidade, a organização do processo de projeto e construção encontra-se atualmente num divisor de águas. No projeto conceitual existe a necessidade de evoluir dos processos manuais, assistidos por módulos computadorizados para um sistema precisamente estruturado e integrado com base em computador, notando-se que esta mudança é complexa e sujeita a maior número de restrições do que no caso dos navios de superfície.

A seguir, há a necessidade de abandonar as maquetes e modelos físicos para um sistema de desenvolvimento de projeto totalmente baseado em CAD ("Computer Aided Design"), com modelagem gráfica tridimensional e com a facilidade de traduzir definições de projeto baseadas nos sistemas componentes em informações de produção. Na construção, a aplicação de controle de qualidade apropriado e manutenção da precisão, de forma a garantir que não haja retrabalhos, e atualmente possível com sistemas assistidos por computador apropriados. Finalmente, para submarinos, a fase de testes, provas, avaliações, comissionamento e aceitação deve ser planejada, programada e os dados técnicos resultantes gerenciados, com "software" apropriado.

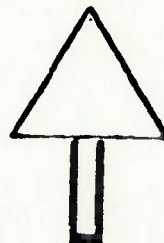
1900 - 1950

- CORVETAS/FRAGATAS SUBMERSIVEIS

- PROJETO ESTATICO DO CASCO E MAQUINAS

- SISTEMAS DE ARMAS MUITO SIMPLES

- SISTEMAS DE COMBATE EXPERIMENTAIS



- AMEACA DE GRANDE SUCESSO

1950 - 2000

- VERDADEIRO SUBMARINO

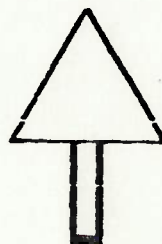
- PROPULSAO INDEPENDENTE DO AR NUCLEAR /

HIP

- NOVOS PROJETOS DE CASCO E MATERIAIS

- REVOLUCAO NOS SENSORES E ELETRONICA C3I

- DETERRENCIA TATICA E ESTRATEGICA



- COMPONENTE NAVAL DA "TRIAD" NUCLEAR

- NAVIO "CAPITAL"

FIGURA 5.1 - EVOLUCAO DO SUBMARINO

# SUBMARINOS

## A N A L I S E D E M E R I T O

### PONTOS FORTES

DISCRICAO  
INDEPENDENCIA  
ARMAS DE GRANDE AMEACA  
GRANDE AUTONOMIA  
PEQUENA TRIPULACAO

### OPORTUNIDADES

SURPRESA  
INVISIBILIDADE  
NOVOS SENSORES  
GERENCIAMENTO DE DADOS  
"LINKS" DE COMUNICACAO  
PROPULSAO INDEPENDENTE  
DO AR

### AMEACAS

PAPEL DE "POLICIA"  
CERIMONIAL  
ARMAS DE BAIXA AMEACA  
VELOCIDADE = RUIDO  
MANUTENCAO EXIGENTE

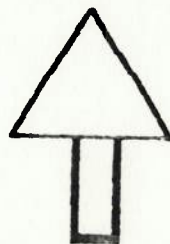
### PONTOS FRACOS

CREDIBILIDADE  
DETECCAO NAO-ACUSTICA  
LIMITE PARA REDUCAO DE RUIDO  
PRODUTIBILIDADE  
DESCOMISSIONAMENTO  
CUSTOS DE AQUISICAO

FIGURA 5.2 - ANALISE DE MERITO DE SUBMARINOS

# REQUISITOS OPERACIONAIS PARA SISTEMAS DE TRANSPORTE MARITIMO

- ESTRATEGICO - Base de Lancamento de Misseis Balisticos
- TATICO
  - "Olhos e Ouvidos"
  - Ameaca Oculta



COMPONENTE ESSENCIAL DE UMA ESQUADRA BALANCEADA

## A TECNOLOGIA PARA O SEculo XXI REQUER:

- Propulsao independente do ar: Nao-nuclear/Mini-nuclear
- Controle submerso: Mais fundo e mais rapido
- Gerenciamento de energia total
- Controle ambiental inteligente
- Integracao de dados
- Interfaces homem/maquina para minimizar tripulacao
- Maior disponibilidade, confiabilidade e manutibilidade
- Meiores condicoes de producao

FIGURA 5.3 - PERSPECTIVAS PARA OS SUBMARINOS NO SEculo



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BITTENCOURT, Armando S. - "As Novas Corvetas e sua Contribuição para o Futuro da Marinha", Revista Marítima Brasileira, vol 110, nº 7/9, jul/set 1990, Serviço Geral de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.
- [2] PINHEIRO DA SILVA, Othon L. - "O Programa de Capacitação para Propulsão Nuclear da Marinha", palestra proferida no Instituto de Engenharia de São Paulo em 17/10/89, patrocinada pela Sociedade Brasileira de Engenharia Naval, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] GOLDEMBERG, José e PRADO, Luis T. S. - "Projeções para a Demanda de Energia Paulista para o Ano de 2000 Através do Método MEDEC", Revista de Estudos Econômicos, set/dez de 1986, São Paulo, Brasil.
- [4] VEJA, revista - "A Última Grande Usina Paulista", 13 de março de 1991, editora Abril, São Paulo, Brasil.
- [5] SAEGER, H. - "Non-Nuclear Submarine Production - and World Market Trends", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [6] GRUHL, E., INGWESSEN, G. e PETERSEN, U.K. - "Trends in Submarine Design", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [7] JACOB, Richard J. - "A Word for Design Engineers", Design News, April 5, 1982.
- [8] FLORES, Mário C. - "Submarino de Propulsão Nuclear - O que o justifica? Como chegar até ele? O que quer a Marinha com ele e para o quê?", Revista Marítima Brasileira, maio de 1988, Serviço Geral de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.
- [9] COMPTON-HALL, Richard - "Submarine Boats : The Beginnings of Underwater Warfare", Conway Maritime Press, 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [10] CRANE, Jonathan - "Submarine", British Broadcasting Corporation, 1984, Londres, Grã-Bretanha.
- [11] RODDIS, L.H. e SIMPSON, J.W. - "The Nuclear Propulsion Plant of the USS Nautilus SSN-571", SNAME Transactions, vol 62, 1954, Nova York, EUA.
- [12] WHITESTONE, Nicholas - "The Submarine: The Ultimate Weapon", Davis-Poynter Publishers, 1973, Londres, Grã-

Bretanha.

- [13] RÖSSLER, Ederhard - "Evolution and Technical History of German Submarines", Arms and Armour Press, 1981, Londres, Grã-Bretanha.
- [14] FRIEDMAN, Norman - "Submarine Design and Development", Conway Maritime Press, 1984, Londres, Grã-Bretanha.
- [15] SHARPE, Richard - "Jane's Fighting Ships", Jane's Information Group, 1990, Surrey, Grã-Bretanha.
- [16] BARRIAC, J. - "Minicin - A Dynamically Tuned Gyro Type Inertial Navigation System", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [17] SAEGER, H. - "Non-Nuclear Submarines and Some Aspects of their Development in Germany", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [18] MCKEE, A. I. - "Recent Submarine Design Practices and Problems", SNAME Transactions, 1960, Nova York, EUA.
- [19] ARENIZEN, E. S. e MANDEL, P. - "Naval Architectural Aspects of Submarine Design", SNAME Transactions, 1961, Nova York, EUA.
- [20] FRIEDMAN, Norman - "Silent Running: Submarine Design Today", Defense and Foreign Affairs, marco de 1987.
- [21] SHEETS, H. E. - "The Engineering of Submarines", Naval Engineers Journal, agosto de 1962.
- [22] SHARPE, Richard - "Jane's Underwater Warfare Systems", Jane's Publishing Company Ltd., 1989, Londres, Grã-Bretanha.
- [23] KORN, H. - "Modern Submarine Weapon Discharge Systems", RINA Symposium on Conventional Naval Submarines, 3-5 de maio de 1988, Londres, Grã-Bretanha.
- [24] HOUSTON, S.J. - "The Handling and Launching of Submarine Weapons", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [25] BOOTH, E. e GILLET, P. E. - "Submarine Weapon System Design", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [26] OLIVA, A. F. e GOSLING, R. J. - "The SSN: An Affordable Platform for Enhancing Undersea Naval Capability", Undersea Defence '88, 1-6 de outubro de 1988, San Diego, EUA.

[27] COMPTON-HALL, Richard - "Sub x Sub - The Tactics and Technology of Underwater Warfare", Orion Books, 1988, New York, EUA.

[28] STEFANICK, T. - "The Non-Acoustic Detection of Submarines", Scientific American vol 258 no 3, março de 1999.

[29] KERVERN, G. e LE GALL, A. - "Recent Progress in Underwater Optical Imaging", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.

[30] CAMINHA, João C. G. - "A Guerra das Malvinas - Conjecturas e Considerações Estratégicas", Revista Marítima Brasileira vol 108 no 10/12, out/dez de 1988, Serviço Geral de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.

[31] PERSON, Ole B. - "The Stirling Submarine Power System", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.

[32] BRATT, C. - "Stirling Energy System for Autonomous Underwater Vehicles", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.

[33] IKL - "Air Independent Hybrid Propulsion System", Ingenieurkontor Lübeck, 1988, Lübeck, Alemanha.

[34] KNAACK, Klaus - "A New German Hybrid Propulsion Systems", Maritime Defence, setembro de 1986.

[35] WITTEKIND, D. e WÜBELLS, B. - "A Closed Cycle Diesel Propulsion System for Submarines", RINA Symposium on Conventional Naval Submarines, 3-5 de maio de 1988, Londres, Grã-Bretanha.

[36] TUFANO, A. e SANTI, G. G. - "20 GSI 48 - A Strokeless, Wakeless Diesel Submarine of a New Generation", RINA Symposium on Conventional Naval Submarines, 3-5 de maio de 1988, Londres, Grã-Bretanha.

[37] GOSLING, R. J. et alii - "The AMP5 Nuclear Reactor Based Air-Independent Power Source for Diesel-Electric Submarines", RINA Symposium on Conventional Naval Submarines, 3-5 de maio de 1988, Londres, Grã-Bretanha.

[38] BOISRAYON, G. - "The Nuclear Coastal Submarine: An Alternative to Exotic Propulsion Systems", RINA Symposium on Conventional Naval Submarines, 3-5 de maio de 1988, Londres, Grã-Bretanha.

[39] HSU, Liu - "Desenvolvimento de Veículos de Operação Remota", COPPETEC, COPPE, UFRJ, 1988, Rio de Janeiro,

- [40] GUERRA, Yapery T. B. - "A Evolução Técnica do Submarino", Escritório Técnico de Construção Naval, Ministério da Marinha, 1964, São Paulo, Brasil.
- [41] SPEAR, Lawrence - "Submarine Torpedo Boats - Past, Present and Future", SNAME Transactions, 1903, New York, EUA.
- [42] U.S.NAVY - "Electric Propulsion", Bureau of Ships Manual, chapter 41, section IV, 1947.
- [43] U.S.NAVY - "Principles of Naval Engineering", NAVPERS 10788-B, 1970.
- [44] PESCE, Eduardo I. - "Preenchendo a Lacuna", Revista Marítima Brasileira, vol 110 no 7/9, jul/set 1990, Serviço Geral de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.
- [45] GABLER, Ulrich - "Submarine Design", Bernard & Graefe Verlag, 1985, Alemanha.
- [46] WESTWOOD, David - "The Type VII U-Boat", Conway Maritime Press, 1984, Londres, Grã-Bretanha.
- [47] MILLER, David e JORDAN, John - "Modern Submarine Warfare", Salamander Books Ltd., 1897, Londres, Grã-Bretanha.
- [48] BREEMER, Jan - "Soviet Submarines - Design, Development and Tactics", Jane's Information Group Ltd., 1989, Surrey, Grã-Bretanha.
- [49] MOORE, John e BERG, John - "The Soviet Submarine Fleet", Jane's Information Group Ltd., 1985, Surrey, Grã-Bretanha.
- [50] RITTERHOFF, J. - "Diesel-Electric Propulsion - Recent Developments and Future Technologies", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [51] HEWITT, R.D. e GARLICK, W.G. - "Design Techniques for conventional Submarine Propulsion Systems", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [52] MURRAY, Raymond L. - "Introdução à Energia Nuclear", Hemus Editora Ltda., 1984, Rio de Janeiro, Brasil.
- [53] HEWLETT, Richard G. e DUNCAN, F. - "Nuclear Navy - 1946-1962", The University of Chicago Press, 1974, Chicago, EUA.



- [54] RICKOVER, Hyman G. et alii - "Some Problems in the Application of Nuclear Propulsion to Naval Vessels", SNAME Transactions 1958, New York, EUA.
- [55] PEPPER, D.J. - "Experiences in the Design and Manufacture of Marine Nuclear Plants", Naval Engineers Journal, November de 1952.
- [56] POLMAR, Norman e ALLEN, Thomas B. - "Rickover, Controversy and Genius - a Biography", Simon and Schuster, 1982, New York, EUA.
- [57] CROUCH, Holmes F. - "Nuclear Ship Propulsion", Cornell Maritime Press, 1960, Cambridge, Grã-Bretanha.
- [58] DUDERSTADT, James J. e HAMILTON, Louis J. - "Nuclear Reactor Analysis", John Wiley & Sons Inc., 1976, New York, EUA.
- [59] GLASSSTONE, Samuel e SESONSKÉ, Alexander - "Ingeniería de Reactores Nucleares", Editorial Reverte S.A., 1968, Barcelona, Espanha.
- [60] TONG, L.S. e WEISMANN, J. - "Thermal Analysis of Pressurized Water Reactors", American Nuclear Society, 1979, Large Park, EUA.
- [61] HANDLER, Joshua e ARKIN, William M. - "Naval Accidents 1945-1989", Neptune Papers No 3 e 4, Institute for Policy Studies, 1990, Washington, EUA.
- [62] TAKEIANI, K. - "Explication of Inherently Safe Reactors", 1st International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 24-26 de agosto de 1987, Lausanne, Suíça.
- [63] TAKEIANI, K. - "Nuclear Safety and its Dependent for Human Beings", 2nd International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 21-23 de agosto de 1989.
- [64] HEWITT, J.S. - "The AMP5 1.5 MW Low pressure Compact Reactor", 1st International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 24-26 de agosto de 1987, Lausanne, Suíça.
- [65] MACMILLAN, J.H. et alii - "Natural Circulation Reactors for Marine Propulsion", Simposio Internazionale Progetti ed Esperienze nel Settore della Propulsione Nucleare Navale, Milão, 1962.
- [66] GREIF, R. - "Natural Circulation Loops", Journal of Heat Transfer vol 110, November 1988.



[67] ZVRIN, Y. - "A Review of Natural Circulation Loops in PWR and other Systems", Nuclear Engineering and Design no 67, 1981.

[68] SHOMER, R.T. e PURDY, R.T. - "Consolidated Nuclear Steam Generator for Marine Propulsion", Simposio Internazionale Progetti ed Esperienze nel Settore della Propulsione Nucleare Navale, Milão, 1962.

[69] ARRA, G. e HASEK, W. - "Advanced PWR Nuclear Ships Based on NS Savannah Experience", Simposio Internazionale Progetti ed Esperienze nel Settore della Propulsione Nucleare Navale, Milão, 1962.

[70] MATZIE, R.A. et alii - "Design of the Safe Integral Reactor", 2nd International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 21-23 de agosto de 1969.

[71] KLAKE, R.D. e KRACHT, H. - "The Consolidated Steam Generator in the Advanced Pressurized Water Reactor", Symposium on the Safety of Nuclear Ships, 5-9 de dezembro de 1977, Hamburgo, Alemanha.

[72] IKL - "Novel Propulsion Systems: Development and Design", Ingenieurkontor Lübeck, Lübeck, Alemanha.

[73] CRITELLI, D. et alii - "Closed Gas Turbine Engines for Future Marine Propulsion", Marine Technology, julho de 1976, SNAME, New York, EUA.

[74] DREWS, J. - "Advanced Technologies in Energy Storage for Submarine Propulsion", XI Congresso Panamericano de Ingeniería Naval, 1988, Santiago, Chile.

[75] JACOBI, W. - "Electrochemical Systems for Energy Storage in Modern Submarines", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.

[76] SOUZA, Zulcy - "Ciclo Stirling", cap. 3.6.5 de "Elementos de Máquinas Térmicas", Editora Campus EFEI, 1980, Rio de Janeiro, Brasil.

[77] WILLIAMS, K.R. - "An Introduction to Fuel Cells", Elsevier Publishing Co., 1966, EUA.

[78] ALDHART, O. - "Fuel Cells", cap. 5 de "Energy Technology Handbook", McGraw-Hill Book Co., 1977, EUA.

[79] DANIELS, F. - "Small Gas Cycle Reactor Offers Economic Promises", Nucleonics, março de 1956, EUA.

[80] MASON, David - "Submarinos Alemães : a Arma Oculta", Editora Renes Ltda, 1975, Rio de Janeiro, Brasil.

- [81] BELLOT, M. - "A Guerra Aeronaval no Atlântico", Editora Record, 1970, São Paulo, Brasil.
- [82] BELLOT, M. - "A Guerra Aeronaval no Pacífico", Editora Record, 1970, São Paulo, Brasil.
- [83] BELLOT, M. - "A Guerra Aeronaval no Mediterrâneo", Editora Record, 1970, São Paulo, Brasil.
- [84] WALDRON, Tom e GLEESON, James - "Mini-Submarinos", Editora Renes Ltd., 1975, Rio de Janeiro, Brasil.
- [85] BYRON, John L. - "A New Target for the Submarine Force", U.S. Naval Institute Proceedings, Janeiro de 1990, EUA.
- [86] WROBEL, P.G. - "Design of the Type 2400 Patrol Class Submarine", RINA Transactions, 1984, Londres, Grã-Bretanha.
- [87] WALSH, Don - "Is It Time for the SSN?", Sea Power, abril de 1989.
- [88] KENDRICK, A. - "Propulsion Engines for Small Submarines: A Canadian Perspective", The Canadian Institute of Marine Engineering 11th MARI-TECH Technical Conference, 7-9 de Junho de 1989, St. John's Newfoundland, Canada.
- [89] ALLMENDINGER, E.E. - "Submarine Vehicle Systems Design", SNAME, 1990, New York, EUA.
- [90] PAIVA, Pedro G. - "Comunicações com Submarinos - Tecnologia Atual", Revista Marítima Brasileira, vol 108 no 10/12, out/dez 1988, Serviço Geral de Documentação da Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.
- [91] DUBBEL - "Manual de Construção de Máquinas", Hemus Editora Ltda., 1979, São Paulo, Brasil.
- [92] JOST, V. M. W. - "Exhaust Gas Turbocharged Submarine Engines", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [93] PERROTA, José A. - "Engenharia do Núcleo de Reatores", Apostila do Curso de Introdução à Energia Nuclear, IPEN/CNEN, 1990, São Paulo, Brasil.
- [94] LAMBERT, John e HILL, David - "The Submarine Alliance", Conway Maritime Press, 1986, Londres, Grã-Bretanha.
- [95] MILLER, David - "Modern Sub-Hunters", Arco Publishing Inc., 1984, New York, EUA.
- [96] ARNOLD, J. e LIPPENS, J. M. - "The Balance Between Sensor and Weapon Capability", Underwater Defence

- Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [197] SIEMENS - "Propulsion Systems for Submarines: Changes and Progress", Naval Forces no V vol X, 1989.
- [198] ROBINS, A.J. - "Throughflow Calculation for a Ducts Propulsor Operating in a Thick Boundary Layer", RINA Conference on New Developments in Warship Propulsion, 14-15 de novembro de 1989, Londres, Grã-Bretanha.
- [199] HARVIE, J. - "Construction of an Axial-Flow Pumpjet Propulsion Unit", Marine Technology, julho de 1966, SNAME, New York, EUA.
- [100] VAN GUNSTEREN, L.A. - "Ring Propellers and their Combination with a Stator", Marine Technology, outubro de 1970, SNAME, New York, EUA.
- [101] SAINT-MICHEL, J. - "Propulsion by Electronic Motor", EPE Conference Proceedings, 1989, Aachen, Alemanha.
- [102] PILLAY, Pragasam e KRISHNAN, R. - "Modelling of Permanent Magnet Motor Drives", IEEE Transactions on Industrial Electronics, novembro de 1988.
- [103] NEROWSKI, G. e PIEPENBREIER, B. - "A New Generation of Submarine Propeller Motors with PM Excitation and Integrated Inverters", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [104] SOYK, K-H., "PM Excitation Motor for Submarine Application", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [105] BRUTSAERT, P. - "Optimization of Submarine Electric Propulsion", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [106] USP, "FDTE e Marinha Desenvolvem Motor para Submarino", Jornal do Campus, outubro 1990, São Paulo, Brasil.
- [107] HENSLEER, J. e STOREY, R. - "Cycloconverter Controlled Variable Speed Alternating Current Propulsion for Warships", RINA Conference on New Developments in Warship Propulsion, 14-15 de novembro de 1989, Londres, Grã-Bretanha.
- [108] KASTNER, A. et alii - "Frigate Electric Cruise Propulsion and Ship's Service Power from Common Distribution Network", SNAME Transactions, 1982, New York, EUA.



- [109] HARVEY, L.M. e FULMER, R.D. - "A New Concept of Electric Ship Propulsion", Marine Technology, abril de 1968, SNAME, New York, EUA.
- [110] GREENE, David L. - "Superconducting Electrical Machines for Ship Propulsion", Marine Technology, abril de 1971, SNAME, New York, EUA.
- [111] DURAGH, R.A. - "Magnetohydrodynamic Ship Propulsion Using Superconducting Magnets", SNAME Transactions, 1968, New York, EUA.
- [112] HAMNER, Michael S. - "A Submarine Electric Propulsion System with Large Hub Propeller", dissertação de mestrado em Engenharia Naval, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, EUA.
- [113] VALAURI, M. - "Problemi di Impiego di Reattori ad Acqua nella Propulsione Navale Nucleare", Simposio Internazionale Progetti ed Esperienze nel Settore della Propulsione Nucleare Navale, Milano, 1962.
- [114] ADAMS, V. M. - "Possible Propulsion Systems", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1988, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [115] ENGELHARDT, John J. - "Soviet Sub Design Philosophy", U.S. Naval Institute Proceedings, outubro 1987.
- [116] HAMILTON, W.H. - "Power and Temperature Control of Pressurized Water Cooled Reactors", American Institute of Electrical Engineers' Congress on Nuclear Engineering and Science, Pittsburgh, USA, 1965.
- [117] ABELS, F. e Niessen, E. - "The Pressure Tight Bulkhead in the Submarine", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Grã-Bretanha.
- [118] LE TALLEC, T. - "Submarine Architecture and Silence", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1990, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [119] COSSON, P.H. e RICHEBÉ, M.B. - "Safety Diving and Ship Silencing", RINA Symposium on Naval Submarines, 13-14-15 Maio 1991, Londres, Grã-Bretanha.
- [120] MOERMAN, R. - "Integrated Platform Management on Walrus-Class Submarines", RINA Symposium on Naval Submarines, 13-14-15 Maio 1991, Londres, Grã-Bretanha.
- [121] HAXTON, R.S. - "Predicting the Shock Response of Submarine Platforms", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1990, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent,

- [122] VERDEAU, J.J. e BAUJAT, J. - "Presentation Generale des Chaufferies Nucleaires de Propulsion Navale CAS: Options Specifiques de Surete", Symposium sur la Surete des Navires Nucleaires Compte Rendu, 5-9 dezembro 1977, Hamburgo, Alemanha.
- [123] BENVENISTE, E.R. - "Le Combustible a Plaque dit Caramel", Symposium sur la Surete des Navires Nucleaires Compte Rendu, 5-9 dezembro 1977, Hamburgo, Alemanha.
- [124] BATTLE, N. e KILLINGLEY, R.V. - "The Influence of Safety and Licensing Requirements on the Selection of a Reactor Plant for an Icebreaker", Symposium sur la Surete des Navires Nucleaires Compte Rendu, 5-9 dezembro 1977, Hamburgo, Alemanha.
- [125] GENCO, M., CINOITI, L. e ADINOLFI, R. - "Passive Features and Components for the Next Generation Nuclear Power Plants", 2nd International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 21-23 de agosto de 1989.
- [126] CONSIDINE, D.M. - "Energy Technology Handbook Cap 9, Magnetohydrodynamic Generators and Thermionic Converters", McGraw-Hill Co., EUA, 1977.
- [127] ROSA DA SILVA, J.E. - "Comparação do Desempenho do Dioxido de Urânio Sintetizado sob a Forma Plana e Cilindrica para Reatores a Agua Pressurizada", dissertação de mestrado, IPEN, São Paulo, 1989.
- [128] MARTINEZ, M.A.B. - "O Projeto do Casco Cilindrico de Submersiveis", tese de livre-docência, EPU SP, 1987.
- [129] JACOBI, W. e DREWS, J. - "Electrochemical Systems for Energy Storage in Modern Submarines", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [130] ADAMS, C. e WITHEY, W.R. - "Escape and Rescue from Royal Navy Submarines", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1988, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [131] POLMAR, N. - "The American Submarine, 1884-2014", U.S. Naval Institute Proceedings Naval Review 1984, EUA.
- [132] HARRISON, I.G. - "Practical Aspects of the Control of Machinery Noise", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1988, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.
- [133] KINNS, R. - "Active and Passive Control of Machinery Noise in Future Warships", Underwater Defence Technology



Conference Proceedings 1988, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[134] PEPPE, P.K. - "Acoustic Showdown for the SSNs", U.S. Naval Institute Proceedings, Julho 1987, EUA.

[135] ENGELKE, G. e RADTKE, D. - "An Integrated Ship Control and Monitoring System - a Man-Machine Interface for a New Type of German Submarine", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[136] EITER, H.S. - "Biological Aspects of Nuclear Propulsion", SNAME Transactions, 1961, EUA.

[137] HELLER, S.R. - "The Case Against the Pump for Control of Flooding of a Submarine", Naval Engineers Journal, fevereiro de 1972.

[138] HALL, K. et alii - "Material for Royal Navy Submarines", RINA Symposium on Naval Submarines, 17-20 Maio 1983, Londres, Gra-Bretanha.

[139] TANNER, D.R. - "The Evolution of Sonar Development", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[140] LATOUR, P. e TONIAZZI, C. - "Magnetic Detection: Detection for the Future?", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[141] BOY-MARCOTTE, J.L. et alii - "MESMA Low Noise Autonomous Underwater Energy Module", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[142] JONES, J.B. - "LAIS - The Future Submarine Battery", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1990, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[143] FAULKNER, D. e DAS, P.K. - "A New Risk Analysis Approach for Structural Design and Adequately Safe Operations of Submarines", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1990, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[144] ROBERTS, M.L. e SMITH, C.S. - "Design of Submarines Structures", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1988, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Gra-Bretanha.

[145] LONGWORTH, B.R. - "The Balance Between Sensor and Weapon Capability", Underwater Defence Technology Conference Proceedings 1991, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd., Kent, Grã-Bretanha.

[146] SÖDERQVIST, S. - "Submarine Noise Reduction", International Conference on Submarine Systems, 8-10 de maio de 1990, Estocolmo, Suécia.

[147] NOUGÉ, V. - "La Propulsion Navale Nucleaire", Cols Bleus Marine et Arsenaux, dezembro de 1990, Paris, França.

[148] EDMAN, Ulf - "Operational Requirements for Air Independent Propulsion in Swedish Submarines", International Conference on Submarine Systems, 8-10 de maio de 1990, Estocolmo, Suécia.

[149] THOMAS, H.M. - "A Probability Model for the Failure of Pressure Containing Parts", U.K. Conference on Reliability, Nottingham, 1977.

[150] SORKIN, G. et alii - "An Overview of Fatigue and Fracture for Design and Certification of Advanced High Performance Ships - Submarine Structure", Symposium on Fracture and Fatigue, School of Engineering and Applied Science, George Washington University, Washington, EUA, 3-5 de maio 1972.

[151] DAZHONG, W. et alii - "Chinese Nuclear Heating Test Reactor and Demonstrating Plant", 2nd International Seminar on Small and Medium Sized Nuclear Reactors Proceedings, 21-23 de agosto de 1989.

[152] OLIVA, A.F. - "The AMP5 1000: An Advanced Reactor Design for Marine Propulsion", 100 Annual Conference of the Canadian Nuclear Society Proceedings, Ottawa, Canada, junho de 1989.

[153] PESCE, Italo - "Submarinos de Propulsão Híbrida", Revista Segurança e Defesa nº 13, 1987, Rio de Janeiro, Brasil.

[154] GOSLING, R.J. - "The AMP5 1000 Nuclear-Hybrid Submarine Propulsion Plant", RINA Conference on New Developments in Warship Propulsion, 14-15 de novembro de 1989, Londres, Grã-Bretanha.

[155] FAJEAU, Maurice - "Petite Réacteur Nucleaire a Eau Pressurisée et a Circulation Naturelle", Demande de Brevet d'Invention nº 2599179, Institut National de la Propriété Industrielle, Paris, França, 1986.

[156] FULLER, G. H. - "Tactical Deterrence - Why How - What?", RINA SYMPOSIUM WARSHIP'90, Londres, Grã-Bretanha, 1990