



SPOLM 2007

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 08 e 09 novembro de 2007.

## O USO DA SIMULAÇÃO NA AVALIAÇÃO OPERACIONAL DA DEFESA ANTIAÉREA DE UM NAVIO DE GUERRA – SEGUNDA FASE

**Maurício José Machado Guedes, MSc**

Centro de Análises de Sistemas Navais, Marinha do Brasil

Pça. Br. de Ladário, s/nº, Ilha das Cobras, Ed.8, 3º andar, Centro, Rio de Janeiro, RJ, 20090-030

[mguedes@casnav.mar.mil.br](mailto:mguedes@casnav.mar.mil.br)

### Resumo

Este artigo apresenta os resultados da segunda fase de uma simulação de Monte Carlo com o objetivo de obter as linhas de ação que maximizem a Probabilidade de Sobrevivência do Navio ( $P_s$ ) em cada cenário. A primeira fase consistiu na modelagem do problema e o conseqüente levantamento dos parâmetros necessários à simulação. Após uma primeira quantificação dos parâmetros necessários para o cálculo de  $P_s$ , obtidos a partir de um processo de Avaliação Operacional (AO) do navio, a simulação é conduzida. Como resultado desta segunda fase, uma análise de sensibilidade indicará onde devem ser empregados recursos para maior precisão na quantificação dos parâmetros e indicará também quais setores de penetração do incursor são mais críticos, permitindo iniciar estudos para desenvolver procedimentos (táticas) para maximizar  $P_s$ . Os valores utilizados aqui são fictícios, já que os valores reais são confidenciais.

*Palavras-chave: Modelagem, Simulação, Avaliação Operacional.*

### Abstract

This article presents the second step of a Monte Carlo simulation to obtain the courses of action that maximize the Ship Survivability Probability ( $P_s$ ) for each scenario. The first step has identified the parameters that quantify the ship air defence system performance, and the relevance of each parameter in that evaluation. Following an initial parameter quantification, carried out by an Operational Test&Evaluation (OT&E) process, the simulation is performed. The second step is going to come up with the sectors that are more difficult to defend and a sensibility analysis is going to show where the resources should be applied in order to improve the precision of the selected parameters. The knowledge of critical sectors is going to trigger studies to develop courses of action to improve  $P_s$  in order to meet the threats.

*Keywords: Modeling, Simulation, Operational Test&Evaluation.*

### 1 – INTRODUÇÃO

Este artigo é uma continuação do estudo para a obtenção de  $P_s$ , a probabilidade de um navio em sobreviver a um ataque de mísseis. A primeira fase [Guedes (2006)] levantou as necessidades de obtenção dos parâmetros para o cálculo de  $P_s$ , que é a Medida de Eficácia Operacional (MEO) principal a ser determinada. Agora, com os parâmetros já parcialmente quantificados, a segunda fase consiste em determinar  $P_s$  para cenários de 1 a 6 incursores e diversos setores de aproximação, importantes já que os sensores e o armamento têm arcos cegos.

A determinação do valor de  $P_s$  é de suma importância para o planejamento de ações navais e para o processo de tomada de decisões e é determinada por um processo de Avaliação Operacional (AO). Como os meios navais são limitados, é importante saber se um navio pode fazer frente sozinho às ameaças presentes no cenário de atuação. Com a crescente complexidade dos sistemas que compõem os meios da Marinha do Brasil (MB), a AO de um navio tornou-se uma tarefa cada vez mais dispendiosa, exigindo cada vez mais o auxílio das ferramentas da Pesquisa Operacional (PO) [MB (2004)].

A AO difere de um processo de aceitação de equipamento por ter uma abordagem sistêmica. Enquanto a aceitação se limita a verificar a aderência do funcionamento de um equipamento às especificações, a AO verifica os vários equipamentos que são necessários para a consecução de uma tarefa, visando otimizar o seu emprego, em condições as mais reais possíveis de operação. Isto é, o foco de uma AO é a missão, que fornecerá os cenários de utilização do navio. O cenário é a descrição imaginária que será utilizada para simular um ambiente real de operação do navio. Na construção do cenário são criadas linhas de ação, que são procedimentos a serem seguidos para cumprir a missão. A partir das linhas de ação são construídos os modelos de emprego, que serão o guia para as simulações que obterão as informações necessárias a respeito das características do sistema e seu desempenho operacional [Braga (1979)]. As simulações a serem conduzidas são digitais ou analógicas, que servirão para aumentar o conhecimento sobre os desdobramentos de uma linha de ação, e quase reais, utilizando o próprio equipamento no mar e o apoio necessário. O termo quase real é porque “tudo que não seja a guerra é simulação” [PEO STRI, 2006]. Os modelos de emprego, chamados de táticas, são estudados visando sua otimização. Mas para isso é necessário a obtenção dos parâmetros de desempenho dos sistemas, não isoladamente, mas integrados entre si e com o elemento humano, no cumprimento de uma determinada missão.

## **2 – A DEFESA ANTIAÉREA DE UM NAVIO**

A defesa de um navio sozinho contra ameaças aéreas é um problema que envolve várias variáveis, que vão desde a detecção da ameaça até sua neutralização. Hoje em dia a maior ameaça são os mísseis “*sea-skimmer*”, lançados além do horizonte radar do navio, que voam muito baixo (<20m) e por isso de difícil detecção.

Os sistemas de defesa contra essa ameaça baseiam-se na automação para garantir um tempo de resposta que seja compatível com as distâncias de detecção e velocidade da ameaça. Como exemplo, um típico míssil anti-navio voa a 300m/s. O horizonte radar de um navio de porte médio é de 30 km, o que significa que, mesmo que o incursor seja prontamente detectado, apenas 100s estão disponíveis para reação. Por esse motivo, existem algoritmos que, a partir dos dados recebidos pelos sensores de bordo e de parâmetros previamente selecionados, priorizam as ameaças e designam as armas de acordo com a distância e o grau de ameaça do incursor. A determinação desses parâmetros impactará na eficiência do sistema e por isso é de crucial importância sua correta escolha para cada tipo de ameaça a ser enfrentada. Uma Avaliação Operacional deverá determinar o valor ótimo dos parâmetros para enfrentar cada ameaça ou uma combinação de ameaças.

Algumas firmas desenvolveram e vendem sistemas para o auxílio ao planejamento e desenvolvimento de táticas de defesa aérea, como por exemplo o SEAROADS da TNO Physics and Electronics Laboratory's [SEAROADS (2006)] e o SADM da BAE Systems [Chapman e Benke (2000)], mas esses sistemas são de pouca valia se os parâmetros de desempenho dos sistemas não são conhecidos, além de terem sido desenvolvidos com objetivos diferentes dos da MB. Foram também elaboradas abordagens mais gerais com o objetivo de explicitar melhor o problema da defesa antiaérea, inclusive sem apoio computacional [Hostbeck (1999)].

## **3 – CENÁRIO**

Será considerado um navio sozinho, sem alarme aéreo antecipado e, por isso, com limitada capacidade de esclarecimento. Nesse caso, a detecção só será possível após o incursor cruzar o horizonte radar (HR) do navio.

O navio modelado aqui tem três radares, um de busca aérea e dois de direção de tiro (DT). O radar de busca aérea não tem arco cego (região não coberta pelo radar devido à superestrutura do navio), e os radares DT têm um arco cego de 60° a ré de suas posições. Seus alcances são considerados como sendo o horizonte radar para um incursor em vôo rasante (altitude < 50 pés). O navio tem dois sistemas de defesa, um lançador de mísseis superfície-ar (MSA) na popa e dois canhões anti-aéreos, um em cada bordo. O navio pode manobrar para desmascarar os alvos se estiverem em arco cego. A decisão da guinada obedece a um algoritmo (ver figura 5) que tem por objetivo minimizar o tempo para o engajamento e maximizar  $P_s$ .

O cenário de ataque é o seguinte:

- a) Radar de busca do navio detecta incursor
- b) Navio identifica incursor como inimigo
- c) Radar de busca envia TI (indicação do alvo) para o radar DT
- d) Radar DT adquire e rastreia o alvo
- e) Navio engaja o incursor

O cenário mais simples é um navio atacado por um único incursor. Algum tempo após o incursor cruzar o HR, ele é detectado. Ele tem que ser identificado como inimigo e rastreado pelo radar de direção de tiro. Após um período de tempo, que pode ser relativamente longo se o navio precisar desmascarar o alvo, um MSA é lançado contra o incursor. Após o tempo previsto de interceptação, é necessária uma avaliação se o incursor foi destruído. Se não foi, é necessário lançar outro MSA ou, dependendo da distância, engajar o incursor com o canhão anti-aéreo.

A situação se torna mais complicada na presença de mais de um incursor. Como a guiagem do MSA é do tipo semi-ativa, o radar DT que está guiando o MSA só é liberado após a interceptação do alvo. Assim, outro incursor só poderá ser engajado com o radar DT restante. Assim, o tempo para o rastreamento será dependente se o incursor estiver no arco cego do radar DT restante. Se estiver, o navio terá de guinar, mas sem comprometer a ação em andamento contra o incursor já engajado.

A tática empregada na manobra do navio para o engajamento das ameaças impactará fortemente em  $P_s$ , pois os arcos cegos dos radares DT e do armamento anti-aéreo poderão implicar em manobras do navio para o desmascaramento do alvo.

A necessidade de engajar dois mísseis incursores fará com que o navio aumente a área de reflexão radar vista pelo incursor, já que a intersecção dos arcos livres dos radares DT força o navio a assumir uma atitude aproximadamente de través ao incursor. Uma consequência disso é que o navio vai aumentar sua área de reflexão radar para o incursor, aumentando assim sua probabilidade de acerto, já que a zona de intersecção dos arcos livres dos radares DT ocorre pelo través do navio.

## **4 – ELEMENTOS DA SIMULAÇÃO**

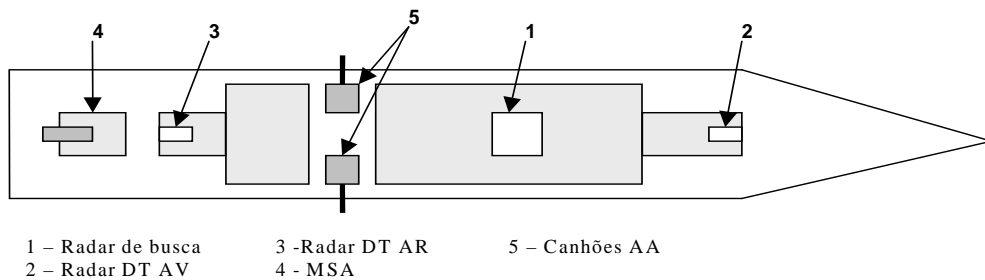
A simulação utiliza vários elementos na modelagem dos cenários de emprego da defesa antiaérea. Eles estão descritos a seguir.

### **4.1 – Incursor**

O incursor será um míssil ou uma aeronave em vôo rasante (< 50 pés) desenvolvendo cerca de 500 nós em vôo retilíneo fechando contra o navio. Este é o perfil típico de um míssil anti-navio, seja lançado por um meio de superfície, submarino ou aéreo. Tem uma probabilidade de sucesso que varia de acordo com a área do alvo apresentada a ele e uma probabilidade de mau funcionamento. Levando em conta essas duas probabilidades, é de 84% a probabilidade do incursor destruir o navio (se não for destruído antes) quando o aspecto apresentado é proa ou popa, e de 96% quando o navio apresenta aspecto de través ao incursor.

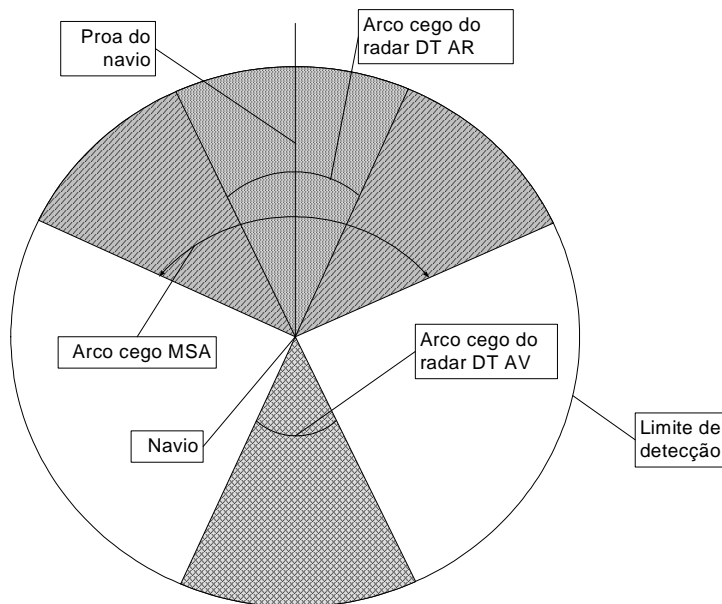
### **4.2 – Navio**

Será considerado sozinho, sem alarme aéreo antecipado. Assim, dependerá somente de seus sensores para detecção de incursores. É dotado dos equipamentos e sistemas descritos a seguir. A figura 1 apresenta a localização dos equipamentos utilizados na simulação.



**Figura 1: Posicionamento dos elementos usados na simulação**

Os armamentos e sensores têm os seguintes arcos cegos, representados na figura 2 a seguir. Os arcos cegos dos canhões não estão representados para não sobrecarregar a figura. O arco cego de cada canhão é o setor de 180° do bordo oposto a cada um.



**Figura 2: Arcos cegos dos sensores e armamento**

#### 4.2.1 – Radar de Busca

Para um navio sozinho, a área que pode ser esclarecida por seus sensores é limitada pelo horizonte radar (HR), que é definido como a maior distância de detecção por causa da curvatura da Terra, isto é, no caso da defesa aérea, o ponto mais cedo possível em que é possível uma detecção. Essa distância depende da altura da antena do radar de vigilância e a altura da aeronave ou míssil incursor. A equação para o cálculo é a seguinte (ver figura 3 a seguir):

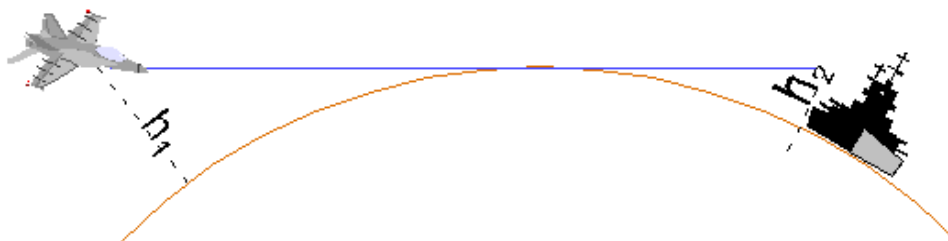
$$HR = 0,869 \times (\sqrt{2h_1} + \sqrt{2h_2}) , \quad (1) \quad [\text{US NAVY (1977)}]$$

onde:

$HR$  : horizonte radar em milhas marítimas (mima)

$h_1$  : altura do alvo em pés

$h_2$  : altura da antena em pés.



**Figura 3 – Horizonte Radar**

O horizonte radar para um radar cuja antena está a 70 pés, em relação a um incursor voando a 50 pés de altura é de aproximadamente 30 km.

Essa equação vale para as condições atmosféricas padrão. O horizonte radar será maior na presença de dutos. Este trabalho não considerará dutos atmosféricos.

A detecção será considerada obtida após um determinado tempo depois que o incursor cruzar o horizonte radar. Este tempo é representado por uma distribuição normal com média de 20 segundos e DP de 30 segundos.

#### 4.2.2 – Radar de Direção de Tiro

É um radar de grande precisão para a orientação das armas do navio. Recebe a indicação de alvo vinda do radar de busca e, após um tempo, adquire e passa a rastrear o alvo. Esse tempo é chamado de tempo de aquisição, e é dependente da qualidade da posição do alvo passada pelo radar de busca, do alinhamento do sistema e do software de controle do radar DT. A distribuição de tempo de aquisição é representada por uma distribuição triangular, com  $b = 5$  segundos e  $c = 3$  segundos.

#### 4.2.3 – Míssil Superfície-Ar (MSA)

O MSA considerado aqui é do tipo semi-ativo (ver Figura 4 a seguir), isto é, é necessário que um radar mantenha o alvo iluminado até a interceptação. Isto significa que o MSA aloca um radar de DT até a interceptação com o alvo.

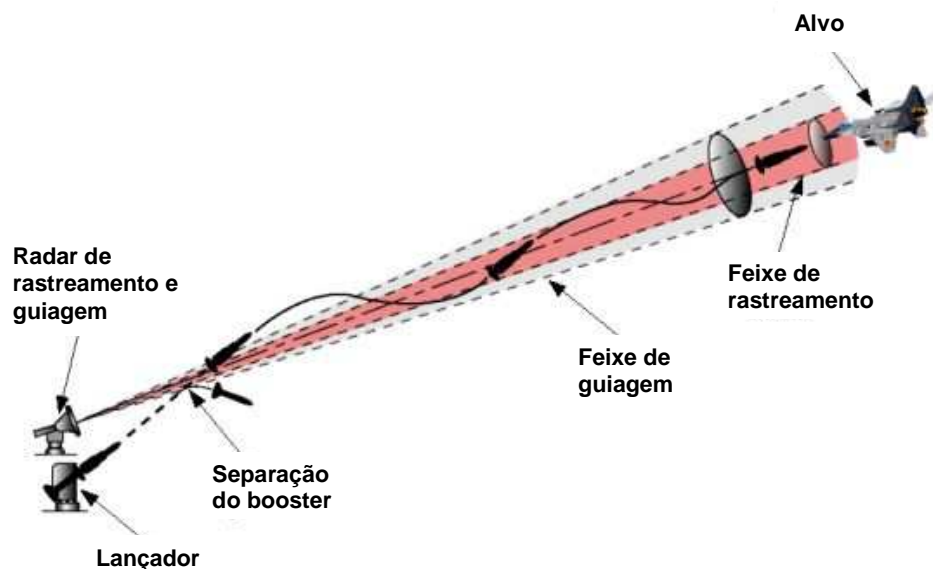


Figura 4: Diagrama esquemático de um MSA com guiagem semi-ativa [Scott (2004)]

Nesta simulação, foi considerado que a probabilidade do MAS destruir o incursor é de 95%.

#### 4.3 – Tempos

Existem os tempos necessários para decisão e aqueles inerentes ao sistema do navio. Os tempos de decisão são aqueles relacionados com o fator humano, como identificação da ameaça e comando de manobra do navio. Esses tempos são dependentes de adestramento. Quanto mais adestrado estiver o comandante nas táticas disponíveis para cada situação menor será o tempo de decisão. O ambiente também influi. Por exemplo, operações próximas a rotas aéreas comerciais dificultam a avaliação das ameaças aéreas e tendem a aumentar o tempo de decisão [Liebhaber (2000)].

Os tempos do sistema do navio são os requeridos para desempenhar as funções necessárias ao engajamento do alvo. Um exemplo é tempo entre a passagem de dados do radar de busca para o radar DT e o efetivo rastreamento do alvo.

Existe ainda o tempo que o navio leva para guinar, que é dependente da sua velocidade. Nesse trabalho, é considerado que o navio está operando sob sua velocidade operativa e, nesta velocidade, será considerado que a taxa de guinada é de  $1^\circ$ /segundo.

Os tempos de reação do elemento humano estão na Tabela I a seguir, e consideram que o navio está em estado de prontidão.

**Tabela I – Tempos de Reação**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>TEMPO (s)</b>
Decisão de engajar	5
Passagem de TI	3
Decisão de guinar	5
Decisão de reengajar	5

#### **4.4 – Tática**

As táticas, ou linhas de ação, de emprego do armamento de defesa aérea são desenvolvidas para maximizar  $P_s$ . Existem várias linhas de ação possíveis. Dentre elas, usando a experiência e o bom senso, é possível eleger algumas que seriam as candidatas à melhor tática. Como existem várias situações possíveis, um conjunto de linhas de ação deverá ser testado para o reconhecimento das melhores em cada situação. Um exemplo parcial (apenas até o engajamento pelo MSA e sem considerar os canhões) de linha de ação está apresentado na figura 5 a seguir. Essa foi a linha de ação utilizada na simulação conduzida, e os resultados apresentados valem apenas para essa linha de ação.

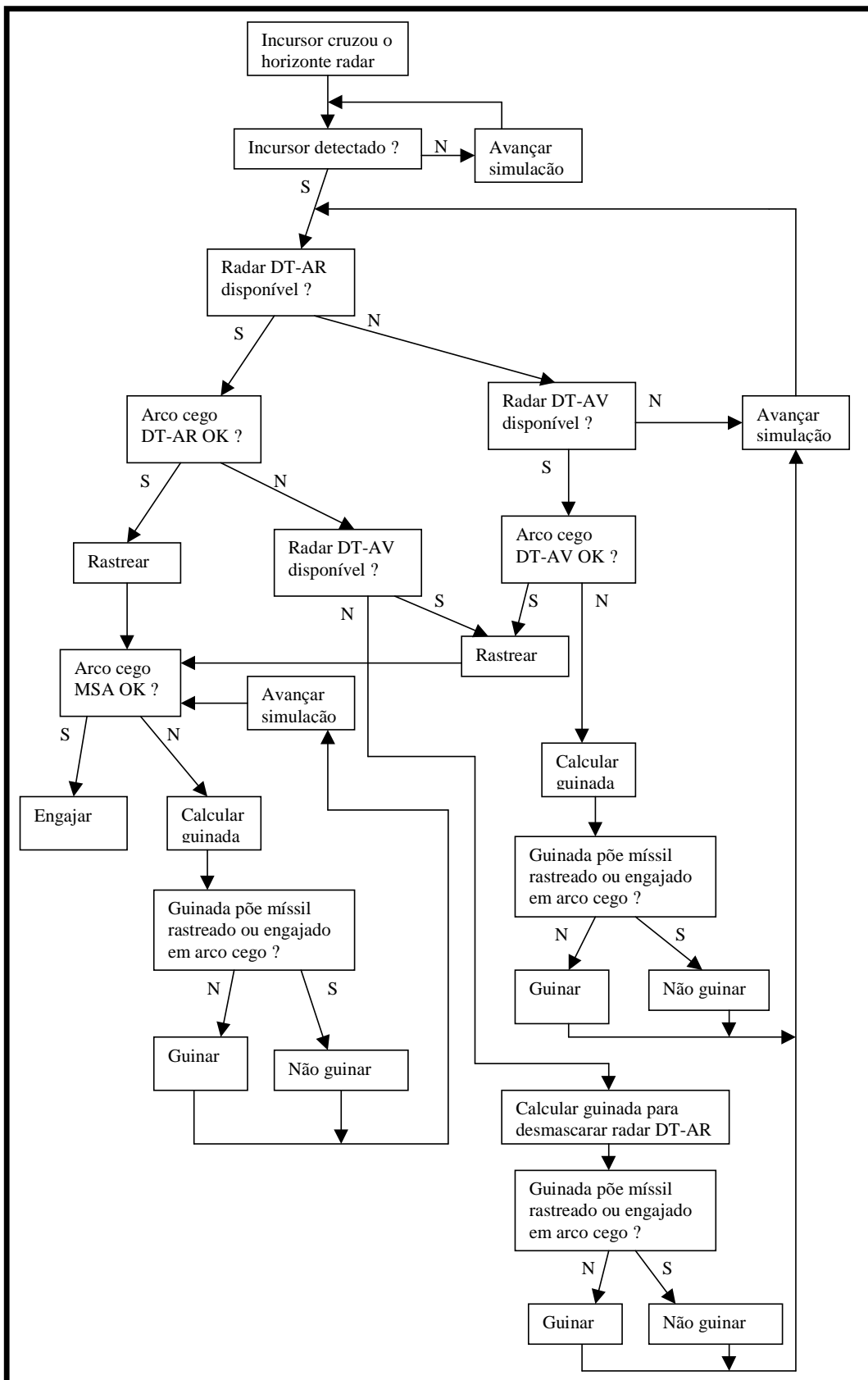


Figura 5 – Fluxograma de Decisão

## 5 – A SIMULAÇÃO

A seguir são apresentadas algumas características do programa utilizado para realizar a simulação.

### 5.1 – Tipo da simulação

Foi usada a simulação orientada a eventos com uma lista encadeada dos eventos. Quando o navio está manobrando, foi usado incrementos fixos no tempo. Essa opção torna a

simulação mais lenta, mas foi motivada pela necessidade de visualização passo a passo da manobra do navio, melhorando o entendimento de cada algoritmo de manobra implementado e permitindo verificar a exatidão do código.

## 5.2 - Linguagem

A linguagem utilizada foi o FORTRAN 95 com o ambiente de desenvolvimento *Digital Visual Fortran Version 6.0*, com a parte gráfica do próprio ambiente (*QuickWin*). Nesse estágio, não é ainda necessário o desenvolvimento de uma apresentação realista do cenário, servindo a parte gráfica para verificar a consistência do código.

## 5.3 – Equipamento utilizado

As simulações foram executadas em um computador pessoal com processador INTEL Pentium IV, com 3,07 GHz de frequência de relógio e 512 Mb de memória RAM.

## 5.4 – Inteligência embutida no código

A simulação tem embutido nos algoritmos de manobra alguma inteligência para comandar as guinadas do navio. Quando um incursor entra por algum arco cego, o programa inicia os cálculos para a guinada. Ele verifica, a cada segundo, se a guinada não vai colocar um incursor já rastreado e engajado em arco cego. Se isto for acontecer, a guinada é interrompida até que incursor já engajado seja destruído. Se durante uma guinada para um determinado bordo aparecer outro incursor, também em arco cego, mas pelo outro bordo, mais próximo de ser desmascarado, o navio inverte o sentido da guinada para desmascarar um incursor o mais rápido possível.

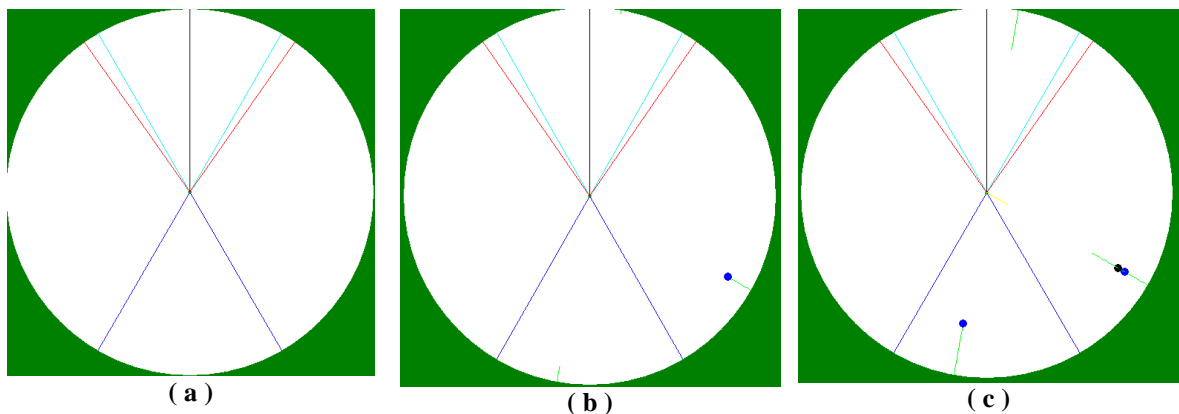
## 5.5 – Implementação da tática de defesa

A tática de defesa utilizada foi aquela descrita na figura 5. Ela foi implementada em uma árvore de decisão complexa, utilizando vários *if* encadeados. A troca da tática de defesa acarreta uma mudança nessa árvore, e necessita de cuidadosa verificação de sua implementação.

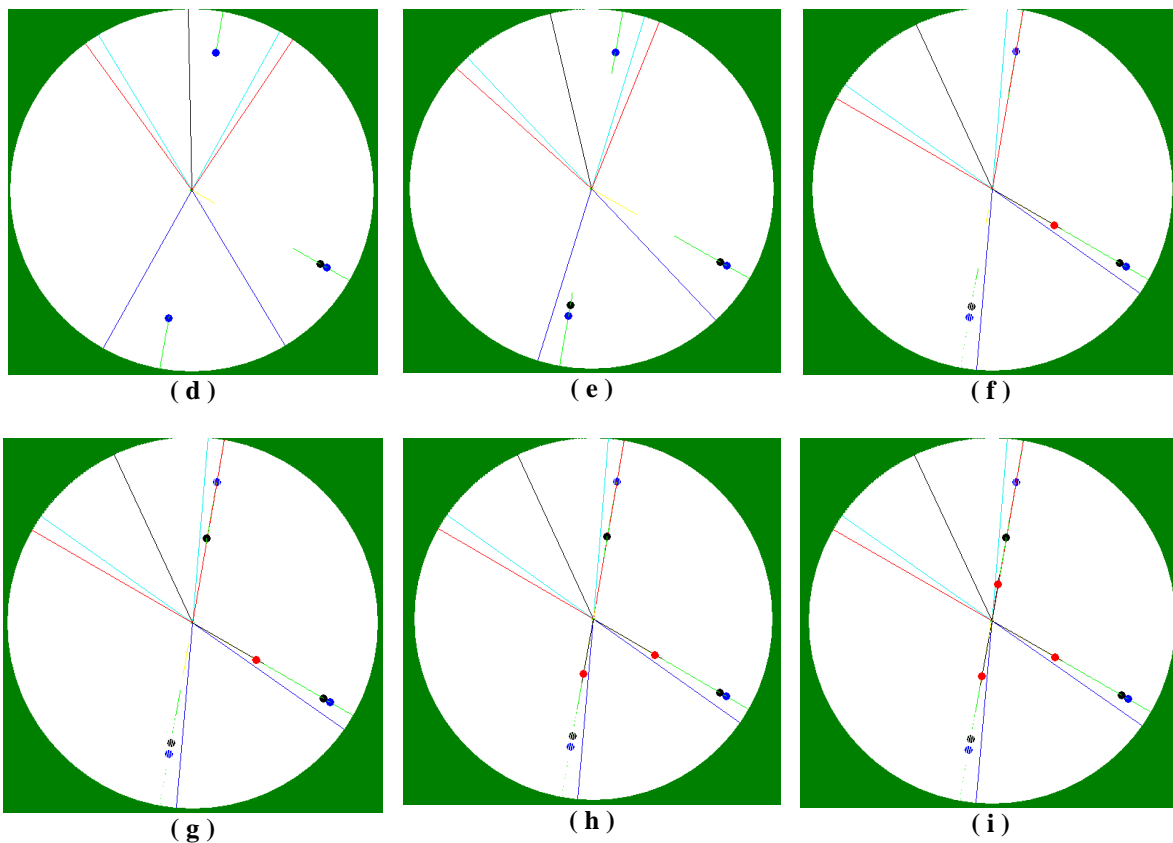
## 5.6 - Exemplo

A figura 6 a seguir apresenta um exemplo, utilizando dados fictícios, do desenrolar de uma iteração da simulação no caso em que três mísseis incursores estão fechando contra o navio, sendo que um está entrando no arco cego do radar DT AV e outro está entrando pelo arco cego do MSA. O navio vai ter que guinar para desmascarar o incursor que está no arco cego do MSA, sempre verificando se não há outro incursor de mais rápido desmascaramento ou se algum incursor já engajado não vai ficar em arco cego. Bolas azul escuro significam que o incursor foi detectado. Bolas pretas significam que ele foi rastreado. Linha verde é a trajetória do incursor, enquanto linha amarela é a trajetória do MSA. Bola vermelha significa incursor destruído (sucesso do MSA) e bola azul significa falha do MSA, isto é, o incursor continua se aproximando. O círculo significa o horizonte radar, e as linhas partindo do centro delimitam os arcos cegos, exceto a preta, que indica a proa do navio. Linha azul escura delimita o arco cego do radar DT AV, linha azul clara delimita o arco cego do radar DT AR e linha vermelha delimita o arco cego do MAS.

Quando a simulação é executada, usando 10.000 iterações, a parte gráfica é desativada para maior rapidez.







**Figura 6: Um exemplo da simulação do engajamento de três incursores**

A figura 6a mostra o início da simulação. Ver figura 2 para maior detalhe dos arcos cegos.

Na figura 6b vê-se um incursor já detectado (os eventos são marcados por bolas azuis escuras) e outro se aproximando ainda sem ser detectado.

A figura 6c mostra um incursor já rastreado por um radar DT, outro já detectado e um terceiro se aproximando ainda sem ser detectado.

A figura 6d apresenta três mísseis detectados, sendo dois rastreados. Na mesma figura pode-se ver que dois mísseis já foram engajados e que o terceiro incursor está esperando a liberação de um radar DT para ser rastreado. Vê-se ainda nessa figura que um incursor está se aproximando pelo arco cego do MSA, obrigando o navio a iniciar a manobra de guinada para desmascarar o incursor.

Na figura 6e dois MSA estão a caminho da interceptação dos incursores, enquanto o navio continua guinando.

Na figura 6f, um MSA destruiu um incursor (liberando um radar DT), e o outro MSA está próximo da interceptação. O navio já desmascarou o terceiro incursor.

A figura 6g apresenta o terceiro incursor já rastreado.

Na figura 6h, o segundo incursor foi destruído e um MSA está a caminho para interceptar o terceiro incursor.

Finalmente a figura 6i apresenta os três mísseis incursores destruídos.

## 6 – RESULTADOS

A simulação foi executada com os valores da Tabela II a seguir para os parâmetros obtidos na primeira fase deste trabalho. Os valores apresentados neste trabalho são fictícios, porque os valores reais, obtidos da Avaliação Operacional, são confidenciais.

**Tabela II - Parâmetros**

PARÂMETROS	VALORES
Horizonte Radar (HR)	HR = 30 km
Tempo para detectar após cruzar o HR	$t = \text{Dist. Normal: } \mu = 20\text{s, } \delta = 30\text{s}$
Tempo de reação de engajamento	$t = 5\text{s}$

Tempo de reação de rastreamento	$t = 3s + \text{Dist. Triangular: } b=5s, c=3s$
Tempo de reação do armamento (MSA)	$t = 15s$
Tempo de reação (manobra)	$t = 5s$
Taxa de Guinada	$1^\circ / s$
Probabilidade de acerto do MSA	95%
Probabilidade de acerto do incursor	84% (proa ou popa) até 96% (través)
Tempo de reação de reengajamento	$t = 5s$

As situações analisadas foram uma composição da quantidade de incursores com os setores de aproximação. Uma análise de sensibilidade foi conduzida para parâmetros selecionados.

### 6.1 – Probabilidades de Sobrevivência

A simulação foi executada utilizando 10.000 repetições, com a parte gráfica desabilitada. Foram testados incursores se aproximando por diversos setores. Por exemplo, o setor de  $315^\circ$  a  $045^\circ$  significa que os incursores se aproximarão pela proa do navio. Não foram testados todos os setores pois foi considerado que o navio é simétrico com relação ao seu eixo longitudinal.

Para os parâmetros das tabelas I e II, e empregando a tática da figura 5, as probabilidades de sobrevivência do navio estão na Tabela III a seguir, obtida com  $P_{killInc}$  variando de 84% a 96%, dependendo do setor de aproximação, e  $P_{killMSA} = 95\%$ .

**Tabela III – Probabilidade de Sobrevivência do Navio ( $P_s$ )**

Nº de mísseis incursores	SETORES DE APROXIMAÇÃO DO(S) INCURSOR(ES)					
	000° a 360°	000° a 090°	090° a 180°	315° a 045°	045° a 135°	135° a 225°
	1	99,7 %	99,6 %	99,8 %	99,5 %	99,8 %
2	99,4 %	99,3 %	99,5 %	85,0 %	99,5 %	99,6 %
3	80,3 %	81,1 %	83,4 %	63,8 %	85,6 %	81,9 %
4	58,2 %	64,0 %	64,1 %	40,2 %	70,3 %	58,7 %
5	33,5 %	39,9 %	39,5 %	21,9 %	45,0 %	29,6 %
6	16,1 %	19,7 %	18,6 %	11,3 %	21,7 %	16,3 %

### 6.2 - Análise de sensibilidade:

Uma análise de sensibilidade foi conduzida para determinar os parâmetros que devem ser obtidos com mais precisão nos testes reais. Como mais precisão acarreta testes mais caros, essa análise ajudará a minimizar os custos adicionais dos testes reais da AO. Os valores de  $P_s$  para variações em torno dos valores nominais estão na Tabela IV e na Tabela V a seguir. Essa análise foi executada para o caso de três mísseis incursores vindos o setor de  $000^\circ$  a  $360^\circ$ , isto é, de qualquer direção. Da Tabela III, o valor de  $P_s$  para essa situação é de 80,3%.

**Tabela IV - Probabilidade de Sobrevivência do Navio ( $P_s$ )**

PARÂMETROS	VARIÇÃO NO PARÂMETRO			
	+ 10%	- 10%	+ 25%	-25%
Horizonte Radar	87,7 %	70,4 %	99,2 %	51,0 %
Tempo para Detectar após Incursor Cruzar o HR	75,1 %	83,8 %	67,4 %	88,6 %

Aumento no parâmetro *Horizonte Radar* significar aumentar  $P_s$ , pois o navio aumenta suas chances de detectar o incursor mais longe, ganhando mais tempo para se defender. Já o aumento no parâmetro *Tempo de Detecção após Incursor Cruzar HR* diminui o tempo que o navio tem para se defender, por conseguinte diminuindo  $P_s$ .

**Tabela V - Probabilidade de Sobrevivência do Navio ( $P_s$ )**

PARÂMETROS	VARIÇÃO NO PARÂMETRO
------------	----------------------

	+ 3s	-1s	+8s	-2s
Tempo de Reação de Engajamento	69,6 %	83,5 %	46,8 %	86,1 %
Tempo de Reação de Reengajamento	79,3 %	81,0 %	76,1 %	81,7 %

Aumento nos parâmetros *Tempo de Reação de Engajamento* e *Tempo de Reação de Reengajamento* diminua  $P_s$ .

Pode ser visto da tabela IV que o *HR* é o parâmetro mais crítico. Pequenas variações em seu valor impactam fortemente em  $P_s$ . O parâmetro *Tempo para Detectar após Incursor Cruzar o HR* é menos crítico, com alterações nesse parâmetro provocando mudanças em  $P_s$  em proporção menor. Da tabela V pode ser visto que alterações no *Tempo de Reação de Engajamento* tem forte influência em  $P_s$  e alterações no *Tempo de Reação de Reengajamento* tem pouca influência em  $P_s$ .

## 7 – CONCLUSÕES

O conhecimento das probabilidades de sobrevivência do navio nas diversas situações táticas é um item fundamental no planejamento de operações navais. Ter táticas prontas para cada situação diminui em muito o tempo de reação às ameaças.

Da tabela III pode ser visto que os setores que incluem arco cego do MSA são mais críticos, como se poderia prever. O setor de 315° a 045° foi o que apresentou as menores  $P_s$ . Assim, é necessário estudar táticas para enfrentar ameaças se aproximando por esse setor. Os outros setores estudados tiveram resultados semelhantes.

Pode-se ver também que  $P_s$  torna-se inaceitável quando o navio é atacado por mais de 3 incursores. Assim, o navio não deve ser colocado em situações em que esse cenário tenha alta probabilidade de acontecer. Apesar disso, pode haver situações em que o tomador de decisões seja obrigado a, mesmo assim, enviar o navio para um cenário com alta probabilidade de sofrer um ataque de mais de três mísseis, mas o fará ciente do risco que o navio enfrentará. De qualquer maneira, a PO é uma ferramenta de apoio à decisão, e não a decisão propriamente dita.

Assim, prioritariamente, mais recursos devem ser alocados para a determinação com precisão dos parâmetros *HR* e *Tempo de Reação de Engajamento*. O parâmetro *Tempo para Detectar após Incursor Cruzar o HR* pode ter sua precisão melhorada se houver disponibilidade de recursos, e não devem ser despendidos mais recursos com o *Tempo de Reação de Reengajamento*.

## 8 – TRABALHOS FUTUROS

A terceira fase consistirá em testar táticas para melhorar o desempenho nas situações em que a tática utilizada até aqui não apresentou bons resultados. Parâmetros que a análise de sensibilidade mostrou serem críticos serão determinados com mais precisão e utilizados na terceira fase. Após a determinação das táticas mais otimizadas para diversos cenários, esse trabalho poderá evoluir para um simulador de treinamento dessas táticas. Para isso, será necessário o desenvolvimento de uma apresentação gráfica mais elaborada, que forneça ao tomador de decisões um maior realismo nas ações.

O emprego dos canhões, ainda não explorado nesta fase, será incorporado à simulação. Os canhões são importantes pois são mais eficientes a curta distância, e sua inclusão trará mais realismo ao modelo.

## 9 – REFERÊNCIAS

**Braga, M.J.F.**, *Avaliação Operacional de Sistemas*, Revista Marítima Brasileira, Marinha do Brasil, jul/ago/set 1979.

**Chapman, S.J., Benke K.K.**, *Assessment of Ship Air Defence Performance by Modelling and Simulation*, BAE SYSTEMS Austrália, 2000.

**Guedes, M.J.M.**, *O Uso da Simulação na Avaliação Operacional da Defesa Antiaérea de um Navio de Guerra*, Anais do XXXVIII SBPO, 2006.

**Hostbeck L.**, *Methods for evaluation of Air-Defence Systems on Surface ships*, Defence Research Establishment, Division of Defence Analysis, 1999.

**Ignall E. e Kolesar P.**, *On Using Simulation to Extend OR/MS Theory: The Symbiosis of Simulation and Analysis*, in *Current Issues in Computer Simulation*, New York, EUA, Academic Press, 1979. Cap. 15, p. 223-233.

**Liebhaber, M.J., Smith, C.A.P.**, *Naval Air Defense Threat Assessment: Cognitive Factors and Model*, 2000 ([www.pacific-science.com/AppliedCognition/BFA%20CCRTS-00-LS.pdf](http://www.pacific-science.com/AppliedCognition/BFA%20CCRTS-00-LS.pdf)).

**Marinha do Brasil (MB)**, EMA-333, *Sistemática para Avaliação Operacional na Marinha do Brasil*, Estado Maior da Armada (EMA), 2004.

**Shephard, R.W. et alli.**, *Applied Operations Research: examples from defence assessment*, Plenum Press, EUA, 1988.

**US NAVY**, *Naval Operations Analysis*, EUA, Naval Institute Press, 2ª edição, 1977.

#### **Internet:**

**PEO STRI**, Program Executive Office For Simulation, U.S. ARMY, [www.peostri.army.mil/](http://www.peostri.army.mil/), 2006.

**AeroSpaceweb**, *Missile Guidance*,

<http://www.aerospaceweb.org/question/weapons/q0187.shtml>, 2006.

**SEAROADS**: Simulation, Evaluation, Analysis and Research on Air Defence Systems,

[http://www.tno.nl/defensie\\_en\\_veiligheid/militair\\_optreden/operational\\_analysis/searoads\\_simulation\\_eval/index.xml](http://www.tno.nl/defensie_en_veiligheid/militair_optreden/operational_analysis/searoads_simulation_eval/index.xml), 2006.

#### **GLOSSÁRIO:**

AA: antiaéreo

AEW: “Aerial Early Warning” - Alarme Aéreo Antecipado

AO: avaliação operacional

AR: a ré

AV: a vante

Cenário: é a descrição imaginária que será utilizada para simular um ambiente real de operação do navio

DT: direção de tiro

hard-kill: neutralização do incursor por destruição

HR: horizonte radar

MAS: míssil ar-superfície

MB: Marinha do Brasil

MEO: medida de eficácia operacional

mima: milha marítima  $\approx$  1.852 metros

MSA: míssil superfície-ar

MSS: míssil superfície-superfície

PO: pesquisa operacional

$P_{killIncursor}$ : Probabilidade do incursor destruir o Navio

$P_{killMSA}$ : Probabilidade do MAS destruir o incursor

$P_s$ : probabilidade de sobrevivência do navio

Radar de busca: Principal radar do navio, para busca aérea e de superfície

sea-skimmer: voo em baixa altura (< 50 pés) sobre a superfície do mar

soft-kill: neutralização do incursor por despistamento (eletronicamente)

TI: “target indication”, indicação da posição do alvo para um radar DT