

**MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA**



AVIAÇÃO MILITAR

ICA 57-24

**METODOLOGIA DE NAVEGAÇÃO BASEADA EM
RISCO PARA SISTEMAS DE AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS**

2020

**MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA
INSTITUTO DE FOMENTO E COORDENAÇÃO INDUSTRIAL**



AVIAÇÃO MILITAR

ICA 57-24

**METODOLOGIA DE NAVEGAÇÃO BASEADA EM
RISCO PARA SISTEMAS DE AERONAVES
REMOTAMENTE PILOTADAS**

2020



MINISTÉRIO DA DEFESA
COMANDO DA AERONÁUTICA
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL

PORTARIA DCTA Nº 2/DNO, 6 DE JANEIRO DE 2020.
Protocolo COMAER nº 67700.000086/2020-14

Aprova a edição da Instrução que dispõe sobre Metodologia de Navegação Baseada em Risco para Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas.

O DIRETOR-GERAL DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AEROESPACIAL, no uso de suas atribuições que lhe confere o inciso IV do art. 10 do Regulamento do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, aprovado pela Portaria nº 581/GC3, de 12 de abril de 2019; e, ainda, considerando o que consta do Processo nº 67770.003858/2019-02, resolve:

Art. 1º Aprovar a edição da ICA 57-24 “Metodologia de Navegação Baseada em Risco para Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas”, no âmbito do Comando da Aeronáutica, que com esta baixa.

Art. 2º Esta Portaria entra em vigor na data de sua publicação.

Ten Brig Ar LUIZ FERNANDO DE AGUIAR
Diretor-Geral do DCTA

(Publicado no BCA Nº 005, de 9 de janeiro de 2020)

SUMÁRIO

1 DISPOSIÇÕES PRELIMINARES	9
1.1 <u>FINALIDADE</u>	9
1.2 <u>ÂMBITO</u>	9
1.3 <u>NATUREZA</u>	9
2 ABREVIATURAS E CONCEITUAÇÕES	10
2.1 <u>ABREVIATURAS</u>	10
2.2 <u>CONCEITUAÇÕES</u>	10
3 FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA	13
3.1 <u>CONTEXTUALIZAÇÃO</u>	13
3.2 <u>FÓRMULA GERAL DO NÚMERO DE FATALIDADES NO SOLO POR CONFIGURAÇÃO DE ACIDENTE DE RPA POR HORA DE VOO</u>	13
4 PROBABILIDADE DE COLISÃO NO SOLO DE UMA RPA	15
4.1 <u>AVALIAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE COLISÃO</u>	15
5 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO DE UMA RPA	16
5.1 <u>HIPÓTESES</u>	16
5.2 <u>FÓRMULA GERAL DA SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO</u>	16
5.3 <u>SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO MECÂNICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE MERGULHO</u>	17
5.4 <u>SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO MECÂNICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE PLANEIO</u>	17
5.5 <u>SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO TÉRMICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE PLANEIO</u>	18
6 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE DE UMA RPA	19
6.1 <u>HIPÓTESES</u>	19
6.2 <u>ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE PARA RPA DE ASA FIXA EM ACIDENTE DESCONTROLADO</u>	19
6.3 <u>ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE PARA RPA DE ASA FIXA EM ACIDENTE COM QUEDA CONTROLADA</u>	20
7 DENSIDADE DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE DE UMA RPA	21
7.1 <u>CONSIDERAÇÕES</u>	21
7.2 <u>DENSIDADE MÉDIA DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE EM UM VOO</u> ..	21
7.3 <u>DENSIDADE POPULACIONAL MÁXIMA PERMITIDA EM VOO</u>	21
8 TABELA DE ACEITAÇÃO DE RISCOS	23
9 DISPOSIÇÕES GERAIS	24
10 DISPOSIÇÕES FINAIS	25
REFERÊNCIAS	26
Anexo – Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA	27
1 INTRODUÇÃO	27
2 NÚMERO DE FATALIDADES NO SOLO POR ACIDENTE DE RPA	28
3 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO DE UMA RPA	31
4 DENSIDADE DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE DE RPA	37
5 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE DE UMA RPA	40
REFERÊNCIAS	47

PREFÁCIO

É responsabilidade do Comando da Aeronáutica (COMAER) assegurar a segurança dos sistemas e produtos utilizados no cumprimento de suas missões. Não se trata somente de buscar excelência na operação de sistemas e equipamentos, na prestação de serviços ou na disponibilização de informações. A busca pela segurança deve ser aspecto mandatório em todas as atribuições pertinentes a este comando, eliminando riscos desnecessários ou injustificáveis que possam comprometê-la.

A complexidade, relevância e criticidade do assunto abordado se tornam ainda mais elevadas a medida que o fomento à indústria nacional de material de defesa incorpora novos vetores com crescente sofisticação tecnológica. Desta incorporação, surge a necessidade de novos regulamentos e metodologias que buscam garantir a operação segura destes novos vetores.

Nos últimos anos, o COMAER incorporou à sua frota duas unidades do *Remotely Piloted Aircraft System* (RPAS) Hermes 450 Atlas e, em 2014, adquiriu uma unidade do RPAS Hermes 900, sendo estes os primeiros veículos aéreos remotamente pilotados em posse do Comando da Aeronáutica. Surge, portanto, a demanda por procedimentos que assegurem a segurança da operação desses sistemas.

O segmento aeronáutico utiliza-se de termos técnicos e padronizados para que haja amplo entendimento dos significados, de forma a colaborar para a segurança das operações aéreas. Posto isso, é importante esclarecer que a utilização do termo SRPA, tradução de RPAS, pode causar confusão por já haver o termo SRPA, acrônimo de *Standard and Recommended Procedures*, padronizado internacionalmente.

Com o propósito de desenvolver uma metodologia de Navegação Baseada em Risco que substancie a análise do risco de fatalidades no solo por acidente de Aeronaves Remotamente Pilotadas (*Remotely Piloted Aircraft* - RPA) em operação pela Força Aérea Brasileira (FAB), a Divisão de Certificação de Produtos Aeroespaciais (CPA) do IFI promoveu um estudo baseado no estado da arte das principais publicações de cunho técnico-científico na área de uso e aplicação de RPAS's.

Esta metodologia estabelece procedimentos matemáticos que calculam a segurança da operação de RPA do COMAER considerando o atual estágio do desenvolvimento desta tecnologia. Objetiva-se promover um desenvolvimento sustentável e seguro para o setor e, assim, algumas restrições operacionais, principalmente no sobrevoo de áreas populosas, foram julgadas como necessárias neste momento. É esperado que a experiência obtida na prática nos próximos anos resulte em um maior conhecimento e superação dos desafios para uma ampla integração desta classe de aeronaves no sistema de aviação militar.

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.

1 DISPOSIÇÕES PRELIMINARES

1.1 FINALIDADE

1.1.1 Esta Instrução visa detalhar a metodologia de avaliação do risco de fatalidades no solo por acidente de Aeronave Remotamente Pilotada (*Remotely Piloted Aircraft - RPA*) de asa fixa a ser aplicada nos produtos aeronáuticos da frota da Força Aérea Brasileira.

1.1.2 Os procedimentos descritos nesta Instrução servem como um guia para a aplicação da metodologia de Navegação Baseada em Risco. 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.

1.1.3 É dirigido aos atores de aeronavegabilidade e aos operadores de RPA.

1.2 ÂMBITO

Esta Instrução aplica-se a todas as Organizações Militares do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial envolvidas em processos de desenvolvimento e certificação, bem como de segurança de sistemas e produtos aeronáuticos e de defesa. Além disso, esta Instrução é também dirigida aos operadores de RPA.

1.3 NATUREZA

A presente Instrução é de natureza Ostensiva.

2 ABREVIATURAS E CONCEITUAÇÕES

2.1 ABREVIATURAS

COMAE: Comando de Operações Aeroespaciais;

COMAER: Comando da Aeronáutica;

COMPREP: Comando de Preparo;

CPA: Divisão de Certificação de Produto Aeroespacial;

DCTA: Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial;

FAB: Força Aérea Brasileira;

IFI: Instituto de Fomento e Coordenação Industrial;

OTAN: Organização do Tratado do Atlântico Norte;

PA: Produto Aeronáutico;

RPA: *Remotely Piloted Aircraft*;

RPAS: *Remotely Piloted Aircraft System*.

2.2 CONCEITUAÇÕES

Para os propósitos desta Instrução, os termos técnicos devem seguir as definições discriminadas a seguir:

2.2.1 ACIDENTE CONTROLADO

É o pouso ou a perda do veículo nas condições previstas no projeto do sistema (paraquedas, *air-bag*, trajetória específica, busca por áreas específicas etc.) para limitar o dano resultante.

2.2.2 ACIDENTE DESCONTROLADO

É o pouso ou a perda 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, como velocidade e ângulo de impacto.

2.2.3 AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

Constitui-se de veículo aéreo em que o piloto não está a bordo, sendo controlado a distância a partir de uma estação remota de pilotagem para a execução de determinada atividade ou tarefa. É parte integrante de um Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada.

2.2.4 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.

2.2.5 CONFIGURAÇÃO DE ACIDENTE

Arranjo que leva em consideração todas as características de um acidente dentro de um determinado espectro para as variáveis envolvidas.

2.2.6 DENSIDADE POPULACIONAL MÉDIA MÁXIMA

Valor máximo da densidade média da população na área sob um voo, calculado para respeitar o objetivo do número de fatalidades no solo em cada configuração de acidente.

2.2.7 GERENCIAMENTO DO RISCO

Termo genérico que engloba a avaliação e a mitigação dos riscos relativos aos perigos de um sistema e/ou de sua operação.

2.2.8 MISSÃO

Conjunto de funções básicas ou capacidades essencialmente militares e que devem ser desempenhadas pelo produto, conforme definidas no contrato e/ou na sua especificação.

2.2.9 OBJETIVO DO NÚMERO DE FATALIDADES

Valor adotado como aceitável, por parte da autoridade competente, para realização de voo em determinada configuração.

2.2.10 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.

2.2.11 PRODUTO AERONÁUTICO

A aeronave e seus componentes, sendo também considerados produtos aeronáuticos os produtos de defesa que possam ser integrados às aeronaves. Para efeito desta ICA, o Produto Aeronáutico (PA) é classificado em duas classes distintas:

- a) produto Classe I: é um veículo (aeronave, planador, sistema aéreo remotamente pilotado, balão, dirigível ou outro veículo aéreo), motor aeronáutico, hélice ou míssil; e
- b) produto Classe II: é qualquer produto considerado parte integrante de um Produto Classe I ou que seja um apêndice do mesmo.

2.2.12 RISCO

A avaliação das consequências de um perigo, expresso em termos de probabilidade e severidade, tomando como referência a pior condição possível.

2.2.13 SISTEMA DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA

Conjunto de meios que constituem um elemento de emprego de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), para o cumprimento de determinada missão aérea. Além da

RPA, é composto, em geral, pela estação de controle de solo e pelo módulo de comando e controle.

2.2.14 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.

2.2.15 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE

Área definida em cada ponto do plano de voo e caracterizada por apresentar, em uma situação de acidente, uma equiprobabilidade de colisão da aeronave em cada unidade de superfície desta área.

3 FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

3.1.1 Por muitos anos os níveis de risco relacionados com aeronavegabilidade visados nos requisitos de certificação foram desenvolvidos com base em abordagens tradicionais. Nos últimos anos, esses níveis foram aprimorados por meio de comparações com os resultados já alcançados (julgados a partir de estatísticas de acidentes), das discussões e deliberações que buscavam requisitos de performance mais racionais e por meio da influência de uma abordagem de *Safety Assessment* na definição dos requisitos.

3.1.2 Tradicionalmente, os níveis de risco relacionados com aeronavegabilidade, ou objetivo de risco de aeronavegabilidade, costumam ser discutidos como um valor pontual: uma taxa de acidentes fatais de causa relacionada à aeronavegabilidade por hora de voo ou ciclo de voo. Para a aviação comercial, por exemplo, o objetivo geralmente é de não mais que 1 acidente catastrófico a cada 1.000.000 (um milhão) de horas de voo.

3.1.3 Entretanto, um valor pontual aplicado às atividades militares pode levar a um custo de não realização da missão. Nesse contexto, o confrontamento entre esse custo e a taxa de acidentes fatais de causa relacionada à aeronavegabilidade auxilia a tomada de decisão.

3.1.4 É justamente nesta parte que a metodologia de Navegação Baseada em Risco descrita nesta Instrução se aplica. Determinar, a partir de parâmetros específicos, um valor de referência para o julgamento da aceitabilidade de exposição da população por meio do número esperado de fatalidades no solo por acidente de RPA.

3.1.5 O julgamento da aceitabilidade de exposição da população através do número esperado de fatalidades no solo por acidente de RPA é responsabilidade das autoridades competentes.

3.2 FÓRMULA GERAL DO NÚMERO DE FATALIDADES NO SOLO POR CONFIGURAÇÃO DE ACIDENTE DE RPA POR HORA DE VOO

3.2.1 É importante salientar que uma RPA pode ter mais de um tipo de configuração de acidente. Sendo assim, o resultado final para o número de fatalidades por hora de voo é a soma dos resultados de cada uma das suas configurações de acidente. Isto pode ser observado na equação 1 do item 2.2 do Anexo.

3.2.2 Conforme OTAN [1], caso a energia cinética de impacto seja maior que 56 ft-lb ou 76 J, assume-se de forma conservadora que o choque é letal. Para os casos onde a energia cinética de impacto é menor que esse valor, uma análise caso a caso deve ser realizada.

3.2.3 A fórmula desenvolvida para o cálculo do número de fatalidades no solo por acidente de RPA (NF) tem a seguinte forma:

$$NF = P_c \times A_s \times D_p \times f$$

3.2.4 A fórmula desenvolvida contém um termo dedicado à probabilidade de colisão (P_c), um termo dedicado à superfície letal de colisão (A_s), um termo dedicado à densidade média da população na zona potencial de acidentes (D_p) e um termo dedicado à proteção da população contra as agressões do acidente (f).

3.2.5 Na pendência de uma definição consolidada, não se analisou o tempo de exposição da população em local aberto. Portanto, nenhum fator de proteção é introduzido por enquanto ($f = 1$). Valores diferentes deste termo podem ser utilizados desde que as análises desses casos sejam detalhadas e suficientes para justificar sua utilização na metodologia.

3.2.6 Inicialmente, a fórmula será aplicada com base em um voo, e não em todos os voos de uma frota, de modo a não se ter um parâmetro artificial de redução de risco praticando voos seguros para a população.

3.2.7 Duas configurações genéricas de colisão podem ser consideradas:

- a) acidente controlado que, se não puder garantir sistematicamente a ausência de fatalidades no solo, reduz a área potencial de acidente e também pode minimizar a superfície letal de colisão; e
- b) acidente não controlado, que estende a área potencial de acidente e não permite agir sobre a superfície letal de colisão, caso em que a configuração de voo maximizando esta superfície é considerada com um voo de terminação em planeio (*glide*).

3.2.8 Configurações específicas de acidentes relacionadas com a integração de sistemas de terminação de voo ou redução de energia no impacto ao solo, como utilização de paraquedas, também podem ser consideradas, porém as análises desses casos devem ser detalhadas e suficientes para justificar sua utilização na metodologia.

4 PROBABILIDADE DE COLISÃO NO SOLO DE UMA RPA

4.1 AVALIAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE COLISÃO

4.1.1 As probabilidades de colisão nas diferentes configurações de colisão consideradas são avaliadas preferencialmente, especialmente em caso de processo de certificação, com base em uma análise de segurança.

4.1.2 Análises alternativas referentes ao cálculo de probabilidade de colisão no solo de uma RPA, como o uso do histórico em serviço, devem ser detalhadas e suficientes para justificar a utilização do resultado na metodologia.

4.1.3 Na medida do possível, os acidentes causados exclusivamente por erro humano e/ou condições ambientais para o qual o sistema não foi dimensionado são excluídos.

5 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO DE UMA RPA

5.1 HIPÓTESES

5.1.1 Sistemas de terminação de voo específicos para certos veículos e que podem afetar a superfície letal não estão integrados, inicialmente, na metodologia. Uma análise caso a caso pode ser realizada para esses sistemas, desde que sejam suficientes para justificar a utilização do resultado na metodologia.

5.1.2 Obstáculos encontrados pelo veículo durante a descida e deslizamento no solo não são considerados como redutores da superfície letal.

5.1.3 A aeronave permanece intacta até o impacto no solo.

5.1.4 As possíveis projeções de detritos consecutivos ao acidente não são levadas em conta no modelo geométrico para calcular a superfície de impacto.

5.1.5 No modelo adotado, o efeito de explosão devido a uma ignição de combustível e/ou produção de uma bola de fogo que pode ser consecutiva ao acidente não aumenta a superfície letal, sendo contabilizada na área de impacto da aeronave.

5.1.6 O efeito térmico do fogo gerado pela provável ignição secundária do combustível espalhado durante o acidente é levado em conta. É considerado independente do voo de terminação da aeronave até o acidente.

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

5.1.8 As dimensões das vítimas consideradas no cálculo são de 1,90 m de altura e 0,6 m de largura.

5.2 FÓRMULA GERAL DA SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO

5.2.1 A superfície letal de colisão numa determinada configuração, considerada para a avaliação do número de fatalidades no solo por colisão de RPA, corresponde ao maior valor entre a superfície letal de colisão mecânica e a superfície letal de colisão térmica, nesta configuração de colisão.

5.2.2 Existem essencialmente três tipos de métodos para se calcular a superfície de impacto:

- a) métodos baseados em geometria: os mais utilizados, que levam em consideração as dimensões da aeronave, o ângulo de impacto no solo e o curso de deslizamento da aeronave no solo;
- b) 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; e
- c) 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.

5.2.3 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.

5.2.4 Duas configurações genéricas de colisão são estudadas ("mergulho", "planeio").

5.2.5 Análises alternativas referentes ao cálculo de superfície letal devem ser detalhados e suficientes para justificar a utilização do resultado na metodologia.

5.3 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO MECÂNICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE MERGULHO

5.3.1 Apenas uma área letal é considerada e corresponde a um círculo de diâmetro com o valor da soma da envergadura da RPA com a largura de uma pessoa (vítima).

5.3.2 A figura 1 e o item 3.4 do Anexo entram em detalhes do cálculo em questão.

5.4 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO MECÂNICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE PLANEIO

5.4.1 Duas áreas letais são consideradas em planeio:

5.4.1.1 Uma primeira área correspondente à descida do veículo com distância do solo equivalente à altura de uma pessoa em pé até o impacto no solo; e

5.4.1.1.1 A primeira área depende do ângulo de planeio da RPA e de sua envergadura, além de depender da altura e da largura da vítima. A figura 2 e as equações de 6 a 8 do item 3.5 do Anexo entram em detalhes do cálculo em questão.

5.4.1.2 Uma segunda área, consecutiva ao deslizamento da aeronave no solo, até que esta perca energia cinética suficiente para se tornar não letal. Por hipótese conservadora, será considerada a área percorrida pelo veículo até sua parada total.

5.4.1.2.1 Para a segunda área correspondente ao deslizamento no solo, além de considerar a envergadura da RPA e a largura da vítima, leva-se também em conta a distância de deslizamento em solo da RPA.

5.4.2 O deslizamento depende das características da RPA na configuração de planeio (velocidade e ângulo de planeio).

5.4.3 Uma estimativa desse deslizamento para RPA's comparáveis a um avião ou planador de aviação geral, é apresentada na tabela 2 e equações 9 e 10 do item 3.5 do Anexo.

5.4.4 Para RPA comparável a um avião de caça tipo avião militar, o Anexo aponta que, para a categoria "small aircraft" que inclui aviões de caça, o comprimento de deslizamento, em situação de aterrisagem (situação de majoração do deslizamento), é inferior 348 metros em 90% dos casos.

5.5 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO TÉRMICA PARA RPA DE ASA FIXA EM VOO DE PLANEIO

5.5.1 Numa primeira aproximação, a capacidade total de combustível da RPA poderá ser considerada para estabelecer o volume de combustível derramado.

5.5.2 O valor dessa superfície depende basicamente do volume de combustível derramado e do tipo de combustível utilizado pela aeronave.

5.5.3 O item 3.6 do Anexo entram em detalhes do cálculo em questão.

6 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE DE UMA RPA

6.1 HIPÓTESES

6.1.1 O impacto do vento não está integrado no cálculo da área da zona potencial de acidente. Em uma situação de acidente, há uma equiprobabilidade de colisão em cada unidade de superfície desta área.

6.1.2 Uma zona potencial de acidente por configuração de acidente é definida em cada ponto da trajetória de voo.

6.1.3 Durante o cálculo da zona potencial de acidente de RPA, considera-se a aeronave como ponto material, ou seja, não serão estudadas as forças e as consequências cinemáticas advindas de uma possível mudança de configuração da aeronave.

6.2 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE PARA RPA DE ASA FIXA EM ACIDENTE DESCONTROLADO

6.2.1 A metodologia para o cálculo da zona potencial de acidente para RPA de asa fixa em acidente descontrolado é baseada em uma simulação, utilizando modelagem aerodinâmica de 6 graus de liberdade.

6.2.2 As conclusões em relação a simulação, são:

- a) em baixas altitudes em relação ao solo, a aeronave não tem a possibilidade de realizar uma curva de 180° completa e o formato da zona potencial de acidente é, aproximadamente, um setor angular (figura 5 do item 5.2 do Anexo); e
- b) em altas altitudes em relação ao solo o formato da zona potencial de acidente é, aproximadamente, duas semi-elipses concêntricas (figura 6 do item 5.2 do Anexo);

6.2.3 Para definir a zona potencial de acidente, num determinado ponto da trajetória, é necessário obter os valores dos semieixos das elipses concêntricas, e da distância que separa a RPA do centro das semi-elipses.

6.2.4 Como mencionado no item 3.2.7, para acidentes descontrolados, adota-se a situação de planeio (glide). Além disso, deve ser considerada a possibilidade de a aeronave realizar curvas, para isso foi adotado um rolamento de 45° que maximiza o alcance da RPA. Portanto, resultam as seguintes configurações:

- a) aeronave em planeio com rolamento igual a zero (inclinação vertical da trajetória menor); e
- b) aeronave em planeio com rolamento igual a 45° (inclinação vertical da trajetória maior, devido a decomposição do vetor sustentação).

6.2.5 O item 6.2.4 pode ser melhor visualizado nas figuras 7 e 8 do item 5.2 do Anexo.

6.2.6 A distância que separa a RPA do centro das semi-elipses (raio de curvatura) é calculada utilizando a fórmula da resultante centrípeta decorrente da decomposição do vetor sustentação na horizontal, responsável pela curva da aeronave (equação 13 do item 5.2 do Anexo).

6.2.7 Para o cálculo dos semieixos das semi-elipses deve ser levado em conta o mencionado no item 6.2.5, porém é necessária uma relação entre as inclinações verticais das trajetórias das configurações apresentadas. Essa relação angular tem o valor de 1,5 para o ângulo de 45°.

6.2.8 Por fim, os semieixos são calculados a partir de relações geométricas apresentadas nas figuras 6, 8 e 9 e equações 14, 15, 17, 18 e 19 do item 5.2 do Anexo.

6.2.9 Porém, especialmente em baixas altitudes, os deslizamentos mencionados nos tópicos 5.4.4 e 5.4.5 devem ser levados em conta na definição da zona potencial de acidente descontrolado para RPA's de asa fixa, equações 22, 23 e 24 do item 5.2 do Anexo.

6.2.10 A área da zona delimitada é calculada pela equação 21 do item 5.2 do Anexo.

6.2.11 O item 5.2 do Anexo entra em detalhes do cálculo de acidente para RPA de asa fixa em acidente descontrolado e sugere métodos de simplificação.

6.2.12 Análises alternativas referentes ao cálculo de zona potencial de acidente para RPA's de asa fixa, em caso de acidente descontrolado, devem ser detalhados e suficientes para justificar a utilização do resultado na metodologia.

6.3 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE PARA RPA DE ASA FIXA EM ACIDENTE COM QUEDA CONTROLADA

6.3.1 No caso de um acidente controlado de uma RPA de asa fixa, é concebível definir, antes do voo, as zonas potenciais de acidente ao longo do plano de voo. Os critérios de definição incluem:

- a) a altitude da RPA;
- b) a capacidade de alcançar essas áreas e concluir um voo minimizando a superfície letal de colisão na configuração operacional degradada levando à realização do acidente controlado; e
- c) a densidade populacional média dessas áreas, a ser minimizada para reduzir o risco de fatalidades no solo (área despovoada na melhor das hipóteses).

6.3.2 A superfície dessas áreas potenciais de acidente, possivelmente mantidas constantes (definindo áreas máximas) para facilitar a operação, terá necessariamente que envolver a superfície letal de colisão determinada em acidente controlado.

6.3.3 Em um exemplo de um plano de voo, as áreas potenciais para acidente controlado podem tomar a forma de discos distribuídos ao longo do plano de voo. Ao contrário do caso de acidente não controlado, a área não evolui continuamente ao longo do plano de voo. A figura 16 do item 5.3 do Anexo pode ser adotada como exemplo.

7 DENSIDADE DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE DE UMA RPA

7.1 CONSIDERAÇÕES

7.1.1 As densidades populacionais consideradas excluem as aglomerações de pessoas, como desfiles, concertos e eventos esportivos. O sobrevoo dessas aglomerações é condicionado pela avaliação e aprovação de autoridade competente, sabendo que neste contexto a ocorrência de fatalidades em caso de colisão é considerada certa, desde que a energia cinética do acidente seja letal para o ser humano.

7.1.2 Na falta de um sistema que forneça um mapa de densidade populacional em tempo real, será utilizado um mapa de densidade com base no censo da população. Portanto, será levado em conta o local das residências e não serão considerados deslocamentos da população.

7.2 DENSIDADE MÉDIA DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE EM UM VOO

7.2.1 A densidade média populacional exposta em um determinado momento e para uma determinada configuração de acidente, corresponde a densidade média populacional na zona potencial de acidente, no momento e na configuração de acidente em questão.

7.2.2 A densidade média populacional da missão é a soma - da integral no tempo da densidade média populacional, compreendido entre o período da decolagem até a aterrissagem, ponderada no tempo total da missão – de cada uma das configurações de acidente.

7.2.3 É necessário, portanto, calcular a densidade populacional da zona potencial de acidente sobreposta ao mapa de densidades populacionais.

7.2.4 O item 4.2 do Anexo, apresenta o cálculo em questão, sendo a integral apresentada pela equação 12 deste Anexo.

7.2.5 A aplicação deste modelo requer uma ferramenta de cálculo computacional para realizar a integração no tempo de voo.

7.2.6 Análises alternativas referentes ao cálculo da densidade média populacional,

7.2.7 devem ser detalhados e suficientes para justificar a utilização do resultado na metodologia.

7.3 DENSIDADE POPULACIONAL MÁXIMA PERMITIDA EM UM VOO

7.3.1 Se para uma determinada missão a autoridade competente, mencionada no tópico 3.1.5, definiu um objetivo de número de fatalidades por hora de voo, o cumprimento desse objetivo pode ser verificado de duas maneiras:

- a) otimizado, realizando um cálculo da densidade média de acordo com o item 7.2; e
- b) simplificado, garantindo que nenhuma área de densidade maior está integrada na zona potencial de colisão ao longo do plano de voo.

7.3.2 A maneira simplificada, conservadora, será aplicada com mais facilidade se a zona potencial de acidente é reduzida, como por exemplo para RPA's pequenas, ou em acidente controlado.

7.3.3 A maneira otimizada é mais recomendada para casos onde a zona potencial de acidente descontrolado abrange áreas altamente populosas.

8 TABELA DE ACEITAÇÃO DE RISCOS

8.1 Finalmente, foram detalhados de maneira quantitativa todos os parâmetros apresentados na fórmula do tópico 3.2.3, sendo possível, portanto, determinar a probabilidade do número de fatalidades para uma missão específica.

8.2 Conforme descrito na STANAG 4671 [2], que é uma norma utilizada para a base de certificação de drones que pesam mais que 150 kg, considerou-se um objetivo de NF na ordem de 1 fatalidade por 100 mil horas voadas, devido a falhas oriundas de projeto.

8.3 É proposta uma tabela de aceitação de riscos conforme Metodologia proposta pela EASA [3], que afirma que uma probabilidade de evento catastrófico maior que 20 vezes o objetivo de segurança do projeto torna o risco muito alto. Qualquer condição de 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.

8.4 A partir destas informações, segue uma proposta de tabela de aceitação de riscos:

Nível de Risco	Valor de NF (por hora de voo)	Aceitação
Baixo	$NF \leq 10^{-5}$	DCTA/IFI
Médio	$10^{-5} < NF < 2.10^{-4}$	Nível Tático
Alto	$NF \leq 2.10^{-4}$	Nível Operacional

8.5 É importante salientar que o Nível Tático está relacionado à autoridade competente do próprio Esquadrão, enquanto o Nível Operacional constitui-se da autoridade competente do Grande Comando (COMAE ou COMPREP), de acordo com a natureza da missão de emprego da aeronave.

8.6 Além disso, quando o perfil de missão apresentar como resultado o sobrevoo em uma região de densidade populacional média associada a um Nível de Risco Baixo, a aprovação do DCTA/IFI se dá de forma automática, uma vez que esse contexto está contemplado na Permissão Especial de Voo Inicial (PEVi) ou Certificado de Aeronavegabilidade, emitidos por esse Instituto.

9 DISPOSIÇÕES GERAIS

A metodologia de Navegação Baseada em Risco se mostra com grande potencial de aplicação na operação não somente dos Sistemas Hermes 450 e 900, atualmente empregados pela FAB, mas também de todos os RPAS's que venham a ser adquiridos pelo COMAER.

A implementação de um programa computacional mais robusto e prático para utilização do operador é importante para se calcular o valor do nível de risco de cada missão o mais preciso possível, permitindo um processo decisório adequado para cada nível de autoridade.

Estudos relacionados ao cálculo mais preciso da densidade populacional, que levem em consideração os deslocamentos, diários e ocasionais, da população, são importantes para a aperfeiçoamento da aplicação prática da metodologia.

10 DISPOSIÇÕES FINAIS

Os casos não previstos nesta Instrução devem ser submetidos à apreciação do Diretor-Geral do DCTA, por intermédio do Diretor do IFI.

REFERÊNCIAS

- [1] *NATO Joint Air Power Competence Centre*, “*Strategic Concept of Employment for Unmanned Aircraft Systems in NATO*”, janeiro 2010.
- [2] NATO. STANAG 4671, “*Unmanned Aerial Vehicles Systems Airworthiness Requirements (USAR)*”, setembro 2009.
- [3] *EUROPEAN AVIATION SAFETY AGENCY (EASA)*. “*Acceptable Means of Compliance (AMC) and Guidance Material (GM)*” to Part 21. Issue 2, outubro 2012.

Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

1 INTRODUÇÃO

1.1 OBJETIVO DO GUIA

O objetivo deste guia é descrever uma abordagem para avaliar o risco de fatalidades no solo por acidente de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), considerando-se veículos de asa fixa, e desenvolver uma metodologia de Navegação Baseada em Risco (NBR).

Na ausência de uma referência normativa sobre o assunto, a abordagem proposta é chamada a constituir um procedimento de referência para a avaliação deste risco, aplicável para permissões especiais de voo e certificações de RPA.

É dirigido aos atores responsáveis pela garantia da aeronavegabilidade das RPA's e, em particular, aos operadores desses sistemas.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO GUIA

O guia é estruturado em capítulos que tratam dos diferentes parâmetros contributivos na avaliação do risco de fatalidades no solo por acidente de RPA.

Capítulo 2: apresenta a fórmula para estimar o número de fatalidades no solo em um voo e lida com a probabilidade de colisão ao solo do veículo por configuração de acidente $P[\text{colisão}]_{Cai}$, parâmetro a ser utilizado na avaliação do número de fatalidades no solo. Considerando-se um objetivo de segurança para um número de fatalidades, calcula-se uma densidade populacional média máxima permitida \overline{DP}_{max} para se respeitar em cada voo, dada uma configuração de acidente. Na ausência de tal objetivo, a avaliação do número de fatalidades depende da densidade populacional média em cada configuração

Capítulo 3: lida com a superfície letal de colisão por configuração de acidente SLC_{Cai} , a ser utilizada na avaliação do número de fatalidades no solo. Algumas configurações genéricas de acidente são discutidas, para veículos de asa fixa.

Capítulo 4: lida com a densidade média da população exposta em um voo por configuração de acidente \overline{DP}_{Cai} , para utilização na avaliação do número de fatalidades no solo ou para comparar com a densidade populacional média máxima permitida \overline{DP}_{Max} , quando um objetivo de número de fatalidades é fixado.

Capítulo 5: identifica a zona potencial de acidente em um ponto no plano de voo e representa uma área potencial de colisão no solo ao longo do plano de voo. O conhecimento desta área por configuração de acidente em todo instante de voo $ZPA_{Cai}(t)$ é necessário para estimar a probabilidade de colisão instantânea em uma dada área de densidade populacional.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

2 NÚMERO DE FATALIDADES NO SOLO POR ACIDENTE DE RPA

2.1 DEFINIÇÕES

2.2 Determinação do 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:

$$\begin{aligned} NF &= (\text{Probabilidade de colisão}) \times (\text{Probabilidade de fatalidade no impacto}) \times (\text{Número médio de pessoas na superfície letal de colisão}) \times (\text{Fator de proteção}) \\ &= (\text{Probabilidade de colisão}) \times (\text{Probabilidade de fatalidade no impacto}) \times (\text{Superfície letal de colisão}) \times (\text{Densidade populacional na zona de colisão}) \times (\text{Fator de proteção}) \end{aligned}$$

A fórmula desenvolvida 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 uma análise de segurança, assumindo-se que para cada condição de falha catastrófica ocorrerá uma colisão. O uso de histórico em serviço para um sistema já em operação pode ser uma alternativa ou um complemento para a análise de segurança gerada. A origem dos dados de *feedback* e o tratamento que é feito para alcançar uma probabilidade de acidente devem ser detalhadas para justificar a credibilidade dos dados. Na medida do possível, os acidentes causados exclusivamente por erro humano e / ou condições ambientais para o qual a RPA não foi dimensionada são excluídos.

A superfície letal de colisão é geralmente considerada como a superfície de colisão no solo, supondo que qualquer pessoa dentro desta superfície é gravemente ferida (hipótese). 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 uma primeira abordagem, a fórmula será aplicada com base em um voo, e não em todos os voos de uma frota, de modo a não se ter um parâmetro artificial de redução de risco.

O número de fatalidades é dimensionado em uma hora de voo.

Na pendência de uma definição consolidada, não se analisou o tempo de exposição da população em local aberto. Portanto, nenhum fator de proteção é introduzido por enquanto.

Também é proposto otimizar esta fórmula distinguindo as configurações de acidente que leva a diferentes superfícies letais de colisão.

A fórmula aplicável é a seguinte:

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

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Tabela 1. Parâmetros de cálculo do número de fatalidades.

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

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 e também pode minimizar a superfície letal de colisão; e
- o acidente não controlado, que estende a área potencial de acidente e não permite agir sobre a superfície letal de colisão, caso em que a configuração de voo maximizando esta superfície é considerada com um voo de terminação em planeio (*glide*).

Configurações específicas de acidentes relacionadas com a integração de sistemas de terminação de voo ou redução de energia no impacto ao solo também podem ser consideradas, com o funcionamento ou não dos sistemas (exemplo: acidente com ou sem abertura de paraquedas).

2.2.1 CASO ESPECIAL EM QUE A DISTINÇÃO ENTRE CONFIGURAÇÕES DE ACIDENTE NÃO É FEITA

A análise de segurança do sistema pode ser insuficientemente precisa para avaliar a probabilidade de colisão nas diferentes configurações de acidente consideradas. Além disso, informações operacionais que podem ser recomendadas em certas configurações se revelam de aplicação difícil e não são finalmente consideradas.

Caso não haja distinção entre as configurações de acidente, elas serão retidas na fórmula de NF:

- a probabilidade de colisão total, independentemente da configuração de acidente; e
- a maior superfície letal de colisão entre as configurações de colisão concebíveis.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

$$NF = 10^{-6} \times P[\text{colisão}]_{total} \times SLC_{max} \times \overline{DP} \quad (\text{equação 2})$$

2.3 DENSIDADE MÉDIA DA POPULAÇÃO EXPOSTA

O objetivo do número de fatalidades NF sendo fixo e os parâmetros relacionados à probabilidade de colisão e a superfície letal de colisão avaliados, a aplicação da fórmula apropriada (veja a equação 1 ou 2) permite determinar a densidade média da população a ser respeitada em um voo de acordo com este objetivo.

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

$$\overline{DP}_{max} = \frac{NF}{10^{-6} \times \sum_{i=1}^k P[\text{colisão}]_{CCi} \times SLC_{CCi}} \quad (\text{equação 3})$$

Na operação da RPA (definição do plano de voo), a seguinte desigualdade deve ser respeitada para cada configuração de acidente, para satisfazer o objetivo do número de fatalidades NF:

$$\overline{DP}_{CAi} \leq \overline{DP}_{max}$$

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA**3 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO DE UMA RPA****3.1 DEFINIÇÕES****3.1.1 SUPERFÍCIE LETAL**

Superfície em que as pessoas presentes são gravemente feridas durante o acidente se não estão protegidas contra as agressões correspondentes (mecânicas, térmicas etc.).

3.2 CONSIDERAÇÕES

- a) sistemas de terminação de voo específicos para certos veículos que podem afetar a superfície letal não estão integrados, inicialmente, na metodologia (paraquedas, amortecedor etc). Uma análise caso a caso pode ser realizada para esses sistemas;
- b) obstáculos encontrados pela RPA durante a descida e deslizamento no solo não são considerados como redutores da superfície letal;
- c) a aeronave permanece intacta até o impacto no solo;
- d) as possíveis projeções de detritos consecutivos ao acidente não são levadas em conta no modelo geométrico para calcular a superfície de impacto.
- e) o efeito térmico do fogo gerado pela provável ignição secundária do combustível espalhado durante o acidente é levado em conta. Tal efeito é considerado independente do voo de terminação da aeronave, até o acidente.
- f) O deslizamento da aeronave no solo ocorre em uma trajetória retilínea; e
- g) Qualquer contato entre a aeronave em movimento e uma pessoa é letal, independentemente da energia cinética da aeronave até o final de sua corrida no solo, desde que a energia cinética de impacto seja letal, isto é, de 56 ft-lb ou 76 J conforme OTAN.

3.3 FÓRMULA GERAL DA SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO

A superfície letal de colisão na configuração de colisão i , SLC_{CCi} , considerada para a avaliação do número de fatalidades no solo por acidente, corresponde à superfície letal de colisão mecânica e a superfície letal de colisão térmica, nesta configuração de colisão:

$$SLC_{CCi} = MAX[SLC_{mecânica}; SLC_{térmica}] \quad (\text{equação 4})$$

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

- a) métodos baseados em geometria: os mais utilizados, que levam em consideração dimensões da aeronave, o ângulo de impacto no solo e o curso de deslizamento da aeronave no solo;
- b) 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; e

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

- c) 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 (pequena, grande etc.).

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 asa fixa: "mergulho" e "planeio".

3.4 SUPERFÍCIE LETAL DE COLISÃO MECÂNICA PARA UM VEÍCULO DE ASA FIXA EM VOO DE MERGULHO

Apenas uma área letal é considerada em voo.

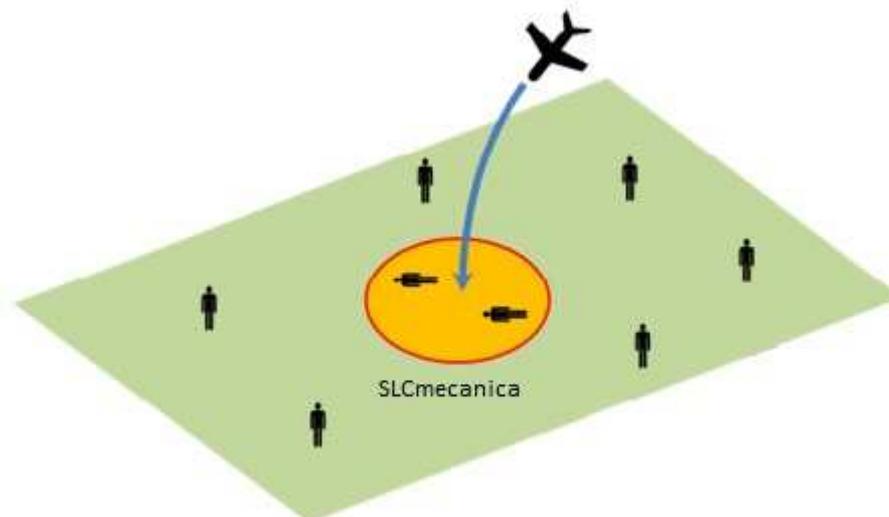


Figura 1: Área letal mecânica para o acidente - tipo mergulho.

A fórmula para a superfície letal é dada por:

$$SLC_{mecanica} = \pi \times \left(\frac{1}{2} \times ENV + R_{pessoa} \right)^2 \quad (\text{equação 5})$$

sendo

ENV : envergadura da aeronave (m);

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

3.5 SUPERFÍCIE DE COLISÃO LETAL MECÂNICA PARA UM VEÍCULO DE ASA FIXA EM PLANEIO:

Duas áreas letais são consideradas em planeio:

- a) uma primeira área correspondente à descida da RPA a partir da altura de uma pessoa em pé até o impacto no solo; e

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

- b) uma segunda área, consecutiva ao deslizamento da RPA no solo, até que este perde energia cinética suficiente para se tornar não letal (até a parada do veículo, por hipótese conservadora).

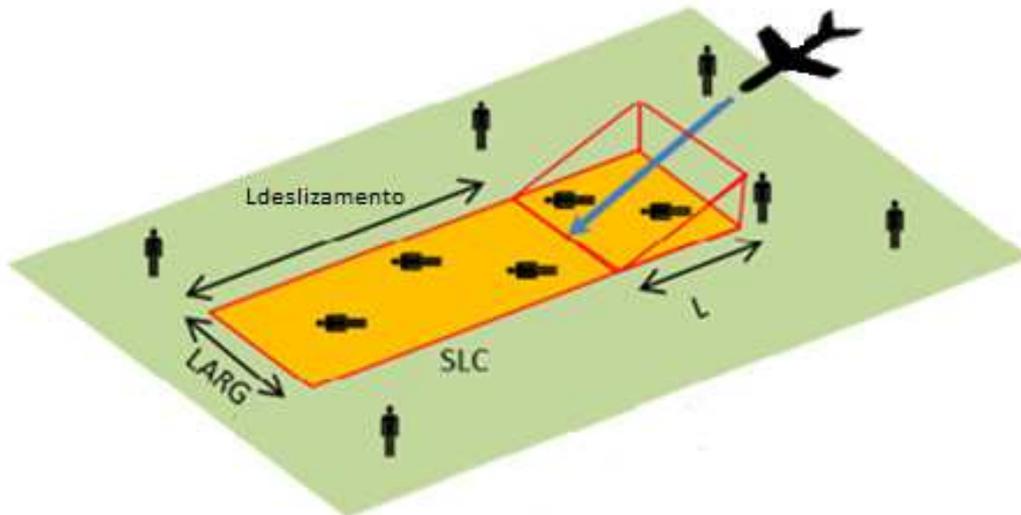


Figura 2: Área letal mecânica para o acidente - em planeio.

A largura da superfície é dada por:

$$LARG_{planeio} = ENV + 2 \times R_{pessoa} \quad (\text{equação 6})$$

Para a primeira área correspondente à descida, o comprimento projetado no solo é determinado com umas das seguintes equações:

3.5.a.1 Razão de planeio máxima da RPA é conhecida.

Se a razão de planeio máxima da RPA é conhecida:

$$L_{descida} = H_{pessoa} \times \left(\frac{L}{D}\right)_{max} \quad (\text{equação 7})$$

Sendo:

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

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

3.5.a.2 Razão de planeio máxima da RPA não é conhecida.

Se a razão de planeio máxima do RPA não é conhecida:

$$L_{descida} = \frac{H_{pessoa}}{\tan(\gamma)} \quad (\text{equação 8})$$

Sendo:

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

$\tan(\gamma)$: ângulo de impacto.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Para a segunda área correspondente ao deslizamento no solo, o comprimento é determinado de acordo com dois tipos de sistema:

3.5.b.1 RPA de asa fixa comparável a um avião ou planador de aviação geral

Uma fórmula empírica de comprimento de deslizamento, a partir de uma análise de regressão de dados, de um banco de dados de acidentes NTSB (*US National Transportation Safety Board*) é proposto na referência [10] para a aviação geral e incluído na referência [4]:

$$\ln(l) = b + m \times \ln(W) + \sum_{i=1}^5 \alpha_i S_i + \sum_{i=1}^5 \beta_i A_i + \varepsilon \quad (\text{equação 9})$$

Os parâmetros estão detalhados na tabela a seguir:

Tabela 2: Detalhamento de parâmetros utilizados para cálculo do comprimento de deslizamento.

Parâmetro	Definição	Unidade	Valor
l	Variável aleatória do comprimento de deslizamento distribuído conforme uma lei log-normal	ft (1 ft = 0,3048 m)	A ser calculado
b	Termo de ordenada em relação à origem	adimensional	0,184
m	Coefficiente de inclinação relativo à massa	adimensional	0,349
W	Massa da aeronave (MTOW)	lb (1 lb = 0,45359 kg)	A ser fornecido
α_1 (velocidade de impacto < 30 kt)	Coefficientes relativos à velocidade de impacto conforme 5 faixas de velocidade	adimensional	-0,485
α_2 (30 kt ≤ velocidade de impacto < 60 kt)			-0,310
α_3 (60 kt ≤ velocidade de impacto < 90 kt)			0,000989
α_4 (90 kt ≤ velocidade de impacto < 120 kt)			0,206
α_5 (velocidade de impacto ≥ 120 kt)			0,626
β_1 (ângulo de impacto < 10°)	Coefficientes relativos ao ângulo de impacto conforme 5 faixas de velocidade	adimensional	0,471
β_2 (10° ≤ ângulo de impacto < 20°)			0,116
β_3 (20° ≤ ângulo de impacto < 30°)			-0,236
β_4 (30° ≤ ângulo de impacto < 60°)			-0,405
β_5 (ângulo de impacto ≥ 60°)			-0,559
S_i	Variável de indicação da faixa de velocidade i considerada	adimensional	1 se aplicável 0 se não

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

A_j	Variável de indicação da faixa de ângulo j considerada	adimensional	1 se aplicável 0 se não
ε	Variável aleatória conforme a lei normal de média 0 e variância σ^2	adimensional	0
σ	Desvio padrão	adimensional	1,32

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

$$L_{deslizamento} = \log N^{-1} [0,90; \ln l; \sigma] \quad (\text{equação 10})$$

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

No caso onde a velocidade de impacto não foi avaliada, a escolha da faixa de velocidade de impacto requerida na equação 9 poderá ser a V_{ne} (*never exceed*) do veículo.

3.5.b.2 RPA de asa fixa comparável a um avião de caça tipo avião militar

A referência [4] estabelece uma distribuição cumulativa de comprimentos de deslizamento em colisões de aeronaves militares baseada em um banco de dados de acidentes. Para a categoria "small aircraft" que inclui aviões de caça, o comprimento de deslizamento é inferior a 1.142 pés (348m) em 90% dos casos, em situação de aterrissagem (situação de majoração do deslizamento).

3.6 SUPERFÍCIE LETAL TÉRMICA DO ACIDENTE

Os incêndios gerados pelo combustível derramado durante o acidente podem causar queimaduras letais além da área de impacto da aeronave, particularmente para sistemas que transportam uma grande quantidade de combustível.

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

$$SLC_{térmica} = \pi r^2$$

$$SLC_{térmica} = \pi \left(\sqrt{\frac{\chi_r \times A \times FT_{combustivel}}{4\pi FT_{letal}}} \right)^2$$

$$SLC_{térmica} = \pi \left(\sqrt{\frac{\chi_{rmax} e^{-kD} \times \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \times FT_{combustivel}}{4\pi FT_{letal}}} \right)^2$$

$$SLC_{térmica} = \pi \left(\sqrt{\frac{0,35 e^{-0,05 \times 10\sqrt{V}} \times \pi \left(\frac{10\sqrt{V}}{2}\right)^2 \times FT_{combustivel}}{4\pi FT_{letal}}} \right)^2 \quad (\text{equação 11})$$

com:

R: raio da superfície letal (m)

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

A: área que abrange o derramamento de combustível (m^2)

D: diâmetro que abrange o derramamento de combustível (m)

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

χ_r : parte do calor total de um incêndio, emitido sob a forma de radiação térmica ao redor do fogo, determinado a partir de histórico em incêndios

$FT_{combustivel}$: 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

Numa primeira aproximação, a capacidade total de combustível da RPA poderá ser considerada para estabelecer o volume de combustível derramado.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

4 DENSIDADE DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE DE RPA

4.1 HIPÓTESES

- 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 (desfiles, concertos, eventos esportivos, eventos etc.). O sobrevoo 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 sobrevoo dessas áreas de aglomeração;
- as densidades populacionais estabelecidas com base em censos populacionais (tipo IBGE) consideram o local de residência dos habitantes e, portanto, não levam em conta os deslocamentos da população; e
- enquanto se espera por um mapa de densidade populacional "em tempo real", será utilizado um mapa de densidade com base no censo da população. Caso seja de conhecimento do operador o valor da densidade populacional média de uma determinada área, zona comercial por exemplo, ela deverá ser considerada.

4.2 DENSIDADE MÉDIA DA POPULAÇÃO EXPOSTA AO ACIDENTE EM UM VOO

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 e varia dependendo da zona potencial de acidente associada à configuração de acidente:

$$\overline{DP}_{CAi} = \frac{1}{T_{voo}} \times \sum_{j=1}^n \int_0^{T_{voo}} \frac{S_{ZDP_j \cap ZP_{CAi}(t)}}{S_{ZP_{CAi}(t)}} dt \times DP_{ZDP_j} \quad (\text{equação 12})$$

Tabela 3: Definição de termos utilizados no cálculo da densidade média de população.

Parâmetro	Definição	Unidade
\overline{DP}_{CAi}	Densidade média da população exposta ao acidente em um voo na configuração de acidente i	habitantes/km ²
T_{voo}	Tempo total de voo	Hora de voo (hdv)
j	Índice do nível de densidade populacional, de acordo com uma divisão do território de evolução do veículo em n níveis de densidade	adimensional
$S_{ZP_{CAi}(t)}$	Superfície da zona potencial de acidente para a configuração de acidente i no instante t do voo	km ²
$S_{ZDP_j \cap ZP_{CAi}(t)}$	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	km ²
DP_{ZDP_j}	Densidade populacional das zonas de densidade de população de nível j	habitantes/km ²

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

A relação de superfície $\frac{S_{ZDP_j \cap ZPA_{CCi}(t)}}{S_{ZPA_{CCi}(t)}}$ 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}_{CCi} 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.

Considere a ilustração a seguir:

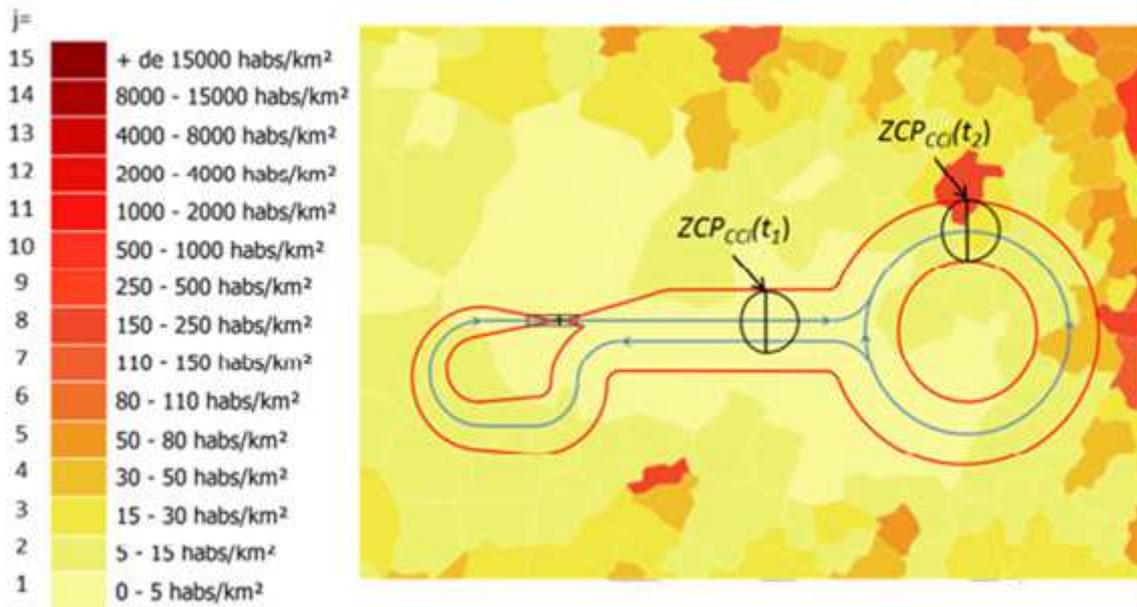


Figura 3: Exemplo de plano de voo sobre áreas de diferentes densidades populacionais e resultantes zonas potenciais de acidente.

Neste plano de voo, tem-se, para a configuração de *crash* i :

- no instante t_1 , $\frac{S_{ZDP_1 \cap ZPA_{CCi}(t_1)}}{S_{ZPA_{CCi}(t_1)}} = 1$, ou seja, a zona potencial de acidente neste instante contém apenas o nível de densidade 1; e
- no instante t_2 , $\frac{S_{ZDP_2 \cap ZPA_{CCi}(t_2)}}{S_{ZPA_{CCi}(t_2)}} + \frac{S_{ZDP_3 \cap ZPA_{CCi}(t_2)}}{S_{ZPA_{CCi}(t_2)}} + \frac{S_{ZDP_{10} \cap ZPA_{CCi}(t_2)}}{S_{ZPA_{CCi}(t_2)}} = 1$, ou seja, a zona potencial de acidente neste instante contém três níveis de densidade, 2, 3 e 10.

No caso geral, a aplicação numérica da equação 1 requer uma ferramenta de cálculo computacional para realizar a integração no tempo de voo.

No caso específico em que um único nível de densidade j está relacionado ao tempo de voo, a equação 13 é simplificada:

$$\overline{DP}_{CCi} = DP_{ZDP_j}$$

O valor da densidade DP_{ZDP_j} retido para áreas de densidade populacional do mesmo nível j é fixo. Ele depende da precisão da divisão do território em níveis de densidade.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Dado um valor de densidade média \overline{DP}_{CAi} num voo, quanto maior o número de níveis de densidade considerados, mais possibilidades de plano de voo existirão. Se um nível é definido por um limite baixo e um limite alto de densidade, sem conhecer a distribuição de densidade entre estes dois limites (dependendo do número de municípios, por exemplo), o limite superior pode ser usado como o valor de densidade a ser aplicado neste nível.

4.3 VERIFICAÇÃO DO CUMPRIMENTO DA DENSIDADE POPULACIONAL MÁXIMA PERMITIDA EM UM VOO \overline{DP}_{max}

Um valor máximo da densidade média da população em um voo, \overline{DP}_{max} , foi calculado (equação 3) para respeitar o objetivo do número de fatalidades no solo (NF).

O respeito deste valor máximo em cada configuração de colisão i pode ser verificado por duas maneiras:

- a) otimizado, realizando-se um cálculo da densidade média \overline{DP}_{CAi} de acordo com a equação 13; e
- b) simplificado, garantindo-se que nenhuma área de densidade maior que \overline{DP}_{max} está integrada na zona potencial de acidente ao longo do plano de voo.

A maneira simplificada, conservadora, será aplicada com mais facilidade se a zona potencial de acidente é pequena: pequenos veículos de asa fixa, ou veículos de asa fixa em uma configuração de acidente controlado.

Assim que níveis de densidade maiores que \overline{DP}_{max} estão contemplados na zona potencial de acidente, somente a maneira otimizada poderá verificar essa desigualdade. Isto é particularmente o caso dos veículos de asa fixa que voam a grandes altitudes, caracterizados por áreas potenciais de acidente, em acidente não controlado, muito extensas, o que poderá integrar áreas de alto nível de densidade.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

5 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE DE UMA RPA

5.1 HIPÓTESES

- o impacto do vento não está integrado no cálculo da área da zona potencial de acidente; e
- sistemas de terminação de voo, específicos para certos veículos, que podem afetar a superfície da zona de acidente não são considerados (paraquedas, por exemplo). Uma análise caso a caso deve ser realizada com tais sistemas e, para fins de avaliação dos níveis de risco que a RPA pode causar para a população, pode-se considerar a probabilidade de condição de falha catastrófica considerando a falha desse sistema (probabilidade de falha dupla)

5.2 ZONA POTENCIAL DE ACIDENTE PARA VEÍCULOS DE ASA FIXA EM ACIDENTE DESCONTROLADO

A partir de um modelo aerodinâmico de aeronave com 6 graus de liberdade, a referência [6] avalia a área de uma zona potencial de acidente em um ponto no plano de voo, após uma condição de falha da aeronave levando a um acidente descontrolado. Este modelo não integra o comprimento de deslizamento após o impacto no solo. Entretanto, para englobar as baixas altitudes onde o deslizamento pode afetar o tamanho da superfície potencial de acidente, o comprimento de deslizamento pode ser adicionado.

Tomando o exemplo de um Cessna 172, simulações levam a potenciais zonas de acidente para diferentes altitudes em relação ao solo, conforme descrito na referência [6] (a = 100 pés, b = 200 pés, c = 300 pés, d = 500 pés):

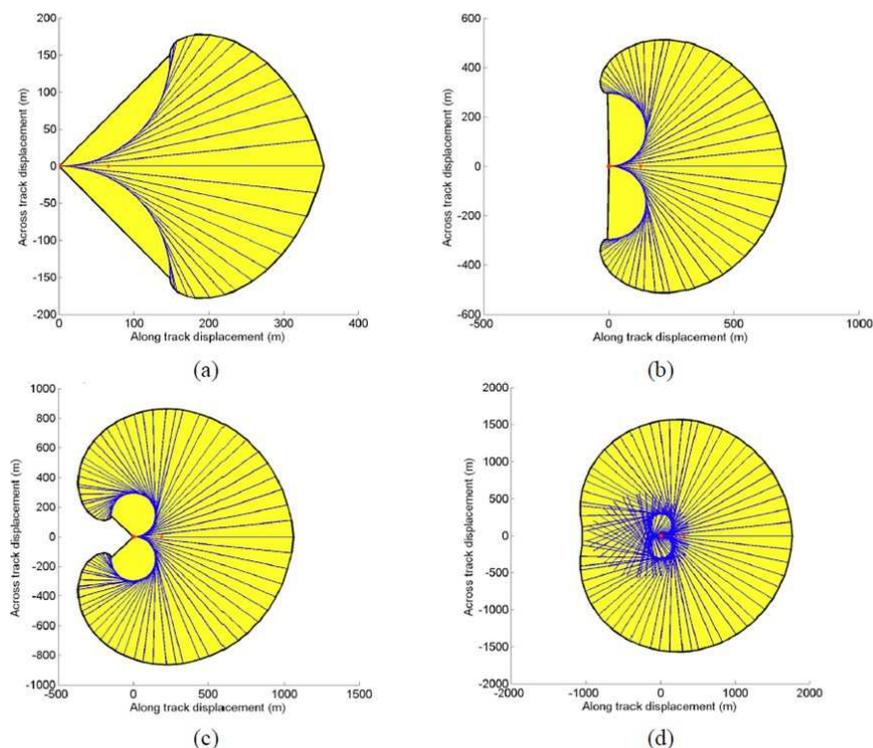


Figura 4: Zonas potenciais de acidente para diferentes altitudes de voo de uma aeronave Cessna 172.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Na baixa altitude (a), a aeronave não tem a possibilidade de fazer uma curva permitindo o retorno completo, antes de tocar o solo. A zona potencial de acidente é representada por um setor angular de raio correspondente à distância máxima de descida relacionada com a razão L/D da aeronave.

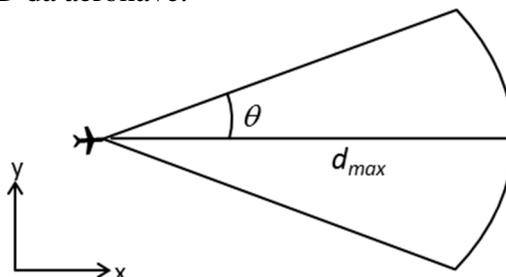


Figura 5: Zona potencial de acidente para pequenas altitudes.

Quanto maior a altitude (b, c e d), mais a aeronave possui liberdade para fazer uma curva que pode ir até um giro completo. Uma vez que um giro completo é possível antes de tocar o solo (d), a zona potencial de acidente é representada por duas semi-elipses acopladas, a semi-elipse à esquerda sendo mais plana. Para maiores altitudes, a representação com duas semi-elipses continua válida, a superfície das semi-elipses aumentando com a altitude em relação ao solo.

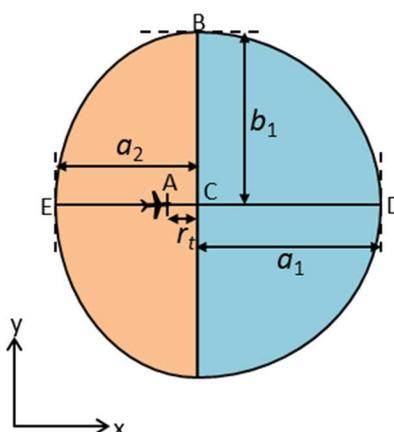


Figura 6: Zona potencial de acidente para grandes altitudes.

Para aeronave em acidente não controlado, a área da zona potencial de acidente em um ponto no plano de voo é calculada considerando-se para cada caso de colisão apenas uma curva de ϕ graus (a aeronave a 45° de inclinação e declive constante), seguida de uma descida até ao solo (em declive constante) [6] e [7]:

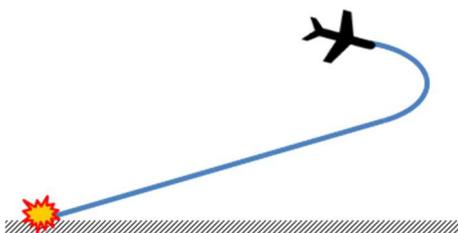


Figura 7: Perfil de vista lateral da queda de drone em acidente não controlado.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

A decomposição da trajetória do acidente vista de cima em um plano xy e vista lateral em z é, portanto, a seguinte:

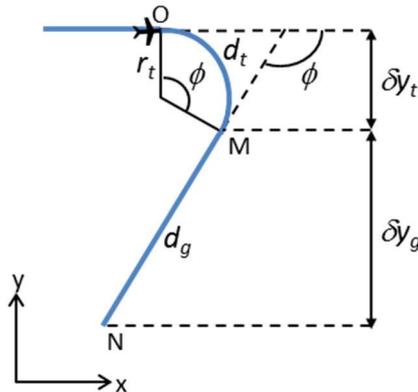


Figura 8: Trajetória do acidente vista de cima (plano xy).

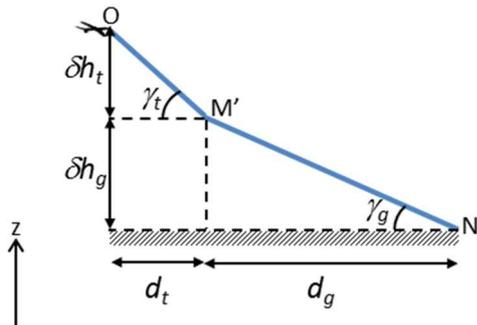


Figura 9: Trajetória do acidente em uma vista lateral (eixo z).

com :

ϕ : ângulo da curva (graus).

γ_g : ângulo de inclinação da trajetória em descida retilínea (graus).

γ_t : ângulo de inclinação da trajetória em curva (graus) ; para uma inclinação da aeronave em curva de 45° , considera-se que $\gamma_t = 1,5 \gamma_g$.

r_t : raio da curva (m) ;

$$r_t = \frac{V_o^2}{g \times \tan(45^\circ)} \quad (\text{equação 13})$$

V_o : velocidade operacional (m/s).

g : constante de aceleração da gravidade (m/s^2) ; $g = 9,80665$.

d_t : distancia projetada ao solo da curva (m) ; $d_t = 2\pi r_t \times \frac{\phi}{360}$ (equação 14)

d_g : distancia projetada ao solo da descida retilínea (m)

$$d_g = \frac{\delta h_g}{\tan(\gamma_g)} = \frac{H - \delta h_t}{\tan(\gamma_g)} = \frac{H - d_t \times \tan(\gamma_t)}{\tan(\gamma_g)} = \frac{H - d_t \times \tan(1,5 \times \gamma_g)}{\tan(\gamma_g)} \quad (\text{equação 15})$$

H : altitude com relação ao solo (m).

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Quando a altitude com relação ao solo é suficiente para que toda curva com ângulo ϕ seja realizada antes de tocar o solo (seja $d_g > 0$), a superfície da zona potencial de acidente S em um ponto do plano de voo é calculada a partir dos parâmetros a_1 , b_1 e a_2 caracterizando duas semi-elipses:

$$S = \frac{\pi}{2} a_1 b_1 + \frac{\pi}{2} a_2 b_1 \quad (\text{equação 16})$$

com:

$$a_1 = d_{max} - r_t \quad (\text{equação 17})$$

$$b_1 = r_t + d_{g(\phi=90^\circ)} \quad (\text{equação 18})$$

$$a_2 = r_t + d_{g(\phi=180^\circ)} \quad (\text{equação 19})$$

d_{max} : comprimento projetado ao solo da descida retilínea máxima (m).

$$d_{max} = H \times \left(\frac{L}{D}\right)_{max} \quad \text{ou} \quad \frac{H}{\tan(\gamma_g)} \quad (\text{equação 20})$$

$\left(\frac{L}{D}\right)_{max}$: razão de planeio (« lift to drag ratio ») máxima da RPA.

Em complemento a este modelo, para considerar o comprimento de deslizamento que segue ao impacto ao solo, a zona potencial de acidente é aumentada de uma distância correspondente ao comprimento de deslizamento sobre toda a superfície:

$$S_{ZCP} = \frac{\pi}{2} a'_1 + \frac{\pi}{2} b'_1 \quad (\text{equação 21})$$

com:

$$a'_1 = a_1 + L_{deslizamento} \quad (\text{equação 22})$$

$$b'_1 = b_1 + L_{deslizamento} \quad (\text{equação 23})$$

$$a'_2 = a_2 + L_{deslizamento} \quad (\text{equação 24})$$

Para as altitudes menores, que não permitem uma curva a 90° antes de tocar o solo, ou seja, $d_{g(\phi=90^\circ)} \leq 0$, a dimensão b_1 é estimada de uma maneira diferente:

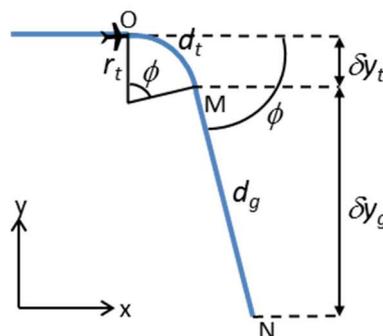


Figura 10: Trajetória do acidente vista de cima (plano xy) para o caso de $\phi < 90^\circ$.

$$b_1 = \max(\delta y_t + \delta y_g) = \max(r_t(1 - \cos \phi) + d_g \sin \phi) \quad (\text{equação 25})$$

Com:

r_t , d_g segundo as equações 14, 15 e 16.

Conforme a equação anterior, o valor de ϕ considerado para o cálculo de b_1 é aquele que maximiza a soma $\delta y_t + \delta y_g$.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Adicionando-se o comprimento de deslizamento após impacto ao solo, a largura b'_1 se torna:

$$b'_1 = b_1 + L_{deslizamento} \quad (\text{equação 26})$$

Para simplificar os cálculos, uma majoração da área da zona potencial de colisão, variando com a altitude H , pode ser considerado pela assimilação desta zona a um disco de raio $d_{max} + L_{deslizamento}$ envolvendo as duas semi-elipses contíguas:

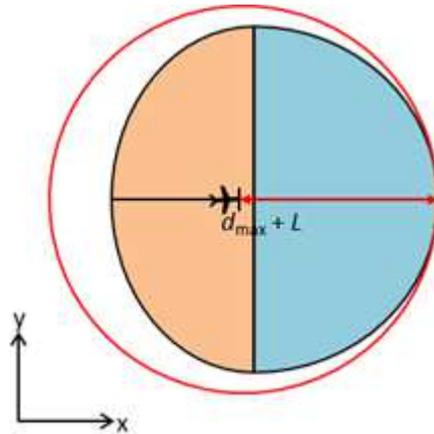


Figura 11: Abordagem simplificada para o cálculo da zona potencial de colisão.

$$S_{ZCP_{maj}} = \pi(d_{max} + L_{deslizamento})^2 \quad (\text{equação 27})$$

A zona potencial de acidente ao longo do plano de voo é obtida pela união das zonas em todos os pontos do plano de voo.

Na fase de cruzeiro, para uma altitude fixa relativa ao solo, a zona potencial de acidente corresponde a um corredor de largura de $2b'_1$ centrado na trajetória de voo:

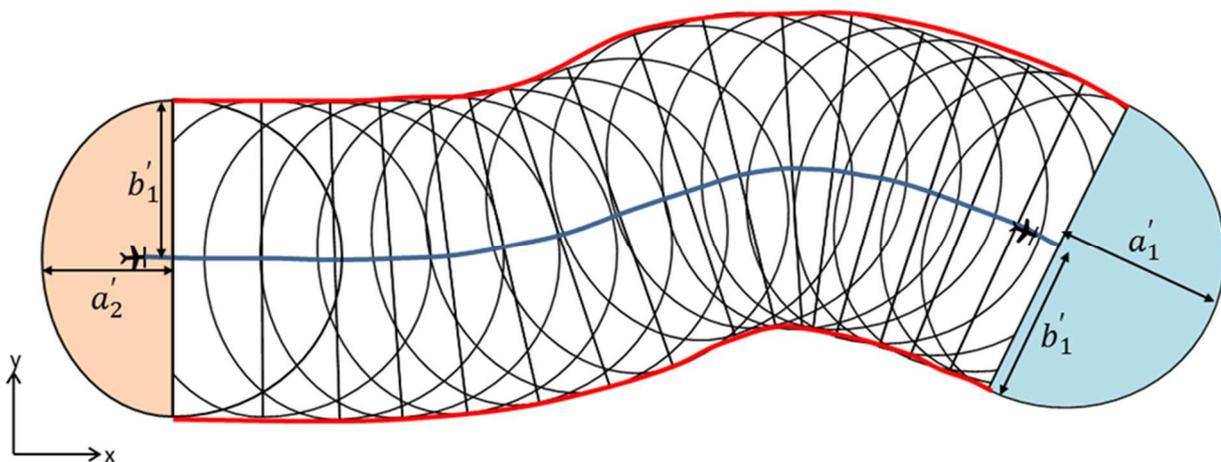


Figura 12: Zona potencial de acidente para a trajetória de voo explicitada, mantendo-se a altitude em relação ao eixo xy.

Mudanças de altitude em relação ao solo levam a um alargamento ou estreitamento do corredor conforme a altitude aumenta ou diminui; b'_1 varia com a altitude H .

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

Na fase de subida, a altitude aumenta gradualmente desde a decolagem, a zona potencial corresponde a um setor angular centrado na trajetória de voo:

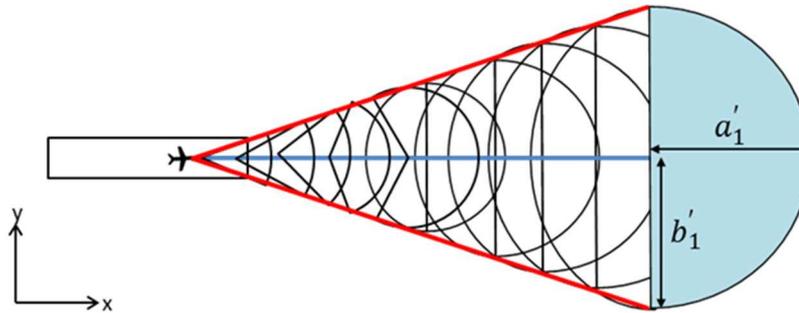


Figura 13: Zona potencial de acidente para a trajetória de voo explicitada, elevando-se a altitude em relação ao eixo xy.

Nesta fase, a área potencial de acidente em um ponto no plano de voo passa progressivamente de um setor angular para duas semi-elipses.

Durante a fase de descida, a zona potencial de acidente é invertida em relação à fase de subida.

Em um exemplo de um plano de voo, a zona potencial de acidente ao longo deste plano, em um acidente não controlado, pode ser ilustrada da seguinte forma:

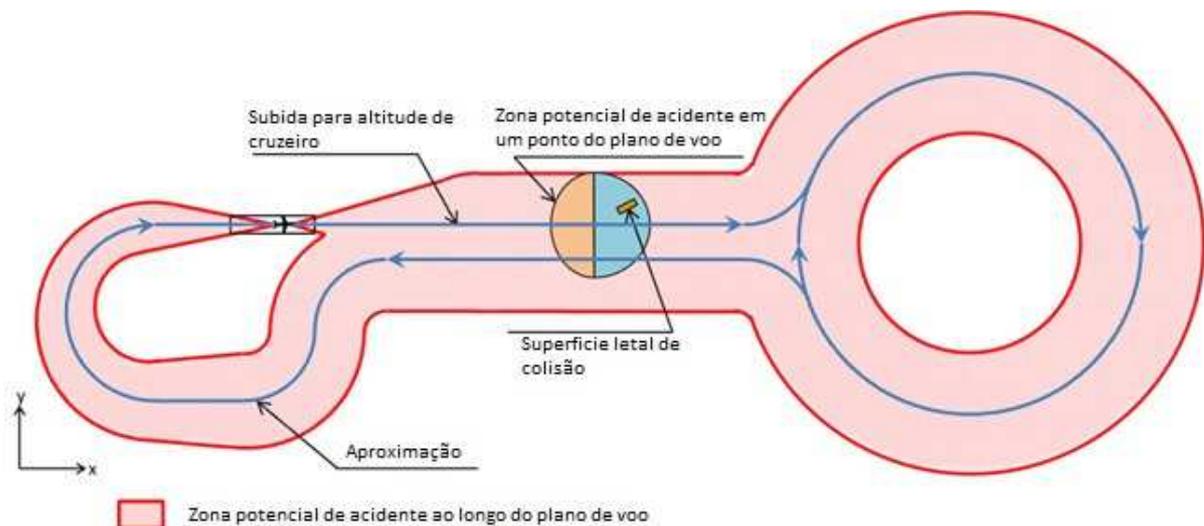


Figura 14: Zona potencial de acidente para a trajetória de um exemplo de plano de voo.

Assume-se aqui que a altitude relativa ao solo em voo de cruzeiro não se altera. Ressalta-se que alterações de altitude relacionada ao plano de voo e ao terreno mudam a zona potencial de acidente.

A majoração da zona potencial de acidente por um disco de raio $d_{max} + L_{deslizamento}$, proposto anteriormente para um ponto no plano de voo, também é aplicável ao longo de um plano de voo; a largura do corredor de colisão potencial corresponde a duas vezes este raio, e varia de acordo com a altitude H.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA

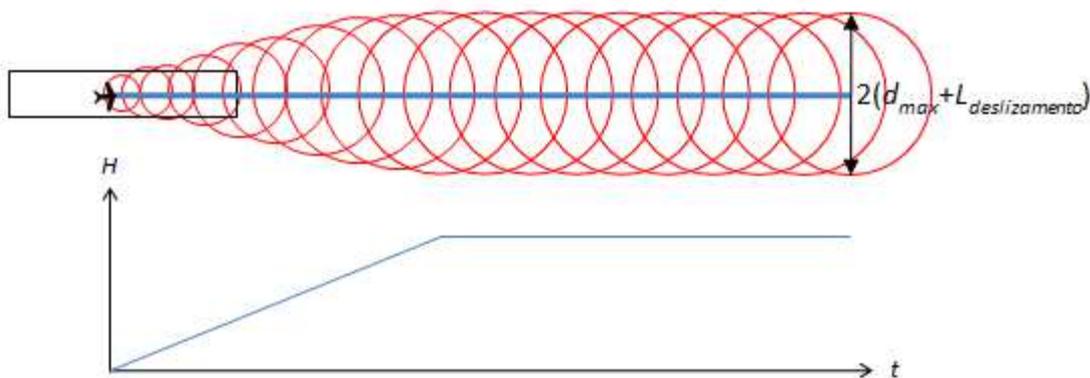


Figura 15: Majoração da zona potencial de acidente para a trajetória de um exemplo de plano de voo.

5.3 ZONA DE COLISÃO POTENCIAL PARA VEÍCULOS DE ASA FIXA EM QUEDA CONTROLADA

No caso de um acidente controlado de um veículo de asa fixa, é concebível definir, antes do voo, as zonas potenciais de acidente ao longo do plano de voo.

Os critérios de definição incluem:

- a) a altitude da RPA;
- b) a capacidade da RPA alcançar essas áreas e concluir um voo minimizando a superfície letal de colisão;
- c) a densidade populacional média dessas áreas, a ser minimizada para reduzir o risco de fatalidades no solo (área despovoada na melhor das hipóteses).

Num exemplo de um plano de voo, as áreas potenciais em acidente controlado podem tomar a forma de discos distribuídos ao longo do plano de voo:

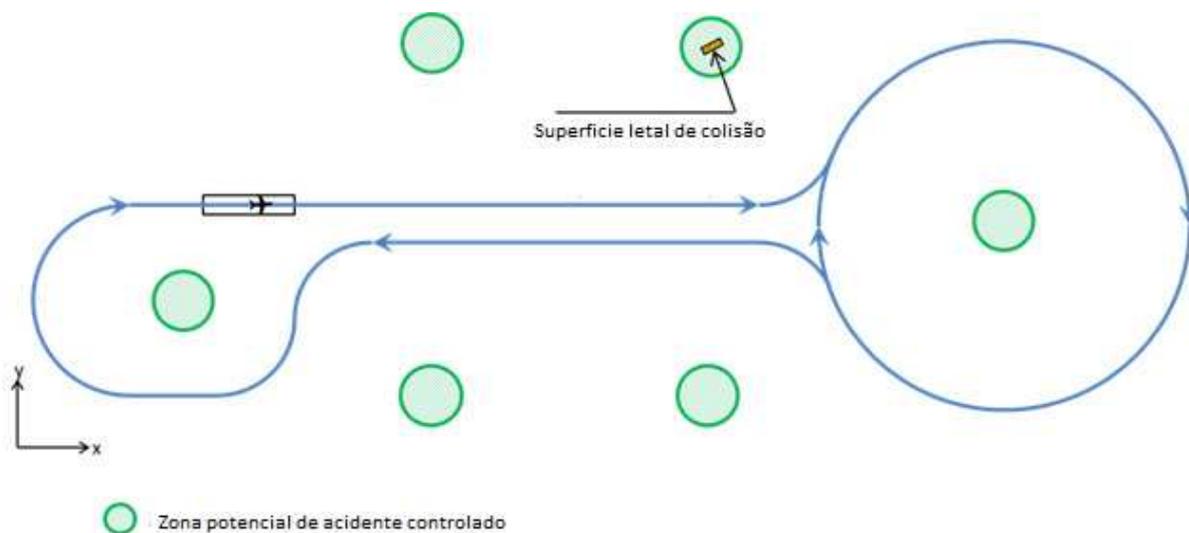


Figura 16: Distribuição de áreas potenciais de colisão para acidentes controlados.

Ao contrário do caso de acidente não controlado, a área não evolui continuamente ao longo do plano de voo.

Continuação do Anexo - Avaliação do Risco de Fatalidades no Solo por Acidente de RPA**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] *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, abril 2006.*
- [3] *US NAVY, "Third Party Risk Assessment Tool (3PRAT)", Report n° NAWCADPAX/TR-2012/218, julho 2012.*
- [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, dezembro 2013.*
- [6] *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", junho 2012.*
- [7] *US NAVY, "Potential Crash Location Model", Report n° NAWCADPAX/TR-2012/195, junho 2012.*
- [8] *EASA, A-NPA n° 16-2005 "Policy for Unmanned Aerial Vehicle (UAV) certification", novembro 2005.*
- [9] *David A. Burke and Charles E. Hall Jr. (North Carolina State University), Stephen P. Cook (Naval Air Systems Command), "System Level Airworthiness Tool (SLAT)", 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, janeiro 2010.*
- [10] *Lawrence Livermore National Laboratory (US Department of Energy), "Data Development Technical Support Document for Aircraft Crash Risk Analysis Methodology (ACRAM) Standard", agosto 1996.*
- [11] *US Department of Energy, "Accident Analysis for Aircraft Crash into Hazardous Facilities", DOESTD-3014-2006, outubro 1996.*
- [12] *US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, "Thermal Radiation from Large Pool Fires", NISTIR 6546, novembro 2000.*