

CONFIGURAÇÃO DE SISTEMAS DE COMBATE NO PROCESSO DE OBTENÇÃO E MODERNIZAÇÃO DE NAVIOS DE SUPERFÍCIE

Capitão-de-Mar-e-Guerra (EN) Antonio da Silva Castro Sobrinho

O Capitão-de-Mar-e-Guerra (EN) Antonio da Silva Castro Sobrinho é mestre em engenharia mecânica pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT) e exerceu a função de Gerente do projeto de modernização das Fragatas Classe "NITERÓI" e de integração da Corveta "BARROSO", na Diretoria de Sistema de Armas da Marinha. Serviu ainda como oficial da primeira tripulação do Centro de Projetos de Navios

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia para a seleção dos componentes de um sistema de combate de navios de superfície, com o objetivo de avaliar, ainda na fase de projeto, o desempenho do sistema. Inicialmente, são apresentados procedimentos para a seleção das armas e dos sensores, propondo-se modelos matemáticos adequados à simulação do funcionamento de cada um desses equipamentos isoladamente. Em seguida, aborda-se a definição da arquitetura do Sistema de Controle Tático e de Armas (SICONTA¹) e descreve-se as etapas necessárias à sua avaliação sistêmica, integrado com as armas e sensores. A última etapa compreende uma análise do desempenho do sistema em um combate simulado contra uma ameaça aérea, descrevendo-se cada um dos eventos, desde a detecção até a avaliação da probabilidade de destruição da ameaça ao final da seqüência de engajamento.

Palavras-chaves: Sistema de Combate; e Probabilidade de Destruição

ABSTRACT

This work proposes a methodology to the selection of components for a combat system of surface ships. Its objective is to evaluate, still in the project phase, the performance of the system. Initially, proceedings are presented for

¹ O termo SICONTA foi utilizado pela primeira vez no projeto de modernização do NAeL "MINAS GERAIS" para denominar apenas o Sistema de Controle Tático, ou seja, sem o Controle de Armas. No projeto Modfrag, o termo SICONTA passou a significar Sistema de Controle Tático e de Armas.

the selection of the weapons and sensors, proposing mathematical models to the appropriate simulation of the functioning of each one of these equipments in a stand-alone mode. Next, it is discussed the definition of the architecture of the Tactic Control and Weapons System (SICONTA) and described the necessary stages to its systemic evaluation, integrated with the weapons and sensors. The last stage contains an analysis of the system performance in a simulated combat against an air threat, where it is described each one of the events, from the detection up to the assessment of the kill probability of the threat at the end of the engagement sequence.

Key words: Combat System; And Kill Probability

INTRODUÇÃO

A obtenção, ou modernização de um navio, é um projeto que envolve atividades relacionadas com a plataforma e com o sistema de combate. Essa divisão refere-se a separação que historicamente existe entre os sistemas de propulsão, de governo, de geração e distribuição de energia, de ar-condicionado, de controle de avarias, etc., tradicionalmente reunidos no grupo “plataforma”; e aqueles relacionados com a configuração do sistema de combate do navio. Esse último envolve uma complexidade maior de funções de comando, necessárias à implementação da própria capacidade de combate do navio.

O resultado prático dessa separação tem sido apontado por alguns autores como uma simplificação dos processos de seleção das armas e sensores durante a execução da atividade de configuração dos sistemas de combate, diferentemente do que ocorre com os demais sistemas componentes da plataforma do navio de superfície (ARTHOU, 1997, p. 39). Essa simplificação tem limitado a seleção dos equipamentos do sistema de combate a informações qualitativas.

Por outro lado, os combates nos cenários atuais da guerra naval ocorrem em alta velocidade e demandam o automatismo e integração das ações de detecção, de designação do alvo e de engajamento das ameaças. O número elevado de informações disponibilizadas pelo sistema de combate, ainda são motivo de discussões acerca da necessidade de aumentar a Inteligência Artificial dos Sistemas Digitais Operativos, de modo a que esses sejam “*attuned to the human decision making process*”², conforme afirma Zimm (1999, p. 31). O caso da fragata americana *Stark*, atingida por um míssil *Exocet* em 1986 e o incidente com o *USS Vincennes*, em 03 de julho de 1988 no Golfo Pérsico, que abateu o avião comercial iraniano (vôo IR655) com um míssil *Standard SM-2*, ainda são

² Tradução do autor: “sintonizá-lo com o processo de tomada de decisão humana”.

casos que motivam os desenvolvimentos de funcionalidades adequadas para os SICONTA - parte integrante dos atuais sistemas de combate.

Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia de projeto em três partes distintas, mas que se interligam por meio de uma seqüência lógica. Inicialmente são discutidos os procedimentos de seleção das armas e dos sensores, que devem ter o seu desempenho tecnicamente analisado, com o auxílio de modelos matemáticos que simulem a operação em face às ameaças e cenários constantes dos Requisitos de Alto Nível de Sistemas (RANS) do navio. Em seguida, é abordada a arquitetura do SICONTA que integra a funcionalidade das armas e os sensores ao cenário tático de operação do navio. A última parte trata de uma proposta para a simulação do engajamento contra uma ameaça aérea, visando verificar o desempenho do sistema de combate ainda na sua fase de projeto.

A EVOLUÇÃO DO PROJETO DE SISTEMAS DE COMBATE NA MARINHA

A noção de sistema de combate é relativamente nova. Tradicionalmente, esse sistema tem sido associado apenas ao conjunto de armas e sensores que fazem parte da configuração do navio. No entanto, o sistema de combate é a razão precípua da existência dos navios de guerra, que utilizam todas as suas capacidades integradas para executar a missão de combater. Segundo Baker (1990), um navio de guerra divide-se em duas grandes partes: a plataforma e o sistema de combate, ou seja, *Navio de Guerra = Sistema de Combate + Plataforma*. Outros autores, como Gates (1987, p. 1), argumentam que um navio de guerra é o próprio sistema de combate e preferem conceituar o sistema pela expressão *Navio de Guerra = Sistema de Combate*.

Na Marinha do Brasil, o conceito que tem sido mais freqüentemente empregado é o primeiro, talvez motivado pela própria divisão de jurisdição dos equipamentos entre a Diretoria de Sistemas de Armas da Marinha, que trata das armas, sensores e SICONTA – o sistema de combate – e a Diretoria de Engenharia Naval, que é responsável pelos demais sistemas do navio, tais como o casco e a estrutura, a propulsão, o governo, o ar-condicionado, a geração e distribuição de energia elétrica, etc. – a plataforma.

As tecnologias de projeto e de construção naval, que produzem a plataforma dos navios de superfície, são de domínio da Marinha, desde o período colonial brasileiro (BARBOZA, 2005). A evolução das técnicas empregadas no projeto e construção da plataforma pelos estaleiros brasileiros acompanhou, com maior ou menor defasagem, os avanços tecnológicos ocorridos nos países que, tradicionalmente, sempre investiram intensamente no desenvolvimento de novas tecnologias, tais como os da comunidade européia e os Estados Unidos. O mesmo não pode ser dito a respeito do domínio tecnológico necessário ao

projeto e desenvolvimento de sistemas de combate dos navios da Marinha, mais especificamente, dos navios de superfície.

Os primeiros passos, na direção de capacitar a indústria nacional para a fabricação desses equipamentos, foram dados com o projeto de modernização do NAeL “MINAS GERAIS”. Seu patamar mais elevado, no entanto, foi atingido com o projeto de modernização das Fragatas Classe “NITERÓI” (Modfrag).

Antes desses projetos, a configuração dos sistemas de combate limitava-se a estudos comparativos de arranjos, nos quais as armas e sensores eram selecionados sem o uso de ferramentas de simulação. O Contra-Almirante (EN) Alan (ARTHOU, 1997, p. 39) já havia identificado esse fato como uma dificuldade do processo de obtenção:

Na MB, os Estudos de Exequibilidade se limitam a comparar diferentes arranjos de sistemas de armas para um determinado navio e são poucos os estudos que demonstram os efeitos de alterações em determinados sistemas de bordo, como é feito nos EUA e na Grã-Bretanha. Esses estudos permitem ao setor operativo, dentro de uma base factual, balancear os requisitos dos sistemas.

CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DAS ARMAS E SENSORES

O projeto Modfrag marcou o início do uso de ferramentas matemáticas de modelagem para simular as armas e os sensores de um navio de superfície. Durante a condução do projeto, foi dada ênfase à análise de desempenho do sistema de combate no engajamento de alvos aéreos, tendo em vista que os tempos envolvidos na cinemática do ataque são extremamente pequenos. Assim, no caso da defesa antiaérea do navio de superfície, o paradigma Modfrag indica critérios de seleção, os quais se aplicam desde os sensores táticos, tais como radares de vigilância e sonares, até as armas e sensores empregados no engajamento, incluindo os equipamentos do sistema de guerra eletrônica.

No processo de obtenção e de modernização de meios empregados pela MB, a execução dos Estudos de Exequibilidade (EE) é a fase em que é feita a seleção das armas, dos sensores e do SICONTA, por meio de estudos que variam em grau de complexidade, de acordo com a diversidade de tarefas e cenários especificados. Os estudos consistem em verificar quais as armas e sensores, disponíveis no mercado, capazes de engajar e destruir as ameaças esperadas durante a operação do navio.

Antes do projeto Modfrag, essa seleção ou era contratada em empresas estrangeiras, que forneciam um “pacote fechado” contendo todos os componentes do sistema de combate, ou simplesmente era executada com base em dados de

placa fornecidos pelos fabricantes. Em ambos os casos, a confiabilidade do resultado era comprometida.

Um outro ponto de destaque, em favor da utilização dessa metodologia de seleção, é a possibilidade de se dimensionar as armas e sensores no nível adequado, evitando-se também descontinuidades e setores cegos nas suas coberturas de emprego. Por outro lado, o conhecimento preciso das capacidades e do desempenho desses equipamentos permite que os sistemas, componentes do sistema de combate, sejam dimensionados de forma econômica, ou seja, sem utilizar armas e sensores extremamente sofisticados para fazer frente a ameaças que podem ser eficazmente combatidas com outras configurações mais simples.

Aqui cabe um comentário fundamental, que diferencia o projeto do sistema de combate na MB dos demais países detentores de capacidade de projeto e fabricação das armas e dos sensores que equipam os navios das suas esquadras. O Brasil se enquadra nos países que dominam o projeto sistêmico e a integração dos componentes do sistema de combate, mas possui capacidade muito limitada de fabricação das suas próprias armas e sensores. Assim, os equipamentos selecionados para os Estudos de Exequibilidade são aqueles de uso comum na MB, e que estão disponíveis no mercado internacional. Os países que dominam a tecnologia de produção desses componentes do sistema de combate estão menos sujeitos às limitações impostas pelo mercado de armamento, mesmo que parcialmente condicionados às linhas de fornecimentos tradicionais das empresas existentes nos seus parques industriais de defesa. Esses países podem projetar armas e sensores de modo a atender requisitos específicos dos sistemas de combate de novos navios.

Nos itens seguintes deste trabalho será abordada a modelagem de armas e sensores típicos desse sistema, de uso comum nos navios da MB, visando exemplificar a metodologia proposta para a sua seleção. As modelagens dos demais equipamentos do sistema de combate, tais como o Canhão, o Míssil Superfície-Superfície, o Sonar, o Sistema Autônomo de Defesa de Ponto (*Close-In Weapons System*), o Radar de Direção de Tiro, a Alça Optrônica, a Alça Óptica e o Sistema de Guerra Eletrônica, encontram-se descritas no trabalho de CASTRO SOBRINHO (2007), cujo processo de seleção é abordado com a mesma amplitude e profundidade deste texto.

RADAR DE VIGILÂNCIA

A modelagem desse sensor é fundamental para a avaliação de um sistema de combate, pois toda a seqüência de comandos e ações necessárias, tanto ao ataque como à defesa, ocorrem, na maioria dos casos, após a detecção de um contato pelo radar de vigilância. O tempo decorrido desde a detecção até o engajamento do alvo deve ser suficiente para permitir a reação do sistema de

combate como um todo, pois, caso contrário, a ameaça poderá atingir o navio antes que os sistemas de defesa possam neutralizá-la. Em suma, o radar deve ser capaz de detectar o contato o mais distante possível do navio.

Para que se possa avaliar o quão crítico é a capacidade de detecção radar de uma ameaça, basta avaliar o tempo que um navio terá para se defender do ataque de um míssil antinavio, tipo *sea-skimmer*, por exemplo. Tipicamente, essa ameaça desenvolve uma velocidade de ataque de 300 metros por segundo. Se for considerada a sua detecção a 30 quilômetros de distância (16,2 milhas náuticas), que já é uma performance muito otimista, o navio terá 100 segundos para identificá-lo, designá-lo ao sistema de direção de tiro e efetuar o engajamento.

A operação do radar também é um fenômeno estocástico, cuja probabilidade de detecção é inversamente proporcional à distância do alvo, além de ser afetada pelas condições de propagação atmosférica. Para a finalidade de analisar o desempenho de forma comparativa, dentro de um processo de seleção, assume-se que as condições de propagação são as mesmas para todos os equipamentos analisados. No entanto, é necessário simular o desempenho do equipamento em algumas condições de propagação adversas, para se verificar o desempenho dos radares em situações de interesse, relacionadas com as aplicações do navio.

Um dos instrumentos analíticos comumente empregados para modelar o desempenho de um radar é a sua curva de cobertura. A Figura 1 apresenta a curva de cobertura de um radar tipo, empregado para a detecção de um helicóptero parado, com seção-reta radar (*Radar Cross-Section* – RSC) de 2 metros quadrados. São consideradas duas antenas diferentes: uma para detecção primordialmente de alvos de superfície ($\text{sen}(x)/x$) e a outra para busca combinada ($\text{cosec}^2(x)$). A probabilidade de detecção adotada foi de 80%, para um estado do mar 4 na escala *Beaufort*. Essa curva foi obtida utilizando-se um “*Radar Evaluation Software*”, como citado por Macfadzaen (1992, p. 300). Este diagrama representa, à esquerda da curva de cada antena, a região com mais de 80% de probabilidade de detecção do radar.

A análise da curva de cobertura radar apresentada na Figura 1 confirma que a estimativa de alcance feita anteriormente para o exemplo de detecção de um míssil *sea-skimmer* é muito otimista, pois além da seção-reta radar desse tipo de míssil ser muito menor que a de um helicóptero (da ordem de 0,1 m²), a sua velocidade de aproximação elevada dificulta a confirmação do contato e abertura de um acompanhamento. Outro aspecto indicativo de que a detecção de um míssil antinavio só é possível a distâncias ainda menores é a probabilidade de 80% adotada para a construção dos diagramas da Figura 1. Se for utilizada uma probabilidade maior para garantir a detecção, os contornos dos diagramas serão mais próximos da origem do gráfico, o que representa uma distância ainda menor de detecção. É importante ressaltar que esta análise preliminar,

aqui apresentada, não considera outras limitações ao desempenho dos radares, tais como as condições de propagação atmosférica, ou a “zona de desvanecimento” formada próxima à superfície do mar, que torna a detecção intermitente para alvos aéreos em baixa altitude, como é o caso do míssil *sea-skimmer*.

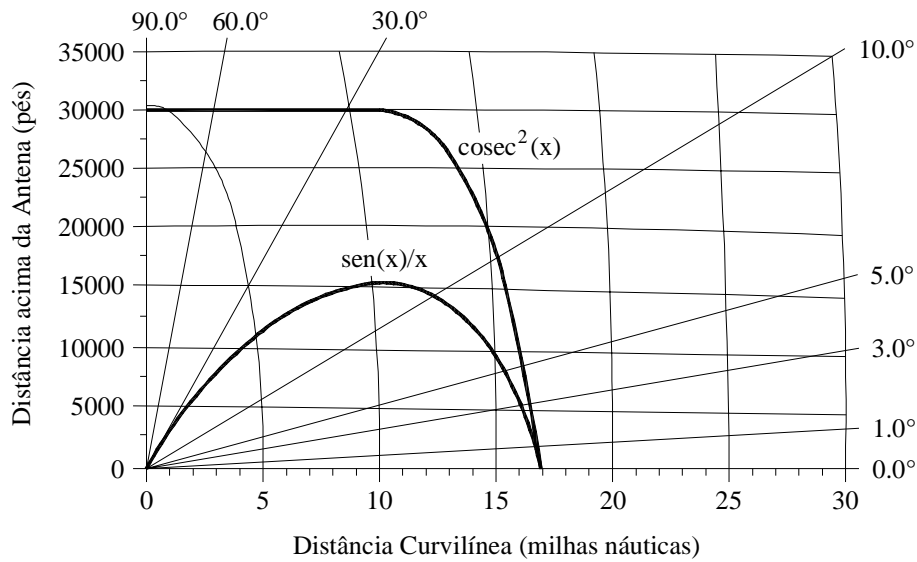


Figura 1 - Diagrama de cobertura radar típica para probabilidade de detecção de 80% de um helicóptero ($RCS = 2 \text{ m}^2$) parado sob mar 4 na escala Beaufort. Comparação entre as antenas $\text{cosec}^2(x)$ e $\text{sen}(x)/x$. (obtido com o programa “*Radar WorkStation* versão 2.2”).

Outro aspecto crítico na seleção do radar de vigilância, é a velocidade de rotação da sua antena. Tomando o mesmo exemplo supracitado sobre a detecção de um míssil *sea-skimmer*, a cada varredura de um radar que opere com 15 r.p.m. de velocidade angular máxima, o tempo para a busca, detecção, aquisição, abertura de acompanhamento, identificação e avaliação da destruição do alvo será de no mínimo 24 segundos, o que representa 24% do tempo total de reação (100 segundos). Para esta estimativa foi considerado que cada etapa requer um mínimo de uma varredura (4 segundos cada). Os radares empregados nos CIWS operam com 60 r.p.m., reduzindo esse tempo para 6 segundos.

MÍSSIL SUPERFÍCIE-AR (MSA)

Um míssil superfície-ar, ou míssil antiaéreo, é semelhante a um projétil dotado de guiagem autônoma (*autopilot*), disparado de canhão. A analogia com a munição de um canhão é possível, pois o míssil acelera até atingir velocidade

supersônica da ordem de grandeza de um projétil. Essa semelhança tem motivado a pesquisa para a produção de um projétil de canhão capaz de efetuar correções durante o vôo (*course-corrected ammunition*) e aumentar a probabilidade de destruição (acerto) dos canhões.

A guiagem autônoma que conduz o míssil até o alvo é a característica dessa arma que confere uma maior ou menor probabilidade de destruição durante o engajamento. Essa característica é implementada de várias maneiras, de acordo com o tipo do míssil, o qual pode ser classificado com base na localização do controle de guiagem, no tipo de irradiação do sensor de acompanhamento e no tipo de algoritmo empregado na guiagem.

Quanto à localização do controle de guiagem, os MSA dividem-se em dois grupos: os que são guiados da base de lançamento – o navio de superfície, neste caso – e os que são guiados localmente no próprio míssil. Os mísseis do segundo grupo são guiados pela irradiação proveniente do alvo. Essa irradiação permite ainda outra variação desse grupo, ou seja, os mísseis semi-ativos e os mísseis ativos e passivos. Os semi-ativos possuem a fonte de energia localizada no próprio navio, a qual “ilumina” o alvo, fazendo com que o sensor do míssil seja guiado pela energia refletida pelo alvo. Os outros mísseis efetuam suas guiasgens por meio de emissões ativas ou passivas, isso é, captam a energia refletida pelo alvo, proveniente de fonte localizada no míssil, ou seguem a energia gerada pelo alvo, respectivamente.

O tipo de energia captada pelo sensor permite que se classifique o míssil como eletroóptico ou eletromagnético, dependendo da faixa do espectro em questão. Do ponto de vista do tipo de algoritmo empregado na guiagem, os MSA podem ser de comando para a linha de visada ou, do termo em inglês, *Command to Line Of Sight* (CLOS), que manobra o míssil para mantê-lo na trajetória da linha que une o alvo ao sensor instalado no navio. O outro tipo de guiagem é a navegação proporcional, cujas correções durante o vôo são proporcionais ao ângulo de desvio do míssil em relação ao alvo, ou seja, do ângulo do *seeker* do míssil³, de modo que sua trajetória intercepta a trajetória do alvo num ponto futuro (GARNELL, 1977, p. 181-189).

Para a modelagem de um MSA, importa principalmente o tipo de algoritmo empregado na sua guiagem. Esse algoritmo terá influência na forma do diagrama de probabilidade de destruição do míssil, elaborado para o seu emprego contra um dado alvo.

O modelo matemático de um MSA descreve a sua guiagem por meio de uma função de transferência, que recebe como entrada a posição relativa do míssil em relação ao alvo e fornece como saídas os comandos para que as superfícies de controle aerodinâmicas do míssil corrijam a sua trajetória, de acordo com o tipo de navegação implementada, ou seja, CLOS ou proporcional

³ É o ângulo que o radar ou sensor infravermelho do míssil faz com o seu eixo axial de simetria.

(MACFADZEAN, 1992, p. 136 e 213). O primeiro resultado obtido da simulação com o modelo do míssil são as curvas cinemáticas de aceleração lateral constante, ilustrada na Figura 2. As curvas representam a máxima aceleração lateral (normal) que um míssil pode desenvolver, ou seja, a sua manobrabilidade.

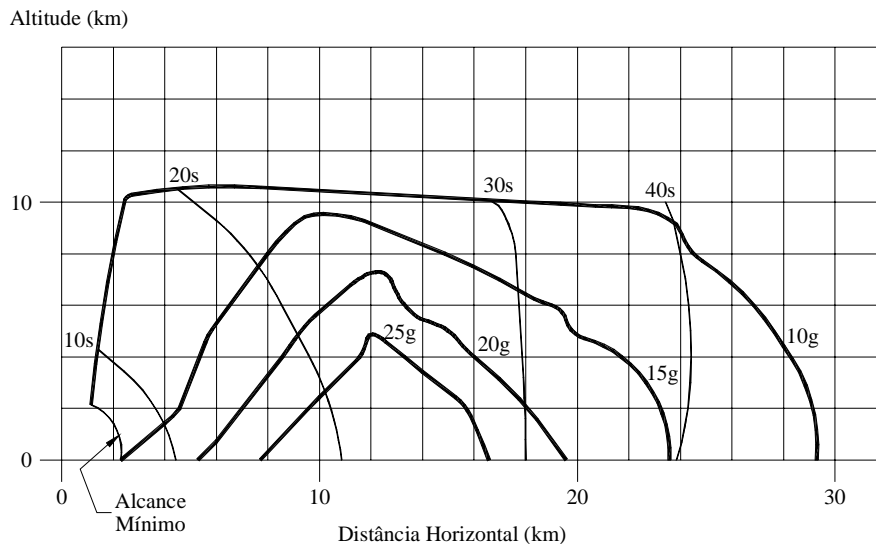


Figura 2 - Curvas cinemáticas de aceleração lateral (g = aceleração da gravidade) e de tempo de voo (s = segundos) constantes de um míssil antiaéreo, que atinge a velocidade supersônica de Mach 3,0 em 22,7 segundos (MACFADZEAN, 1992, p. 200-208).

O diagrama da probabilidade de destruição (*kill probability*) de um míssil é elaborado a partir da curva cinemática ilustrada na Figura 2, onde as curvas de probabilidade de destruição constantes são semelhantes às de g constante.

Além da manobrabilidade, que mantém uma relação direta com a distância de passagem míssil-alvo (*miss-distance*), é considerado também o modelo da espoleta de proximidade, que aumenta o raio de atuação da cabeça de combate do míssil, dentro de uma análise estocástica. Macfedzean (1992, p. 262) comenta que “[...] warhead characterization data is used in conjunction with the miss-distance distribution that results from the guidance and control functions to estimate kill probability.”

⁴ Tradução do autor: “[...] a informação de caracterização da cabeça de combate é utilizada em conjunção com a distribuição da distância de passagem, que resulta das funções de guiagem e controle, para estimar a probabilidade de destruição.”

O CONTRATO DE AQUISIÇÃO COMO GARANTIA DE DESEMPENHO

Todos os modelos e análises, propostos nesse trabalho, dependem do grau de confiabilidade das informações fornecidas pelos fabricantes das armas e sensores, considerados durante o processo de seleção.

Em alguns casos é possível avaliar a consistência desses dados, por meio dos próprios resultados obtidos nas simulações. Esse, aliás, é um dos objetivos de se empregar uma metodologia de análise. Entretanto, devido à impossibilidade de se confirmar muitas das informações fornecidas, por meio de simulações apenas, os dados declarados pelos fabricantes devem constar do contrato, para futura verificação durante os testes de fábrica, ou na avaliação operacional dos respectivos equipamentos (BAKER, 1990, p. 513)

SELEÇÃO DO SICONTA

O ponto de partida para a seleção das armas e dos sensores, que tem como objetivo a configuração do sistema de combate de um navio de superfície, são os Estudos de Exeqüibilidade (EE). A seleção do SICONTA é feita ainda na fase dos EE, a qual consiste em definir uma arquitetura integrada às armas e sensores, a fim de permitir que o navio execute adequadamente as suas tarefas, dentro dos cenários especificados nos RANS.

Entretanto, a metodologia utilizada para a análise de desempenho do SICONTA difere daquela proposta para a seleção das armas e sensores. Por se tratar de um Sistema Digital Operativo, desenvolvido para processar informações e executar comandos e controles em “tempo real”⁵, a sua simulação na fase de projeto consiste de três atividades básicas: elaboração do modelo funcional do sistema de combate; análise do fluxo de informações no SICONTA (tráfego na rede de dados); e simulação das interfaces.

A elaboração do modelo funcional do sistema de combate é feita a partir dos requisitos estabelecidos nos RANS do navio e consiste de um diagrama que tem origem nas funções de alto nível do sistema. Com o auxílio dessa representação gráfica, são detalhadas as funções executadas nos níveis inferiores, até atingir os níveis mais baixos que representam os recursos necessários à execução das tarefas do sistema, ou seja, equipamentos, software, pessoal, informações e itens logísticos, dentre outros (BLANCHARD, 1998, p. 62-64). Atualmente, existem *softwares* que auxiliam na elaboração do diagrama funcional do sistema, tais como o *System Architecture*.

⁵ Na maioria das definições, “tempo real” é descrito como uma característica de resposta rápida, compatível com as funções que um sistema deve desempenhar (ALLWORTH, 1981, p. 12).

O exercício de representar o sistema de combate por meio de um diagrama detalhado de níveis funcionais (*breakdown*), seguindo uma seqüência do mais alto nível para o mais baixo (*top-down*), é uma abordagem que auxilia na seleção da sua arquitetura, ainda na fase dos EE. Sistemas de combate que necessitem executar simultaneamente um elevado número de funções de alto nível, para uma quantidade elevada de ameaças, provavelmente serão mais bem projetados com uma arquitetura distribuída. Outros sistemas, idealizados para fazer frente a cenários de poucas ameaças, poderão ser configurados com uma arquitetura centralizada.

Outra atividade necessária à análise do desempenho de um sistema de combate é a simulação do fluxo de informações que trafegam no SICONTA, para a execução das suas funções. Mesmo após a definição do tipo de arquitetura a ser empregada no sistema, é necessário que o seu desempenho seja testado, a fim de se verificar a sua capacidade de processar, em “tempo real”, as funções essenciais de combate, tais como o engajamento de alvos, tanto em operações de ataque como de defesa do próprio navio. Além disso, o sistema deve ser capaz de executar funções auxiliares, tais como a distribuição dos sinais da giro, do anemômetro e do hodômetro, em um nível de prioridade compatível com a velocidade exigida para os processos essenciais do sistema.

A simulação do fluxo de informações na fase dos Estudos de Exequibilidade pode ser feita por estudos meramente teóricos da carga do sistema, ou pela comparação com outros sistemas de combate já em operação. Modelagens mais complexas chegam a empregar computadores e redes de dados com a mesma capacidade projetada para a arquitetura do SICONTA.

Ainda no mesmo contexto de avaliação de desempenho do sistema de combate durante a execução das suas funções essenciais e auxiliares, os Estudos de Exequibilidade devem analisar as interfaces que possibilitam a interconexão entre o SICONTA e as armas e sensores. Dependendo da importância do equipamento, a análise das suas interfaces pode variar de uma simples verificação teórica dos sinais, até um teste envolvendo simuladores que monitoram o tráfego de dados através das interfaces durante a operação.

ARQUITETURA DO SICONTA

A finalidade do SICONTA é executar automaticamente as funções que, antes do advento dos computadores digitais, eram desempenhadas pelos operadores. A compilação do quadro tático, a solução de problemas de navegação, a inicialização de acompanhamentos, o processamento das ações de engajamento, etc., passaram a ser funções implementadas pelos diversos sistemas que compõem o SICONTA (PAKENHAM, 1989, p. 96-103).

Nesse sentido, pode-se identificar dois tipos básicos de arquitetura para o SICONTA, que serão abordados neste capítulo para ilustrar os aspectos a serem considerados no projeto e no desenvolvimento desse sistema: a centralizada e a distribuída.

Pelo próprio curso histórico do desenvolvimento dos sistemas computacionais, a arquitetura centralizada foi a primeira a ser empregada no projeto de sistemas de combate. Basicamente, essa arquitetura é composta de uma unidade de processamento central, denominada de *mainframe*, por onde trafegam todas as informações e onde são processados todos os cálculos necessários à consecução das funções do sistema; e de unidades periféricas, que são usuários dessas informações.

Conforme ilustrado na Figura 3, a arquitetura centralizada demanda que toda carga do sistema trafegue através do computador central (Processador de Dados Central). Isso requer processamento de elevada performance para que a alta velocidade necessária à execução simultânea das funções de combate seja mantida, mesmo em situações de carga intensa do sistema, ou seja, durante a ocorrência de intenso fluxo de informações no computador central. Pakenham (1989, p. 101) comenta que *“the demand for such rapid response taxes even a computer’s ability, and the need to react within few seconds can pose a impossible task in a busy situation with several threats occurring simultaneously.”*⁶

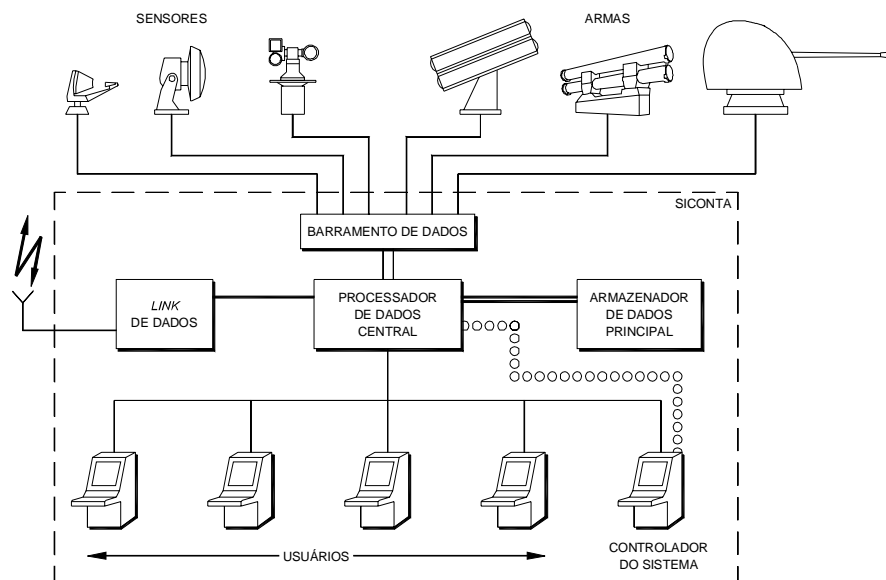


Figura 3 - Diagrama de um sistema de combate com arquitetura centralizada para o SICONTA (dados extraídos de PAKENHAM, 1989, p. 97).

⁶ “a demanda por respostas tão rápidas sobrecarrega até a capacidade de um computador e a necessidade de reação em poucos segundos pode atribuir uma tarefa impossível em uma condição de congestionamento, com várias ameaças ocorrendo simultaneamente.”

A arquitetura distribuída, ilustrada na Figura 4, é composta de vários computadores independentes, denominados Usuários, que compartilham a execução das funções do sistema. As unidades se comunicam por meio de uma Rede de Dados que permite a interligação entre o SICONTA, as armas e os sensores, com várias combinações simultâneas, ou seja, com a execução paralela de mais de uma função, independentemente do processamento de outras.

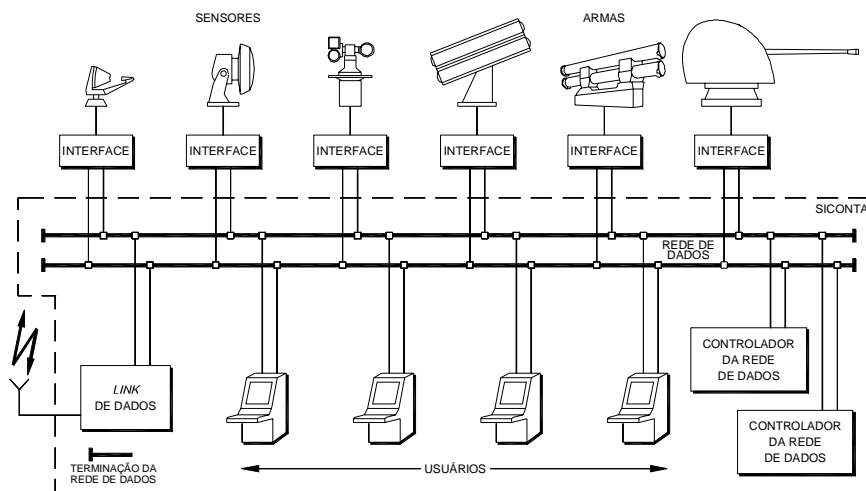


Figura 4 - Diagrama de um sistema de combate com arquitetura distribuída para o SICONTA (dados extraídos de PAKENHAM, 1989, p. 102 e BAKER, 1990, p. 493).

A arquitetura distribuída proporciona maior confiabilidade ao SICONTA, por permitir a reconfiguração do sistema na eventualidade da avaria de um dos seus computadores (Usuários da Figura 4), ou seja, o sistema pode continuar operando em modo degradado, o que não é normalmente possível na arquitetura centralizada (PAKENHAM, 1989, p. 103).

A operação no modo degradado, no entanto, não pode ser aplicada a todas as funções do sistema. O navio tem de ser capaz de manter certas capacidades de combate, mesmo em presença de avarias. De uma maneira geral, esse princípio de redundância deve ser aplicado às funções críticas do sistema, em consonância com os requisitos estabelecidos nos RANS.

ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE COMBATE

Macfadzean (1992, p. 289-290) propõe que a simulação do engajamento é o nível adequado para analisar o desempenho de um sistema de combate. Entendido como sendo o encontro entre o navio e uma ameaça, o processo de

engajamento envolve as funções fundamentais do sistema, que devem ser executadas em uma moldura temporal, compatível com a cinemática do ataque.

À semelhança do que foi discutido anteriormente, a simulação do engajamento é realizada com o auxílio de um modelo matemático que possibilita avaliar o desempenho do sistema de combate, dentro de um cenário preestabelecido. No entanto, são necessários mais de um modelo para descrever todas as fases do engajamento, alguns de caráter determinístico, como o modelo de guiagem de um míssil em vôo; e outros estocásticos, como o modelo de disparo de um canhão.

SIMULAÇÃO DO COMBATE

As macrofunções de um sistema de combate, que são executadas durante o enfrentamento de uma ameaça, consistem da detecção, da designação do alvo para um dos sistemas de armas (*Target Indication* - TI) e do engajamento. Na última fase dessa seqüência, o sistema seleciona a arma e o sensor, efetua o disparo contra o alvo e avalia a destruição da ameaça.

A Figura 5 ilustra a defesa de ponto de um navio de superfície contra uma ameaça aérea, exemplificada por um avião armado com bomba. A seqüência de combate é representada por etapas numeradas de (1) a (12), na qual é empregado um míssil antiaéreo como arma durante o engajamento.

A simulação da seqüência inicia com a busca (1). O instante em que a ameaça atinge a distância máxima de detecção é usado como o marco de início da contagem do tempo de aproximação do avião, que irá determinar a sua posição em cada etapa do combate.

Em seguida ocorre a detecção (2) da ameaça pelo radar de busca. Além do diagrama de cobertura do radar ilustrado na Figura 1, é necessário estabelecer o valor mínimo da probabilidade de aquisição a partir do qual será considerado o estabelecimento de um contato válido, ou seja, da aquisição (3) do alvo. Esse evento envolve um número mínimo de varreduras do radar (detecções) antes que ocorra a aquisição, pois o diagrama de cobertura do radar é geralmente calculado para uma única varredura. Como cada detecção é um evento estocástico independente, a probabilidade de aquisição após 3 varreduras, por exemplo, é obtida pela expressão $P_{(N \text{ varreduras})} = 1 - (1 - P_{(1 \text{ varredura})})^N$, para $N=3$. Como exemplo, para 80% de probabilidade de detecção em 1 varredura, a probabilidade de aquisição, após 3 varreduras, será de 99,2%.

As etapas de inicialização de um acompanhamento (4), identificação (5) e designação do alvo (6), são modeladas em termos de tempo gasto para a execução de cada uma delas, independentemente de serem executadas manualmente ou automaticamente pelo sistema. Esses tempos irão afetar a distância na qual o alvo será destruído e, conseqüentemente, na avaliação do

desempenho do sistema durante o combate. O mesmo ocorre com a etapa de designação da arma/sensor (7) que dará início à seqüência de engajamento.

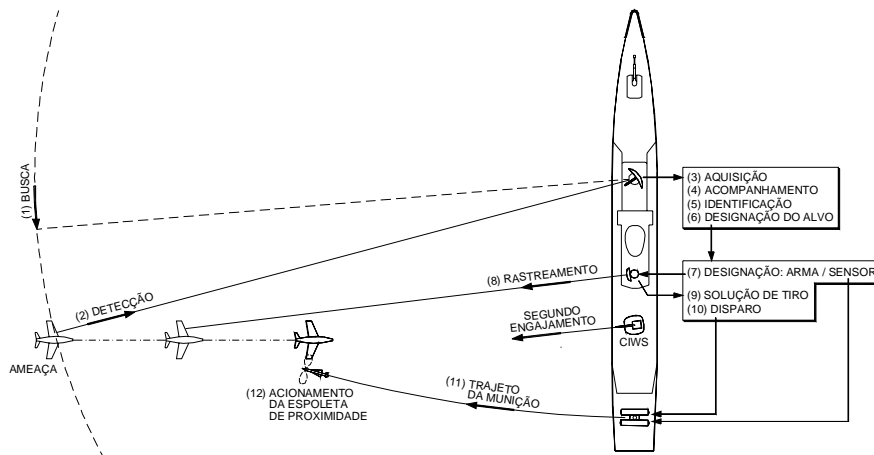


Figura 5 - Processo de combate contra uma ameaça aérea. Fase de detecção: busca, detecção, aquisição, acompanhamento e identificação. Fase de designação do alvo. Fase de engajamento: designação da arma e sensor, rastreamento, solução de tiro, disparo, trajeto da munição e acionamento da espoleta de proximidade (dados extraídos de GATES, 1987, p. 24-28 e de MACFADZEAN, 1992, p. 298).

Durante o rastreamento (8), ou *tracking*, devem ser contabilizados os intervalos de tempo necessários para a execução dos eventos manuais e/ou automáticos de operação do sensor. Essa etapa introduz uma nova variável na simulação do combate: a precisão do rastreamento, que será utilizado para o cálculo da *miss-distance* (distância de passagem míssil-alvo), caso o míssil empregado seja do tipo CLOS.

Na seqüência, o sistema calcula a solução de tiro (9), em função dos dados recebidos continuamente do sensor de rastreamento. No modelo matemático adotado para a simulação do combate, o algoritmo usado na predição do ponto futuro do alvo deve ser implementado de acordo com as características da arma empregada no engajamento.

O disparo (10) encerra a simulação dos eventos que envolvem os sistemas instalados a bordo. O tempo despendido para a solução de tiro, até o instante em que é executado o disparo efetivo da arma, deve ser computado para o cálculo da posição do alvo no início da etapa seguinte do combate, ou seja, do trajeto da munição.

Durante a simulação do trajeto da munição (11) devem ser utilizados modelos específicos para cada tipo de munição. Sobre esse aspecto, cabe observar que o tratamento matemático para o projétil de um canhão, por

exemplo, é consideravelmente diferente daquele empregado para um míssil, cuja trajetória é corrigida pelo seu sistema de guiagem.

Uma vez obtida a posição do míssil em relação ao alvo, no ponto de passagem (*miss-distance*), é realizada a verificação para o acionamento da espoleta de proximidade (12), que irá detonar a cabeça de combate do míssil, caso a distância de passagem seja menor que a distância máxima de sensibilidade da espoleta de proximidade. Aplica-se então o modelo de espalhamento dos fragmentos da cabeça de combate do míssil e calcula-se a probabilidade de destruição do alvo.

Após a avaliação da destruição do alvo, o modelo poderá ainda incluir um segundo engajamento, a ser realizado com a mesma arma, ou com outra mais apropriada ao engajamento a distâncias mais próximas do navio, como o CIWS ilustrado na Figura 5, ou outro canhão de baixo calibre.

MEDIDA DE DESEMPENHO

Ao se estabelecer os requisitos de um navio, tem-se em mente a execução de tarefas que deverão ser desempenhadas em cenários reais de operação. Como nas fases que se sucedem, até o comissionamento, não haverá oportunidade de se realizar ensaios de funcionamento dos sistemas, para que sejam efetuadas verificações intermediárias, é indispensável que uma medida de desempenho seja empregada, de modo a permitir alterações nos requisitos antes mesmo do início da fase de detalhamento do projeto do navio. Uma medida que pode ser utilizada para esse fim é a própria probabilidade de destruição das ameaças. Essa medida deve ser calculada por meio de simulações de combate.

CONCLUSÃO

A primeira fase do processo de obtenção e modernização de navios na MB consiste na elaboração dos Estudos de Exequibilidade, cujo objetivo é propor configurações que atendam às funcionalidades estabelecidas para o navio através dos RANS. Os resultados dos EE são utilizados para validar os requisitos, ou subsidiar alterações visando torná-los exequíveis. Por isso, é indispensável que sejam utilizados modelos matemáticos para simular a operação dos sistemas na execução das suas tarefas, especialmente no combate às ameaças previstas para os cenários onde o navio irá operar.

Enquanto as tecnologias de construção naval são de domínio da Marinha desde o período colonial brasileiro (BARBOZA, 2005), o uso de mísseis antiaéreo só foi introduzido na MB a partir da década de 70, com a aquisição das Fragatas Classe “NITERÓI”. O mesmo pode se dizer a respeito do emprego de sistemas de combate baseados em Sistemas Digitais Operativos.

O primeiro empreendimento que empregou procedimentos de modelagem matemática e simulações, para avaliar o desempenho do sistema de combate, foi o projeto Modfrag. Procedimentos semelhantes foram utilizados durante a execução do projeto do Navio-Patrolha Oceânico, porém em escala menor, pois a configuração das armas e sensores era mais simples do que a existente no sistema de combate do projeto Modfrag.

Essa foi a principal motivação para elaborar o presente trabalho, no qual é proposta uma metodologia de configuração dos sistemas de combate, a ser empregada durante o processo de obtenção e modernização de navios de superfície, mais especificamente na condução dos EE.

A metodologia proposta divide-se em três fases concatenadas. Inicia-se com a seleção das armas e sensores por meio da simulação do desempenho de cada um desses equipamentos individualmente, ou seja, operando *stand-alone*. Esse procedimento é construído sobre modelos matemáticos das armas e sensores associados a análises qualitativas das suas características técnicas.

Na segunda fase, são estudadas as características das arquiteturas adotadas para o SICONTA que, uma vez integrado às armas e aos sensores, constituirá a configuração do sistema de combate do navio.

Ao final da conclusão das duas primeiras fases, são obtidas configurações possíveis para o sistema de combate, teoricamente capazes de atender aos requisitos estabelecidos nos RANS. Entretanto, ainda faz-se mister verificar o desempenho das armas e sensores, integrados ao SICONTA, durante o combate às ameaças previstas para os cenários de operação do navio. Isso é realizado na última fase da metodologia proposta, com a simulação das várias etapas do engajamento contra um alvo aéreo, dentro de uma moldura temporal. Desse modo, é possível obter uma medida de desempenho para o sistema, expressa em termos de probabilidade de destruição de uma ameaça representativa.

A metodologia proposta neste trabalho tem como objetivo principal antecipar problemas e deficiências ainda na fase de projeto do sistema de combate, que, a princípio, só são identificadas durante a fase de avaliação operacional do navio.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALLWORTH, S. T. **Introduction to Real-Time Software Design**. New York: Springer-Verlag New York Inc., 1981.
2. ARTHOU, Contra-Almirante (EN), Alan Paes Leme. **O Futuro do Projeto e da Construção de Navios de Guerra no País**. 1997. 53 f. Monografia (Curso de Política e Estratégia Marítimas)– Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 1997.
3. BARBOZA, Contra-Almirante (EN-RM1), Tiudorico Leite. Ciência, Tecnologia e Inovação na Marinha do Brasil: Origem e Evolução; Crítica e Proposta de Reformulação. **Revista Marítima Brasileira**, Rio de Janeiro, v.125, n.10/12, p. 59-80, out./dez. 2005.
4. BAKER, Lionel. Combat System Design Developments. **Journal of Naval Engineering**. U.K., v. 32(3), p. 458-515, 1990.
5. BLANCHARD, B. S. and Fabrycky, W. J. **Systems Engineering Analysis**. 3rd edition. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1998.
6. CASTRO SOBRINHO, Capitão-de-Mar-e-Guerra (EN), Antonio da Silva. **Configuração de Sistemas de Combate no Processo de Obtenção e Modernização de Navios de Superfície**. 2007. 58 f. Monografia (Curso de Política e Estratégia Marítimas) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, 2007.
7. FRIEDEN, D. R. **Principles of naval Weapons Systems**. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press, 1985.
8. GARNELL, P. e East, D. J. **Guided Weapon Control Systems**. Oxford: Pergamon Press, 1977.
9. GATES, P. J. **Surface Warships – an Introduction to Design Principles**. Brassey's Sea Power: Naval Vessels, Weapons Systems and Technology Series, v. 4. London: Brassey's Defence Publishers, 1987.
10. MACFADZEAN, R. H. M. **Surface-Based Air Defense System Analysis**. Norwood, MA: Artech House, 1992.

11. PAKENHAM, Captain W.T.T. **Naval Command and Control. Brassey's Sea Power**: Naval Vessels, Weapons Systems and Technology Series, v. 8. London: Brassey's Defence Publishers, 1989.
12. ZIMM, Commander Alan D., U.S. Navy. Human-Centric Warfare (Winner of the Arleigh Burke Essay Contest). **The U.S. Naval Institute Proceedings**, Annapolis, MD, v. 125/5/1,155, p. 28-31, may 1999.