

# Método de Prescrição de Navegação Baseada em Risco para RPA

Guilherme Conceição Rocha<sup>1</sup>, Vitor Henrique Oliveira Bourguignon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), São José dos Campos/SP – Brasil

<sup>2</sup>Instituto de Fomento e Coordenação Industrial (IFI), São José dos Campos/SP – Brasil

**Resumo** – Esse trabalho estudou um método de prescrição de Navegação Baseada em Riscos para Aeronave Remotamente Pilotada. Durante o desenvolvimento do método, identificou-se os parâmetros que influenciam no número de fatalidades no solo por acidente de aeronaves não tripuladas e estabeleceu-se uma metodologia que defina os critérios de densidade populacional máxima para operação daquelas aeronaves. Procedimentos matemáticos que calculam a segurança da operação de aeronaves não tripuladas considerando o atual estágio do desenvolvimento desta tecnologia foram estabelecidos. Objetivou-se um estudo que considerasse um desenvolvimento sustentável e seguro para o setor e, assim, uma avaliação de risco baseada em nível de aprovação de autoridade foi proposta. A partir disso, foi possível definir rotas de navegação que atendam a critérios de densidade populacional máxima. Finalmente, avaliou-se criticamente a aplicabilidade prática do método por meio de um estudo de caso real.

**Palavras-Chave** – RPA, Risco, Densidade.

## I. INTRODUÇÃO

A demanda por operação civil e militar de Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely-Piloted Aircraft* – RPA) cresce anualmente, o que aumenta a necessidade de se regular esse tipo de atividade. Conforme descrito em [1], inexistente referência normativa capaz de estabelecer critérios objetivos para deliberar sobre a autorização e planejamento de tais operações.

Como consequência de não se ter uma referência normativa, as Autoridades Reguladoras poderiam atuar de forma discricionária, enquanto alguns operadores poderiam optar pela execução de operações clandestinas. Além disso, a legislação é um aspecto crítico, pois as incertezas regulamentares inibem que usuários que precisam dos serviços façam contratações, e que empresários tomem suas decisões e façam novos investimentos no setor.

Com o propósito de estabelecer critérios objetivos de segurança para operação de RPA, é proposta uma metodologia de Navegação Baseada em Risco que substancie a análise do risco de fatalidades no solo por acidente de RPA. Apresenta-se um estudo baseado no estado da arte das principais publicações de cunho técnico-científico na área de uso e aplicação de RPA.

Para se prescrever uma metodologia de Navegação Baseada em Risco, é necessário o estudo sistemático de: número de fatalidades no solo por acidente de RPA, superfície letal de colisão (geométrica e térmica) e densidade média da população exposta. Tais parâmetros foram discutidos pelas referências [3] a [8], porém as mesmas não abrangem o problema completamente.

Portanto, a abordagem proposta nesse artigo propõe a constituição de um procedimento de referência.

Vale ressaltar que o produto final resultante da aplicação do método não é uma regra, mas sim um guia para uma avaliação fundamentada do risco de fatalidades no solo por acidente de RPA. Dessa forma, o guia constitui uma excelente ferramenta para suporte de decisões baseadas em um objetivo de segurança para um determinado número de fatalidades.

Os resultados gerados pela metodologia devem ser submetidos a análise da autoridade competente para tomada de decisão com relação ao objetivo de segurança para cada missão.

É dirigido aos atores de aeronavegabilidade e aos operadores de RPA e aplicável para permissões especiais de voo, certificações de RPA, bem como prescrição de Navegação Baseada em Risco (NBR).

No escopo do presente trabalho, consideram-se veículos aéreos não tripulados de asa fixa.

## II. DEFINIÇÕES

O método proposto faz uso dos conceitos e definições listados a seguir, conforme [2]:

**Acidente controlado:** queda da aeronave não tripulada nas condições previstas no projeto do sistema (acionamento de paraquedas, acionamento de airbag, entre outros) para limitar o dano resultante.

**Acidente descontrolado:** queda da aeronave não tripulada em condições em que o sistema de controle não permite mais o controle de atitudes ou trajetórias, o que requer considerar, ao analisar o dano resultante, os casos mais desfavoráveis (velocidade, ângulo de impacto, dentre outros).

**Superfície letal de colisão:** É a superfície em que as pessoas presentes sofrem agressão durante o acidente com o veículo aéreo, caso não estejam protegidas contra as agressões correspondentes, sejam elas de cunho mecânico ou térmico.

**Configuração de acidente:** arranjo que leva em conta todas as características de um acidente dentro de um determinado espectro para as variáveis envolvidas.

**Densidade populacional média máxima:** valor máximo da densidade média da população em um voo, calculado para respeitar o objetivo do número de fatalidades no solo em cada configuração de colisão.

**Probabilidade de colisão instantânea:** probabilidade numérica de acidente sobre uma determinada área de densidade populacional, calculada para cada ponto do plano de voo da aeronave.

**Área de densidade populacional:** região geográfica que apresenta densidade populacional previamente conhecida e

está sujeita ao impacto da aeronave com o solo ao longo de seu plano de voo.

### III. NÚMERO DE FATALIDADES NO SOLO POR ACIDENTE DE RPA

O equacionamento que define o número de fatalidades no solo por acidente (NF) é estabelecido da seguinte forma, conforme [3]:

$$NF = 10^{-6} \times \sum_{i=1}^k \times P[\text{colisão}]_{CAi} \times SLC_{CAi} \times \overline{DP}_{CAi} \times f_{pi} \quad (1)$$

Nessa equação, os termos são definidos conforme tabela a seguir.

TABELA I. PARÂMETROS DE CÁLCULO DO NÚMERO DE FATALIDADES

Parâmetro	Definição
NF	Número de fatalidades no solo em um voo, por hora de voo.
$i$	Índice de configuração de acidente, para $k$ configurações consideradas.
$f_{pi}$	$f_{pi}$ : fator de proteção ( $0 \leq f_{pi} \leq 1$ ). Sempre que não houver informações suficientes sobre este fator, deve-se considerá-lo como sendo o valor 1 (um).
$P[\text{colisão}]_{CAi}$	Probabilidade de colisão na configuração de acidente $i$ em um voo, por hora de voo.
$SLC_{CAi}$	Superfície letal de colisão, na configuração de acidente $i$ .
$\overline{DP}_{CAi}$	Densidade média de população exposta à colisão em um voo na configuração de acidente $i$ .
$10^{-6}$	Conversão $m^2/km^2$ .

A expressão do número de fatalidades contém um termo dedicado à probabilidade de colisão, um termo dedicado à superfície letal de colisão, um termo dedicado à densidade média da população na zona potencial de acidente e um termo dedicado à proteção da população contra as agressões do acidente.

As probabilidades de colisão nas diferentes configurações de acidente consideradas são avaliadas com base em análises de segurança, associando-se para cada condição de falha catastrófica uma probabilidade de colisão.

A superfície letal de colisão geralmente é estendida considerando-se os choques de pessoas antes do impacto ao solo (na altura de uma pessoa), de acordo com o ângulo de impacto, bem como os efeitos térmicos que podem acompanhar o choque.

Em (1) considera diferentes configurações de acidente associadas a diferentes superfícies letais de colisão e o número de fatalidades é normalizado por hora de voo.

Para veículos de asa fixa, duas configurações genéricas de acidente podem ser consideradas:

- o acidente controlado que, se não puder garantir sistematicamente a ausência de fatalidades no solo, reduz a área potencial de acidente, podendo minimizar a superfície letal de colisão;
- o acidente não controlado, que estende a área potencial de acidente e não permite agir sobre a

superfície letal de colisão. Nesse caso, considera-se um voo de terminação em planeio (glide), maximizando a superfície letal de colisão.

A fim de prescrever uma Navegação Baseada em Risco, a autoridade reguladora deve estabelecer um objetivo de número de fatalidades por hora de voo máximo aceitável para uma determinada configuração operacional.

### IV. SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO DE RPA

Considera-se a superfície letal de colisão de RPA, como a superfície na qual as pessoas ali presentes podem ser gravemente feridas durante um acidente caso não estejam protegidas contra as agressões correspondentes ao acidente.

As seguintes hipóteses simplificadoras são estabelecidas:

1- Sistemas de terminação de voo específicos para certos veículos que podem afetar a superfície letal não estão integrados na metodologia (e.g.: paraquedas, amortecedor).

2- Obstáculos encontrados pela aeronave durante a descida e deslizamento no solo não são considerados como redutores da superfície letal.

3- A aeronave permanece intacta até o impacto no solo.

4- As possíveis projeções de detritos consecutivos ao acidente não são consideradas no modelo geométrico para calcular a superfície de impacto.

5- O deslizamento da aeronave no solo ocorre em uma trajetória retilínea.

6- Qualquer contato entre a aeronave em movimento e uma pessoa é letal, desde que a energia cinética de impacto seja maior ou igual a 56 ft\*lb ou 76 J, conforme OTAN [4].

A superfície letal de colisão na configuração de acidente  $i$ ,  $SLC_{CAi}$ , considerada para a avaliação do número de fatalidades no solo por acidente, corresponde ao valor máximo entre a superfície letal de colisão mecânica e a superfície letal de colisão térmica nesta configuração, ou seja:

$$SLC_{CAi} = \max[SLC_{mecânica}; SLC_{térmica}] \quad (2)$$

#### A. Superfície letal de colisão mecânica

Como mostrado em [5], há essencialmente três tipos de métodos para calcular a superfície de impacto mecânico:

- Métodos baseados em geometria, que levam em consideração dimensões da aeronave, o ângulo de impacto no solo e o curso de deslizamento da aeronave no solo;
- Métodos baseados unicamente na massa da aeronave, baseados em dados reais de aeronaves acidentadas, estabelecendo uma correlação entre a massa e a superfície de impacto no solo, integrando quaisquer detritos resultantes do acidente;
- Métodos baseados em categorias de aeronaves, que se baseiam em dados reais de acidentes de

aeronaves tripuladas e que alocam uma área de impacto ao solo de acordo com a categoria da aeronave.

Adotou-se um método baseado na geometria, certamente mais teórico que os outros (com as imprecisões associadas com as hipóteses consideradas), mas por outro lado mais universal e mais verificável.

Duas configurações genéricas de colisão são estudadas para um veículo de asa fixa, conforme figuras a seguir: "mergulho" e "planeio".

1) *Condição de mergulho*: Apenas uma área letal é considerada em voo.

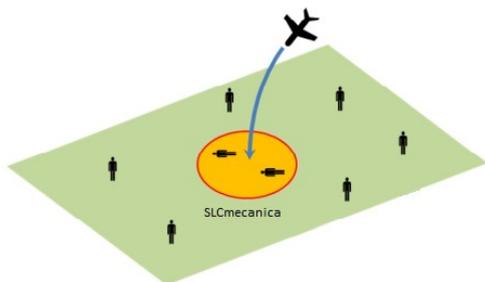


Fig. 1. Área letal mecânica para o acidente - tipo mergulho.

A fórmula para a superfície letal é dada por:

$$SLC_{mecânica} = \pi \times \left( \frac{1}{2} \times ENV + R_{pessoa} \right)^2 \quad (3)$$

sendo

$ENV$ : envergadura da aeronave (m);

$R_{pessoa}$ : raio de uma pessoa (m) = 0,3.

2) *Condição de planeio*: Duas áreas letais são consideradas no planeio, a saber:

- uma primeira área correspondente à descida da aeronave a partir da altura de uma pessoa em pé até o impacto no solo;
- uma segunda área, consecutiva ao deslizamento da aeronave no solo, até que este perde energia cinética suficiente para se tornar não letal (por hipótese conservadora, até a parada do veículo).

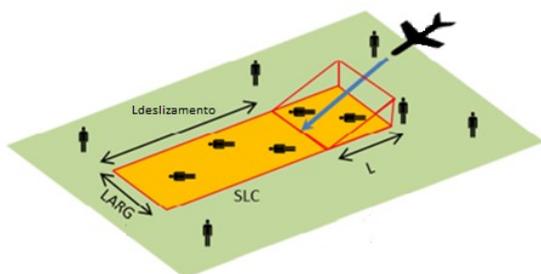


Fig. 2. Área letal mecânica para o acidente em planeio.

A largura da superfície é dada por:

$$LARG_{planeio} = ENV + 2 \times R_{pessoa} \quad (4)$$

O comprimento projetado no solo é determinado pela seguinte equação:

$$L_{descida} = H_{pessoa} \times \left( \frac{L}{D} \right)_{max} \quad (5)$$

sendo

$H_{pessoa}$ : altura de uma pessoa (m) = 1,9;

$\left( \frac{L}{D} \right)_{max}$ : razão de planeio (*lift to drag ratio*) máxima do veículo.

Se a razão de planeio máxima do veículo não é conhecida, então a mesma pode ser estimada por:

$$L_{descida} = \frac{H_{pessoa}}{\tan(\gamma)} \quad (6)$$

sendo

$H_{pessoa}$ : altura de uma pessoa (m) = 1,9;

$\tan(\gamma)$ : tangente do ângulo de impacto.

Para a segunda área correspondente ao deslizamento no solo, o comprimento é determinado de acordo com uma fórmula empírica de comprimento de deslizamento, a partir de análise de regressão de dados, baseada em banco de dados de acidentes do NTSB (*US National Transportation Safety Board*), conforme proposto na referência [6] para a aviação geral e ilustrada a seguir:

$$\ln(l) = b + m \times \ln(W) + \sum_{i=1}^5 \alpha_i S_i + \sum_{i=1}^5 \beta_i A_i + \varepsilon \quad (7)$$

Os parâmetros dessa expressão estão detalhados em [6] e [7].

Fixando-se o comprimento de deslizamento,  $L_{deslizamento}$ , como o 90º percentil da lei de distribuição (significa que  $P[l \leq L_{deslizamento}] = 0,90$ ), tem-se:

$$L_{deslizamento} = \log N^{-1} [0,90; \ln l; \sigma] \quad (8)$$

O que corresponde à lei Log-Normal inversa de probabilidade 0,90, de valor esperado  $\ln l$  e de desvio padrão  $\sigma$ .

No caso onde a velocidade de impacto não possa ser avaliada, a escolha da faixa de velocidade de impacto requerida na equação 7 poderá ser a  $V_{ne}$  (*never exceed*) do veículo.

### B. Superfície letal térmica do acidente

Os incêndios gerados pelo combustível derramado durante o acidente podem causar queimaduras letais além da área de impacto mecânico da aeronave, particularmente para

sistemas que transportam uma grande quantidade de combustível.

Portanto, uma superfície letal térmica do acidente  $SLC_{térmica}$  é definida por:

$$SLC_{térmica} = \pi r^2 \quad (9)$$

Conforme [7], a superfície letal térmica é dada por:

$$SLC_{térmica} = \pi \left( \sqrt{\frac{0,35e^{-0,05 \times 10\sqrt{V}} \times \pi \left(\frac{10\sqrt{V}}{2}\right)^2 \times FT_{combustível}}{4\pi FT_{letal}}} \right)^2 \quad (10)$$

com:

r: raio da superfície letal (m);

V: volume de combustível derramado no acidente ( $m^3$ );

$FT_{combustível}$ : fluxo térmico de combustão do combustível ( $kW/m^2$ ) = 2400 para gasolina, 1700 para o querosene, 1400 para o diesel;

$FT_{letal}$ : fluxo térmico letal ( $kW/m^2$ ) = 15,44 para o homem.

Como uma aproximação conservadora, a capacidade total de combustível da aeronave poderá ser considerada para estimar o volume de combustível derramado.

## V. DENSIDADE MÉDIA DA POPULAÇÃO EXPOSTA

As seguintes hipóteses simplificadoras foram consideradas para a determinação da densidade média da população exposta.

- Uma zona potencial de acidente por configuração de acidente é definida em cada ponto do plano de voo. Em uma situação de acidente, há uma equiprobabilidade de colisão em cada unidade de superfície desta área;
- As densidades populacionais consideradas excluem as aglomerações de pessoas em grandes eventos. O sobrevoos dessas aglomerações é condicionado pela avaliação e aprovação de autoridade competente, sabendo que neste contexto a ocorrência de fatalidades em caso de acidente não controlado que ocorra nessa área é considerada praticamente certa, desde que a energia cinética do acidente seja letal para o ser humano. Recomenda-se nesses casos, estabelecer-se um cone de segurança para evitar sobrevoos dessas áreas de aglomeração.
- As densidades populacionais são estabelecidas com base em censos populacionais, consideram o local de residência dos habitantes e, portanto, não levam em conta os deslocamentos da população.

O número de fatalidades no solo por acidente de RPA considera uma densidade média de população exposta à colisão para cada configuração de acidente  $i$ ,  $\overline{DP}_{CAi}$ . Essa densidade é calculada com base numa divisão do território de evolução do veículo em  $n$  níveis de densidade [7] e varia dependendo da zona potencial de acidente associada à configuração de acidente:

$$\overline{DP}_{CAi} = \frac{1}{T_{voo}} \times \sum_{j=1}^n \int_0^{T_{voo}} \frac{S_{ZDP_j \cap ZPA_{CAi}(t)}}{S_{ZPA_{CAi}(t)}} dt \times DP_{ZDP_j} \quad (11)$$

A tabela a seguir apresenta a definição dos termos utilizados em (11).

TABELA II. DEFINIÇÃO DE TERMOS UTILIZADOS NO CÁLCULO DA DENSIDADE MÉDIA DE POPULAÇÃO

Parâmetro	Definição
$\overline{DP}_{CAi}$	Densidade média da população exposta ao acidente em um voo na configuração de acidente $i$
$T_{voo}$	Tempo total de voo
$j$	Índice do nível de densidade populacional, de acordo com uma divisão do território de evolução do veículo em $n$ níveis de densidade
$S_{ZPA_{CAi}(t)}$	Superfície da zona potencial de acidente para a configuração de acidente $i$ no instante $t$ do voo
$S_{ZDP_j \cap ZPA_{CAi}(t)}$	Superfície de interseção das zonas de densidade populacional de nível $j$ com a zona potencial de acidente para a configuração de acidente $i$ no instante $t$ do voo
$DP_{ZDP_j}$	Densidade populacional das zonas de densidade de população de nível $j$

A relação de superfície  $\frac{S_{ZDP_j \cap ZPA_{CAi}(t)}}{S_{ZPA_{CAi}(t)}}$  representa a probabilidade instantânea de acidente em uma zona de densidade populacional de nível  $j$  com a configuração de colisão  $i$ , considerando-se a premissa de equiprobabilidade de colisão em cada unidade de superfície da zona potencial de acidente.

A densidade média  $\overline{DP}_{CAi}$  é obtida pela sobreposição da zona potencial de acidente para a configuração de acidente  $i$  no mapa de densidade populacional, de acordo com o plano de voo.

## VI. ESTUDO DE CASO: USO DA METODOLOGIA PARA ESTIMAR CRITÉRIOS DE DENSIDADE POPULACIONAL MÁXIMA PERMITIDA ÀS ÁREAS SOBREVOADAS POR UM RPAS TÁTICO

No presente estudo de caso, buscou-se determinar a densidade populacional máxima permitida às áreas sobrevoadas pelo Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely-Piloted Aircraft System* – RPAS) tático H-450WE ATLAS.

### A. Critério de número máximo de fatalidade em solo (NF)

Considerou-se um objetivo de número de fatalidades operacionais da ordem de 1 fatalidade por 10 mil horas voadas, ou  $10^{-4}$  fatalidades / H, com base no pressuposto de que o risco incorrido por terceiros no solo em voos do H-

450WE ATLAS deve ser do mesmo nível que o risco em voos de aeronaves civis tripuladas de pequeno porte, classe I (monomotor, até 6000 libras) [9].

Para o caso de RPAS, conforme descrito na STANAG 4671 [4], considerou-se que apenas 10% dos acidentes são devido à falha oriunda de projeto. Logo, o número de fatalidades devido a falhas de projeto é fixado em:

$$NF = 1 \times 10^{-5}/H \quad (12)$$

### B. Avaliação das probabilidades de colisão

As probabilidades de colisão nas diferentes configurações de acidente consideradas foram avaliadas com base em uma análise de segurança.

No relatório de análise de segurança (*Safety Assessment Report*) do sistema [10], as probabilidades associadas a condições de falhas catastróficas da aeronave H-450 ATLAS foram somadas e o valor resultante é igual:

$$P[\text{colisão}]_i \sim 1,55 \times 10^{-5} / H \quad (13)$$

### C. Superfície letal de colisão mecânica para um veículo de asa fixa em voo de mergulho

Para o caso do H-450 ATLAS, tem-se:

$$ENV \text{ (envergadura da aeronave)} = 10,51 \text{ m}$$

Desse modo, aplicando (3):

$$SLC_{mecanica} = \pi \times \left(\frac{1}{2} \times 10,51 + 0,3\right)^2 = 96,9 \text{ m}^2 \quad (14)$$

### D. Superfície de colisão letal mecânica para um veículo de asa fixa em planeio

Para o caso do H-450 ATLAS, como:

$\tan(\gamma)$ : ângulo de impacto =  $4,15^\circ$  (conforme informação do conceito operacional da aeronave).

Tem-se que,

$$L_{descida} = 26,19 \text{ m} \quad (15)$$

### E. Comprimento de deslizamento para veículo de asa fixa comparável a um avião ou planador de aviação geral

Para o H-450, considerou-se uma velocidade de impacto igual a 85 kt e um ângulo de impacto igual a  $4,15^\circ$ , de acordo com o conceito operacional da aeronave.

Deste modo chega-se em,

$$L_{deslizamento} = 35,43 \text{ m} \quad (16)$$

A superfície letal mecânica é dada por:

$$SLC_{mecanica} = LARG \times (L_{descida} + L_{deslizamento}) = 684,60 \text{ m}^2 \quad (17)$$

### F. Superfície letal térmica do acidente

Uma superfície letal térmica do acidente  $SLC_{térmica}$  é estimada por (10) com:

- V: volume de combustível derramado no acidente ( $m^3$ ) = 0,15.
- $FT_{combustivel}$ : fluxo térmico de combustão do combustível ( $kW/m^2$ ) = 2400 para gasolina.
- $FT_{letal}$ : fluxo térmico letal ( $kW/m^2$ ) = 15,44 para o homem.

Numa primeira aproximação conservadora, a capacidade total de combustível do veículo foi considerada para estimar o volume de combustível derramado.

Portanto,

$$SLC_{térmica} = 132,02 \text{ m}^2 \quad (18)$$

### G. Superfície letal global do acidente

Para o H-450 ATLAS, conservadoramente, considerou-se que em 100% dos casos ter-se-á a configuração de acidente "planeio".

Como,  $SLC_{CCi} = MAX[SLC_{mecanica}; SLC_{térmica}]$ , tem-se que:

$$SLC_{CCi} = 684,60 \text{ m}^2 \quad (19)$$

### H. Densidade média da população exposta

A aplicação de (1) permite determinar a densidade média da população a ser respeitada em um voo (valor máximo) de acordo com este objetivo.

Uma densidade máxima aceitável, independentemente da configuração de acidente, pode ser considerada:

$$\overline{DP}_{max} = \frac{NF}{10^{-6} \times \sum_{i=1}^k P[cra]_{CCi} \times SLC_{CCi}} \quad (20)$$

Portanto, com os dados calculados, tem-se que:

$$\overline{DP}_{max} = 942 \text{ hab}/km^2 \quad (21)$$

Para fins de comparação, a cidade do Rio de Janeiro possui densidade demográfica média igual a 5265 hab./km<sup>2</sup>.

É proposta uma tabela de aceitação de riscos conforme Metodologia proposta pela EASA [11], que afirma que uma probabilidade de evento catastrófico maior que 20 vezes o objetivo de segurança do projeto torna o risco muito alto. Qualquer falha que ofereça um risco maior que este, contribuirá mais para a ocorrência de uma catástrofe que todas as outras causas (operacionais e ambientais) juntas.

TABELA III. NÍVEL DE RISCO E CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO CONFORME DENSIDADE POPULACIONAL MÁXIMA

Nível de Risco	Valor de NF (por hora de voo)	Valor de $\overline{DP}_{max}$ em hab/km <sup>2</sup>	Aceitação
Baixo	$NF \leq 10^{-5}$	$\overline{DP}_{max} \leq 942$	Nível Especialista
Médio	$10^{-5} < NF < 2 \cdot 10^{-4}$	$942 < \overline{DP}_{max} < 18840$	Esquadrão
Alto	$NF \geq 2 \cdot 10^{-4}$	$\overline{DP}_{max} \geq 18840$	Autoridade máxima de regulação

Portanto, pode-se definir um fator de segurança (FS), relacionado com o critério EASA de aceitabilidade e com a densidade populacional real de determinada região, tal que:

$$FS = \frac{20 \times \text{Densidade populacional máxima}}{\text{Densidade populacional real}} \quad (22)$$

Risco baixo:  $FS \geq 20$ .

Risco médio:  $1 < FS < 20$ .

Risco alto:  $FS \leq 1$ .

Ressalta-se que as densidades populacionais consideradas excluem as aglomerações de pessoas (desfiles, concertos, eventos esportivos, entre outras). O sobrevoo dessas aglomerações é condicionado pela avaliação e aprovação da autoridade competente.

## VII. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A aplicação real da metodologia de Navegação Baseada em Risco se mostrou coerente com a realidade da aviação, em termos de índice de segurança da operação.

Conforme descrito no estudo de caso, considerou-se que o número de fatalidades devido a falhas de projeto para o H-450WE ATLAS é fixado em  $10^{-5}$  fatalidades / H, semelhante ao prescrito no RBAC 23 para aeronaves civis tripuladas de pequeno porte, classe I.

Numa eventual operação do H-450WE ATLAS sobrevoando a cidade do Rio de Janeiro, os resultados apresentados na tabela 5 permitem concluir que o risco calculado seria considerado médio, e a aprovação seria feita pelo chefe do esquadrão, o que é um resultado plausível. O valor de FS seria aproximadamente 3,6 (18840/5265), com relação às operações de aeronaves civis tripuladas de pequeno porte, classe I, certificadas conforme RBAC 23.

Tal fator de segurança está relacionado com a especificidade da operação de aeronaves não tripuladas, como por exemplo a percepção de risco por parte do governo e da sociedade. Observa-se que quanto mais o fator de segurança se aproxima de 1, maior nível de aprovação da autoridade competente para tomada de decisão com relação ao objetivo de segurança para cada missão.

## VIII. CONCLUSÃO

Por meio do critério de máxima densidade média da população exposta, para um determinado par origem e destino, é possível definir uma trajetória de navegação que minimize o risco de ocorrência de fatalidades no solo.

Essa etapa é fundamental para a prescrição de uma Navegação Baseada em Risco. O método contém um conjunto de hipóteses simplificadoras, mas mostra-se bastante simples de ser implementado e conservador.

Caso a missão do RPAS seja monitorar uma grande aglomeração de pessoas em um evento, o nível de risco da missão será naturalmente considerado alto, conforme descrito na tabela 5, não permitindo uma Navegação Baseada em Risco e demandando uma aceitação pela autoridade máxima de regulação, a qual tomará a decisão ponderando risco e retorno de se executar a missão.

Em trabalhos futuros, será possível detalhar e automatizar algumas etapas do método, de modo a transformá-lo em uma ferramenta prática e útil de apoio à tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- [1] US Range Commander Council (DOD), "Rationale and Methodology Supplement", Supplement to document n° 323-99 "Range Safety Criteria for Unmanned Air Vehicles", abril 2001.
- [2] US NAVY, "Third Party Risk Assessment Tool (3PRAT)", Report n° NAWCADPAX/TR-2012/218, julho 2012.
- [3] Reece Clothier and Rodney Walker (Australian Research Centre for Aerospace Automation), "Determination and Evaluation of UAV Safety Objectives", 21st International Unmanned Air Vehicle Systems Conference, Bristol, 2006.
- [4] US NAVY, "Crash Lethality Model", Report n° NAWCADPAX/TR-2012/196, junho 2012.
- [5] Richard Melnyk, Daniel Schrage and Hernando Jimenez (Georgia Institute of Technology/School of Aerospace Engineering), Vitali Volovoi (Independent Consultant), "A third-party casualty risk model for unmanned aircraft system operations", Reliability Engineering and System Safety n°124, 2014.
- [6] Lawrence Livermore National Laboratory (US Department of Energy), "Data Development Technical Support Document for Aircraft Crash Risk Analysis Methodology (ACRAM) Standard", agosto 1996.
- [7] Direction générale de l'armement. DGA/DT/ST/IP/ASA "GUIDE D'EVALUATION DU RISQUE DE DECES AU SOL PAR CRASH DE DRONE", edição 01/2017. No prelo.
- [8] Wu, Paul P. & Clothier, Reece A., Queensland University of Technology (Brisbane, Australia), "The Development of Ground Impact Models for the Analysis of the Risks Associated with Unmanned Aircraft Operations Over Inhabited Areas", 2012.
- [9] FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION (FAA). Advisory Circular (AC) N° 23.1309-1E, "System Safety Analysis and Assessment for Part 23 Airplanes". 17 november 2011.
- [10] Elbit Systems. SAR For Flights at Customer Site, report n° 027860-E-00. February 2013.
- [11] EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA). Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM) to Part 21. Issue 2. 30 october 2012.