



SPOLM 2009

ISSN 2175-6295

Rio de Janeiro- Brasil, 05 e 06 de agosto de 2009.

005/2009 - METODOLOGIA DE APOIO A DECISÃO PARA OS PROCESSOS DE SELEÇÃO DE ALVOS E ARMAMENTOS

Hélcio Vieira Junior

Karl Heinz Kienitz

Mischel Carmen Neyra Belderrain

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

Praça Marechal Eduardo Gomes 50, Vila das Acácias

12228-900 - São José dos Campos – SP

helcio@ita.br / kienitz@ita.br / carmen@ita.br

Resumo

O objetivo deste trabalho é a proposta de uma adaptação da formulação clássica do problema de designação arma-alvo (WTA) e o uso da metodologia multicritério MACBETH para a resolução dos problemas de seleção de armamentos e de alvos, de importância fundamental para o resultado de um confronto militar.

O uso do MACBETH possibilitou uma melhor fundamentação aos julgamentos do decisor no tocante ao estabelecimento dos valores unitários de cada alvo e o modelo de programação linear inteira proposto inovou: (1) por ser mais tratável que o modelo de programação não-linear WTA clássico; (2) por fornece como saída, além da lista de alvos a serem atacados, o agrupamento ideal de aeronaves (tipo e quantidade) para realizar tal ataque; e (3) por assegurar uma probabilidade mínima de destruição aceitável para os alvos.

Palavras-Chaves: Militar; Seleção de Alvos; Seleção de Armamentos.

Abstract

The purpose of this paper is the proposal of an adaptation of the classic Weapon-Target Assignment (WTA) model and the use of the multicriteria methodology MACBETH to solve the targeting and weaponing problems, of fundamental importance for the outcome of a military confrontation.

The MACBETH use allowed a better well-founded judgment of the decision maker in the setting-up of the target unit values. The proposed integer linear program innovates: (1) by being more manageable than the classic WTA non-linear program; (2) by supplying as output the target list and the ideal group of aircrafts (type and quantity) to perform the attack; and (3) by assuring a minimum probability of destruction to the targets.

Keywords: Military; Targeting; Weaponing.

1. INTRODUÇÃO

Durante a preparação para qualquer confronto militar, dois processos se destacam pela sua grande influência no resultado da disputa: a seleção de alvos e a seleção de armamentos.

A seleção de alvos (do inglês *targeting*) pode ser definida como o processo que prioriza, dentre uma lista de alvos, aqueles que deverão ser atacados.

A seleção de armamentos (do inglês *weaponing*), por sua vez, é o procedimento por intermédio do qual os especialistas estudam e determinam o tipo e a quantidade de armamentos necessários para que este atinja o efeito desejado, com base na análise física e estrutural do alvo.

O clássico problema de designação arma-alvo – WTA (do inglês *Weapon-Target Assignment*) encontrado na literatura e as metodologias de apoio à decisão multicritério possuem claras afinidades com os processos anteriormente referidos.

Desta forma, o objetivo desta pesquisa é a proposta de uma adaptação da formulação clássica do WTA e o uso da metodologia MACBETH para a resolução dos problemas de seleção de armamentos e de alvos.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: na próxima seção o WTA clássico e um dos mais importantes métodos de apoio à decisão multicritério chamado MACBETH serão revistos; a seção 3 introduzirá a metodologia proposta e na última seção encontram-se as conclusões.

2. REVISÃO METODOLÓGICA

2.1. WTA - PROBLEMA DE DESIGNAÇÃO ARMA-ALVO

O problema de designação arma-alvo vem sendo estudado há mais de cinco décadas, sendo que podemos listar como uma das primeiras abordagens e uma das mais recentes, respectivamente, os trabalhos de Manne [1] e Ahuja et al [2].

Este problema é definido como a modelagem na qual se deseja maximizar o efeito total esperado nos alvos inimigos usando um número limitado de armas. Para tanto, o seguinte problema de programação não-linear foi proposto:

$$\begin{aligned} & \text{Min} \sum_{j=1}^n w_j \prod_{i=1}^m (1 - p_{ij} x_{ij}) \\ & \text{S.T.} : \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1, i = 1, 2, \dots, m \\ & \quad x_{ij} > 0 \end{aligned} \tag{1}$$

onde w_j é o valor unitário do alvo j , p_{ij} é a probabilidade da arma i destruir o alvo j e x_{ij} é a probabilidade de que a arma i seja designada para o alvo j .

2.2. MACBETH

A Análise de Decisão Multicritério é uma forma de abordar problemas que leva em conta que situações da vida real possuem, via de regra, diversas variáveis (critérios). De acordo com Gomes, Araya e Carignano [3], “os métodos de Apoio Multicritério à Decisão

têm um caráter científico e, ao mesmo tempo, subjetivo, trazendo consigo a capacidade de agregar, de maneira ampla, todas as características consideradas importantes, inclusive as não quantitativas...”.

A metodologia MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique* – Mensuração de Atratividade através de uma Técnica de Avaliação Baseada em Categorias) é uma técnica de tomada de decisão multicritério discreta que, através de julgamentos qualitativos sobre diferenças de valores, pode quantificar a atratividade relativa de opções. O MACBETH [4] é uma metodologia interativa e construtivista que adota o modelo de agregação aditiva com os objetivos de:

- Dar suporte interativo de aprendizagem sobre um problema de avaliação; e
- Elaborar recomendações para priorizar e selecionar opções no processo de tomada de decisão individual ou em grupo.

Seja $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ um conjunto finito de n opções para um problema multicritério discreto. Diz-se que a opção a_i é mais atrativa que a opção a_j ($a_i Pa_j$) se for possível associar a estas opções números de modo que $v(a_i) > v(a_j)$. Por similaridade, diz-se que opção a_i é tão atrativa quanto a opção a_j ($a_i Ia_j$) se $v(a_i) = v(a_j)$.

O início do procedimento proposto pela metodologia se dá através da solicitação ao decisor de verbalmente julgar a diferença de atratividade entre cada par de opções através de uma das categorias semânticas listadas na tabela I.

Tabela I. Categorias semânticas do MACBETH

Categoria	Atratividade
C_0	Nenhuma/indiferente (<i>No/indifference</i>)
C_1	Muito fraca (<i>Very Weak</i>)
C_2	Fraca (<i>Weak</i>)
C_3	Moderada (<i>Moderate</i>)
C_4	Forte (<i>Strong</i>)
C_5	Muito forte (<i>Very Strong</i>)
C_6	Extrema (<i>Extreme</i>)

Por exemplo: se o decisor diz que a opção a_i é mais atrativa que a opção a_j , e que a diferença de atratividade entre elas é moderada, então $(a_i, a_j) \in C_3$.

Em seguida, tentar-se-á propor uma escala de valores que satisfaça:

$$\forall a_i, a_j \in A : v(a_i) > v(a_j) \Leftrightarrow a_i Pa_j \quad (2)$$

$$\forall k, k^* \in \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}, \forall a_i, a_j, a_p, a_q \in A \text{ com } (a_i, a_j) \in C_k \text{ e } (a_p, a_q) \in C_{k^*} : k \geq k^* + 1 \Rightarrow v(a_i) - v(a_j) > v(a_p) - v(a_q) \quad (3)$$

Com o objetivo de obter tal escala, será resolvido o seguinte problema de programação linear:

$$\begin{aligned}
& \text{Min } v(a^+) \\
& S.T.: \forall a_i, a_j \in A: a_i P a_j \Rightarrow v(a_i) \geq v(a_j) + 1 + \delta(a_i, a_j, a_j, a_j) \\
& \quad \forall a_i, a_j \in A: a_i I a_j \Rightarrow v(a_i) = v(a_j) \\
& \quad \forall (a_i, a_j), (a_p, a_q) \in P, \text{ se o resultado da informação de preferencia} \\
& \quad \quad \text{é que a diferença de atratividade entre } a_i \text{ e } a_j \\
& \quad \quad \text{é maior que a diferença de atratividade entre} \\
& \quad \quad a_p \text{ e } a_q, \text{ então:} \\
& \quad \quad v(a_i) - v(a_j) \geq v(a_p) - v(a_q) + 1 + \delta(a_i, a_j, a_p, a_q) \\
& v(a^-) = 0
\end{aligned} \tag{4}$$

onde P é relação binária transitiva assimétrica e negativa definida em A que modela o ordenamento dos seus elementos pela ordem decrescente de atratividade, I é a relação binária definida em A de modo que $\forall a_i, a_j \in A: a_i I a_j \Leftrightarrow a_i \bar{P} a_j$ e $a_j \bar{P} a_i$, \bar{P} significa *não é mais atrativa que* (não- P), a^+ é um elemento de A de modo que $\forall a_i \in A: a^+ (P \cup I) a_i$, a^- é um elemento de A de modo que $\forall a_i \in A: a_i (P \cup I) a^-$, $\delta(a_i, a_j, a_p, a_q)$ é o número mínimo de categorias de diferença de atratividade entre (a diferença de atratividade entre a_i e a_j) e (a diferença de atratividade entre a_p e a_q).

Se não for possível obter uma escala que obedeça a tais regras, então com MACBETH serão apontadas as inconsistências da matriz de julgamentos e propostas de modificações para tornar a matriz consistente.

3. METODOLOGIA PROPOSTA

3.1. AVALIAÇÃO DO VALOR UNITÁRIO DOS ALVOS

Conforme pode ser observado na formulação (1), w_j é o valor unitário do alvo j . Uma pergunta que imediatamente se levanta é: como inferir os valores unitários de cada alvo? Como ser coerente com a pontuação atribuída a cada alvo se as características dos alvos podem diferir enormemente? Por exemplo: como comparar a importância de aeronaves de caça com o centro de comando e controle (C2)? Sem as aeronaves não existe finalidade para o C2 e vice-versa.

Para solucionar tal óbice, nossa proposta faz uso da metodologia MACBETH para o levantamento dos valores unitários dos alvos.

Ilustraremos a proposta com um exemplo: imagine que se deseje obter a superioridade aérea no teatro de operações - TO (no nosso exemplo o TO está representado pelo estado brasileiro do Rio Grande do Sul). Foram levantados vários alvos de interesse de acordo com as figura 1 e tabela II.

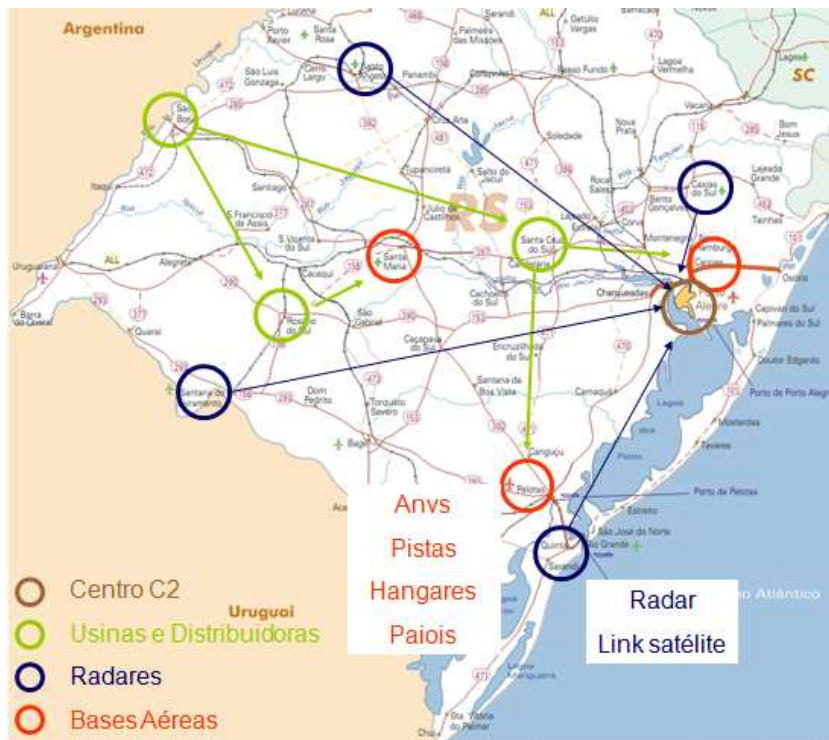


Figura 1. TO hipotético

Inicialmente, os alvos devem ser agrupados de acordo com características em comum. No nosso exemplo isto foi feito de acordo com a figura 2.

Com o uso da metodologia MACBETH, faz-se o julgamento par a par do primeiro nível do agrupamento de acordo com as diferenças de atratividade listadas na tabela I. A figura 3 ilustra a tabela de julgamentos feita para o primeiro nível do agrupamento. Observe que o decisor não precisou utilizar nenhum valor cardinal até o momento. Ele/ela apenas necessitou explicitar qual alternativa lhe pareceu mais atrativa e quão (em um sentido semântico) uma é melhor do que outra.

Tabela II. Alvos selecionados para a campanha de Superioridade Aérea

Alvo	Descrição	Alvo	Descrição
1	Distribuidora de eletricidade 1	14	Usina hidroelétrica
2	Distribuidora de eletricidade 2	15	Radar 1
3	Hangar de manutenção - base aérea 1	16	Radar 2
4	Hangar de manutenção - base aérea 2	17	Radar 3
5	Hangar de manutenção - base aérea 3	18	Radar 4
6	Pátio 1 de aeronaves - base aérea 1	19	Pista de pouso - base aérea 1
7	Pátio 2 de aeronaves - base aérea 1	20	Pista de pouso - base aérea 2
8	Pátio de aeronaves - base aérea 2	21	Pista de pouso - base aérea 3
9	Pátio 1 de aeronaves - base aérea 3	22	Antena Link C2 - base aérea 1
10	Pátio 2 de aeronaves - base aérea 3	23	Antena Link C2 - base aérea 2
11	Paiois de armamentos - base aérea 1	24	Antena Link C2 - base aérea 3
12	Paiois de armamentos - base aérea 2	25	Centro de Comando e Controle
13	Paiois de armamentos - base aérea 3	26	Antena Link C2 – Centro de C2

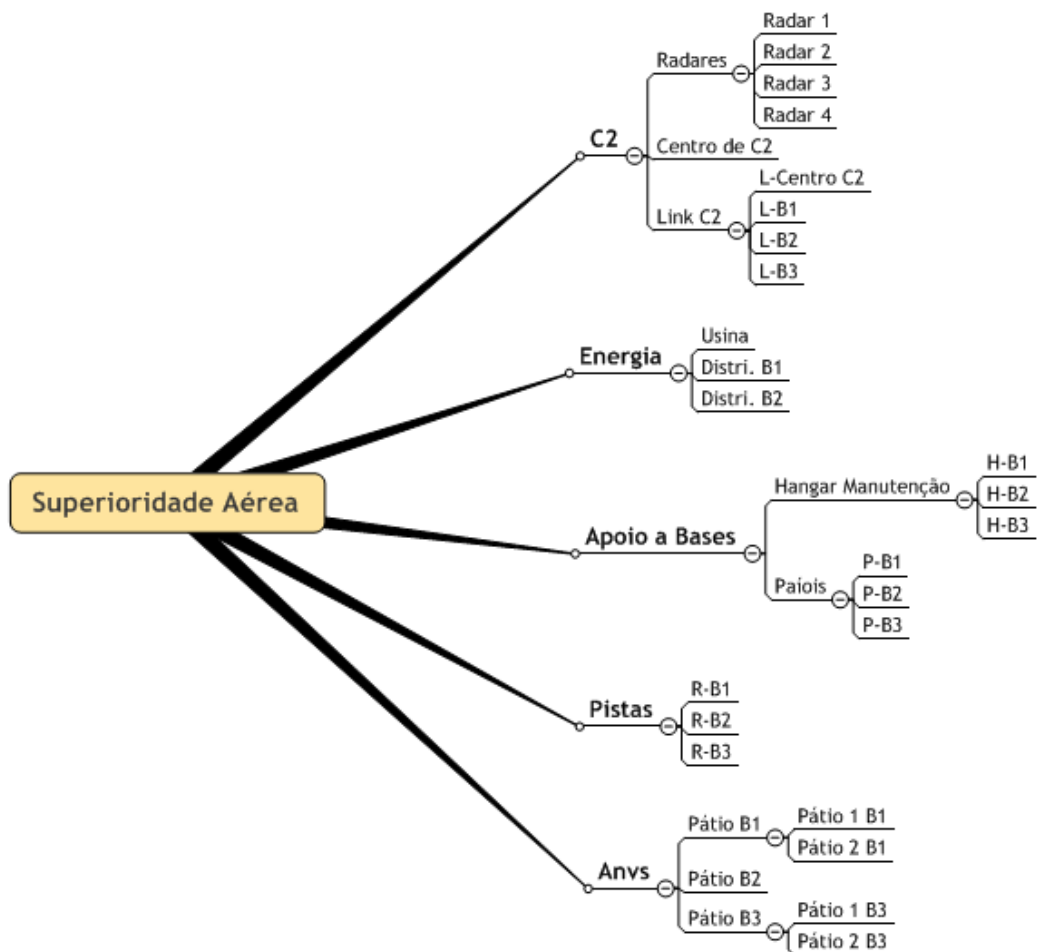


Figura 2. Agrupamento (*clustering*) dos alvos

Ponderação (Global)							
	[C2]	[Aeronaves]	[Energia]	[Pistas]	[Apoio às Bases]	[tudo inf.]	
[C2]	nula	forte	forte	mt. forte	extrema	positiva	extrema
[Aeronaves]		nula	mt. fraca	forte	mt. forte	positiva	mt. forte
[Energia]			nula	moderada	forte	positiva	moderada
[Pistas]				nula	fraca	positiva	fraca
[Apoio às Bases]					nula	positiva	mt. fraca
[tudo inf.]						nula	nula

Julgamentos consistentes

Figura 3. Tabela de julgamentos para o primeiro nível do agrupamento

O software M-MACBETH (implementação da metodologia MACBETH disponível em <http://www.m-macbeth.com/>) gerou como saída aos julgamentos explicitados na figura 3 uma escala chamada de pré-cardinal. Esta escala, após as considerações (modificações) feitas pelo decisor, transforma-se em um escala cardinal, tornando-se os pesos que cada agrupamento de primeiro nível terá. A figura 4 lista as escalas pré-cardinal (à esquerda) e cardinal (à direita).

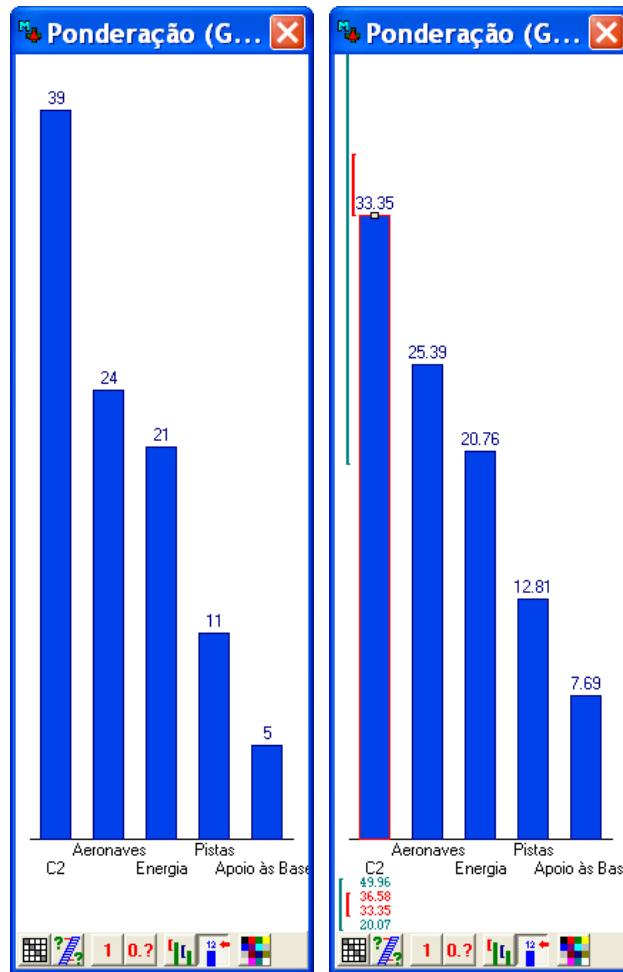


Figura 4. Escala pré-cardinal (esquerda) e escala cardinal (direita)

Repete-se este procedimento agora para os demais níveis, atentando-se de construir tabelas de julgamento internas ao nível anterior, e.g., apenas serão julgados no 2º nível do C2 as alternativas (1) radares, (2) Centro de C2 e (3) Link C2.

Deste modo, constrói-se uma estrutura hierarquizada onde o valor unitário w_j será a multiplicação dos pesos dos diversos níveis de cada alvo, conforme ilustrado na tabela III.

Observe que a somatória dos valores unitários de cada alvo é um. Isto nos possibilita utilizar como subproduto desta proposta o acompanhamento da campanha, pois o somatório dos valores individuais dos alvos já atacados será um indicador da porcentagem da campanha já realizada.

3.2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA PARA A RESOLUÇÃO DOS PROBLEMAS DE SELEÇÃO DE ARMAMENTOS E ALVOS

Suponha que o decisor tenha disponíveis 4 aeronaves A-1 para realizar o ataque aos alvos *Radar 1*, *Centro de C2* e *Distribuidora de Eletricidade B1* e que as probabilidades de destruição dos alvos quando atacados por 2 ou 4 aeronaves A-1 sejam dadas pela tabela IV.

Tabela III. Cálculo do valor unitário dos alvos selecionados

Agrupamento de 1° nível	Alvo	Peso do 1° nível	Peso do 2° nível	Peso do 3° nível	Valor unitário w_j
C2	Radar 1	0,334	0,450	0,400	0,0600
	Radar 2	0,334	0,450	0,200	0,0300
	Radar 3	0,334	0,450	0,100	0,0150
	Radar 4	0,334	0,450	0,300	0,0450
	Centro C2	0,334	0,250	1,000	0,0834
	Link -Centro C2	0,334	0,300	0,200	0,0200
	Link -B1	0,334	0,300	0,400	0,0400
	Link -B2	0,334	0,300	0,100	0,0100
Energia	Link -B3	0,334	0,300	0,300	0,0300
	Usina	0,254	0,150	1,000	0,0381
	Distr. B1	0,254	0,600	1,000	0,1523
Apoio a Bases	Distr. B2	0,254	0,250	1,000	0,0635
	Hangar-B1	0,208	0,200	0,500	0,0208
	Hangar -B2	0,208	0,200	0,400	0,0166
	Hangar -B3	0,208	0,200	0,100	0,0042
	Paiol-B1	0,208	0,800	0,200	0,0332
	Paiol-B2	0,208	0,800	0,400	0,0664
Pistas	Paiol-B3	0,208	0,800	0,400	0,0664
	Pista-B1	0,128	0,300	1,000	0,0384
	Pista-B2	0,128	0,400	1,000	0,0512
Aeronaves	Pista-B3	0,128	0,300	1,000	0,0384
	Pátio 1 B1	0,077	0,300	0,600	0,0138
	Pátio 2 B1	0,077	0,300	0,400	0,0092
	Pátio B2	0,077	0,400	1,000	0,0308
	Pátio 1 B3	0,077	0,300	0,200	0,0046
Pátio 2 B3	0,077	0,300	0,800	0,0185	

Soma dos valores unitários:

1,000

Tabela IV. Probabilidades de destruição

Alvo	Valor unitário	Probabilidade de destruição por 2 A-1	Probabilidade de destruição por 4 A-1
Radar 1	0,060	96,00%	99,84%
Centro C2	0,083	93,75%	99,61%
Distr. B1	0,152	27,75%	47,80%

O decisor deverá optar entre atacar o *radar 1* e o *centro de C2* cada um com duas aeronaves (soma dos valores unitários: $0,060+0,083=0,143$) ou atacar a *distribuidora de*

energia BI (valor unitário de 0,152) com quatro aeronaves. Como a diferença entre o valor unitário da última com a soma dos valores unitários das primeiras é muito pequena, o que influenciará a decisão será a probabilidade de destruição. No nosso exemplo, é mais lógico atacar os dois primeiros alvos, pois suas probabilidades de destruição (maiores que 90%) são muito maiores que a probabilidade de destruição do último (abaixo de 50%).

Isto nos mostra que o valor unitário dos alvos não responde sozinho pela decisão de quais alvos atacar. A probabilidade de destruição dos alvos deve de alguma forma ser levada em conta para a tomada desta decisão.

Nossa proposta para a seleção de alvos e armamentos consiste em ponderarmos os valores unitários dos alvos pelas suas probabilidades de destruição e utilizarmos um modelo de programação inteira para maximizar estes valores unitários ponderados dada a restrição do número de armamentos (aeronaves) disponível.

O modelo proposto encontra-se explicitado na formulação (5).

$$\begin{aligned}
 & \text{Max} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n w_i p_{ij} x_{ij} \\
 & \text{S.T.} : \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \varepsilon_{j,anv} < n_{anv}, \forall anv \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1, \forall i \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} (p_{ij} - \bar{p}_i) \geq 0, \forall i \\
 & x_{ij} \in \{0, 1\}
 \end{aligned} \tag{5}$$

onde w_i é o valor unitário do alvo i , p_{ij} é a probabilidade do alvo i ser destruído pela esquadrilha j , x_{ij} é a variável de decisão que assume valor 1 caso o alvo i seja atacado pela esquadrilha j e valor 0 caso contrário, $\varepsilon_{j,anv}$ é o número de aeronaves do tipo anv na esquadrilha j , n_{anv} é o número máximo de aeronaves do tipo anv disponíveis e \bar{p}_i é a menor probabilidade de destruição aceitável para o alvo i .

O modelo (5) trás as seguintes inovações em relação ao modelo WTA clássico (1):

- É um modelo de programação linear inteira: mais tratável que um modelo de programação não-linear.
- Fornece como saída, além da lista de alvos a serem atacados, o agrupamento ideal de aeronaves (tipo e quantidade) – denominado esquadrilha – para realizar tal ataque.
- Assegura uma probabilidade mínima de destruição aceitável para os alvos.

3.3. EXEMPLO DA APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Abordaremos nesta seção um exemplo hipotético no qual o decisor tem as seguintes aeronaves disponíveis: 12 A-1, 12 F-5, 12 A-29 e 12 AT-26. Foi definido que a probabilidade mínima de destruição de cada alvo é de 80% e que os valores unitários de cada alvo são os listados na tabela III.

A tabela V mostra a probabilidade de destruição p_{ia} de cada alvo i quando atacado por uma aeronave do tipo a . Para se calcular a probabilidade de destruição quando atacado por uma esquadrilha, basta usar a fórmula (6).

$$p_{ij} = 1 - \prod_{l=1}^{n_l} (1 - p_{ia}) \quad (6)$$

Onde l é o índice do conjunto das n_l aeronaves que fazem parte da esquadrilha j . Por exemplo: a esquadrilha β formada por 2 A-1 e 2 F-5 atacando o alvo *radar 1*, tem a seguinte probabilidade de destruição:

$$p_{radar1,\beta} = 1 - (1 - 0,1347)(1 - 0,1347)(1 - 0,2259)(1 - 0,2259) = 0,5513$$

Tabela V. Probabilidade de destruição de alvos quando atacados por **uma** aeronave

Alvo	A-1	F-5	A-29	AT-26
Radar 1	0,1347	0,2259	0,1000	0,0600
Radar 2	0,1626	0,2696	0,1200	0,0800
Radar 3	0,2585	0,4053	0,1900	0,1300
Radar 4	0,2860	0,4473	0,2100	0,1400
Centro C2	0,2152	0,3488	0,1600	0,1000
L-Centro C2	0,1433	0,2397	0,1000	0,0700
Link-B1	0,1750	0,2851	0,1300	0,0900
Link-B2	0,2200	0,3550	0,1600	0,1100
Link-B3	0,1751	0,2883	0,1300	0,0800
Usina	0,1084	0,1837	0,0800	0,0500
Distr. B1	0,2113	0,3431	0,1600	0,1000
Distr. B2	0,1143	0,1937	0,0800	0,0500
Hangar-B1	0,1354	0,2272	0,1000	0,0600
Hangar -B2	0,1792	0,2932	0,1300	0,0900
Hangar -B3	0,1741	0,2873	0,1300	0,0800
Paio1-B1	0,1080	0,1834	0,0800	0,0500
Paio1 -B2	0,0235	0,0414	0,0168	0,0109
Paio1 -B3	0,1995	0,3255	0,1500	0,1000
Pista-B1	0,1431	0,2394	0,1000	0,0700
Pista -B2	0,1808	0,2974	0,1300	0,0900
Pista -B3	0,2614	0,4047	0,2000	0,1300
Pátio 1 B1	0,2003	0,3261	0,1500	0,1000
Pátio 2 B1	0,1421	0,2377	0,1000	0,0700
Pátio B2	0,1812	0,2973	0,1300	0,0900
Pátio 1 B3	0,1899	0,3082	0,1400	0,0900
Pátio 2 B3	0,1498	0,2487	0,1100	0,0700

As esquadrilhas foram formadas por similaridades (velocidade e alcance) entre as aeronaves: aviões A-1 e F-5 podem voar juntos em uma esquadrilha e aeronaves A-29 e AT-26 idem. O número de aeronaves de um tipo dentro de cada esquadrilha foi $n_2 \in \{0, 2, 4, 6, 8, 10, 12\}$. Deste modo, formaram-se 90 tipos diferentes de esquadrilha.

O resultado da aplicação da metodologia proposta para a definição dos alvos a serem atacados e por quais esquadrilhas para os dois primeiros ataques (considerou-se que o primeiro ataque teve 100% de êxito) foram os listados na tabela VI, onde na coluna ataque temos qual esquadrilha foi designada para realizar o ataque e os números entre parênteses indicam a probabilidade de destruição do alvo quando atacado pela esquadrilha.

Tabela VI. Resultado da aplicação da metodologia proposta

Alvo	Valor unitário w_i	1° Ataque	2° Ataque
Distr. B1	0,1523	4 A1 / 4 F-5 (0,928)	---
Centro C2	0,0834	2 A1 / 4 F-5 (0,889)	---
Paiol-B2	0,0664	---	---
Paiol-B3	0,0664	4 A1 / 2 F-5 (0,813)	---
Distr. B2	0,0635	---	10 A1 / 2 F-5 (0,807)
Radar 1	0,0600	---	12 A-29 / 12 AT-26 (0,866)
Pista-B2	0,0512	12 A-29 / 0 AT-26 (0,812)	---
Radar 4	0,0450	2 A1 / 2 F-5 (0,844)	---
Link-B1	0,0400	---	2 A1 / 4 F-5 (0,822)
Pista-B1	0,0384	---	0 A1 / 6 F-5 (0,806)
Pista-B3	0,0384	0 A-29 / 12 AT-26 (0,812)	---
Usina	0,0381	---	---
⋮	⋮	---	---
Hangar -B3	0,0042	---	---
% campanha realizada no ataque		43,68%	20,20%
% campanha realizada no total		43,68%	63,88%

Observe que os alvos designados para o 1° ataque não foram escolhidos seguindo estritamente a ordenação dos valores unitários. O alvo *Paiol – B2*, por exemplo, não foi designado para os dois primeiros ataques apesar de possuir o terceiro maior valor unitário. Isto se deve ao fato de sua probabilidade de destruição ser muito pequena (vide tabela V).

Nas últimas duas linhas da tabela VI encontram-se os indicadores da porcentagem da campanha realizada (somatório dos valores unitários dos alvos já atacados). O primeiro ataque foi responsável por 43,68% da campanha, apesar de atacar somente 23,07% da totalidade dos alvos.

4. CONCLUSÃO

Foi proposta uma adaptação da formulação clássica do problema de designação arma-alvo – WTA e o uso da metodologia multicritério chamada MACBETH para a resolução dos problemas de seleção de armamentos e de alvos.

Na segunda seção, o modelo WTA clássico e a metodologia de apoio à decisão multicritério MACBETH foram revistos e a seção 3 introduziu nossa proposta.

O uso de uma metodologia científica de apoio a decisão multicritério possibilita uma melhor fundamentação aos julgamentos do decisor no tocante ao estabelecimento dos valores unitários de cada alvo. Além disto, o acompanhamento da campanha pelo somatório dos valores individuais dos alvos já atacados mostra-se útil como um indicador da porcentagem da campanha já realizada

O modelo de programação linear inteira proposto trouxe várias inovações em relação ao modelo WTA clássico: (1) por ser um modelo de programação linear inteira é mais tratável que um modelo de programação não-linear; (2) fornece como saída, além da lista de alvos a serem atacados, o agrupamento ideal de aeronaves (tipo e quantidade) – denominado esquadrilha – para realizar tal ataque; e (3) assegura uma probabilidade mínima de destruição aceitável para os alvos.

Como trabalhos futuros, sugere-se a inclusão no modelo proposto de restrições quanto ao alcance das aeronaves e janelas de horário para os alvos serem atacados (HSO – hora sobre o alvo).

5. BIBLIOGRAFIA

[1] Manne, Alan S. “A Target-Assignment Problem.” *Operations Research Vol 6*, May-June, 1958: 346-351.

[2] Ahuja, R. K., A. Kumar, K. C. Jha, e J. B. Orlin. “Exact and Heuristic Algorithms for the Weapon-Target Assignment Problem.” *Operations Research Vol 55, n° 6*, 2007: 1136-1146.

[3] Gomes, Luiz Flávio Autran Monteiro, Marcela Cecilia G. Araya, e Claudia Carignano. *Tomada de Decisões em Cenários Complexos*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

[4] Bana e Costa, Carlos A., Jean-Marie De Corte, e Jean-Claude Vansnick. “MACBETH.” 2003.