Esta tese descreve o desenvolvimento de um *framework* para o gerenciamento de recursos associados ao uso do espaço aéreo, durante a execução de múltiplas missões de UAV, com a particularidade de gerar modelos e especificações de controle de forma automática, e tendo como ponto de partida os planos de voo definidos pelos operadores destas aeronaves.

A metodologia utilizada na modelagem de missões de UAV fez uso de métodos formais baseados em Sistemas a Eventos Discretos, representando o comportamento da aeronave durante a missão, bem como as restrições de controle destinadas a evitar problemas relacionados ao uso do espaço aéreo compartilhado.

A abordagem genérica proposta neste trabalho permite a geração automática de modelos de forma transparente para o operador da GCS, através de um sistema de identificação e controle de conflitos entre missões quanto à ocupação de um espaço aéreo em comum, e de bloqueio quanto ao acesso à recursos compartilhados.

São apresentados ainda os resultados de validações, envolvendo a implementação das principais funcionalidades do *framework* proposto.

Joinville, 2020

ANO
2020

RICARDO FERREIRA MARTINS | UM FRAMEWORK PARA A COORDENAÇÃO AUTOMÁTCA DE MÚLTIPLAS MISSÕES DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS BASEADO NA TEORIA DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

UDESC

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TESE DE DOUTORADO

UM FRAMEWORK PARA A COORDENAÇÃO AUTOMÁTICA DE MÚLTIPLAS MISSÕES DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS BASEADO NA TEORIA DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

RICARDO FERREIRA MARTINS

JOINVILLE, 2020

RICARDO FERREIRA MARTINS

UM FRAMEWORK PARA A COORDENAÇÃO AUTOMÁTICA DE MÚLTIPLAS MISSÕES DE VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS BASEADO NA TEORIA DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Tese submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Bittencourt Leal

JOINVILLE

2020

Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da

Biblioteca Setorial do CCT/UDESC,

com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Martins, Ricardo Ferreira
Um Framework para a Coordenação Automática de Múltiplas Missões de Veículos Aéreos Não Tripulados baseado na Teoria de Sistemas a Eventos Discretos / Ricardo Ferreira Martins. -- 2020.
145 p.

Orientador: André Bittencourt Leal
Tese (doutorado) -- Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2020.

1. Veículos Aéreos Não Tripulados. 2. Controle do espaço aéreo. 3. Gerenciamento de recursos. 4. Sistemas a Eventos Discretos. 5. Teoria de Controle Supervisório. I. Leal, André Bittencourt. II. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Um Framework para a Coordenação Automática de Múltiplas Missões de Veículos Aéreos não Tripulados Baseado na Teoria de Sistemas a Eventos Discretos

por

Ricardo Ferreira Martins

Esta tese foi julgada adequada para obtenção do título de

DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Área de concentração em “Sistemas Eletroeletrônicos”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Bittencourt Leal
CCT/UDESC
(Orientador/Presidente)

Prof. Dr. Edson Roberto De Pieri
UFSC

Profa. Dra. Patricia Della Méa Plentz
UFSC

Prof. Dr. Ademir Nied
CCT/UDESC

Prof. Dr. Douglas Wildgrube Bertol
CCT/UDESC

Joinville, SC, 27 de março de 2020.

Dedico este trabalho a minha família... pois é a maior riqueza da vida!

AGRADECIMENTOS

A felicidade verdadeira é aquela baseada em acreditar no bem, e quem é feliz respira gratidão! Assim, começo os meus agradecimentos, pois as pessoas que faço menção aqui foram fundamentais durante este processo da minha vida. E continuarão sendo assim...

Quero agradecer a minha familia, pois sem ela não existo de fato. A minha amada esposa Marcia, e ao meu explêndido filho, Felipe. A paciência de vocês, nos meus momentos difíceis, foi fundamental.

Agradeço ao meu orientador, professor André, por toda (e tanta) dedicação durante todo este período. O meu obrigado se estende para a família do André (esposa e filhas), pela paciência em compartilhar o esposo/pai durante todo o período desse trabalho.

Sou grato também aos meus familiares mais distantes, pois me apoiaram com a compreensão nos momentos que não estive presente.

Minha gratidão também é dedicada aos amigos que tenho dentro e fora da UDESC.

Agradeço também as equipes de desenvolvimento dos projetos Mission Planner, QGroundControl, ArduPilot e a organização CamberraUAV, pois sem eles (seus comentários, sugestões e o compartilhamento de códigos), eu me sentiria frustado. Os meus colegas de doutorado também merecem agradecimentos... principalmente a Ana e o Fabrício, e todos os alunos de IC e TCC (Gian Lucas Nunes de Almeida, Gabriel Nakata, Gabriel Vanassi, Gabriel Rech e Victor Luiz Ferreira), agradeço por toda atenção e cooperação.

Quero agradecer também ao meu departamento (DCC) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UDESC, por todo apoio dado. Meus agradecimendos para a banca de avaliadores, por terem aceito o convite e se dedicado na avaliação deste trabalho.

Muito obrigado também para quem lê esta mensagem...

"Nunca deixe que lhe digam que não vale a pena
Acreditar no sonho que se tem
Ou que seus planos nunca vão dar certo
Ou que você nunca vai ser alguém...
*Confie em si mesmo." (**Renato Russo**)*

RESUMO

Esta tese trata do problema de controle da ocupação do espaço aéreo por parte de veículos aéreos não tripulados (do inglês, *Unmanned Aerial Vehicle* - UAV). Apresenta-se um *framework* para a coordenação automática de múltiplas missões de UAV, baseado na Teoria de Sistemas a Eventos Discretos. Este *framework* possui as principais funcionalidades de UTM (*Unmanned aircraft system Traffic Management*), podendo ser usado como referência no desenvolvimento de sistemas de coordenação centralizada de UAV. São introduzidos modelos genéricos de autômatos que representam o comportamento de cada aeronave. Também são apresentados modelos genéricos que representam restrições de controle destinadas a evitar problemas relacionados ao uso do espaço aéreo compartilhado. A abordagem genérica permite a geração automática desses modelos, de forma transparente, para o operador da estação de controle (*Ground Control Station*). Os primeiros são gerados a partir das informações contidas nos planos de voo definidos pelos operadores das aeronaves e os demais a partir de um sistema de identificação e controle de conflitos entre missões quanto à ocupação de um espaço aéreo em comum, e de bloqueio quanto ao acesso a recursos compartilhados. Assim, a partir de recursos de telemetria, esses modelos são usados para indicar ao coordenador a necessidade de tomada de decisão e, nesse caso, o coordenador interferir na execução do voo dos UAV a fim de evitar os problemas identificados. As principais funcionalidades do *framework* foram implementadas, com destaque para a análise das missões, as credenciais dos usuários, as regras de controle e restrições de voo. Foram realizadas ainda validações da implementação de tais funcionalidades, no sentido de demonstrar a aplicação da estrutura proposta em situações reais. Considerando os resultados alcançados, conclui-se que o *framework* desenvolvido contempla tais funcionalidades, com a particularidade de gerar modelos de missões e especificações de controle de forma automática, a partir de cada modelo de missão (plano de voo) definido pelo operador de uma aeronave.

Palavras-chave: UAV, GCS, controle do espaço aéreo, gerenciamento de recursos, DES.

ABSTRACT

This thesis deals with the control problem of air space occupation by Unmanned Aerial Vehicle (UAV). A framework is presented for the automatic coordination of multiple UAV missions, based on the Theory of Discrete Events Systems. This framework has the main functionalities of UTM (Unmanned aircraft system Traffic Management), which can be used as a reference in the development of centralized UAV coordination systems. Generic models of automata are introduced that represent the behavior of each aircraft. Models are also presented for control restrictions designed to avoid problems related to the use of shared airspace. The generic approach allows the automatic generation of these models, transparently, for the operator of the Ground Control Station. The first ones are generated from the information contained in the flight plans defined by the aircraft operators and the others from an identification system and control of conflicts between missions regarding the occupation of a common air space, and of blocking access to shared resources. So, from telemetry resources, these models are used to indicate to the coordinator the need for decision making and, in this case, the coordinator will interfere in the execution of the UAV flight in order to avoid the identified problems. The main functionalities of the framework were implemented, with emphasis on the missions analysis, the users credentials, the control rules and flight restrictions. Validations were also carried out on the implementation of such functionalities, demonstrating the application of the proposed structure in real situations. Considering the results, it is concluded that the developed framework contemplates such functionalities, with the particularity of generating mission models and control specifications automatically, from each original mission model (flight plan) defined by an aircraft operator.

Keywords: UAV, GCS, Air Traffic Management, Resource Allocation, DES.

LISTA DE FIGURAS

1 Ambiente de coordenação descentralizada. 33
2 Cenário de um sistema de coordenação centralizado do espaço aéreo. 34
3 Representação abstrata de um *framework* para a coordenação de missões de UAV. . . 35
4 Noções básicas a respeito da integração do espaço aéreo. 42
5 Definição de uma missão, através da ferramenta QGroundControl. 45
6 Distribuição (por áreas) das publicações associadas ao assunto geral (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990. 47
7 Distribuição (por países) das publicações associadas ao assunto Engenharia e Ciência da Computação (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990. 48
8 Distribuição (por ano) das publicações associadas ao assunto Engenharia e Ciência da Computação (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990. . . 48
9 Representação de uma missão, na forma de um grafo orientado, considerando uma missão genérica com *N waypoints*. 49
10 Representação dos vetores (a) e (d), associados a atitude e ao deslocamento da aeronave, respectivamente, bem como o destaque para o uso de uma trajetória suavizada (r). 50
11 Refinamento do levantamento bibliográfico, em dois níveis: 1) Usando o termo "GCS"; e 2) Complementando com os termos "missão AND descrição". 51
12 Refinamento do levantamento bibliográfico, em dois níveis: 1) Usando o termo "controle do espaço aéreo"; e 2) Considerando duas análises: "coordenação AND missão"e "voo AND autônomo". 53
13 Exemplo de um DFA. A linguagem marcada associada a esse DFA pode ser representada pela ER: $a(ba)^*cc^*$. 62
14 Exemplo de aplicação da operação de composição síncrona: (a) autômato G_A, com $\Sigma_A = \{a, x, z\}$; (b) autômato G_B, com $\Sigma_B = \{a, y\}$; e (c) $G_A \parallel G_B$, com $\Sigma_{A\|B} = \{a, x, y, z\}$. 63
15 Exemplo de uma máquina de Moore. 65
16 Malha fechada associada ao controle supervisório, com G representando a planta do sistema não controlado e S representando o supervisor. 67
17 Representação básica da planta associada a duas missões de UAVs, onde (a) representa a planta da missão 1, (b) representa a planta da missão 2, e (c) mostra o resultado da composição síncrona dos dois modelos. 67

18 Exemplo de uma especificação de controle (E), considerando o momento do início das missões. 69
19 R: resultado da composição entre G e E. 69
20 Autômato resultante S: $L_m(S) = Sup_C(G,K)$. 70
21 Atualização do mapeamento sistemático da literatura, específico para os conceitos de DES e SCT. 71
22 Atualização do mapeamento sistemático da literatura, específico para os conceitos de controle do espaço aéreo e alocação de recursos. 73
23 Representação da evolução de uma missão, com destaque para os instantes associados a cada chegada em pontos específicos (•) da trajetória de uma missão (*waypoints*). 79
24 Representação de uma missão, na forma de um DES, considerando uma missão genérica com N *waypoints*. 80
25 Uma missão genérica envolvendo 6 *waypoints* que devem ser visitados de forma sequencial, sendo ela definida através da GCS *Mission Planner* (ARDUPILOT, 2016). 81
26 DFA da missão representada pela Figura 25. 81
27 Alteração da missão anterior (Figura 25), com a adição do *waypoint* **7**. 82
28 Autômato que representa a execução de uma missão: (a) associada com as posições geográficas (*waypoints*); (b) que diferencia as posições geográficas de acordo com o momento da visitação dos *waypoints*. 82
29 Modelo genérico básico de um DFA para missões de UAV. 83
30 Modelo básico para uma missão com 6 *waypoints*. 84
31 Modelo modificado (partindo da Figura 30) para uma missão com 6 *waypoints*, incluindo estados intermediários de movimento. 84
32 Modelo genérico modificado, incluindo estados intermediários de movimento. 85
33 Modelo genérico modificado, incluindo estados intermediários de movimento, estados de interrupção e ações de interação. 86
34 Modelo genérico final, incluindo os estados intermediários de movimento, estados de interrupção (associados também aos *waypoints)* e ações de interação. 86
35 Cuidados com a manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica. 87
36 Características gerais de uma torre de transmissão. 88
37 Inspeção de uma linha de transmissão de energia elétrica, com identificação de defeito na componente de isolamento de uma das torres do sistema. 89
38 Modelo genérico de um DFA para missões de UAV, com destaque para a inclusão de tarefas. 89

39 Modificação de uma missão principal fazendo uso de um sensor para tomada de decisão: (a) missão original contendo 6 *waypoints*; (b) associação do sensor (S1) a um *waypoint*, bem como os *waypoints* de destino, após a tomada de decisão (on/off); e (c) identificação das missões alternativas resultantes (M1, M2 e M3). 92
40 Fluxograma da estrutura da função AutoWD. 94
41 Importação de uma missão, da GCS para o Nadzoru, e posterior exportação, com informações sobre o sensor virtual incorporadas à missão. 94
42 Validação da proposta de replanejamento de missões: (a) experimentos realizados através da técnica HIL; e (b) experimentos realizados em ambiente real. 96
43 Implementação do sensor virtual na GCS (Mission Planner). 97
44 Ilustração do planejamento de três missões de UAVs (A, B e C), com destaque para a caracterização de quatro regiões de conflito. 101
45 Exemplo envolvendo três missões que podem fazer uso de um recurso compartilhado associado a um *waypoint* comum. 103
46 Um exemplo de duas missões sendo executadas em uma região em comum. 105
47 Representação das missões A e B associadas ao exemplo da Figura 46, através de DES. 105
48 Associação das duas missões com a região de conflito. 107
49 Especificação de controle associada à região de conflito identificada no exemplo. . . 108
50 Especificação de controle genérica, associada a uma região de conflito que envolve *n* missões. 109
51 Exemplo de duas missões planejadas, compartilhando um *waypoint* específico, caracterizado como base para recarga de combustível. 110
52 Organização das bases de recarga (S_R) e de espera (S_E), com destaque para: (a) o encaminhamento das aeronaves para as bases de recarga, quando existir disponibilidade, e posterior redirecionamento para a missão original (d); (b) o encaminhamento das aeronaves para as bases de espera, quando não existir base de recarga disponível; e (c) o encaminhamento das aeronaves que se encontram nas bases de espera, quando uma base de recarga estiver disponível. 111
53 Representação das missões A e B (referente ao exemplo da Figura 51), através de DES, com destaque para etapa associada ao replanejamento de cada missão, após a recarga de combustível. 113
54 Modificação da missão A (referente ao exemplo da Figura 51), com a caracterização do uso do recurso compartilhado. 113
55 Especificação de controle associada ao tratamento da região de bloqueio, específica para a missão A (referente ao exemplo da Figura 51). 114
56 Especificação de controle genérica, associada ao tratamento de uma região de bloqueio. 115

57 *Framework* proposto neste trabalho. 118
58 Exemplo de uma região sob a responsabilidade de um coordenador, contendo as missões A, B e C, com a representação por quadrantes, associando-os aos *waypoints* e trajetórias entre dois ou mais pontos, bem como a identificação das regiões de conflito. 123
59 Identificação das relações entre dois segmentos de reta (associados a deslocamentos de missões): (a) com um ponto de intersecção entre dois segmentos de reta (no mesmo plano); (b) sem um ponto de intersecção entre os dois segmentos de reta (planos distintos); e (c) segmentos de reta no mesmo plano, mas sem um ponto de intersecção. 125
60 Identificação de delimitadores seguros: (a) situação sem conflito; e (b) situação conflitante. 126
61 Representação do planejamento de duas missões (A e B). 127
62 Reconhecimento de uma região de conflito entre as missões A e B: (a) Identificação do delimitador seguro necessário para a realização da missão A, bem como o primeiro ponto comum (X), considerando também o sentido do deslocamento da aeronave (esfera que representa o delimitador seguro) e a trajetória da missão B; (b) Semelhante ao caso anterior, agora considerando o delimitador seguro necessário para a realização da missão B, com destaque para o primeiro ponto em comum (Y); (c) Identificação de um ponto em comum entre as trajetórias das missões A e B, caracterizado como sendo uma intersecção (Z). 128
63 Reconhecimento de uma região de conflito entre as missões A e B: (a) Identificação do delimitador seguro necessário para a realização da missão A, bem como o primeiro ponto comum, considerando o deslocamento da aeronave (esfera que representa o delimitador seguro) e a trajetória da missão B; (b) Semelhante ao caso anterior, agora considerando o delimitador seguro necessário para a realização da missão B; (c) Identificação de pontos em comum entre as trajetórias das missões A e B. 129
64 Reconhecimento da região de conflito (entradas e saídas). 129
65 Arquitetura geral - Projeto ArduPilot. 134
66 Arquitetura de desenvolvimento escolhida para promover a validação do sistema de coordenação centralizada. 135
67 Exemplo de uma missão definida no ambiente de simulação, contendo 7 *waypoints*. . 136
68 Arquivo contendo informações da missão identificada (Figura 67). 137

LISTA DE TABELAS

1 Descritores para o refinamento quanto a DES e SCT. 71
2 Listagem dos artigos que destacam somente a teoria de DES. 71
3 Listagem dos artigos que destacam as duas teorias (DES e SCT). 72
4 Descritores para o refinamento quanto ao controle do espaço aéreo e a alocação (gerenciamento) de recursos (tarefas). 73
5 Listagem dos artigos que destacam o assunto "controle do espaço aéreo". 74
6 Listagem dos artigos que destacam o assunto "alocação de recursos". 74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
ATC	*Airspace Traffic Control*
CTOL	*Conventional Take-Off and Landing*
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
DFA	*Deterministic Finite Automaton*
DES	*Discrete Event System*
EUA	Estados Unidos da América
FAA	*Federal Aviation Administration*
FIFO	*First In First Out*
GCS	*Ground Control Station*
HIL	*Hardware In the Loop*
IRF	*Instrumental Flight Rules*
ONU	Organização das Nações Unidas
POI	*Point Of Interest*
MM	*Moore Machine*
NASA	*National Aeronautics and Space Administration*
RPAS	*Remotely Piloted Aircraft System*
RA	*Resource Allocation*
RL	*Regular Language*
SCT	*Supervisory Control Theory*
SED	Sistema a Eventos Discretos
SIL	*Software In the Loop*
TCS	Teoria de Controle Supervisório

UAM	*Urban Air Mobility*
UAS	*Unmanned Aircraft System*
UAV	*Unmanned Aerial Vehicle*
UTM	*Unmanned aircraft system Traffic Management*
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VRF	*Visual Flight Rules*
VTOL	*Vertical Take-Off and Landing*

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ	Conjunto de eventos
Σ_o	Conjunto de eventos observáveis, $\Sigma_o \subset \Sigma$
Σ_{no}	Conjunto de eventos não observáveis, $\Sigma_{no} \subset \Sigma$
Σ_c	Conjunto de eventos controláveis, $\Sigma_c \subset \Sigma$
Σ_{nc}	Conjunto de eventos não controláveis, $\Sigma_{nc} \subset \Sigma$
Σ^*	Fecho de Kleene
G	Autômato Finito Determinístico, $G = (X, \Sigma, \delta, x_0, X_m)$
$L = \overline{L}$	Prefixo-fechada
X_m	Conjunto dos estados marcados - DFA
x_o	Estado inicial - DFA
X	Conjunto finito de estados - DFA
f	Função de transição de estados - DFA
$L(G)$	Linguagem gerada
$L_m(G)$	Linguagem marcada
G_{MM}	DFA de uma máquina de moore - MM
Δ	Símbolos de saída de uma MM
λ	Função de tradução de uma MM
d_i	Evento associado à partida de um *waypoint i*
Γ	Estrutura de controle
γ	Opção de controle
k	Linguagem alvo
E_i	Especificação de controle (i)
R	Resultado da composição síncrona entre E e G

$Sup_C(G,K)$	Supervisor
p_i	Partida de um *waypoint i*
c_i	Chegada em um *waypoint i*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 31
1.1 Definição do escopo 32
1.2 Objetivos 36
1.2.1 Objetivo geral 36
1.2.2 Objetivos específicos 36
1.3 Resumo das contribuições 37
1.4 Estrutura da tese 38

2 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA SOBRE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO E ALOCAÇÃO DE RECURSOS 41
2.1 Conceitos básicos associados a UAV/UAS 43
2.2 Trabalhos relacionados 46
2.2.1 Representação de uma missão 49
2.2.2 Controle do espaço aéreo 52
2.2.3 Alocação de recursos 53
2.3 Conclusões do capítulo 54

3 FUNDAMENTOS ASSOCIADOS ÀS TEORIAS DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO . . . 57
3.1 Sistemas a Eventos Discretos 58
3.1.1 Teoria das Linguagens Formais 59
3.1.2 Expressões Regulares 61
3.1.3 Autômatos Finitos Determinísticos 61
3.1.4 Composição síncrona de autômatos 63
3.1.5 Transdutores 64
3.1.6 Linguagens Regulares 65
3.1.7 Caracterização dos eventos 65
3.2 Teoria de Controle Supervisório 66
3.2.1 Refinamento do mapeamento sistemático da literatura 70
3.2.2 Conclusões do capítulo 75

4 PROPOSIÇÕES PARA A MODELAGEM DE MISSÕES DE UAVS 77
4.1 Representação de missões através de DES 78
4.1.1 Caracterização de uma modelagem genérica 78
4.1.2 Adição de estados de movimento ao modelo genérico 84
4.1.3 Modelagem de tarefas 86
4.2 Resultados alcançados com o replanejamento e interrupção de missões 90
4.2.1 Replanejamento de uma missão automática 92
4.2.2 Caracterização do replanejamento de uma missão 92
4.2.3 Validação da proposta de replanejamento de missões 93
4.3 Conclusões do capítulo 96

5 PROPOSIÇÕES PARA A GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESPECIFICAÇÕES DE CONTROLE ENVOLVENDO MÚLTIPLAS MISSÕES DE UAVS 99
5.1 Caracterização de uma região de conflito 99
5.2 Caracterização de uma região de bloqueio 102
5.3 Proposta de um modelo genérico para o tratamento do problema de conflito de missões 104
5.4 Proposta de um modelo genérico para o tratamento do problema de bloqueio de missões 109
5.5 Conclusões do capítulo 115

6 DEFINIÇÃO DE UM FRAMEWORK DE COORDENAÇÃO CENTRALIZADA DE MÚLTIPLAS MISSÕES DE UAVS 117
6.1 Apresentação da estrutura do framework proposto 117
6.1.1 Credenciais do usuário 119
6.1.2 Análise da missão 120
6.1.3 Configurações 120
6.1.4 Restrições 121
6.1.5 Regras de controle 121
6.2 Análise das restrições 122
6.2.1 Identificação das regiões de conflito 122
6.2.2 Identificação das regiões de bloqueio 130
6.3 Definição das regras de controle 130
6.4 Conclusões do capítulo 130

7 IMPLEMENTAÇÃO DE UM COORDENADOR CENTRALIZADO 133
7.1 Descrição do ambiente de desenvolvimento e simulação 135
7.2 Conclusões do capítulo 137

8 CONCLUSÕES 139

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 141

1 INTRODUÇÃO

Com a disseminação do uso de veículos aéreos não tripulados (VANT), surgiram diversas aplicações interessantes, e em diversos setores da sociedade. Por exemplo, um VANT, também conhecido como UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) pode ser utilizado em missões de monitoramento de situações e ambientes (como o acompanhamento da evolução do plantio de uma lavoura ou a avaliação das condições operacionais de uma linha de transmissão de energia elétrica), ou até para realizar a entrega de encomendas em locais de difícil acesso (por exemplo, existem organizações não governamentais que promovem a distribuição de medicamentos em diversos países da África).

No entanto, estas aeronaves fazem uso do espaço aéreo e devem seguir legislações específicas de cada região, quanto ao uso deste recurso compartilhado. Além disto, não existe um sistema que permita fazer o acompanhamento de missões realizadas por UAV, ou algo semelhante aos controladores de voo que operam no gerenciamento de voos de aeronaves comerciais (tripuladas).

Neste sentido, surge a necessidade de identificar soluções para gerenciar conflitos relacionados a ocupação do espaço aéreo, de forma a criar condições de priorização de uso dos recursos, bem como definir alternativas de comportamento que, no pior dos casos, determinem a interrupção de uma missão em prol da garantia da segurança coletiva das aeronaves envolvidas.

Além destas questões de uso compartilhado de recursos, existe ainda a necessidade de avaliar os requisitos operacionais de uma aeronave, mais especificamente quanto a garantia da realização de uma missão com sucesso, envolvendo: combustível suficiente para a execução da missão planejada, meios de comunicação necessários para o acompanhamento da evolução da missão e geração de eventos que indiquem situações de emergência, dentre outros.

Outra questão relevante está na execução de missões de forma automática, ou seja, assistida por um operador de forma remota, porém, com todas as etapas da missão previamente definidas, antes do início do voo. Missões envolvendo aeronaves não tripuladas possuem um tempo de resposta maior, associado à reação mediante uma identificação de situação de emergência.

Para minimizar os problemas associados com a redução deste tempo de resposta ou até contornar a situação de risco, seria interessante identificar as condições que podem levar a uma situação crítica, no sentido de evitar que as aeronaves cheguem a experimentar urgências. Enfim, se existem condições que permitem identificar que problemas de compartilhamento de

recursos podem ocorrer, então pode ser relevante definir um sistema que identifique estas condições e atue de forma a definir soluções para contornar o problema.

1.1 DEFINIÇÃO DO ESCOPO

Segundo Lim et al. (2012), um UAV possui um conjunto de recursos que capacitam a execução de uma missão planejada, sendo eles: controladora de voo, embarcada na aeronave, e que promove todo o controle da atitude (movimentação de forma estável) de voo, além de permitir que destinos sejam alcançados; sensores embarcados, capazes de capturar informações do ambiente associado à missão, permitindo que a aeronave promova mudanças de trajetória; e enlaces de dados, permitindo a comunicação entre a aeronave e a estação de controle em solo.

Um Sistema de Aeronaves Não-Tripuladas (*Unmanned Aircraft System* - UAS) inclui os veículos aéreos não-tripulados (UAV), as estações de controle terrestre (*Ground Control Station* - GCS) e toda a equipe de operadores. Cada operador faz uso de uma GCS para definir suas missões e associar cada missão a uma aeronave que seja capaz de desempenhar as funcionalidades desejadas.

Em termos de trajetória de voo, existem duas formas de tratar da problemática de deslocamento de uma aeronave. A primeira está focada no controle dos recursos de deslocamento/propulsão da aeronave, e os problemas associados a este tipo de controle são definidos através das teorias de controle clássico / contínuo (NONAMI et al., 2010), e de otimização de trajetória (SHANMUGAVEL, 2007).

Este trabalho procura tratar de questões relacionadas com o deslocamento entre dois pontos de uma trajetória, sendo que a técnica de controle utilizada para a realização deste deslocamento, bem como os sistemas necessários para promover a estabilização da aeronave, durante a execução da trajetória, não fazem parte do escopo deste trabalho, pois são assumidas como sendo questões resolvidas.

As missões atribuídas aos UAV são previamente descritas através de uma sequência de pontos a serem visitados por cada aeronave, sendo que o operador é responsável pela definição de todas as trajetórias, obrigando-o a ter o conhecimento detalhado do ambiente envolvido, destacando o detalhamento quanto ao relevo do terreno, construções existentes, características do espaço aéreo, regras de uso do espaço aéreo, condições climáticas da região, entre outras informações.

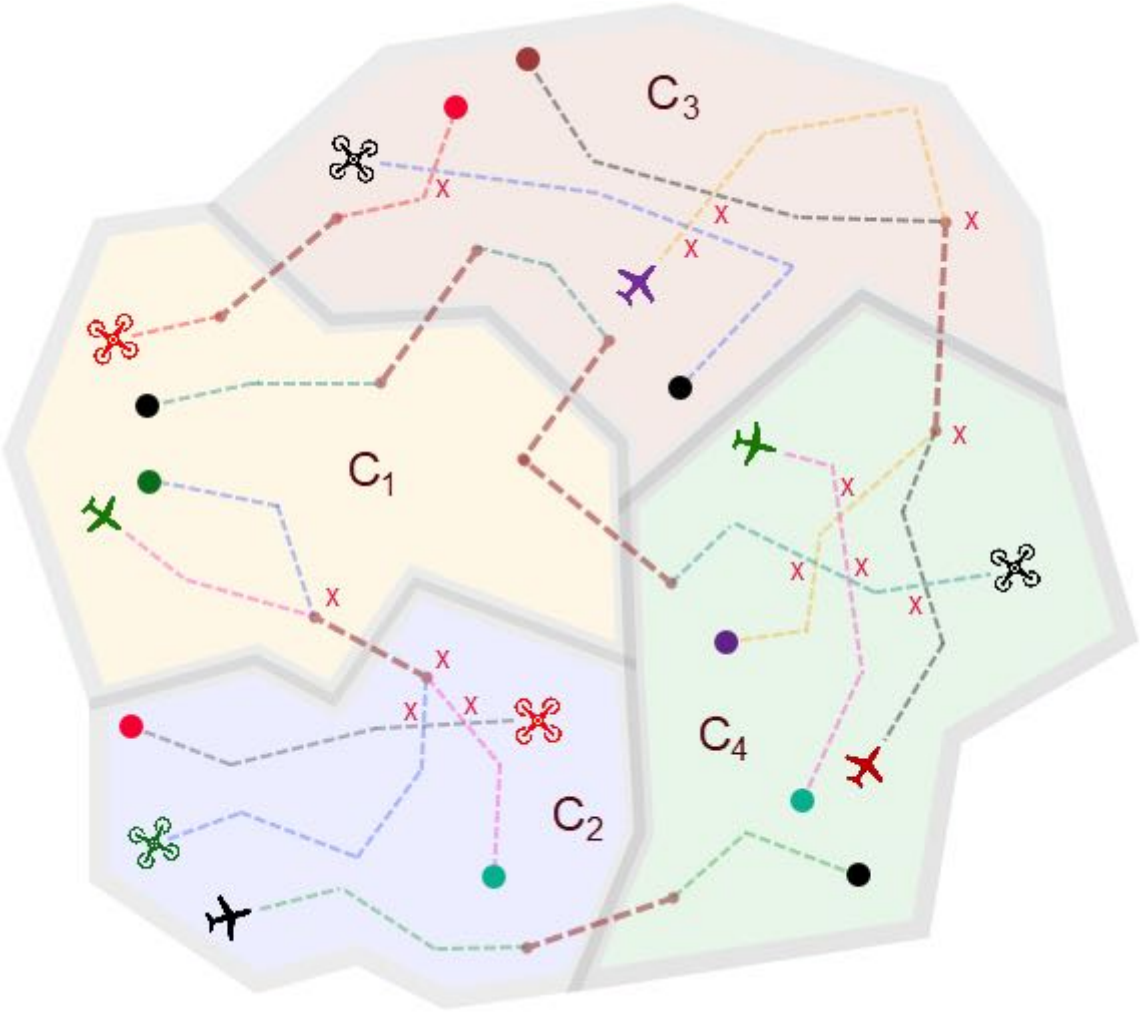
Assim, quanto ao deslocamento entre dois pontos, considerando que uma missão é definida como sendo uma sequência de pontos definidos no espaço aéreo, o interesse deste trabalho está na representação discreta de eventos associados aos momentos de acesso a cada ponto na trajetória.

Neste sentido, o uso da teoria de Sistemas a Eventos Discretos (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008) e da Teoria de Controle Supervisório (RAMADGE; WONHAN, 1989) demonstra ser interessante para a representação destas missões, bem como para a definição de comportamentos associados a um controle baseado em restrições, sendo esta base teórica deste trabalho.

Portanto, o foco deste trabalho está no controle da execução de missões, visando determinar garantias de execução de forma segura, observando situações de conflito associadas à ocupação do espaço aéreo e de gerenciamento de recursos compartilhados.

Com o objetivo de apresentar um cenário genérico, a Figura 1 apresenta uma situação envolvendo diversas missões de UAV, considerando 4 regiões distintas sendo gerenciadas pelos seus respectivos coordenadores (C_i, com $i = 1,2,3,4$). Cada região possui duas ou mais fronteiras com as suas regiões vizinhas, sendo que existem trajetórias específicas, definidas para permitir a transição das aeronaves entre as regiões.

Figura 1 – Ambiente de coordenação descentralizada.



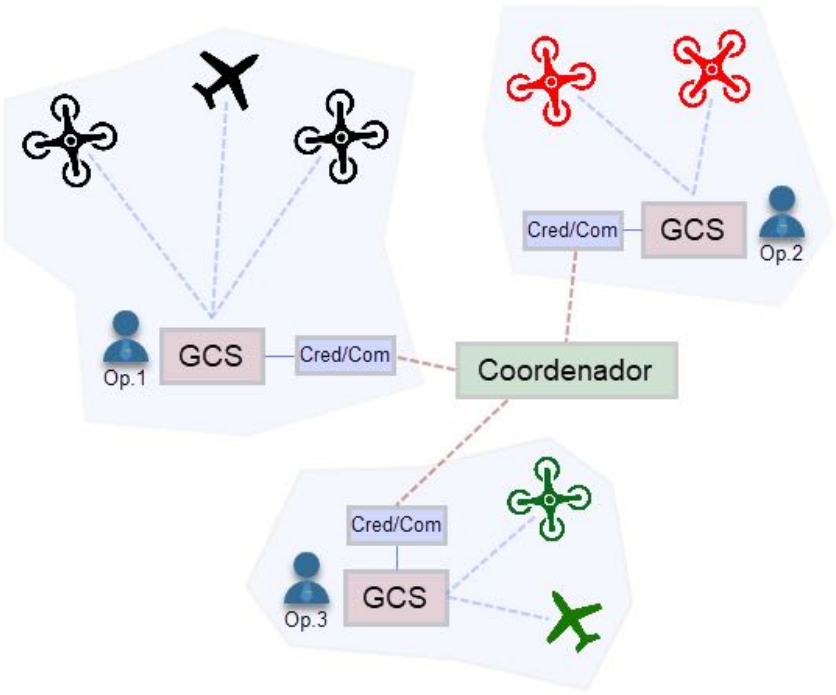
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

É possível ainda observar que, em cada região, existem situações de conflito associadas à ocupação de uma posição do espaço por mais de uma aeronave, identificadas com um X. Por exemplo, a região associada ao coordenador C_2 possui 3 posições que caracterizam situações de conflito em potencial, dependendo da ocupação espacial das aeronaves envolvidas ao mesmo tempo.

Para que seja possível identificar as situações de planejamento de missões que envolvam mais de uma região/coordenador, antes, é preciso identificar as necessidades de atuação de um coordenador de uma região específica, envolvendo todas as aeronaves sob sua supervisão.

Assim, para desempenhar os papéis associados ao controle das missões de UAV, é necessário definir um sistema de controle capaz de atuar em todas as aeronaves, no sentido de definir restrições a cada uma delas. Assim, a Figura 2 ilustra essa situação, considerando o papel de um coordenador específico, responsável por uma região em particular.

Figura 2 – Cenário de um sistema de coordenação centralizado do espaço aéreo.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Cada aeronave deve ser associada a um operador de missões de UAV, sendo ele responsável pela configuração da aeronave e das missões a serem desempenhadas por ela. Para realizar uma missão, o operador faz uso de uma GCS, ferramenta que permite planejar uma missão e executá-la sob a supervisão do operador.

Assim, o sistema de coordenação deve interagir com cada GCS, através de um módulo que gerencia o enlace de comunicação (entre o coordenador e a GCS). Esse módulo também

deve possuir recursos de gerenciamento do credenciamento de cada operador, identificando-o e associando-o ao conjunto de aeronaves sob a sua responsabilidade.

O sistema de coordenação deve atuar em uma determinada região, considerando a sua abrangência em termos da capacidade de alcance dos enlaces de dados existentes.

Fazendo uso de uma abordagem centralizada, o sistema de coordenação deve refletir o seu conhecimento a respeito da região de atuação através de ações sobre o conjunto de aeronaves em voo.

Para atuar sobre o comportamento de cada aeronave, é preciso utilizar de um canal de comunicação constante, promovendo consultas periódicas a todas as aeronaves em atividade.

A partir do momento que um operador identifica uma aeronave e sua missão, o coordenador deve avaliar as possibilidade de interação da aeronave com o ambiente que ele coordena, incluindo as demais missões em execução.

As funcionalidades de um coordenador podem ser apresentadas através de um *framework*, sendo que a Figura 3 ilustra uma representação abstrata deste modelo.

Figura 3 – Representação abstrata de um *framework* para a coordenação de missões de UAV.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

De forma simplificada, pretende-se apresentar neste momento os principais elementos associados a um *framework* para a coordenação centralizada de missões de UAV, sendo este o principal foco do trabalho. Assim, um coordenador de missões pode ser operacionalizado através de um conjunto de funcionalidades:

- Análise das missões: processo fundamental que deve ser executado em cada missão atribuída a um coordenador, considerando a sua descrição em termos de ocupação do espaço aéreo;

- Credenciais dos usuários: identificação das informações associadas aos operadores de missões, bem como a caracterização das aeronaves utilizadas;

- Restrições de voo: avaliação das condições de voo observadas, considerando a região envolvida, o conjunto de missões definidas, e o momento de atuação de cada aeronave; e

- Regras de controle: caracterização de cada situação observada, de acordo com as restrições de voo identificadas, com o objetivo de definir regras de controle aplicáveis às aeronaves envolvidas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta tese consiste em desenvolver um *framework* para a coordenação automática de múltiplas missões de veículos aéreos não tripulados baseado nas teorias de sistemas a eventos discretos e de controle supervisório, que permitem o gerenciamento de recursos compartilhados e o controle de tráfego aéreo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar as possibilidades de se modelar uma missão de um UAV através do uso da teoria de SED;

- Apresentar propostas e ensaios iniciais, com base nas teorias revisadas, no sentido de promover a modelagem e definição de especificações de controle para missões de UAV;

- Apresentar proposta para a geração automática de especificações de controle para múltiplas missões de UAV; e

- Definir um *framework* de coordenação centralizada de múltiplas missões de UAV com a particularidade de gerar modelos e especificações de controle de forma automática e tendo como ponto de partida os modelos de missões (planos de voo) definidos pelos operadores destas aeronaves.

Quanto ao tipo de aeronave, existe um conjunto significativo de formas que podem ser adotadas para a classificação de aeronaves. No entanto, considerando o contexto desse trabalho, essa classificação é feita de forma simplificada. Assim, existem duas classificações gerais de aeronaves, quanto a forma de execução da decolagem e do pouso, sendo elas: as aeronaves do tipo VTOL (*Vertical Take-Off and Landing*), que promovem a decolagem e o pouso na vertical (fazendo uso de asas rotativas); e as aeronaves do tipo CTOL (*Conventional Take-Off and Landing*), que promovem a decolagem e o pouso na sua forma convencional (fazendo uso de asas fixas). A escolha da aeronave está diretamente associada com as necessidades encontradas na caracterização da missão, envolvendo o espaço ocupado em solo e no ar. Neste sentido, esse trabalho permite tratar de missões associadas à aeronaves dos dois tipos aqui identificados.

1.3 RESUMO DAS CONTRIBUIÇÕES

Diversos trabalhos de pesquisa foram realizados desde 2015 no tema de coordenação de missões de UAV no Grupo de Automação de Sistemas e Robótica da UDESC. A partir de 2015 surgiram os primeiros trabalhos de iniciação científica, criando a oportunidade de compreender aspectos importantes associados ao planejamento de missões de UAV, a adição de sensores para auxilio na navegação das aeronaves, ao uso de recursos por imagem para auxiliar na etapa de pouso de uma aeronave e o gerenciamento de frotas de UAV. Surgiram também os primeiros projetos em nível de pós-graduação, sendo um projeto de mestrado e a presente tese de doutorado, também com a participação de 7 alunos de iniciação científica ao longo do desenvolvimento. Todos estes projetos trouxeram experiência em conceitos de coordenação de missões, especialmente em relação ao papel do coordenador, contribuindo na geração de conhecimento para o grupo - impactando no desenvolvimento do projeto da presente tese de doutorado.

Parte dos resultados gerados ao longo deste período foram publicados em 2017 no International Conference on Unmanned Aircraft Systems – ICUAS, sob o título "*Towards Automatic Code Generation for UAV Mission Planning Using Decision Sensors*" , tendo como autores: MARTINS, R. F. ; ALMEIDA, G. L. N. ; LEAL, A. B., disponível em:

https://ieeexplore.ieee.org/document/7991476

DOI 10.1109/ICUAS.2017.7991476

Neste mesmo ano, foi publicado o trabalho intitulado "*Planejamento de missões de VANTs utilizando modelagem por SEDs e sensores de decisão*" no Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente em Porto Alegre, disponível em:

https://www.ufrgs.br/sbai17/papers/paper_695.pdf

A terceira publicação no tema ocorreu em 2018 no IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC), sob o título "*A Framework for Automatic Coordination of Request-*

Oriented Deployment of Multi-UAV with Cost Optimization", tendo como autores: FLORENCIO, J. L. ; LEAL, A. B. ; MARTINS, R. F. ; LOPES, Y. K., disponível em:

https://ieeexplore.ieee.org/document/8569366.

DOI 10.1109/DASC.2018.8569366

Esta tese descreve o desenvolvimento de um *framework* para o gerenciamento de recursos associados ao uso do espaço aéreo, durante a execução de múltiplas missões de UAV, com a particularidade de gerar modelos e especificações de controle de forma automática, e tendo como ponto de partida os planos de voo definidos pelos operadores destas aeronaves.

A metodologia proposta na modelagem de missões de UAV fez uso de métodos formais baseados em Sistemas a Eventos Discretos, representando o comportamento da aeronave durante a missão, bem como as restrições de controle destinadas a evitar problemas relacionados ao uso do espaço aéreo compartilhado.

A abordagem genérica proposta neste trabalho permite a geração automática de modelos de forma transparente para o operador da GCS, através de um sistema de identificação e controle de conflitos entre missões quanto à ocupação de um espaço aéreo em comum, e de bloqueio quanto ao acesso à recursos compartilhados.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em oito capítulos, sendo que no primeiro e presente capítulo foram apresentados a importância dos veículos aéreos não tripulados na atualidade e os problemas associados ao uso compartilhado de recursos e espaço aéreo, caracterizando a importância de pesquisas na busca por soluções eficientes. Com isso definiu-se o escopo do projeto, os objetivos da tese e as contribuições científicas publicadas a partir do projeto.

No Capítulo 2 é apresentado o mapeamento sistemático da literatura associada ao tema da pesquisa. Para isso, conceitos básicos associados a UAV são apresentados e nortearam a seleção de palavras-chave adequadas para o levantamento da literatura, partindo de termos amplos, como UAV, chegando a refinamentos utilizando termos específicos como Controle do Espaço Aéreo e Alocação de Recursos. Por fim, são descritos os achados de autores relevantes para a presente proposta.

O Capítulo 3 traz os fundamentos de SED e TCS, bem como o refinamento do mapeamento sistemático da literatura associada às teorias aplicadas às aeronaves não tripuladas. Destaca-se a importância da teoria de SED/DES para a representação genérica de missões de UAV e monitoramento do sistema, permitindo identificar a evolução da missão e a forma de atuação do supervisor (coordenador). Também se descreve a relação dessa teoria com a teoria de linguagens formais e suas representações. Descreve-se a importância da TCS/SCT na espe-

cificação de controle, representando uma lógica de controle, porém de modelagem genérica. É apresentado um modelo matemático, baseado na máquina de Moore, relevante na formulação de propostas associadas à alocação de recursos.

Assim, o mapeamento sistemático da literatura, desenvolvido nos capítulos 2 e 3, foi realizado em duas etapas: a primeira etapa apresenta a associação dos veículos aéreos não tripulados com dois problemas identificados na atualidade (controle do espaço aéreo e alocação de recursos), enquanto que a segunda etapa trata do levantamento da aplicação das teorias de SED e TCS sobre os problemas anteriormente identificados. O principal objetivo desta forma de organização do texto está na caracterização sistemática dos problemas elencados, e suas relevâncias diante dos cenários de pesquisa encontrados, para depois realizar a associação com a aplicação das teorias citadas. Além disto, foi possível apresentar os principais conceitos associados de forma focada a cada momento do levantamento, visando destacar situações específicas de cada levamentamento realizado.

A nova metodologia para a modelagem de missões de UAV proposta nesta tese é apresentada no Capítulo 4. Inicialmente são apresentadas as possíveis representações de missões de UAV, fazendo uso do formalismo de DES, com o objetivo de definir uma modelagem genérica de missões, acrescidas de estados de movimento. Na sequência, são definidos os conceitos próprios de replanejamento de missões devidamente caracterizados e validados a partir de modelos definidos. Para a validação foi desenvolvida e apresentada uma ferramenta computacional que permite considerar informações de sensores embarcados ou não para tomada de decisões em pontos intermediários da missão principal, levando ao seu replanejamento.

No Capítulo 5 são apresentadas as proposições para a geração automática de especificações de controle de múltiplas missões de UAV. Os modelos desenvolvidos no capítulo anterior são empregados para padronizar a representação das missões e para fornecer recursos suficientes para a definição de regras de controle das aeronaves envolvidas. Para isso, caracteriza-se a região de conflito e a região de bloqueio. Finalizando com as propostas de um modelo genérico para tratamento de conflito e de bloqueio de missões.

Por sua vez, o Capítulo 6 apresenta a proposta de um *framework* que contempla as funcionalidades de UTM para o papel de um sistema centralizado de coordenação de UAV, detalhando suas funcionalidades e suas respectivas relações. Também é apresentado um algoritmo complementar para a identificação de regiões de conflito.

O Capítulo 7 traz detalhes da implementação do sistema de coordenação centralizada de missões de UAV, visando validar o *framework* proposto no capítulo anterior, bem como as proposições de modelagem das missões e de especificações de controle.

Por fim, o Capítulo 8 finaliza este trabalho, apresentando um resumo de todo o processo de desenvolvimento da tese, com destaque para cada contribuição alcançada nos capítulos anteriores.

2 MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA LITERATURA SOBRE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO E ALOCAÇÃO DE RECURSOS

Nas grandes cidades ao redor do mundo é comum observar o acúmulo de veículos nas ruas e, como consequência disso, o deslocamento de pessoas e produtos está sendo prejudicado. O aumento da concentração de pessoas nas cidades, a falta de um planejamento urbano sustentável e os elevados índices de poluição nos grandes centros são alguns dos fatores que provocam essa crise de mobilidade urbana.

Em 2012, a Organização das Nações Unidas (ONU) elaborou um relatório indicando que 80% da população latino-americana vivia em centros urbanos e 14% habitava metrópoles como São Paulo e Cidade do México. O programa ONU-HABITAT (ONU, 2012) indicou ainda que a taxa de urbanização no Brasil e países do Cone Sul chegará a 90% em 2020.

Atualmente, com o objetivo de auxiliar na locomoção e no compartilhamento de recursos, foram criados aplicativos de mobilidade urbana. No entanto, os resultados alcançados demonstram que são necessárias outras medidas para que um cenário mais positivo seja alcançado.

Assim, na última década surgiram diversas iniciativas que procuraram desenvolver tecnologias para a condução autônoma de veículos, sem a necessidade de uma pessoa para conduzir o veículo. Projetos associados à grandes empresas foram desenvolvidos com o objetivo de projetar veículos capazes de trafegar nas ruas com segurança, alcançando resultados significativos, como é o caso da empresa que herdou a tecnologia desenvolvida pela Google (Waymo[1]) e da TESLA[2], com os seus carros elétricos autônomos que já permitem transitar de forma autônoma em diversas cidades dos Estados Unidos da América (EUA).

Contudo, surgiram também avanços tecnológicos associados aos veículos aéreos, mais especificamente quanto aos não tripulados (UAV). Tais veículos ficaram conhecidos, inicialmente, pela sua aplicação em ações militares, mas acabaram ganhando espaço também em aplicações sociais, comerciais e industriais.

Considerando as situações nas quais se faz o uso de um UAV, podem ser destacadas: na aplicação de defensivos agrícolas, na manutenção de plantas industriais, no transporte de pessoas e produtos, ou ainda na distribuição de medicamentos em regiões de países subdesenvolvidos. Como exemplo, a empresa WISK[3] foi criada em 2019 como uma "*joint venture*" entre duas empresas (Boeing e Kitty Hawk) com o objetivo de desenvolver uma aeronave (nomeada como Cora), a qual deve ser utilizada como veículo de transporte de passageiros. Essa aeronave possui espaço somente para dois passageiros (ou seja, sem a presença de um piloto embar-

[1] https://waymo.com
[2] https://www.tesla.com
[3] https://wisk.aero

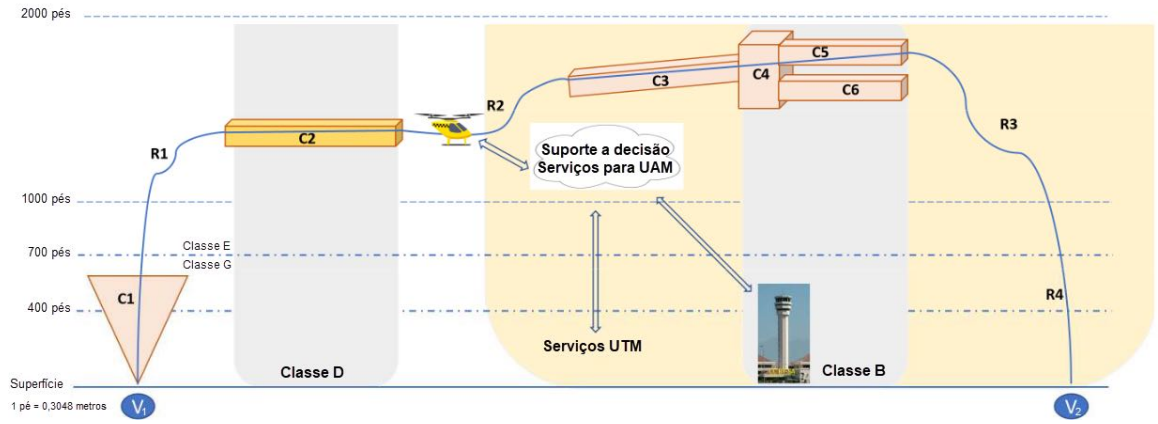
cado na aeronave), com a obrigação de estar integrada ao sistema de controle do espaço aéreo da região de atuação. Ensaios com essa aeronave serão realizados a partir deste ano na Nova Zelândia.

É importante destacar que, considerando os sistemas de controle de espaço aéreo associados à aeronaves tripuladas, os controladores de voo são pessoas que fazem uso de recursos que permitem localizar as aeronaves (radares) e promover a comunicação entre eles e os pilotos das aeronaves. Assim, o controle do espaço aéreo é feito com a observação da evolução de cada plano de voo (associado a cada aeronave) e a atuação ocorre na forma de comunicados entre os pilotos e as bases de controle envolvidas. Existem ainda recursos associados a alguns fabricantes de aeronaves, que fazem o monitoramento das aeronaves que estão em voo, além de mecanismos pontuais que permitem que um piloto possa identificar aeronaves próximas a ele.

A Figura 4 ilustra como ocorre a integração do espaço aéreo associado à aeronaves tripuladas, com destaque para aeronaves classificadas como VTOL e altitudes limitadas até 2000 pés (pouco mais de 600 metros). Assim, existem seis categorias (A, B, C, D, E e G) diferenciadas de acordo com a altitude do voo, a distância que a aeronave se encontra de um local de pouso e decolagem, o tráfego aéreo observado na região, além de outros critérios. A classe A é a mais restritiva em termos operacionais, enquanto que a classe G possui o menor conjunto de restrições.

Existem dois tipos de rotas: aquelas monitoradas pelos controladores de voo (nomeadas como *corredores* - C_i) e as rotas preferenciais (R_i), localizadas fora dos corredores e definidas de acordo com as empresas responsáveis pelas operações dos voos.

Figura 4 – Noções básicas a respeito da integração do espaço aéreo.



Fonte: Adaptado de Lascara et al. (2019).

O exemplo ilustrado representa um voo que deve iniciar (do ponto de partida indicado por V_1) após a liberação do uso do corredor C1, para depois alcançar a altitude adequada (através de R1) até seguir para o próximo corredor (C2). Toda a evolução do voo envolve as devidas

autorizações de uso dos corredores (com a análise e tomada de decisão dos controladores de voo envolvidos) e avaliações dos pilotos (de acordo com as regras das empresas que operam os voos) para decidir quais rotas serão utilizadas em direção ao ponto final do plano de voo (ponto V_2 de destino).

Existem ainda regras associadas a execução dos voos nos corredores, sendo que um voo pode ser executado de forma guiada por instrumentos (IFR - *Instrumental Flight Rules*) ou de forma guiada por recursos visuais (VFR - *Visual Flight Rules*). A diferença básica entre essas regras está associada às condições climáticas e às informações obtidas através dos instrumentos disponíveis (embarcados ou em solo).

Com base na complexidade relatada quanto aos problemas associados à mobilidade urbana e às dificuldades inerentes ao controle do espaço aéreo, a promoção de soluções baseadas em UAV deve ser encaminhada de uma maneira sistemática, envolvendo sistemas automáticos que permitam atuar sobre os planos de voo de cada aeronave em voo, garantindo um atendimento de forma escalável (independente do total de voos em execução).

No contexto do plano de voo associado a um UAV, ele é definido como uma missão descrita através de uma planejamento associado a evolução do voo, desde o início até a sua finalização. Assim, os sistemas de controle de missões, conhecidos como RPAS (*Remotely Piloted Aircraft Systems*) ou UAS (*Unmanned Aircraft Systems*) são aqueles que devem promover a atuação necessária para que cada missão seja executada conforme o seu planejamento prévio.

Este capítulo tem como principal objetivo a realização de um levantamento da literatura associada aos objetivos da tese, que estão concentrados na definição de mecanismos para o tratamento dos problemas associados ao controle do espaço aéreo, envolvendo aeronaves não tripuladas, bem como o gerenciamento e a alocação de recursos compartilhados. Antes de realizar esse levantamento, é preciso apresentar os principais conceitos associados aos sistemas que devem ser responsáveis pelo controle das missões de UAV, caracterizando os seus principais componentes e identificando as terminologias mais relevantes da área.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS ASSOCIADOS A UAV/UAS

Para que uma missão de um UAV seja realizada, é preciso inicialmente que o plano de voo seja elaborado, visando determinar os pontos de visitação ao longo da trajetória definida. Tais pontos são chamados de *waypoints*, e cada um deles é caracterizado pela sua posição geográfica (latitude e longitude). Durante o planejamento da missão, o operador define informações complementares de cada *waypoint*, tais como a altitude e a velocidade. Assim, a cada ponto visitado, a aeronave pode modificar algumas características relacionadas a forma como ela realiza o seu deslocamento entre dois pontos.

Para a definição de uma missão, é necessário que o operador de cada missão faça uso de uma ferramenta conhecida como GCS (*Ground Control Station*), capaz de representar a região de interesse e permitir que os pontos sejam definidos de acordo com o detalhamento da trajetória associada à realização de uma determinada tarefa. De uma forma geral, uma GCS possui as seguintes funcionalidades:

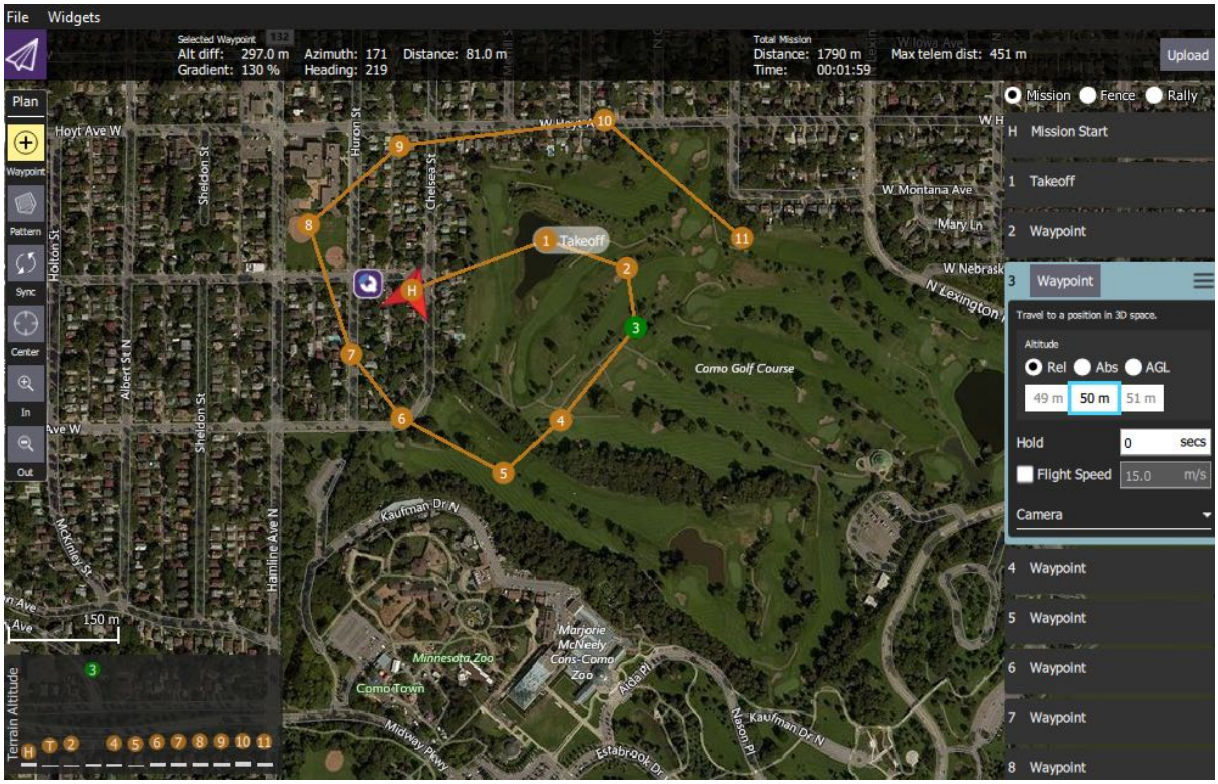
- Edição das missões de interesse do operador, definidas de forma associada com uma região geográfica de interesse;
- Carregamento de uma missão no sistema embarcado de uma aeronave, para a sua execução (no momento escolhido pelo operador);
- Execução de uma missão, conforme definida e no momento escolhido pelo operador;
- Acompanhamento da evolução das missões, através do uso de canais de comunicação / telemetria (estabelecidos entre cada aeronave e a GCS);
- Suspensão de uma missão, executada pelo operador, devido a uma necessidade pontual, sendo possível a sua retomada (partindo do ponto associado ao momento da parada); e
- Encerramento de uma missão, seja através de uma ação de finalização planejada na missão ou de uma ação de interrupção, executada pelo operador, devido a uma necessidade observada durante o voo.

A Figura 5 ilustra o uso da GCS chamada QGroundControl (QGC, 2019). Trata-se de uma ferramenta desenvolvida por uma comunidade aberta, sendo que o seu código fonte é desenvolvido na linguagem C# e distribuído de acordo com as licenças Apache 2.0 e GPLv3. A missão representada possui 11 *waypoints*, com detalhamento de altitude e velocidade igual para todos os pontos.

Essa ferramenta permite realizar o planejamento e execução de um conjunto de missões, mas sem qualquer relação entre elas e a região de interesse. Existem outras ferramentas disponíveis, tais como: Mission Planner (ARDUPILOT, 2016) e UgCS (UGCS, 2019), com características semelhantes, ou seja, dentro das funcionalidades associadas a uma GCS. A equipe que trabalha no desenvolvimento da ferramenta QGroundControl se formou a partir de uma divisão de esforços ocorrida dentro da equipe responsável pelo desenvolvimento da ferramenta Mission Planner, que continua sendo desenvolvida também no conceito de comunidade aberta, sendo disponibilizada através das mesmas licenças (Apache 2.0 e GPLv3).Essa ferramenta permite realizar o planejamento e execução de um conjunto de missões, mas sem qualquer relação entre elas e a região de interesse. Existem outras ferramentas disponíveis, tais como: Mission

Planner (ARDUPILOT, 2016) e UgCS (UGCS, 2019), com características semelhantes, ou seja, dentro das funcionalidades associadas a uma GCS. A equipe que trabalha no desenvolvimento da ferramenta QGroundControl se formou a partir de uma divisão de esforços ocorrida dentro da equipe responsável pelo desenvolvimento da ferramenta Mission Planner, que continua sendo desenvolvida também no conceito de comunidade aberta, sendo disponibilizada através das mesmas licenças (Apache 2.0 e GPLv3).

Figura 5 – Definição de uma missão, através da ferramenta QGroundControl.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

O planejamento de uma missão pode envolver as etapas de pouso e decolagem, ou seja, esses dois procedimentos também podem ser executados de forma automática. No entanto, é comum que a escolha do operador seja por iniciar a missão de forma manual, para depois ativar o modo automático de voo, pois trata-se de uma etapa da missão que depende de uma identificação do potencial de riscos associados a sua execução, não somente quanto à integridade da aeronave, mas também quanto às pessoas e os recursos envolvidos. De forma semelhante, a mesma preocupação pode estar voltada para a etapa de pouso.

Cabe mencionar ainda o fato de qualquer missão, definida através de uma GCS, possuir uma relação com o ambiente somente através da experiência do operador, tendo em vista que ele definiu a missão com base nos seus conhecimentos a respeito da geografia do terreno e do

potencial de execução de voo que a aeronave escolhida possui, associada ao seu perfil (como a sua autonomia e a adequação em relação à trajetória definida e às características do terreno).

Considerando os objetivos desta tese, a qual é voltada para o desenvolvimento de um sistema que promova o controle de uma missão, os dois últimos apontamentos não serão alvo de discussão neste trabalho. Ou seja, pretende-se trabalhar com missões definidas de forma clara, quanto à trajetória a ser realizada, onde o foco é estabelecido sobre as relações entre as missões, em termos da ocupação do espaço aéreo durante a execução das missões.

A busca por soluções para o problema de mobilidade urbana aérea (UAM - *Urbain Air Mobility*) vem sendo identificada como uma prioridade para algumas empresas, como a NASA[4] e a AirBus[5]. Esse problema envolve a necessidade de um sistema automático para serviços de transporte de pessoas ou objetos, com atendimento sob demanda.

Assim, um UAS possui as características funcionais de uma GCS, pois é preciso monitorar as aeronaves e atuar no comportamento das missões, no sentido de associar a situação de cada missão em andamento a uma visão global para o sistema.

Neste sentido, existe uma terminologia, definida como *Unmanned aircraft system Traffic Management* (UTM), que remete a um ecossistema de gerenciamento de tráfego para operações não controladas pelos sistemas de controle de tráfego aéreo vigentes, considerando missões definidas com altitudes de voo praticadas até 400 pés (pouco mais de 120 metros), em um primeiro momento. Esse conceito está sendo desenvolvido nos EUA, de forma conjunta entre governo (FAA e NASA) e empresas, com o intuito de aprimorar o conceito, desenvolver o estudo de casos e promover a troca de experiências.

2.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Visando a realização de um levantamento sistemático da literatura, é apresentado um conjunto de informações, com o objetivo de fornecer uma visão geral da área de pesquisa em destaque, em termos quantitativos. Tal levantamento possibilita identificar tendências e lacunas para uma questão de pesquisa.

O levantamento apresentado neste trabalho é baseado no modelo proposto por Petersen et al. (2008), sendo que o primeiro passo trata da identificação da questão da pesquisa. Assim, o principal questionamento feito para este trabalho está relacionado com as características necessárias em um sistema de controle de tráfego aéreo, considerando o conceito de UTM apresentado na seção anterior.

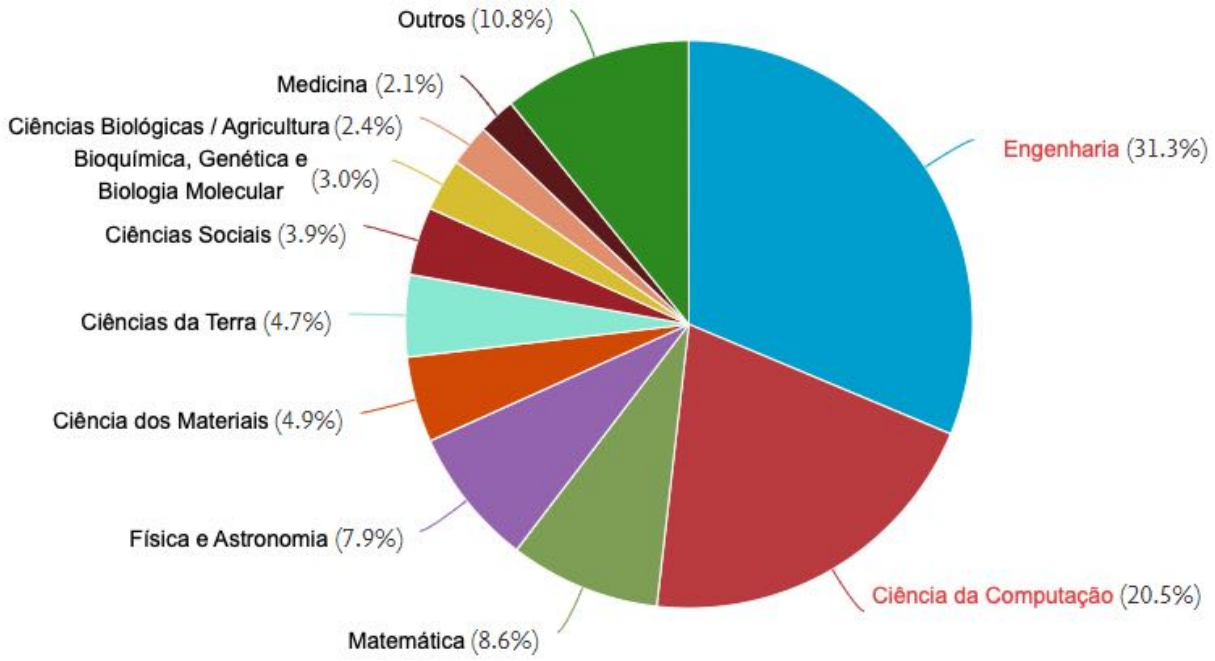
[4]https://www.nasa.gov/uam

[5]https://www.airbus.com/innovation/future-technology/autonomy.html

O passo seguinte consiste na identificação de uma ferramenta de busca adequada para a realização do levantamento bibliográfico, no sentido de gerar informações determinantes para o resultado da pesquisa bibliográfica. Assim, a ferramenta escolhida foi a Scopus (Elsevier), por ser classificada como um dos maiores bancos de dados de resumos e citações da literatura, e que contempla as áreas das engenharias.

Em seguida, é preciso fazer a identificação das palavras-chave da busca. A estratégia de busca usada neste trabalho foi dividida em partes, sendo que a primeira palavra-chave identificada foi: veículos aéreos não tripulados. Os termos da pesquisa foram associados a sinônimos da palavra-chave, todos na língua inglesa, sendo que a Figura 6 traz a distribuição das publicações, considerando dados desde 1990.

Figura 6 – Distribuição (por áreas) das publicações associadas ao assunto geral (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990.



Fonte: Traduzido, a partir dos resultados base de dados Scopus (Elsevier, 2020).

A ferramenta apresenta uma quantidade significativa de trabalhos associados a duas áreas de interesse, sendo elas: Engenharia e Ciência da Computação. O total dessas áreas acumula o valor de 51,8%.

Outro resultado obtido traz a distribuição das publicações por países, agora dando ênfase às áreas de interesse, conforme apresentado na Figura 7. Destaque para o Brasil, que figura na 13ª posição, com um total de 825 publicações.

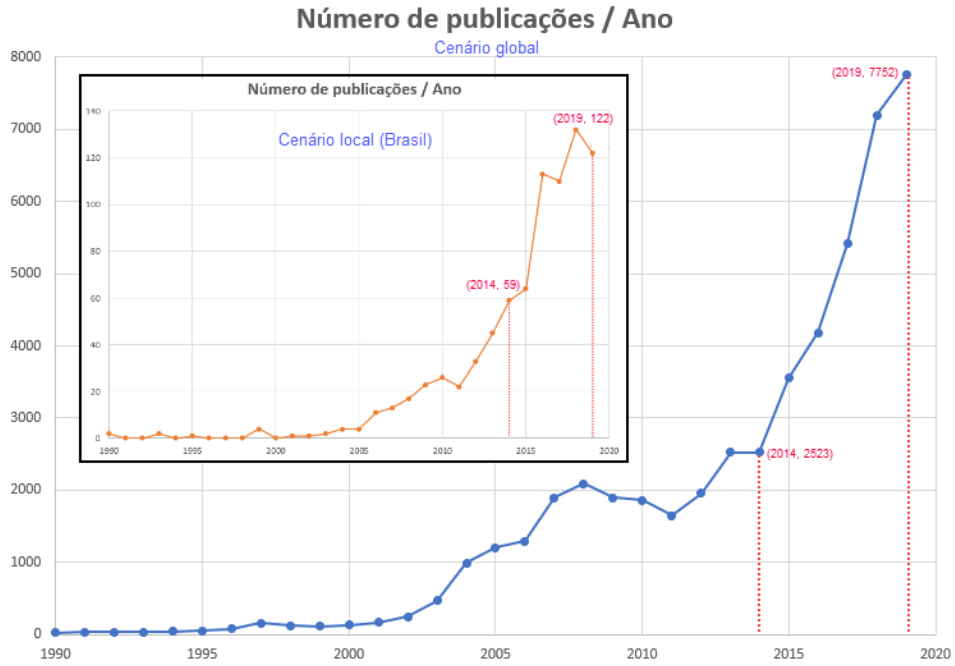
O último resultado desta parte do levantamento apresenta a distribuição das publicações associadas à área de interesse, ao longo dos anos (desde 1990 até os dias atuais). A Figura 8 apresenta dois gráficos, sendo o principal relativo a todos os países que tiveram publicações no

Figura 7 – Distribuição (por países) das publicações associadas ao assunto Engenharia e Ciência da Computação (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990.

Fonte: Traduzido, a partir dos resultados base de dados Scopus (Elsevier, 2020).

período, e o segundo gráfico (em destaque) contém os resultados associados às publicações do Brasil.

Figura 8 – Distribuição (por ano) das publicações associadas ao assunto Engenharia e Ciência da Computação (veículos aéreos não tripulados), considerando dados desde 1990.



Fonte: Traduzido, a partir dos resultados base de dados Scopus (Elsevier, 2020).

Ao analisar os dois gráficos, é possível concluir que o tema destacado apresenta um interesse crescente pela comunidade científica, alcançando 7.752 publicações em 2019, sendo que 122 foram publicações do Brasil. O total de publicações identificadas através da base Scopus foi de 48.473 artigos.

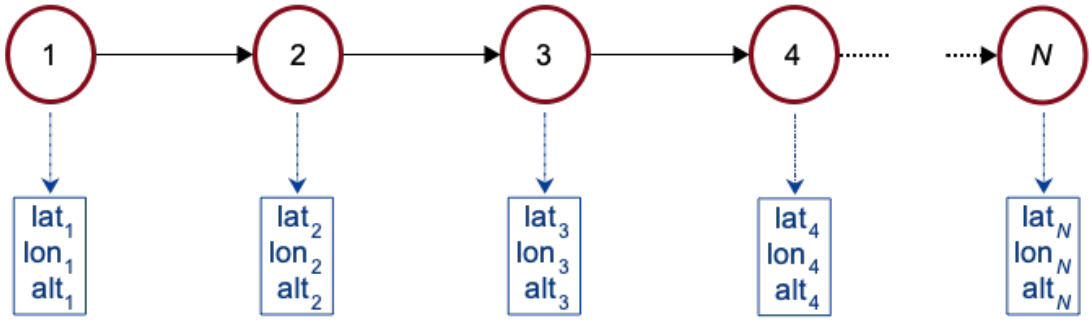
2.2.1 Representação de uma missão

As ferramentas de GCS possuem uma representação gráfica das missões, mas não existe nenhum modelo matemático associado às mesmas, pois elas fazem uso de uma tabela de dados, associando informações aos *waypoints*. A representação adotada nas ferramentas utilizadas neste trabalho será apresentada no Capítulo 7.

No entanto, a descrição de uma missão, nos termos da definição dos *waypoints*, pode ser associada à definição de um grafo orientado, concentrando informações no primeiro vértice de cada par de vértices associado ao respectivo par de *waypoints*.

Em termos de descrição dos *waypoints*, as principais informações são: latitude, longitude e altitude. Na Figura 9, apresenta-se um grafo de uma missão genérica com *N waypoints*, com destaque para os três elementos de descrição (latitude - lat_i, longiture - lon_i e altitude - alt_i) associados a cada vértice que representa o *waypoint i*.

Figura 9 – Representação de uma missão, na forma de um grafo orientado, considerando uma missão genérica com *N waypoints*.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Os principais elementos de descrição de um deslocamento são: a velocidade de deslocamento, a atitude da aeronave, e a trajetória. A velocidade de deslocamento é definida por um valor constante, com o seu significado associado ao momento em que a aeronave parte de um *waypoint*. A atitude da aeronave define o seu posicionamento durante o deslocamento entre dois *waypoints*, que pode ser distinto da orientação em relação à direção da trajetória a ser percorrida. A trajetória pode ser definida de forma retilínea ou através de fórmulas que promovem a suavização do movimento, como através do uso de Curvas de Bézier. A Figura 10 ilustra a

diferença entre a direção do deslocamento e a atitude da aeronave, na forma de vetores, bem como o uso de recursos de suavização de trajetórias.

Figura 10 – Representação dos vetores (a) e (d), associados a atitude e ao deslocamento da aeronave, respectivamente, bem como o destaque para o uso de uma trajetória suavizada (r).

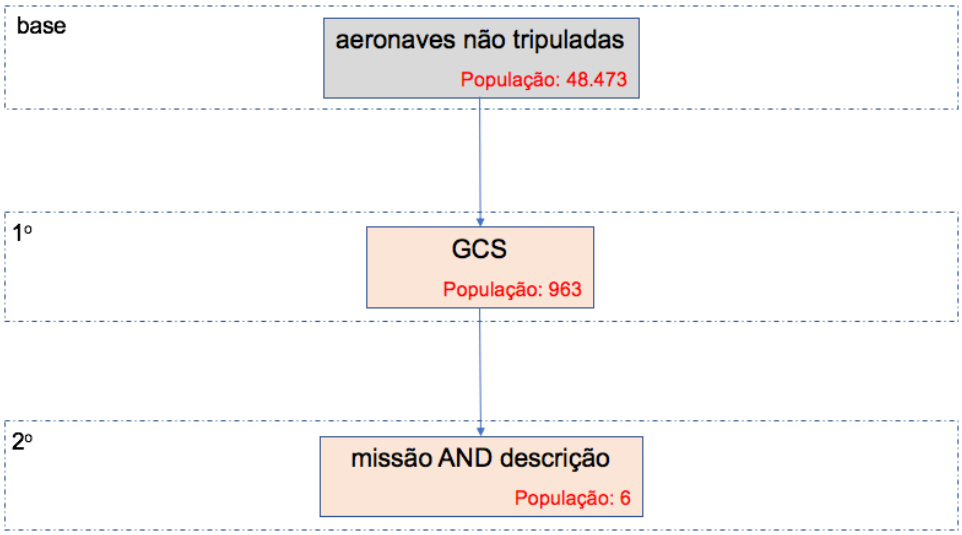
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Seguindo a estratégia de levantamento sistemático da literatura, procurou-se associar ao resultado anterior (sobre o montante de artigos associados à veículos aéreos não tripulados) o termo GCS, sendo que o resultado alcançado identificou 963 artigos. Assim, um novo refinamento foi realizado, como mostra a Figura 11, procurando destacar aqueles que possuem características associadas a descrição de uma missão, considerando os termos "missão AND descrição". No final, foram destacados 6 artigos.

Usach e Vila (2020) definem um UAS capaz de gerenciar as missões, no sentido de promover a reconfiguração em termos de possibilidades de rotas alternativas, sendo que o sistema necessita do conhecimento prévio das possibilidades. A abordagem demonstra ser interessante, mas está associada ao conceito de roteamento de missões, e não faz uso de modelos genéricos.

Klimkowska, Lee e Choi (2016) descrevem as possibilidades de uso de um UAS para o monitoramento de regiões marítimas, mas sem propostas relacionadas com a modelagem de missões.

Figura 11 – Refinamento do levantamento bibliográfico, em dois níveis: 1) Usando o termo "GCS"; e 2) Complementando com os termos "missão AND descrição".



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Os trabalhos de Duquette (2011), Ke et al. (2009) e Devambez (1995) não possuem qualquer relação com este trabalho, no sentido da caracterização de missões de UAV.

Tsach et al. (2007) apresentam um estudo a respeito dos conceitos associados a UAS, mas não apresentam contribuições para a questão da representação de uma missão.

Os trabalhos elencados a seguir foram listados a partir da análise das referências dos trabalhos identificados através do levantamento bibliográfico, sendo que eles são descritos com o intuito de identificar como uma missão de um UAV (ou de qualquer outro veículo com características semelhantes) pode ser representada. De fato, o objetivo maior está em discutir a funcionalidade de cada representação e procurar associar as soluções propostas com as características específicas das missões de UAV.

Outra informação em comum nos trabalhos destacados é quanto a caracterização de modelos baseados em eventos discretos ou modelos híbridos, sendo o foco voltado para representações baseadas na teoria de Sistemas a Eventos Discretos (DES).

O trabalho apresentado por Seibel (2000) propôs uma solução para o problema de planejamento e controle de missões de UAV, ou mais especificamente, visando a produção de planos de voo cuja conformidade com os objetivos da missão e robustez possam ser formalmente garantidos. A modelagem utilizada foi baseada em autômatos híbridos lineares.

Goryca e Hill (2013) apresentam modelos de robôs considerando as restrições geográficas e de execução de tarefas, sendo que o formalismo adotado é baseado em DES. Assim, cada robô pode apresentar restrições distintas. De forma semelhante, Molina et al. (2010) abordam o problema de navegação de um robô móvel terrestre em um ambiente estruturado e totalmente

conhecido, sendo que os modelos são baseados em DES e possuem estados associados às posições pré-estabelecidas do veículo dentro de um ambiente conhecido.

Karimoddini et al. (2011) definem modelos com o objetivo de identificar padrões de formação de voo para grupos de UAV, sendo que a modelagem das formações é realizada através de DES.

Su (2013) descreve o comportamento combinado de sistemas multiagentes, através da aplicação de uma regra específica da operação de composição síncrona entre Autômatos Finitos Determinísticos (*Deterministic Finite Automata* - DFA), com destaque para as propriedades comutativa e associativa desta operação.

Lopes et al. (2016) descrevem modelos de comportamento para enxames de robôs, considerando um conjunto finito de modelos de comportamento, configurado de acordo com cada funcionalidade aplicada a um robô. Os modelos descritos são representados através de DFA, e também é realizada a geração automática de código dos modelos.

Ju e Son (2020) promovem a modelagem de robôs heterogêneos (aéreos e terrestres) aplicados em um ambiente agrícola, com foco na cooperação entre eles para a realização de tarefas. Neste sentido, a modelagem feita por DES não está associada a definição das missões dos robôs, mas na representação dos comportamentos associados a eles. Os comportamentos modelados são: seguidor de caminho, movimentação em formação e evitar obstáculos.

De forma geral, a representação do comportamento de veículos não tripulados (aéreos ou não) já vem sendo realizada através do uso da teoria de DES. No entanto, como contribuição desta tese destaca-se a característica genérica do modelo proposto, propiciando assim a geração automática de modelos, como será descrito no Capítulo 4. Outra contribuição deste trabalho está no fato de que toda a modelagem da planta é obtida de forma automática, podendo esta ser gerada a partir da definição da missão planejada, feita pelo operador da GCS. Assim, todo o procedimento de obtenção de modelos fica transparente para o operador e não há necessidade de realizar modificações na forma de definir uma missão.

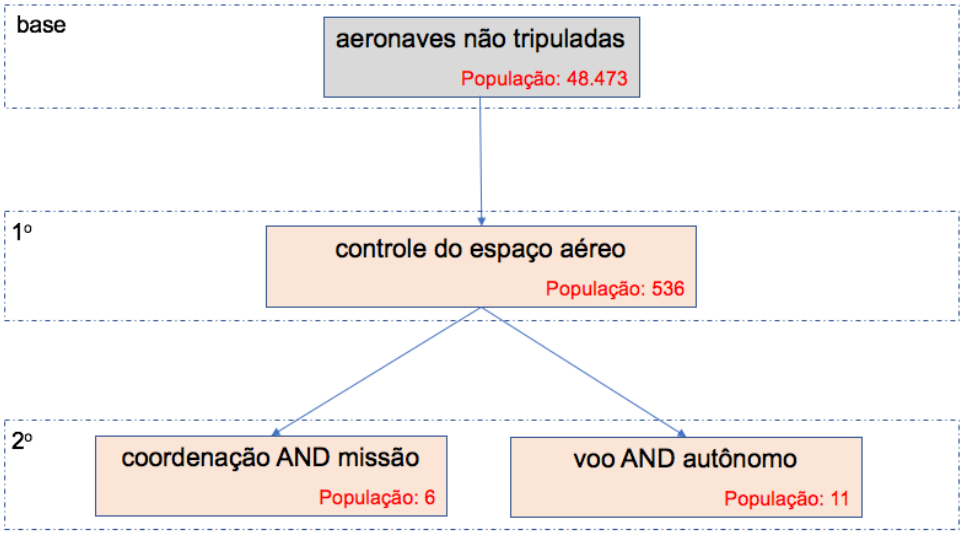
2.2.2 Controle do espaço aéreo

Em relação ao controle do espaço aéreo, o levantamento sistemático da literatura foi organizado de forma a destacar dois termos: a coordenação de missões e o voo autônomo, sendo que o resultado da busca é resumido na Figura 12.

Dos 17 artigos identificados, apenas um deles apresenta contribuições interessantes, mas são complementares ao assunto tratado, pois não fazem uma associação direta com a modelagem das missões.

Jodehy e Cobbz (2015) apresentam uma proposta de uso de uma rede de sensores para o monitoramento de tráfego aéreo, visando realizar um ajuste no planejamento de rotas, considerando as informações de tráfego obtidas. De fato, tal abordagem pode ser interessante para a solução apresentada no Capítulo 5 (gerenciamento de conflitos), mas depende de uma infraestrutura de comunicação para a coleta de informações.

Figura 12 – Refinamento do levantamento bibliográfico, em dois níveis: 1) Usando o termo "controle do espaço aéreo"; e 2) Considerando duas análises: "coordenação AND missão"e "voo AND autônomo".



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

As soluções comuns para o controle de recursos envolve um grande volume de troca de informações, fazendo uso de um conjunto de sensores. No entanto, a proposta apresentada neste trabalho faz uso das próprias aeronaves, no sentido delas fornecerem informações, sem a necessidade de uso de sensores adicionais.

2.2.3 Alocação de recursos

No contexto de alocação de recursos de UAV, a maioria dos trabalhos lida com o gerenciamento de frotas de UAV, em termos da alocação das aeronaves e balanceamento dos recursos existentes.

O problema também pode ser caracterizado como sendo um planejamento cooperativo de missões, como discutido em Huang et al. (2019). Assim, cada missão deve agir de forma a cooperar para que o sistema não alcance uma situação de bloqueio.

Gonzalez et al. (2018) discutem uma arquitetura para navegação de múltiplos robôs, baseada na teoria de controle supervisório. O sistema garante a correta navegação de cada robô, considerando a possibilidade de existência de obstáculos.

Neste trabalho, o objetivo está no tratamento dos recursos existentes, como sendo finitos e acessíveis por qualquer UAV, sendo que o sistema de coordenação deve tratar das limitações de recursos de forma transparente, ou seja, garantindo que todas as aeronaves tenham a garantia de uso dos recursos requisitados.

No refinamento para o levantamento sistemático da literatura, não foram obtidos resultados relevantes para este trabalho. Ou seja, os resultados alcançados são em grande quantidade, dispersos e distantes do foco da proposta desta tese, no contexto de alocação de recursos. Assim, é realizado um novo refinamento no Capítulo 3, com o objetivo de alcançar uma população de artigos coerente com o objeto de análise.

2.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos associados a um UAV e sua aplicação associada a um UAS, considerando o seu papel relevante no controle do espaço aéreo. Inicialmente, foi necessário contextualizar o uso de uma GCS, como ferramenta para a configuração de uma missão e a sua associação a uma aeronave. Assim, através do uso de recursos de comunicação e telemetria, a estação pode monitorar a evolução da missão, bem como atuar sobre ela no sentido da interrupção da missão.

Também foi destacada a relevância associada aos sistemas de controle do espaço aéreo, principalmente quanto à problemática associada ao controle do espaço aéreo. O conceito apresentado de um UTM vem ao encontro da proposta deste trabalho, pois a definição de um sistema de coordenação leva a uma atuação sobre as aeronaves, no sentido de promover o controle do espaço aéreo.

No que se refere aos órgãos de regulamentação brasileiros (ANAC e DECEA), existe uma questão associada à legislação, pois é proibido o uso do espaço aéreo por UAV operando de forma autônoma, mas não existe nenhum recurso em operação, no sentido de gerenciar e fiscalizar o atendimento a essa regra. Órgãos internacionais (FAA e NASA) estão trabalhando na definição de regulamentações e mecanismos para UTM, mas os trabalhos estão em fase de desenvolvimento.

Observando o cenário mundial, no que se refere aos problemas associados a mobilidade urbana, e considerando os avanços alcançados no desenvolvimentos de aeronaves para uso autônomo, de baixo consumo de combustível, com capacidade de operação em baixas altitudes e

necessidade de espaço reduzido para as etapas de pouso e decolagem, torna-se fundamental a homologação de soluções para UTM.

Neste momento do texto, um dos objetivos básicos foi identificar uma missão planejada através de uma representação simplificada, ou seja, fazendo uso de um modelo de grafo. Essa representação é importante para a etapa de especificação de um modelo genérico de missões, que permitirá agregar informações do comportamento do sistema.

Para finalizar, o levantamento bibliográfico permitiu mostrar um forte e crescente interesse da comunidade científica pelo tema de pesquisa em questão e concluir pela relevância do problema tratado nesta tese. Além disso, trabalhos relacionados com o tema específico desta tese foram apresentados a fim de demonstrar que não tratam exatamente do mesmo problema ou não apresentam soluções semelhante à apresentada nesta tese, caracterizando o ineditismo da presente proposta.

No próximo capítulo, é apresentado um refinamento deste levantamento considerando os conceitos teóricos apresentados, pois estes são os formalismos adotados para a modelagem formal das missões e dos controladores associados aos problemas tratados.

3 FUNDAMENTOS ASSOCIADOS ÀS TEORIAS DE SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS E TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

O levantamento realizado no Capítulo 2 permitiu mapear a evolução dos trabalhos associados às missões de veículos aéreos não tripulados (UAV), com destaque para dois pontos de interesse: o controle do espaço aéreo (ATC) e a alocação de recursos (RA).

O ATC pode ser considerado um dos principais problemas da aviação, conforme Jiang et al. (2017), pois as diversas soluções apresentadas não foram implementadas de forma efetiva ou amplamente, devido a falta de mecanismos que promovam o gerenciamento do espaço que será ocupado por uma demanda diferenciada, em cada uma das aplicações envolvidas. De fato, grande parte dos esforços foram concentrados na solução de demandas específicas, como as estratégias de execução de voo em formação (HATTENBERGER; LACROIX; ALAMI, 2006) ou ainda, a otimização de uso de recursos associados ao sistema que compõe o conjunto de aeronaves disponíveis (BARDHAN; GHOSE, 2013).

Quanto a alocação de recursos, o levantamento realizado demonstrou que os esforços foram concentrados na relação entre o conjunto de aeronaves disponíveis e as demandas envolvidas, mas sem um detalhamento de cada missão quanto aos recursos específicos de cada aeronave, associados ao êxito da execução da tarefa. O exemplo mais comum está associado a necessidade de combustível suficiente para completar a missão, sem a necessidade de uma intervenção manual.

Neste momento do texto, serão apresentadas duas teorias relevantes para o desenvolvimento deste trabalho: a teoria associada aos sistemas a eventos discretos (DES) e a teoria de controle supervisório (SCT).

A teoria de DES será fundamental para a proposição de uma representação genérica de missões de UAVs, com destaque para os sinais associados ao comportamento do sistema. Esses sinais permitirão identificar a evolução de cada missão, mas também irão elencar a forma e o momento de atuação do supervisor, considerando cada uma das aeronaves envolvidas.

Já a SCT permitirá definir a formação de especificações de controle, necessárias para o cálculo de um supervisor (representando uma lógica de controle). No entanto, como um dos objetivos deste trabalho está na geração automática do supervisor, tais especificações deverão ser formuladas de forma genérica, ou seja, atendendo a todas as possibilidade elencadas, e que também permita ao sistema evoluir de forma escalável.

Assim, além dos conceitos sobre DES, será apresentada a relação dessa teoria com a teoria de linguagens formais e suas representações, com destaque para os autômatos finitos determinísticos (DFA) e a sua classe de linguagens (linguagens regulares - RL). O DFA (por

simplicidade, daqui pra frente chamado de autômato) será o modelo matemático adotado para representar cada missão, bem como as especificações de controle.

Ao final deste capítulo, será apresentado mais um modelo matemático, chamado de transdutor (mais especificamente a máquina de Moore (MM)). Esse modelo reconhece a mesma classe de linguagens dos autômatos, porém, ele permite associar ações de saída aos estados do modelo. Ele será relevante para a formulação de propostas associadas ao problema de alocação de recursos.

3.1 SISTEMAS A EVENTOS DISCRETOS

Um Sistema a Eventos Discretos (DES, do inglês Discrete Event Systems) faz parte de uma família de sistemas com comportamentos dinâmicos cuja evolução de estados é guiada por eventos assíncronos, capazes de modificar o seu estado. O seu espaço de estados é discreto, ou seja, cada estado assume um valor discreto (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008).

Cada evento representa uma atitude do sistema capaz de alterar seu estado físico. Assim, um robô pode ser utilizado como exemplo, em que o seu estado pode ser caracterizado como em movimento ou em repouso, bem como o seu comportamento (considerando se ele está ou não transportando uma peça). Um evento que modifica o estado do robô, inicialmente colocando-o em repouso até que outro evento ocorra (indicando a necessidade de transportar uma peça).

Durante a modelagem de um DES, as situações físicas do sistema que são de interesse (destaques relevantes para a modelagem) devem ser associadas a estados do DES, enquanto que os sinais que provocam mudanças no comportamento do sistema (mudanças de estado) são associados a eventos.

No contexto de uma missão de um UAV, cada localização da aeronave permite caracterizar um estado do sistema. No entanto, fica evidente que se for considerando um deslocamento de poucos minutos (5 minutos, por exemplo), o número de estados torna-se elevado. Assim, a associação dos estados deve ser feita considerando posições estratégicas ao longo da trajetória, fazendo distinção quanto a alteração do sistema, como a mudança na orientação do deslocamento (direção) ou a velocidade de deslocamento da aeronave.

A identificação de um evento associado a uma missão de um UAV envolve atribuir um significado (uma alteração significativa da atitude da aeronave), quanto a execução da sua trajetória. Assim para realizar essa identificação, faz-se uso de sensores que identificam a dinâmica do voo, sendo que o GPS (sistema de posicionamento global, para missões executadas em ambientes abertos) representa o exemplo mais comum de sensor, pois permite identificar um conjunto de informações associadas com o deslocamento da aeronave, como foi apresentado no Capítulo 2.

Nesta seção, são apresentados os conceitos necessários para o entendimento e a aplicação da teoria de DES. Vale a pena destacar que algumas definições relacionadas aos DES são apresentadas de forma intuitiva, com apoio de exemplos, e sem apresentar o conceito formal das mesmas. A justificativa para isso se deve ao fato de que a formalização de tais definições não é necessária para o entendimento do trabalho, ou seja, a apresentação de forma intuitiva facilita o entendimento do leitor que não domina a área de DES, facilitando a divulgação dos resultados junto à comunidade externa à essa área. Assim, para uma compreensão mais aprofundada desses conceitos, recomenda-se a consulta da obra de Cassandras e Lafortune (2008).

3.1.1 Teoria das Linguagens Formais

A evolução de um DES se dá em razão da ocorrência de eventos arbitrários e, assim, a sua representação é feita por uma sequência de acontecimentos que guiam o seu comportamento. Essa sequência de acontecimentos pode identificar propriedades comuns ao sistema, bem como definir operações que levam a novas propriedades. Nesse sentido, são apresentadas algumas definições, descritas por Cassandras e Lafortune (2008), com o objetivo de fazer uma relação com tais sequências de eventos.

Definição: alfabeto

Qualquer evento ocorrido em um DES, com a capacidade de ocasionar uma transição de estado, deve ser representado por um símbolo que o diferencie dos demais eventos. Assim, o conjunto finito de símbolos possíveis de um DES, representado por Σ, é chamado de alfabeto.

Exemplo: $\Sigma = \{a, b\}$ representa um alfabeto que contém dois símbolos (a e b).

Definição: palavra ou cadeia

Uma palavra (também conhecida como cadeia) é uma sequência finita de eventos pertencentes ao alfabeto (Σ), concatenados de forma repetida ou não. A palavra vazia não possui nenhum evento e é representada por ε. Σ^* é o conjunto de todas as palavras que podem ser formadas com os símbolos do alfabeto Σ, incluindo ε.

Exemplo: Para $\Sigma = \{a, b\}$, Σ^* é o conjunto $\{\varepsilon, a, b, aa, ab, bb, ba, \ldots\}$.

Definição: cardinalidade

A cardinalidade de uma palavra x é denotada por $|x|$, representando a quantidade de símbolos do alfabeto observados nessa palavra (incluindo as repetições).

Como exemplo, para o alfabeto $\Sigma = \{\varepsilon, a, b, c, e, g\}$, a palavra abe tem a sua cardinalidade igual a $|abe| = 3$, e $|\varepsilon| = 0$. O conjunto definido por Σ^* possui infinitas palavras, bem

como a cardinalidade da sua maior cadeia, contendo infinitos símbolos. Assim, no contexto de um DES, existe um conjunto de palavras que permitem representar a sequência de transições de estados do sistema.

Definição: linguagem

Uma linguagem L, tal que $L \subseteq \Sigma^*$, determina quais são as palavras de Σ^* que são reconhecidas como válidas.

Uma linguagem pode contemplar um número infinito de cadeias. Por exemplo, seja $\Sigma = \{a, b\}$ e $L \subseteq \Sigma^*$. A linguagem L que contém todas as cadeias que podem ser geradas em Σ^* corresponde a $L = \{\varepsilon, a, b, aa, bb, ab, ba, aaa, aab, \ldots\}$, caracterizada por ser uma linguagem que define um conjunto infinito, que contém cadeias de qualquer cardinalidade, e com qualquer número e ordem de símbolos do alfabeto, incluindo a cadeia vazia.

Operações sobre linguagens

A teoria de DES tem como base a teoria de conjuntos, pois trata da definição e manipulação de conjuntos característicos que estão associados ao comportamento de um sistema. Assim, é importante destacar algumas operações relevantes, principalmente no contexto deste trabalho. São elas: a concatenação, o fecho do prefixo, e o fecho de *Kleene*.

A operação de **concatenação** é aplicada sobre cadeias ou linguagens. Assim, considerando duas linguagens, L_1 e L_2, definidas sobre Σ^*, tal que $L_1, L_2 \subseteq \Sigma^*$, a concatenação de L_1 com L_2, dada por L_1L_2 é tal que:

$$L_1L_2 = \{s \in \Sigma^* \mid (s = s_1s_2) \text{ com } (s_1 \in L_1) \text{ e } (s_2 \in L_2)\}$$

Considerando duas cadeias das linguagens L_1 e L_2, $s_1 = abba \subseteq \Sigma^*$ e $s_2 = abbbba \subseteq \Sigma^*$, a concatenação dessas duas cadeias teria como cadeia resultante $s_1s_2 = abbaabbbba$.

A operação de **fecho do prefixo**, aplicada a uma linguagem $L \subseteq \Sigma^*$, é representada por $\overline{L}$, tal que:

$$\overline{L} = \{s \in \Sigma^* \mid (\exists t \in \Sigma^*), st \in L\}$$

Como exemplo para a operação de fecho do prefixo, seja $L = \{bde, eb\} \subseteq \{b, d, e\}^*$, então $\overline{L} = \{\varepsilon, b, bd, bde, e, eb\}$. Agora, caso a linguagem L contenha todos os prefixos de todas as cadeias de L, ou seja, $L = \overline{L}$, então essa linguagem é dita **prefixo-fechada**.

A operação de **fecho de *Kleene***, aplicada a uma linguagem $L \subseteq \Sigma^*$, é representada por L^* e resulta na linguagem composta por cadeias formadas pela concatenação de um número finito de elementos de L, incluindo a concatenação de "zero" elementos (que seria a cadeia ε), ou seja:

$$L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \ldots$$

Essa é a mesma operação (*) definida para o alfabeto Σ, porém, os elementos de L podem ter a sua cardinalidade maior ou igual a 1. Outro destaque importante está no fato dela ser idempotente, ou seja, $(L^*)^* = L^*$.

3.1.2 Expressões Regulares

A representação de uma linguagem através de uma Expressão Regular (ER) remete a uma notação alternativa, utilizada pare representar a classe de linguagens mais simples (linguagens regulares), dentro da hierarquia de Chomsky (1959).

Uma expressão regular pode ser definida, de forma recursiva, de acordo com as seguintes regras (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2008):

1. $\varnothing$ é uma expressão regular que denota o conjunto regular vazio, ε é uma expressão regular que denota o conjunto $\{\varepsilon\}$, e σ é uma expressão regular que denota o conjunto $\{\sigma\}$ (com $\sigma \in \Sigma$);

2. se r e s são expressões regulares, então rs, $(r+s)$, r^*, s^* são expressões regulares; e

3. não existem expressões regulares além daquelas construídas através da aplicação das regras 1 e 2 um número finito de vezes.

As ERs constituem uma representação simples para linguagens potencialmente complexas. Por exemplo, considerando o alfabeto $\Sigma = \{a, b, c\}$, a ER $(a+b)c^*$ denota a linguagem infinita: $L = \{a, b, ac, bc, acc, bcc, \ldots\}$, que pode ser descrita como sendo a linguagem com palavras que são iniciadas com a ou b, seguido de zero ou mais símbolos c.

3.1.3 Autômatos Finitos Determinísticos

Um Autômato Finito Determinístico (DFA) é uma máquina de estados finitos (LAWSON, 2019) que permite modelar um DES e a sua representação formal pode ser feita por uma quíntupla:

$$G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m) \tag{3.1}$$

Sendo que:

- X é o conjunto finito de estados do autômato;
- Σ é o conjunto de eventos que definem o alfabeto da linguagem;
- $f : X \times \Sigma \to X$ é a função de transição de estados;

- x_0 é o estado inicial, com $x_0 \in X$; e
- $X_m \subseteq X$ é o conjunto de estados marcados.

Os autômatos são representações gráficas por meio de diagramas de transição de estados, nos quais os estados são representados por nós circulares e os eventos por arcos rotulados com símbolos que conectam os estados entre si. O estado inicial é identificado por uma transição sem origem, e os estados marcados são representados por círculos duplos concêntricos.

Os estados marcados representam estados que podem ser usados para denotar uma tarefa concluída ou a disponibilidade de um recurso. Já os estados não marcados representam estados que buscam alcançar um estado marcado.

A associação dos conceitos sobre linguagens com a teoria de autômatos é feita considerando as cadeias alcançadas a partir do estado inicial do autômato. Nesse sentido, a **linguagem gerada** é denotada por $L(G) \subseteq \Sigma^*$ e representa o conjunto de todas as cadeias possíveis a partir de x_0, ou seja:

$$L(G) = \{s \mid s \in \Sigma^* \text{ e } f'(x_0, s) \text{ é definida}\}$$

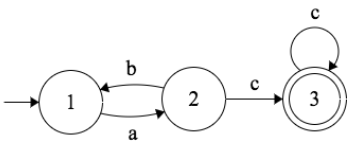
Por outro lado, a **linguagem marcada** é denotada por $L_m(G) \subseteq \Sigma^*$ e contém todas as cadeias que representam tarefas concluídas a partir de x_0, ou seja:

$$L_m(G) = \{s \mid s \in L(G) \text{ e } f'(x_0, s) \in X_m\}$$

A notação $f'(x, s)$ representa a função de transição estendida de f, que define a evolução do autômato, a partir de um estado x e, considerando uma cadeia s, resulta na chegada em um estado do autômato, considerando uma sucessão de transições que reconhecem cada símbolo da cadeia s.

O determinismo de um autômato está no fato de, em cada estado, ele apresentar apenas uma transição etiquetada com cada evento do alfabeto. Assim, o autômato da Figura 13 possui as características de um autômato. Essa linguagem representa um conjunto infinito de cadeias, sendo que a menor cadeia da linguagem marcada é ac.

Figura 13 – Exemplo de um DFA. A linguagem marcada associada a esse DFA pode ser representada pela ER: $a(ba)^*cc^*$.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

3.1.4 Composição síncrona de autômatos

Uma abordagem comum na modelagem do comportamento de um DES é a modelagem dos subsistemas que compõem o mesmo, sendo que tais subsistemas devem ser sincronizados para representar o comportamento global do sistema. Essa sincronização é chamada de Composição Síncrona e representada por $\|$.

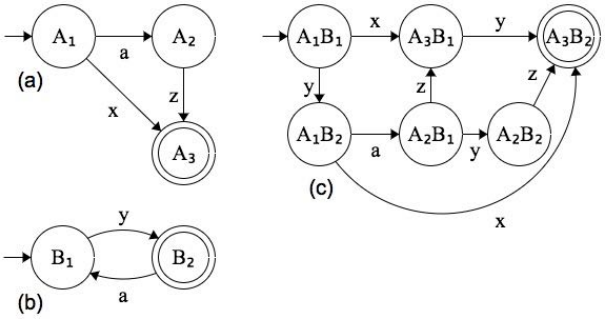
Basicamente, na composição síncrona um evento comum a dois ou mais autômatos só pode ser executado se todos esses autômatos o executam simultaneamente. Já os eventos privados (não compartilhados) podem ocorrer livremente num autômato sem afetar o outro.

Os estados resultantes da composição síncrona entre dois autômatos compreendem o conjunto formado pelo produto cartesiano entre X_{G_A} e X_{G_B}, ou seja, $X_{G_A \parallel G_B} = X_{G_A} \times X_{G_B}$. Mais precisamente, são de interesse apenas os pares de estados que são acessíveis a partir do par que representa o estado inicial do autômato resultante (x_{0_A}, x_{0_B}).

Assim, seja um conjunto de subsistemas que compõem um DES, sendo que cada subsistema é modelado por um autômato $G_j = (\Sigma_j,\ X_j,\ f_j,\ x_{0j},\ X_{mj}),\ j \in J\ = \{1,\ 2,\ \ldots,\ n\}$. O comportamento global G do sistema resulta da composição síncrona dos modelos G_j, ou seja, $G\ = \|_{j \in J}\ G_j$, definido sobre um alfabeto resultante $\Sigma\ =\ \cup_{j=1}^{n} \Sigma_j$. Os comportamentos globais (gerado e marcado) também podem ser definidos tais que $L(G)\ = \|_{j \in J}\ L(G_j)$ e $L_m(G)\ = \|_{j \in J}\ L_m(Gj)$, respectivamente.

A Figura 14 ilustra um exemplo da aplicação da operação de composição paralela. É possível observar que $L_m(G_A) = \{x,\ az\}$, $L_m(G_B) = \{y,\ yay,\ yayay,\ ...\}$ e $L_m(G_A \parallel G_B)\ = \{xy,\ yazy,\ yaxz,\ yx\}$. Além disso, $L_m(G_A)$ é uma linguagem finita e $L_m(G_B)$ uma linguagem infinita, sendo que o resultado $L_m(G_A \parallel G_B)$ é uma linguagem finita, pois $\Sigma_A \cap \Sigma_B\ = \{a\}$, e a parte associada ao comportamento infinito de G_B está associada ao evento $\{a\}$.

Figura 14 – Exemplo de aplicação da operação de composição síncrona: (a) autômato G_A, com $\Sigma_A\ =\ \{a,\ x,\ z\}$; (b) autômato G_B, com $\Sigma_B\ =\ \{a,\ y\}$; e (c) $G_A \parallel G_B$, com $\Sigma_{A \| B}\ =\ \{a,\ x,\ y,\ z\}$.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Essa é uma operação útil, principalmente por permitir a modelagem de sistemas de uma forma modular e simples, representando o seu comportamento global através da associação dos modelos compostos sincronamente entre si. No exemplo acima, o autômato resultante da composição síncrona possui 6 estados, que é o total de combinações entre os estados de G_A e G_B.

Quando o DES é constituído por muitos módulos (subsistemas) integrados, existe a possibilidade de ocorrer a explosão combinatória de estados ao se fazer a composição dos autômatos que representam esses subsistemas, o que significa obter um autômato resultante com elevado número de estados. Nesses casos, o emprego da SCT para a síntese de supervisores pode ficar comprometido em função de limitações das ferramentas computacionais usadas para auxiliar na execução dessa composição.

3.1.5 Transdutores

Os autômatos caracterizam um formalismo que reconhece palavras, porém não possuem qualquer recurso de saída de resultados ou informações, pois o único resultado gerado é a aceitação/rejeição da palavra.

Com o objetivo de ampliar a aplicabilidade dos autômatos, algumas extensões foram definidas, no sentido de associar, a cada palavra reconhecida, uma cadeia correspondente de saída. Dentre essas extensões, destaca-se a Máquina de Moore[1] (MOORE, 1964).

Uma MM é definida pela sétupla:

$$G_{MM} = (X, \Sigma, \Delta, f, \lambda, x_0, X_m) \tag{3.2}$$

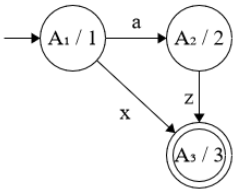
A equação acima é definida sobre a Equação 3.1 (quíntupla de um DFA), na qual Δ representa o alfabeto de saída e $\lambda : X \rightarrow \Delta^*$ é a função de tradução de G_{MM}.

Considerando o exemplo apresentado pela Figura 15, o modelo reconhece a mesma linguagem associada ao autômato da Figura 14(a), com o destaque para a saída associada aos estados.

Assim, $\Delta = \{1, 2, 3\}$ contém os símbolos de saída, sendo que as associações a cada estado são identificadas através da função λ. As palavras reconhecidas são: az e x, sendo que as saídas são, respectivamente, 123 e 13.

[1] Essa extensão será importante para a geração de especificações de controle, relativas ao gerenciamento da alocação de recursos, tema que será tratado no Capítulo 5.

Figura 15 – Exemplo de uma máquina de Moore.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

3.1.6 Linguagens Regulares

Todos os formalismos apresentados neste capítulo (expressões regulares, DFA e transdutores) permitem gerar ou reconhecer linguagens conhecidas como regulares. Assim, obter uma dessas representações já garante que o resultado está associado a uma RL. Mais ainda, existe uma característica das linguagens regulares que trata de um subconjunto específico dessa classe de linguagens, identificando todas as linguagens finitas[2].

3.1.7 Caracterização dos eventos

Considerando o contexto da aplicação de DES, o conjunto de eventos pode ser particionado em $\Sigma = \Sigma_o \cup \Sigma_{no}$, sendo que Σ_o representa o conjunto de eventos observáveis (o), associados a sinais que representam informações do sistema (eventos cujas ocorrências podem ser registradas por sensores), enquanto que Σ_{no} representa o conjunto de eventos não observáveis (no).

Observabilidade de DES: O conceito de observabilidade de eventos leva a duas questões importantes, associados aos autômatos finitos (LAFORTUNE, 2019).

- A diagnosticabilidade[3], que consiste na possibilidade de detectar qualquer ocorrência de um evento e_d não observável em $L(G)$ a partir da ocorrência de um número limitado de eventos observáveis; e

- A opacidade[4], que representa a capacidade de manter secreta uma parte da informação do sistema (eventos), por motivos de segurança. Por exemplo, ocultar informações do sistema para que alguém não autorizado tenha acesso e monitore os eventos observáveis.

[2]Essa característica será destacada no Capítulo 4, no momento da modelagem das missões através de autômatos.

[3]Esse conceito será explorado no Capítulo 5, quando será apresentada uma abordagem baseada em diagnóstico de falhas.

[4]Tal capacidade será discutida no capítulo final, visando identificar possibilidades de continuidade deste trabalho.

3.2 TEORIA DE CONTROLE SUPERVISÓRIO

A Teoria de Controle Supervisório (SCT) (RAMADGE; WONHAM, 1987; RAMADGE; WONHAN, 1989) é reconhecida como uma abordagem formal baseada em um conjunto de métodos consistentes para a síntese de supervisores em DES, tendo como base a teoria de autômatos e linguagens. Assim, ela é aplicável a toda a classe de DES.

Nessa teoria, o foco está no controle de sistemas a eventos discretos, ou seja, tendo como ponto de partida a modelagem da planta[5] (modelagem do sistema a ser controlado, considerando um determinado nível de abstração), um conjunto de especificações de controle[6] é definido com o propósito de determinar ao sistema um conjunto de limitações quanto ao seu comportamento. Assim, o problema de controle supervisório consiste em restringir minimamente o comportamento da planta para que, em malha fechada, ela apresente um comportamento que atenda às especificações de controle.

Basicamente, o objetivo do controle supervisório de DES consiste em fazer com que diversos subsistemas atuem em conjunto (de forma coordenada), garantindo que o seu comportamento esteja de acordo com as especificações de controle. Para isso, introduz-se o conceito do supervisor, que interage com a planta de forma a fechar a malha de controle.

A Figura 16 representa a estrutura de um sistema de controle supervisório, contendo os todos os eventos possíveis da planta, com destaque para aqueles que podem ser observados pelo supervisor ($s \subseteq \Sigma_o$, sendo s uma cadeia de eventos). Assim, o supervisor promove habilitações de eventos sobre a planta ($S(s)$), em cada estágio de execução, proibindo a ocorrência de eventos cuja evolução conduza a um comportamento atípico, indesejado ou inadmissível. Nesse caso, alguma operação ilegal estaria sendo executada pelo sistema controlado, o que significa a possibilidade de situações que podem comprometer a segurança e a confiabilidade do sistema.

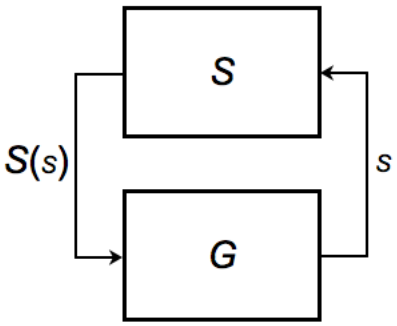
Na SCT, o alfabeto Σ é particionado em razão da controlabilidade dos eventos, de modo que $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_u$, sendo que $\Sigma_c \subseteq \Sigma$ representa o subconjunto dos eventos considerados controláveis, enquanto $\Sigma_u \subseteq \Sigma$ contém aqueles eventos cuja ocorrência não pode ser diretamente impedida pela ação de controle, sendo importante ressaltar que a atribuição do rótulo de controlabilidade é considerada uma tarefa associada à modelagem da planta.

O paradigma de controle define que a função de transição do autômato G pode ser controlada por S, no sentido de que os eventos controláveis de G podem ser dinamicamente habilitados (ou desabilitados) pelo supervisor S.

[5] No Capítulo 4, será tratada a modelagem da planta, ou seja, considerando-a como sendo uma missão de um UAV.

[6] Os elementos necessários para a elaboração da especificação de controle de missões serão apresentados no Capítulo 5, com foco para as problemáticas associadas às regiões de conflito e aos recursos compartilhados.

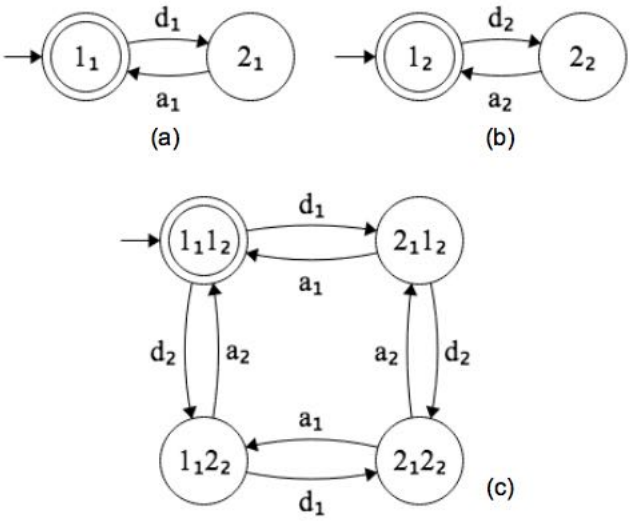
Figura 16 – Malha fechada associada ao controle supervisório, com G representando a planta do sistema não controlado e S representando o supervisor.



Fonte: Cassandras e Lafortune (2008).

A Figura 17 apresenta um exemplo básico, representando duas missões de UAVs, considerando $\Sigma_1 = \{d_1, a_1\}$ (com $\Sigma_{1c} = \{d_1\}$ e $\Sigma_{1u} = \{a_1\}$) e $\Sigma_2 = \{d_2, a_2\}$ (com $\Sigma_{2c} = \{d_2\}$ e $\Sigma_{2u} = \{a_2\}$).

Figura 17 – Representação básica da planta associada a duas missões de UAVs, onde (a) representa a planta da missão 1, (b) representa a planta da missão 2, e (c) mostra o resultado da composição síncrona dos dois modelos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O evento controlável d_i representa o início da missão (*departure*) da aeronave i, considerando um ponto de partida genérico (uma base comum para as aeronaves), e o evento a_i representa a chegada (*arrival*) da aeronave i, após a realização de uma determinada tarefa.

Sendo Γ uma estrutura de controle, a opção de controle $\gamma \in \Gamma$ a ser aplicada ao sistema contém o conjunto ativo de eventos habilitados a ocorrer no sistema. Com a definição da controlabilidade de eventos, a estrutura de controle é:

$$\Gamma = \{ \gamma \in 2^{\Sigma} : \gamma \supseteq \Sigma_u \}$$

onde a condição $\gamma \supseteq \Sigma_u$ indica que os eventos não controláveis não podem ser desabilitados.

Assim, o supervisor é uma função definida por:

$$S: L(G) \rightarrow 2^{\Sigma}$$

A admissibilidade de um supervisor S é verdadeira se não existir qualquer implicação quanto a desabilitação de eventos não controláveis. Assim, define-se uma estrutura de controle Γ para G pelo particionamento de Σ como indicado anteriormente.

Um supervisor pode ser representado por um autômato S, definido sobre o mesmo alfabeto (Σ), cujas mudanças de estado são ditadas pela ocorrência de eventos na planta G. A ação de controle de S, definida para cada estado do autômato, é desabilitar em G os eventos que não possam ocorrer em S após uma cadeia de eventos observada. O funcionamento do sistema controlado S/G pode ser descrito pelo DES resultante da composição síncrona de S e G, isto é, $S||G$. De fato, na composição síncrona $S||G$, somente as transições previstas no modelo do sistema G e permitidas pelo supervisor S são possíveis de ocorrer.

O comportamento do sistema em malha fechada é dado por:

$$L(S/G) = L(S||G) \text{ e } L_m(S/G) = L_m(S||G).$$

Definição de um modelo para a especificação de controle

A linguagem $k \subset L_m(G)$, é a linguagem alvo, ou linguagem que representa o comportamento desejado para o sistema em malha fechada.

Esse processo pode ser descrito como:

1. Construção das especificações de controle E_i para cada restrição de coordenação do sistema a ser controlado;

2. Cálculo da composição síncrona dos autômatos das especificações E_i, resultando em E, sendo o autômato que representa a especificação global de controle; e

3. Geração do autômato R, resultante da composição síncrona entre a especificação global (E) e a planta do sistema (G), sendo o autômato que modela o comportamento que está contido na linguagem da planta e que deve ser o comportamento alvo.

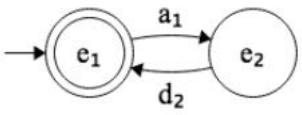
Assim, considerando uma planta G com comportamento $(L(G), L_m(G))$ e estrutura de controle Γ, definidos sobre o conjunto de eventos Σ e $K \subset L_m(G)$, existe um supervisor não bloqueante S para G tal que $L_m(S/G) = K$, se e somente se K for controlável. E o problema de controle supervisório possui solução se e somente se $Sup_C(E) \supseteq A$, onde A é equivalente ao comportamento mínimo desejado. Se $A \neq \emptyset$, então o problema tem solução se o resultado do cálculo $Sup_C(G,K)$ resultar em um conjunto não vazio.

Assim, o cálculo do supervisor passa pelas seguintes etapas:

$G = G_1 \parallel G_2 \parallel \ldots \parallel G_n$; $E = E_1 \parallel \ldots \parallel E_m$; $R = E \parallel G$; e $L_m(S) = Sup_C(G,K)$

Seguindo o exemplo já iniciado, uma especificação de controle pode ser definida de acordo com a Figura 18. A ideia básica seria restringir o uso da segunda aeronave, associado com a chegada da primeira aeronave. Em outras palavras, de forma simplista, essa especificação impõe a alternância entre a chegada da aeronave 1 no seu destino (evento a_1) e a partida da aeronave 2 (evento d_2), iniciando essa alternância pela aeronave 1.

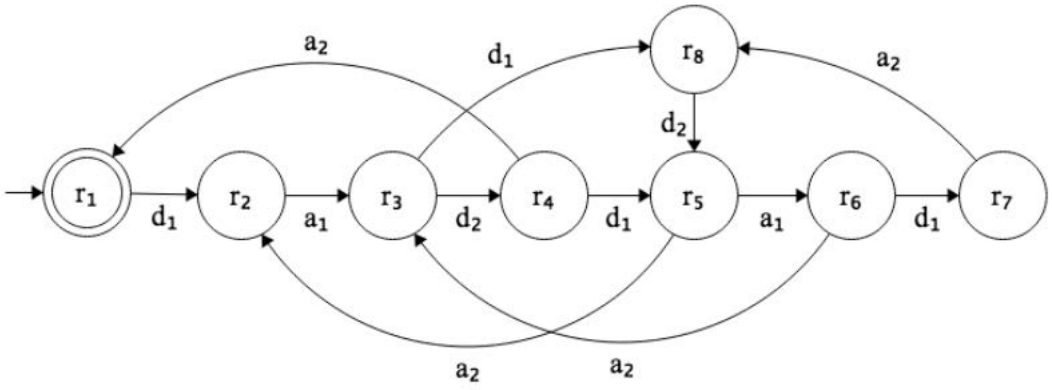
Figura 18 – Exemplo de uma especificação de controle (E), considerando o momento do início das missões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O autômato R, apresentado na Figura 19, representa o resultado da aplicação da especificação de controle (E) sobre a planta (G), através da composição síncrona.

Figura 19 – R: resultado da composição entre G e E.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

O cálculo de $Sup_C(G,K)$ baseia-se em um algoritmo para a identificação e eliminação de maus estados, bem como na eliminação de estados de bloqueio.

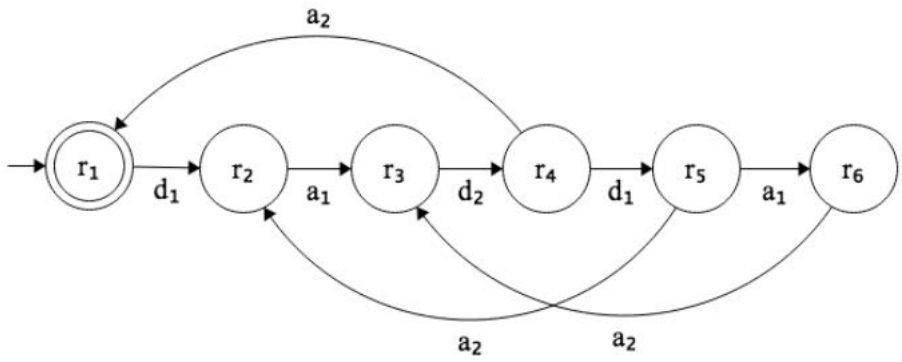
Um estado de R é considerado um mau estado se no estado correspondente a ele na planta existe um evento não controlável que não está presente nesse estado de R. Em outras palavras, um mau estado no autômato que representa a lógica de controle é aquele que tenta desabilitar a ocorrência de um evento não controlável que é possível de ocorrer na planta.

Finalizando o exemplo, é possível observar que os estados r_7 e r_8 são caracterizados como maus estados, sendo que a eliminação desses estados não leva a um estado de bloqueio e nem a estados inacessíveis.

É possível observar que o estado r_8 (Figura 19) corresponde ao estado $2_1 1_2$ do autômato G da Figura 17(c), no qual existe o evento não controlável a_1 (evento de chegada em um *waypoint*), mas ele não está presente no estado r_8.

O resultado final de $Sup_C(G,K)$ é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Autômato resultante S: $L_m(S) = Sup_C(G,K)$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

3.2.1 Refinamento do mapeamento sistemático da literatura

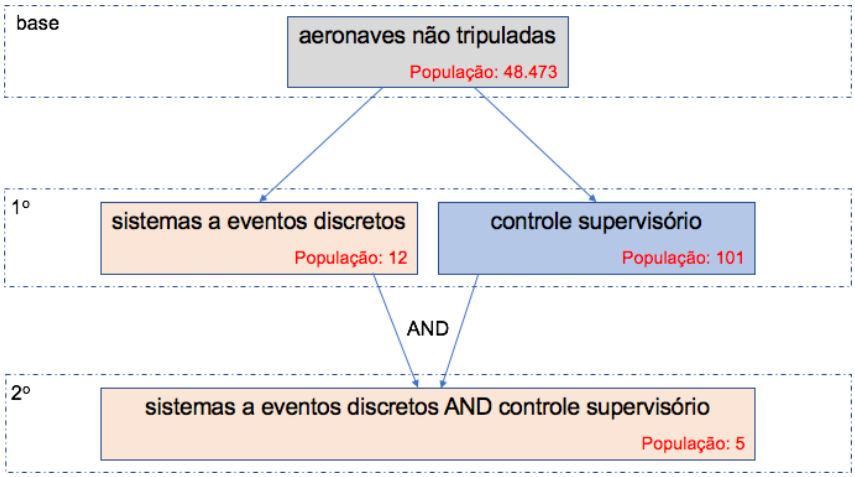
Com base no mapeamento sistemático da literatura, realizado no Capítulo 2, e considerando ainda os conceitos apresentados até o momento, torna-se relevante atualizar aquele levantamento. Assim, a Figura 21 apresenta um primeiro refinamento desse estudo.

O propósito do momento foi fazer destaque para os trabalhos, no contexto das aeronaves não tripuladas (base), que fazem uso das duas teorias apresentadas neste capítulo. Assim, foram identificados 12 trabalhos que fazem uso da teoria de DES e 101 trabalhos que fazem uso do termo "controle supervisório", sendo que esse termo não está associado apenas à SCT, mas a qualquer possibilidade de uso de um sistema que promova o papel de um controle supervisório. O objetivo associado a seleção desse último termo foi no sentido de tornar a busca mais abrangente, permitindo uma análise mais ampla quanto as soluções/aplicações existentes.

Os descritores utilizados para os dois níveis posteriores à base, formulada no Capítulo 2, foram identificados conforme indicado na Tabela 1.

Dos 12 artigos encontrados a partir do uso do descritor (1), 5 deles também são encontrados a partir do uso do descritor (2) ("controle supervisório", relaconados na Tabela 3), e 7 compõem o conjunto de artigos sobre "sistemas a eventos discretos" (relacionados na Tabela 2).

Figura 21 – Atualização do mapeamento sistemático da literatura, específico para os conceitos de DES e SCT.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Tabela 1 – Descritores para o refinamento quanto a DES e SCT.

Refinamento	Descritores
(1) sistema a eventos discretos	TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (discrete PRE/0 event PRE/0 system) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , “COMP”))
(2) controle supervisório	TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (supervisory PRE/0 control) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , “COMP”))
(1) AND (2)	(TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (discrete PRE/0 event PRE/0 system) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989) AND (TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (supervisory PRE/0 control) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "ENGI") OR LIMIT-TO (SUBJAREA , "COMP"))

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Tabela 2 – Listagem dos artigos que destacam somente a teoria de DES.

1. Zeigler, B.P., Kim, D. (2019). Multi-resolution modeling for adaptive UAV service systems.
2. Zeigler, B.P., Kim, D. (2019). Multi-resolution modeling for adaptive UAV service systems.
3. Martins, R.F., De Almeida, G.L.N., Leal, A.B. (2017). Towards automatic code generation for UAV mission planning using decision sensors.
4. Shahzad, A., Ur-Rehman, R. (2013). An artificial intelligence based novel approach for real-time allocation of armament to hostile targets.
5. Tousi, M.M., Aghdam, A.G., Khorasani, K. (2009). A hybrid fault diagnosis for a team of unmanned aerial vehicles.
6. Fatemi, M., Millan, J., Stevenson, J., Yu, T., O'Young, S. (2008). Discrete event control of an unmanned aircraft.
7. Rohloff, K., Lafortune, S. (2004). Symmetry reductions for a class of discrete-event systems.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Zeigler e Kim (2019) fazem uso do conceito de SoS (*Systems of Systems*), no sentido de aplicar um exemplo associado a frotas de UAVs para serviços de atendimento emergencial

(ambulância aérea), para situações de primeiros socorros. Os autores definem um modelo de Markov para representar o comportamento de cada aeronave, mas de forma funcional, ou seja, se ela se encontra disponível, executando alguma tarefa ou sem condições de operação. De forma geral, tal contribuição não relaciona o sistema com a descrição da missão, e também não se preocupa com as garantias necessárias para que a aeronave alcance o seu destino.

Shahzad e Ur-Rehman (2013) propõem uma abordagem para o gerenciamento de recursos (armas) em termos de posicionamento estratégico. O modelo de simulação proposto se baseia nas restrições do ambiente e tomada de decisões sobre qual o melhor recurso que deve ser utilizado, sem relações com a caracterização da missão, em termos de trajetória.

Tousi, Aghdam e Khorasani (2009) propõem uma metodologia híbrida de diagnóstico de falhas para equipes de UAVs. É proposto um *framework* em dois níveis no qual o diagnóstico de falha de alto nível (equipe) é formulado no âmbito de DES, enquanto o diagnóstico de baixo nível (agente) utiliza as técnicas clássicas de diagnóstico.

Fatemi et al. (2008) desenvolvem o trabalho dentro do contexto de "*sense and avoid*", envolvendo duas aeronaves, sendo uma delas caracterizada como intruso, e a outra com a missão de evitar a sua aproximação, ou seja, sem a caracterização de uma missão planejada.

Rohloff e Lafortune (2004) apresentam uma solução para a redução de custo computacional (tempo e memória), explorando a simetria de estratégias de voo em formação através do uso de DES modulares.

Martins, Almeida e Leal (2017b) definem uma metodologia para a segmentação de missões, baseado na modelagem das missões de UAV através de DES, sendo que esse trabalho é apresentado no Capítulo 4.

Quando se fez o relacionamento entre os conceitos DES e SCT, 5 publicações foram destacadas, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Listagem dos artigos que destacam as duas teorias (DES e SCT).

1. Ju, C., Son, H.I. (2018). Discrete event systems based modeling for agricultural multiple unmanned aerial vehicles: automata theory approach. 2. Ju, C., Son, H.I. (2018). Design of supervisors for the control of agricultural multiple UAV systems: a preliminary result. 3. Tousi, M.M., Khorasani, K. (2015). A hybrid fault detection and isolation strategy for a team of cooperating unmanned vehicles.	4. Furci, M., Paoli, A., Naldi, R. (2013). A supervisory control strategy for robot-assisted search and rescue in hostile environments. 5. Tousi, M.M., Khorasani, K. (2012). Optimal hybrid fault recovery in a team of unmanned aerial vehicles.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Ju e Son (2018) apresentam, nos seus dois artigos, uma modelagem formal para um sistema que consiste de múltiplos UAVs aplicados na agricultura, fazendo uso de DES e SCT para modelar o comportamento da aeronave, com foco em três situações: seguidores de caminho, detecção de colisão e voo em formação. No entanto, no que diz respeito a descrição das mis-

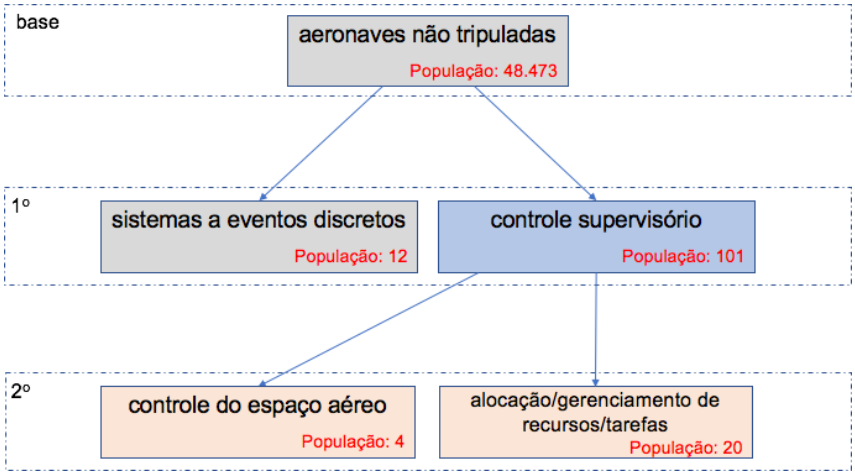
sões, os modelos apresentados tratam de situações pontuais, sendo que a modelagem foi feita para descrever a situação de operação de cada aeronave.

Tousi e Khorasani (2015) formulam uma solução baseada em um cenário de times cooperativos de UAVs, focando esforços na detecção e isolamento de falhas associadas em arranjos baseados em um sistema híbrido, porém, sem relações com a descrição da missão. Os autores também publicaram um trabalho anterior (TOUSI; KHORASANI, 2012), de forma semelhante ao destacado.

Furci, Paoli e Naldi (2013) apresentam uma proposta de controle supervisório reativo para um time de robôs/UAVs baseado nas teorias de DES e SCT. No entanto, a modelagem dos movimentos é realizada a partir de situações pré-definidas.

Considerando uma atualização do mapeamento, em um segundo nível, novos resultados foram alcançados, conforme indicado na Figura 22.

Figura 22 – Atualização do mapeamento sistemático da literatura, específico para os conceitos de controle do espaço aéreo e alocação de recursos.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Assim, os descritores associados aos dois novos conjuntos são elencados na Tabela 4.

Tabela 4 – Descritores para o refinamento quanto ao controle do espaço aéreo e a alocação (gerenciamento) de recursos (tarefas).

Refinamento	Descritores
controle do espaço aéreo	TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (supervisory PRE/0 control) AND (air PRE/0 traffic PRE/0 (control OR management)) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , “COMP”))
alocação/gerenciamento de recursos/tarefas	TITLE-ABS-KEY ((uav OR (unmanned PRE/0 aerial PRE/0 vehicle) OR rpa OR (remotely PRE/0 piloted PRE/0 aircraft) OR drone) AND (supervisory PRE/0 control) AND ((resource OR task) AND (management OR allocation)) AND NOT (proceedings) AND NOT (conference)) AND PUBYEAR > 1989 AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , “ENGI”) OR LIMIT-TO (SUBJAREA , “COMP”))

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Quando o destaque foi dado para o assunto "controle do espaço aéreo", foram encontrados 4 artigos (conforme apresentado na Tabela 5), sendo que os dois últimos artigos não são relevantes para essa discussão. Já os trabalhos de Lundberg, Palmerius e Josefsson (2018) e Aubert et al. (2015) são no formato de "*survey*" e serão discutidos no Capítulo 7, sendo que ambos apresentam elementos fundamentais para a justificativa da relevância deste trabalho. De fato, alguns pontos já foram destacados no Capítulo 2.

Tabela 5 – Listagem dos artigos que destacam o assunto "controle do espaço aéreo".

1. Lundberg, J., Palmerius, K.L., Josefsson, B. (2018). Urban Air Traffic Management (UTM) Implementation in cities - Sampled side-effects.
2. Aubert, M.C., Üzümcü, S., Hutchins, A.R., Cummings, M.L. (2015). Toward the development of a low-altitude air traffic control paradigm for networks of small, Autonomous unmanned aerial vehicles.
3. Sasangohar, F., Scott, S.D., Cummings, M.L. (2014). Supervisory-level interruption recovery in time-critical control tasks.
4. Calhoun, G., Ruff, H., Breeden, C., (...), Draper, M., Miller, C. (2013). Multiple remotely piloted aircraft control: Visualization and control of future path.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

O refinamento será finalizado com o termo "alocação de recursos", conforme o descritor já apresentado, sendo que a relação das publicações se encontra na Tabela 6.

Tabela 6 – Listagem dos artigos que destacam o assunto "alocação de recursos".

1. Kargbo, A.H., Eveleigh, T.J., Tanju, B. (2018). Electric grid disaster response management - A systems of systems engineering approach.
2. Nadella, B.K., Avvari, G.V., Kumar, A., (...), Coyne, J., Monfort, S.S. (2016). Proactive decision support for dynamic assignment and routing of Unmanned Aerial Systems.
3. Peters, J.R., Bertuccelli, L.F. (2016). Robust task scheduling for multi-operator supervisory control missions.
4. Ramchurn, S.D., Fischer, J.E., Ikuno, Y., (...), Flann, J., Waldock, A. (2015). A study of human-agent collaboration for multi-UAV task allocation in dynamic environments.
5. Aubert, M.C., Üzümcü, S., Hutchins, A.R., Cummings, M.L. (2015). Toward the development of a low-altitude air traffic control paradigm for networks of small, Autonomous unmanned aerial vehicles.
6. Breslow, L.A., Gartenberg, D., McCurry, J.M., Trafton, J.G. (2014). Dynamic operator overload: A model for predicting workload during supervisory control.
7. Claub, S., Schulte, A. (2014). Task delegation in an agent supervisory control relationship: Capability awareness in a cognitive agent.
8. Sasangohar, F., Scott, S.D., Cummings, M.L. (2014). Supervisory-level interruption recovery in time-critical control tasks.
9. Fuchs, C., Borst, C., De Croon, G.C.H.E., Van Paassen, M.M., Mulder, M. (2014). An ecological approach to the supervisory control of UAV swarms.
10. Ryan, J.C., Banerjee, A.G., Cummings, M.L., Roy, N. (2014). Comparing the performance of expert user heuristics and an integer linear program in aircraft carrier deck operations.
11. Clauss, S., Schulte, A. (2014). Implications for operator interactions in an agent supervisory control relationship.
12. Péni, T., Vanek, B., Szabó, Z., Bokor, J. (2014). Supervisory fault tolerant control of the NASA AirStar aircraft.
13. McMullen, E.L., Grass, B.S., Kennedy, Q., Sullivan, J., Yang, J.H. (2013). Effects of UAV supervisory control on F-18 formation flight performance in a simulator environment.
14. Clauß, S., Kriegel, M., Schulte, A. (2013). UAV capability management using agent supervisory Control.
15. Calhoun, G.L., Ruff, H.A., Draper, M.H., Wright, E.J. (2011). Automation-Level Transference Effects in Simulated Multiple Unmanned Aerial Vehicle Control.
16. Calhoun, G.L., Ruff, H.A., Draper, M.H., Wright, N.F., Mullins, B.P. (2009). Levels of automation in multi-UAV control allocation and router tasks.
17. Cummings, M.L., Mitchell, P.J. (2008). Predicting controller capacity in supervisory control of multiple UAVs.
18. Brzezinski, A.S., Seybold, A.L., Cummings, M.L. (2007). Decision support visualizations for schedule management of multiple unmanned aerial vehicles.
19. Cummings, M.L., Mitchell, P.J. (2007). Operator scheduling strategies in supervisory control of multiple UAVs.
20. Mehra, Raman K., Boskovic, Jovan D., Li, Sai-Ming (2000). Autonomous formation flying of multiple UCAVs under communication failure.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Todos esses trabalhos têm em comum o fato de considerarem como recursos as próprias aeronaves, o que os difere da presente tese, uma vez que nesta consideram-se como recursos os elementos necessários para que as aeronaves realizem suas tarefas. A motivação para isso reside no fato de que se tem como objetivo prover recursos para os operadores planejarem as suas missões considerando recursos disponíveis ao longo da trajetória, como é o caso do reabastecimento de combustível. Alguns desses trabalhos tratam da problemática baseando-se na definição de funções custo, visando garantir a realização da missão.

3.2.2 Conclusões do capítulo

Neste capítulo da tese, foram apresentados os principais conceitos associados aos Sistemas a Eventos Discretos, considerando a sua representação através de autômatos finitos determinísticos.

Para modelar um sistema com base na teoria de DES, é preciso identificar e caracterizar os seus eventos, em termos de comportamento e indicação de sua evolução, bem como as relações existentes que permitem descrever as mudanças de estado, causadas pela ocorrência de eventos.

Considerando o contexto deste trabalho, a identificação dos eventos de um sistema que promova o controle do espaço aéreo de UAV deve ser realizada de forma a observar como esses veículos executam as suas missões. Assim, cada aeronave deve ser associada a um conjunto de eventos distinto das demais, e que eles permitam identificar a sua evolução durante a execução de uma missão.

Quando um SED é avaliado, em termos de nível lógico, o interesse está voltado para a avaliação da sequência de eventos executada pelo sistema, caracterizando uma linguagem que representa todas as possibilidades de ocorrência de tais eventos.

A Teoria de Controle Supervisório exerce um controle realimentado sobre um SED, no sentido de restringir a linguagem gerada pelo SED a um subconjunto da linguagem gerada em malha aberta.

A segunda parte do capítulo foi dedicada ao refinamento do levantamento sistemático da literatura, agora considerando as duas teorias apresentadas. Além disto, foram realizados levantamentos, de forma combinada, considerando também os dois problemas identificados para o desenvolvimento deste trabalho: o controle do espaço aéreo e a alocação de recursos.

Os resultados obtidos no levantamento da literatura permitem afirmar que o tema escolhido apresenta desafios relevantes, e que foi caracterizada a ausência de resultados na literatura, envolvendo os principais conceitos, que são: a alocação de recursos e os problemas associados à ocupação do espaço aéreo.

No próximo capítulo, é apresentada uma proposta de modelagem de missões de UAV, baseada em DES. Existem dois objetivos, envolvendo essa proposta, no sentido de definir uma modelagem genérica, permitindo que ela ocorra de forma automática e seja representativa para qualquer missão.

Um raciocínio semelhante está associado à definição de uma especificação de controle de forma genérica, formulada através da Teoria de Controle Supervisório. Assim, todos os modelos podem ser gerados de forma automática, no sentido de avaliar a viabilidade de implementação de um sistema de gerenciamento de missões.

4 PROPOSIÇÕES PARA A MODELAGEM DE MISSÕES DE UAVS

Conforme apresentado no Capítulo 2, a execução de um voo automático de um UAV deve ser orientada por uma missão previamente definida, que contém todas as características associadas à trajetória do voo da aeronave, bem como as garantias (requisitos de execução) associadas à realização da missão com sucesso. No entanto, cada operador de um UAV possui informações que podem ser insuficientes para garantir efetivamente a realização da missão, considerando a ausência de informações quanto ao momento da ocupação do espaço aéreo envolvido, principalmente quanto ao uso compartilhado desse recurso (missões em paralelo que utilizam regiões em comum do espaço aéreo).

Nesse sentido, o objetivo deste capítulo é apresentar uma nova metodologia para a modelagem de missões de UAVs, sendo que esta representação é feita através de métodos formais baseados em Sistemas a Eventos Discretos (DES). Tal modelagem visa representar tanto o comportamento da aeronave durante a missão, como também adicionar recursos que permitam controlar cada missão planejada, em plena execução do voo, fazendo uso de recursos de telemetria para indicar a necessidade de tomada de uma decisão.

Essa modelagem visa permitir também que uma missão possa ser modificada durante a sua execução, pois tal recurso será relevante em situações de priorização da ocupação de regiões do espaço aéreo.

De uma forma mais ampla, e considerando que o principal objetivo deste trabalho está na definição de um *framework* para a coordenação de missões de UAV, foi identificada a necessidade de trabalhar com um modelo de missão que permita lidar com eventos associados às ações de controle necessárias para o gerenciamento das missões em andamento, bem como outras necessidades que possam surgir no futuro.

É importante destacar que o uso do formalismo de DES não implicará na mudança da forma de definição original da missão pelo operador da estação de controle terrestre (GCS), pois, através desta nova abordagem, todo o uso desse formalismo será transparente e automático.

Como os resultados de implementação, ao longo do desenvolvimento desse trabalho, foram obtidos através do uso de duas ferramentas específicas de GCS (mais especificamente, *Mission Planner* e *QGroundControl*), as ilustrações apresentadas nos próximos capítulos farão uso de imagens desses sistemas, com destaque para as modificações realizadas e a detalhes de configuração.

Este capítulo está organizado de forma a apresentar, inicialmente, as possíveis representações de missões de UAV, fazendo uso do formalismo de DES, com a intenção de definir uma modelagem genérica dessas missões. Após isto, são definidos os conceitos próprios de repla-

nejamento de missões, com toda a caracterização e validação realizadas a partir dos modelos definidos.

4.1 REPRESENTAÇÃO DE MISSÕES ATRAVÉS DE DES

Como já foi destacado anteriormente, a representação clássica de missões de UAVs, feita por grafos, não permite detalhar informações associadas à relação entre a aeronave e a ferramenta de *software* usada para definir a missão. Essa representação simplificada se justifica pelo fato de que não existe, normalmente, a intenção de realizar o controle da aeronave através da GCS. Ou seja, a GCS possibilita a realização do planejamento da missão e a transmissão desse plano para o sistema embarcado que controla a aeronave. Durante a execução do voo, a GCS realiza apenas o monitoramento da execução da missão, além de possuir recursos disponíveis para interromper ou comandar o prosseguimento da missão.

No entanto, quando se trata de uma missão que necessita avaliar as condições do ambiente no qual ela será executada, e também quando esse ambiente é compartilhado com outras missões, se faz necessário o uso de um modelo que permita representar as informações de uma maneira mais detalhada, relacionando tanto o comportamento de cada aeronave (quanto ao seu deslocamento no ambiente) como também a relação que cada aeronave tem com o ambiente e com a GCS.

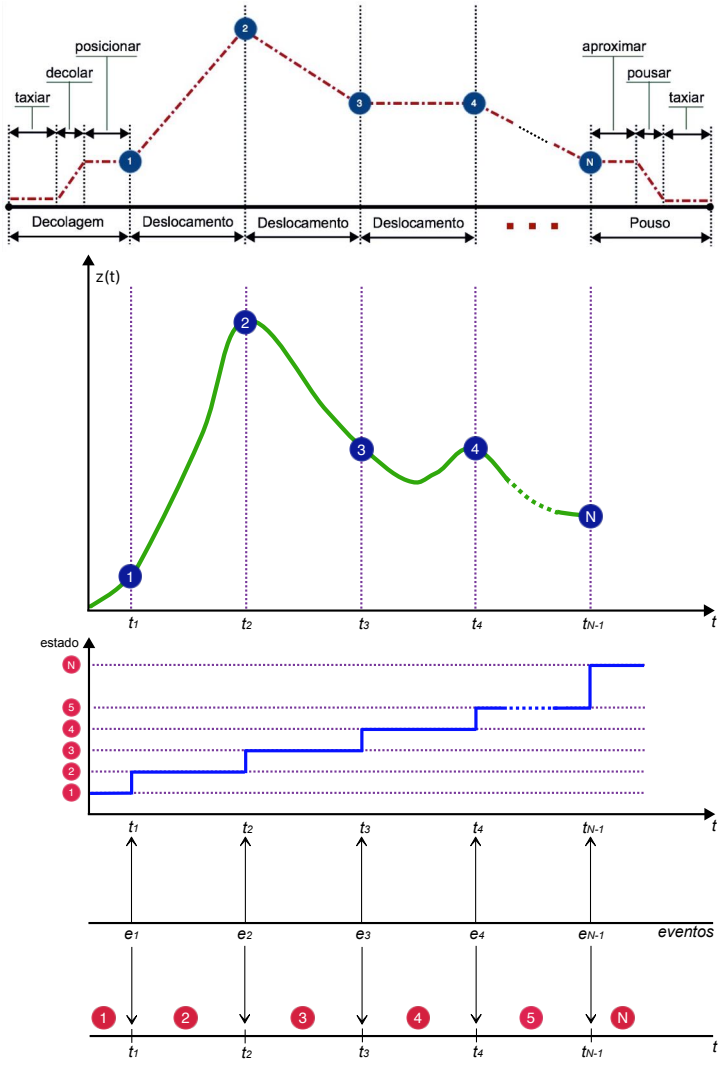
Nesta seção, discute-se como essas missões são representadas, visando propor uma metodologia de modelagem por DES. Além disso, a maneira como as missões serão modeladas possui um propósito claro, associado à necessidade de controle do espaço aéreo de uma determinada região, gerenciada por um sistema de coordenação de missões. Tal sistema deverá interagir com as GCS que estão associadas com as aeronaves envolvidas na sua região de controle.

4.1.1 Caracterização de uma modelagem genérica

Como foi apresentado no Capítulo 2, as ferramentas (GCS) utilizadas para o planejamento de uma missão de um UAV fazem uso de uma representação semelhante ao conceito de grafos orientados (DIESTEL, 2000). Com isso, cada *waypoint* (wp) de uma missão é representado como um vértice do grafo, e o deslocamento entre dois *waypoints* é representado por uma aresta que interliga dois vértices desse grafo. A Figura 9 apresenta um grafo de uma missão genérica com N *waypoints*, com destaque para três elementos de descrição (latitude - lat_i, longitude - lon_i e altitude - alt_i) associados a cada vértice que representa o *waypoint* i. Essa representação é suficiente para destacar informações específicas associadas a cada *waypoint*.

A execução de uma missão de um UAV, considerando a evolução da sua trajetória ao longo do tempo, pode ser representada através da evolução de um DES, como é ilustrado no exemplo apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Representação da evolução de uma missão, com destaque para os instantes associados a cada chegada em pontos específicos (•) da trajetória de uma missão (*waypoints*).



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Essa representação se mostra suficiente quando se representa uma missão de forma isolada, sem a preocupação com a interação com o ambiente, e desconsiderando também que possam existir outras aeronaves realizando missões nesse mesmo ambiente.

A curva em verde expressa a evolução contínua da missão, considerando neste exemplo apenas a altitude da aeronave - $z(t)$, visando simplificar a representação da evolução do voo, ao longo do tempo, bem como a identificação dos *N waypoints* dessa missão.

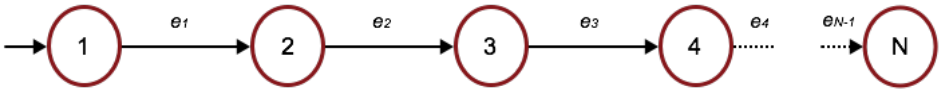
O modelo de eventos discretos pode representar uma abstração do comportamento contínuo, onde os estados (•) podem ser associados a situações físicas do UAV, e as transições de estados se dão pela ocorrência de eventos discretos (e_1, e_2, e_3, e_4, ..., e_{N-1}).

A evolução no tempo permite identificar instantes específicos (t_i) nos quais ocorrem mudanças de estado. Assim, em t_i, uma mudança de estado pode ser observada, do estado i para o estado $i+1$, devido a ocorrência do evento e_i.

Inicialmente, é preciso relacionar eventos do sistema que envolvem a execução de uma missão. Por exemplo, cada evento e_i pode ser associado com a chegada da aeronave a um determinado *waypoint* (*i+1*). Assim, o modelo fica diretamente relacionado com atitudes observadas no sistema.

Na Figura 24, apresenta-se um modelo básico de um DES que poderia ser usado para representar a evolução da missão ilustrada na Figura 23.

Figura 24 – Representação de uma missão, na forma de um DES, considerando uma missão genérica com *N waypoints*.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

As ferramentas existentes, associadas ao conceito de uma GCS, fazem uso de um modelo para representar a evolução da missão, associando apenas uma única informação de deslocamento da aeronave. Essa informação está associada com o momento da chegada da aeronave em um determinado *waypoint*.

No intuito de tratar dessa limitação e apresentar uma nova metodologia de modelagem, adequada para a representação das missões através da teoria de DES, apresenta-se a seguir uma proposta que associa informações relevantes para o relacionamento entre as missões envolvidas e a região geográfica em destaque.

Para iniciar essa discussão, a Figura 25 ilustra uma missão simples de monitoramento de um terreno, contendo 6 *waypoints*. O ponto 0 representa a posição inicial de planejamento da missão (*home*), e normalmente não faz parte da execução da missão de forma automática, como discutido anteriormente. O último *waypoint* (6) pode ser considerado como sendo a posição geográfica final da aeronave, no sentido de ser o último ponto a ser visitado, durante a execução da missão, podendo ser ou não ser associado à etapa de pouso da aeronave (neste momento, ele está sendo considerado como sendo desassociado do momento do pouso).

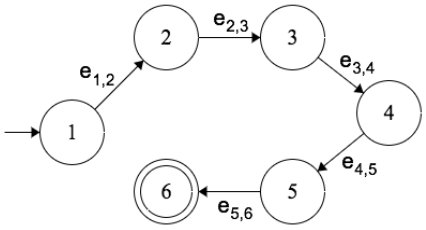
Essa missão pode ser representada por um DFA de 6 estados, no qual os eventos $e_{j,k}$ representam a evolução da posição da aeronave, do *waypoint* j para o *waypoint* k, conforme

Figura 25 – Uma missão genérica envolvendo 6 *waypoints* que devem ser visitados de forma sequencial, sendo ela definida através da GCS *Mission Planner* (ARDUPILOT, 2016).

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

a Figura 26. O DFA possui uma linguagem simples, contendo apenas uma palavra associada à linguagem marcada, que representa a finalização da missão com sucesso. Assim, a palavra $\mathbf{e}_{1,2}\ \mathbf{e}_{2,3}\ \mathbf{e}_{3,4}\ \mathbf{e}_{4,5}\ \mathbf{e}_{5,6}$ representa a evolução do sistema até o estado final, significando que a missão foi executada com sucesso.

Figura 26 – DFA da missão representada pela Figura 25.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Representar a missão de forma abstrata significa, neste momento, dizer que os eventos que indicam a evolução da aeronave na missão resumem a chegada em um *waypoint*, sem se preocupar com a identificação de qualquer comportamento ou tarefa efetuada.

Contudo, se for considerada a adição de um novo *waypoint* nessa missão, conforme a Figura 27, se faz relevante destacar as consequências associadas com a equivalência geográfica entre dois pontos. O novo ponto (7) possui as mesmas coordenadas geográficas do ponto inicial da missão (1).

O que se deseja destacar é que, mesmo com a possibilidade de dois ou mais *waypoints* apresentarem uma mesma posição geográfica, a representação do estado associado a cada um desses pontos pode ser feita de forma distinta. Essa afirmação pode ser constatada quando se

Figura 27 – Alteração da missão anterior (Figura 25), com a adição do *waypoint* **7**.

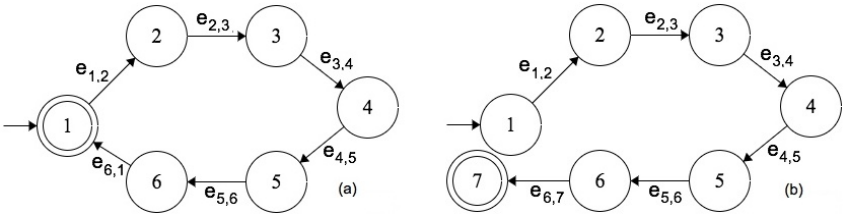
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

entende que um estado no modelo da missão não representa apenas a posição geográfica, mas também outros elementos, como a sequência de visitas a um determinado *waypoint* (permitindo diferenciar, por exemplo, duas visitas a mesma posição geográfica).

O interesse de fazer tal distinção de estados se deve ao fato de que é possível observar contextos diferentes em cada momento que se alcance uma mesma posição geográfica (*waypoint*), sendo que tais contextos devem ser explicitados no momento da modelagem.

Com isso, a Figura 28 apresenta uma comparação do modelo de autômato que apenas associa a posição geográfica com cada estado do modelo, com uma representação de missão que diferencia os estados considerando também elementos adicionais.

Figura 28 – Autômato que representa a execução de uma missão: (a) associada com as posições geográficas (*waypoints*); (b) que diferencia as posições geográficas de acordo com o momento da visitação dos *waypoints*.



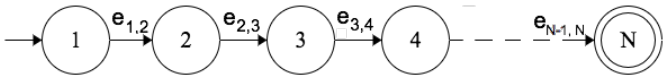
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

A linguagem associada a cada DFA permite identificar um comportamento diferenciado quanto a execução das missões. A missão da Figura 28(a) tem a sua linguagem descrita pela expressão regular: $(\mathbf{e}_{1,2}\ \mathbf{e}_{2,3}\ \mathbf{e}_{3,4}\ \mathbf{e}_{4,5}\ \mathbf{e}_{5,6}\ \mathbf{e}_{6,1})^*$, enquanto que a linguagem associada à missão da Figura 28(b) é descrita por: $\mathbf{e}_{1,2}\ \mathbf{e}_{2,3}\ \mathbf{e}_{3,4}\ \mathbf{e}_{4,5}\ \mathbf{e}_{5,6}\ \mathbf{e}_{6,7}$. Assim, fica evidente que a primeira linguagem aceita um conjunto infinito de palavras (significando a possibilidade de aceitar in-

finitas possibilidades de missões), enquanto que a segunda linguagem representa exatamente a missão que se pretende executar (a linguagem possui apenas uma palavra).

Portanto, é possível definir um modelo genérico de uma missão, baseado em uma linguagem finita, evitando o alcance de um estado mais de uma vez. De fato, os recursos de combustível de um UAV (bateria, por exemplo) são finitos, o que corrobora com a característica de uma linguagem finita. Assim, a Figura 29 representa uma forma que define o modelo genérico básico, permitindo representar qualquer missão, no contexto abstrato relacionado aos eventos.

Figura 29 – Modelo genérico básico de um DFA para missões de UAV.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Com o modelo acima, é definida uma característica essencial para a evolução do mesmo. Serão feitas complementações a este modelo, desde caracterizações de novos estados como também a identificação de eventos associados a necessidades de interação entre as aeronaves e o sistema de coordenação de missões.

Em termos de conceitos associados à classe de linguagens identificada (linguagens regulares), é possível identificar o significado de algumas operações, considerando o contexto das missões de UAV. Ou seja:

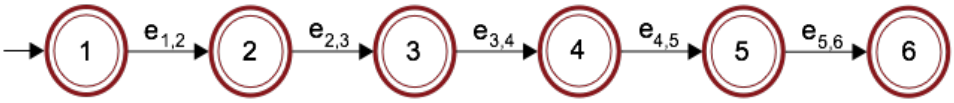
- A operação de **fecho do prefixo** ($\overline{L}$) permite identificar a evolução de uma missão, desde o estado inicial do DFA. Mas se todos os estados do DFA são considerados marcados, o conjunto definido por $\overline{L}$ representa as palavras aceitas, ou melhor, que a execução da missão considera todos os estados do DFA como sendo *waypoints* de finalização. Essa caracterização é importante quando as ações de coordenação forem definidas.

- A operação de **fecho de Kleene** (L^*) representa a possibilidade de repetir a execução de uma determinada missão, sendo também uma caracterização a ser definida posteriormente.

A Figura 26 representa uma missão que contém 6 *waypoints*, sendo que o modelo básico para esta missão pode ser apresentado através da Figura 30.

É possível observar que todos os estados do modelo são marcados, levando em consideração as operações acima elencadas, pois elas são úteis para a etapa de implementação do sistema de coordenação de missões.

Figura 30 – Modelo básico para uma missão com 6 *waypoints*.



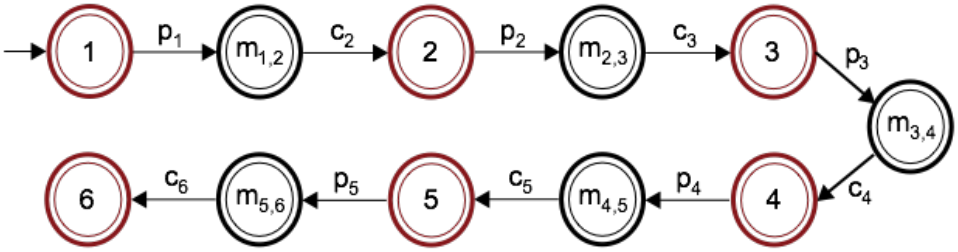
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

4.1.2 Adição de estados de movimento ao modelo genérico

O modelo da Figura 30 identifica apenas o posicionamento em um determinado *waypoint*, não sendo capaz de representar os momentos nos quais a aeronave não se encontra em nenhum desses *waypoints*, mas sim em movimento.

Assim, é interessante representar os momentos nos quais a aeronave se encontra em movimento, entre os pontos de visitação, e isso pode ser identificado através da inclusão de novos estados. Para tanto, utiliza-se a notação $m_{j,k}$ para representar o deslocamento entre os *waypoints* j e k. A Figura 31 ilustra o modelo modificado, incluindo estados intermediários que indicam esses deslocamentos.

Figura 31 – Modelo modificado (partindo da Figura 30) para uma missão com 6 *waypoints*, incluindo estados intermediários de movimento.



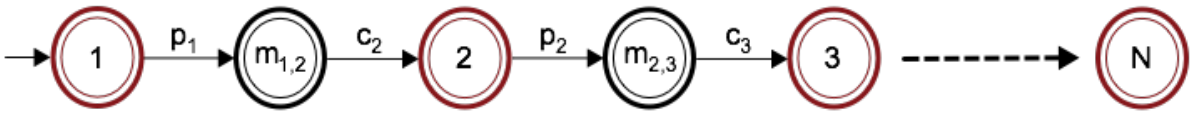
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Com essa nova caracterização da missão, os eventos genéricos $e_{j,k}$ foram substituídos por pares de eventos específicos (p_j e c_k) que representam, respectivamente, os momentos de partida do *waypoint* j e de chegada ao *waypoint* k. Esta nova representação permite identificar com mais clareza a situação da aeronave, ou seja, se ela alcançou um determinado *waypoint* ou se está em movimento entre dois *waypoints*.

No intuito de representar que uma missão interrompida ou finalizada por ação de controle (seja pela GCS, como apresentado na sua caracterização, como também pela associação com a proposta de sistema de coordenação de missões) possa ser considerada como missão completada, todos os estados desse novo modelo são marcados.

Com isso, a proposta inicial (modelo genérico básico) é complementada com a marcação de todos os estados e a caracterização dos estados de movimento, da mesma forma apresentada no exemplo acima, mas considerando um número finito de *waypoints* (N), cujo resultado é ilustrado pela Figura 32.

Figura 32 – Modelo genérico modificado, incluindo estados intermediários de movimento.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

No entanto, para permitir a associação com uma GCS (ou com o sistema de coordenação proposto nesta tese), o modelo deve possuir eventos que representem a interação com tais recursos. Os eventos $d_{j,k}$ e $h_{j,k}$ representam, respectivamente, as ações de desabilitar (d) e habilitar/reabilitar (h) o movimento da aeronave. Também é preciso definir estados adicionais ($i_{j,k}$) que caracterizem a condição de interrupção do movimento, associados aos estados $m_{j,k}$, conforme ilustrado pela Figura 33.

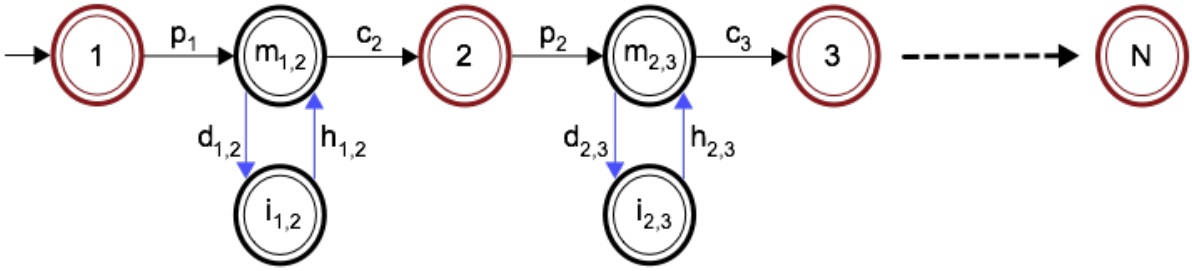
O significado de um evento que permite desabilitar o movimento de um UAV está na sua mudança de atitude quanto ao movimento executado. Nesse sentido, uma aeronave que se encontra em movimento entre dois *waypoints* pode ser interrompida, através de um evento que desabilite o seu comportamento atual, colocando a aeronave em um modo de espera, aguardando uma nova instrução. Considerando o projeto ArduPilot, o modo conhecido com *loiter* (ARDUPILOT, 2009) permite colocar uma aeronave em sua condição atual (latitude, longitude, altitude e orientação da aeronave em relação ao polo magnético terrestre) de forma fixa, com correções automáticas dessa posição, devido a perturbações associadas às condições do ambiente, realizadas através de seus recursos embarcados. Já o evento de habilitação/reabilitação do voo está associado à retomada da execução normal da missão.

Resta ainda representar a situação em que uma aeronave possa ter alcançado um determinado *waypoint* (j) mas precisa ser interrompida pelo coordenador, antes mesmo de seguir o seu movimento em direção ao próximo *waypoint* (k). Para isso, é necessário criar novos estados ($i_{j,k}$), bem com os eventos equivalentes (d_j e h_j).

Assim, a Figura 34 apresenta a versão final do modelo genérico de um DFA para uma missão de um UAV.

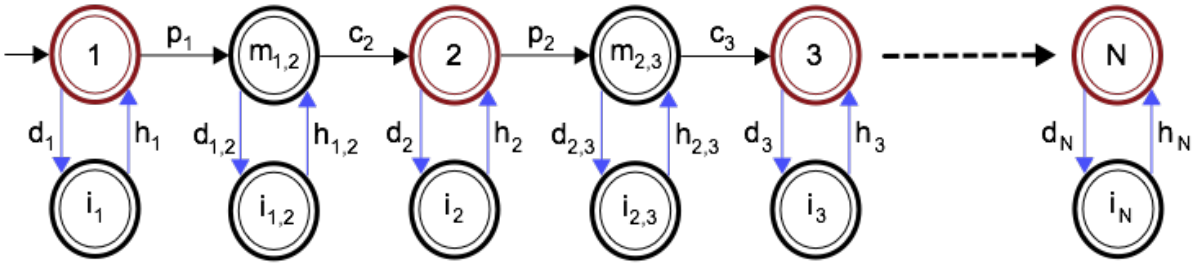
Vale destacar que esse será o modelo adotado na formulação da implementação do sistema de coordenação, sendo que o detalhamento da caracterização dos eventos será apresentado no próximo capítulo, visto que ele depende da apresentação da teoria de controle e das especificações de controle envolvidas com os problemas elencados no início deste documento.

Figura 33 – Modelo genérico modificado, incluindo estados intermediários de movimento, estados de interrupção e ações de interação.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Figura 34 – Modelo genérico final, incluindo os estados intermediários de movimento, estados de interrupção (associados também aos *waypoints)* e ações de interação.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

A próxima seção apresenta uma modelagem associada a tarefas realizadas por um UAV, sendo que essa representação não existe em nenhuma das ferramentas encontradas na literatura. Assim, apesar de não ser o foco de aplicação deste trabalho, a descrição de tal modelo é apresentada pelo fato da adição de tarefas representar uma discussão complementar ao mesmo.

A modelagem de tarefas através do mesmo formalismo apresentado permite associar ações de controle a atitudes de voo que, no momento, são executadas do início ao fim, sem qualquer interação com o operador/GCS. Além disso, associar eventos a sensores embarcados permite que a interação com as missões seja mais dinâmica. Como exemplo, uma missão poderia estar monitorando uma erupção vulcânica, e através de sensores que indiquem regiões mais relevantes para a análise, a aeronave poderia ter a sua missão modificada de forma automática, considerando que a descrição da missão tenha esse recurso modelado, sem a necessidade de retorno da aeronave para a base (para uma reprogramação da missão).

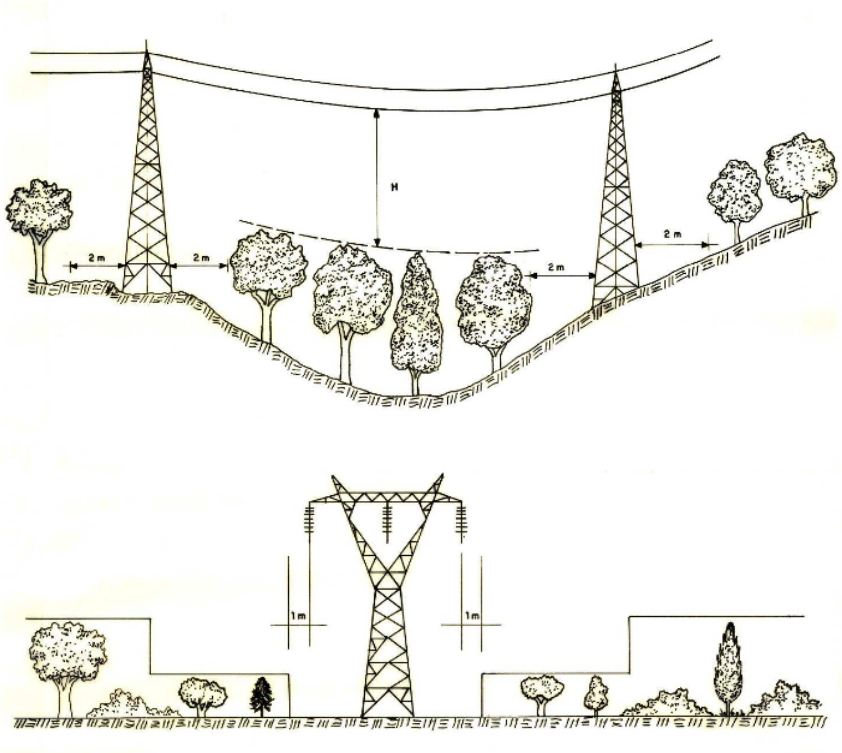
4.1.3 Modelagem de tarefas

É interessante relembrar a atitude de voo desempenhada por um UAV durante o seu deslocamento entre dois *waypoints*, pois a aeronave pode simplesmente se deslocar em linha reta,

focada em alcançar o seu ponto de destino, considerando eventuais perturbações (o vento, por exemplo). Nesse caso, considera-se que a missão entre esses pontos não possui nenhuma tarefa a ser cumprida, a não ser o deslocamento propriamente dito.

Por outro lado, se o deslocamento entre dois pontos de uma missão envolve também uma tarefa, como o reposicionamento da aeronave com base em um ponto de interesse (POI), então existe uma tarefa a ser realizada, além do deslocamento até o ponto de destino. A título de exemplo, a tarefa a ser realizada pode ser a inspeção das condições operacionais de uma linha de transmissão de energia elétrica, fazendo uso de uma câmera de alta resolução para identificar eventuais problemas.

Figura 35 – Cuidados com a manutenção de linhas de transmissão de energia elétrica.



Fonte: Manual de instruções técnicas: manutenção de subestações e linhas de subtransmissão / COPEL, 2014.

A inspeção ao longo de uma linha de transmissão deve ocorrer de forma periódica, considerando que tais estruturas são localizadas, na maioria dos casos, em regiões com pouco desenvolvimento urbano. Com o tempo, a vegetação avança sobre o local de instalação, o que pode prejudicar o sistema de transmissão. A Figura 35 permite imaginar preocupações existentes, onde uma visualização aérea prévia proporciona um planejamento das ações necessárias.

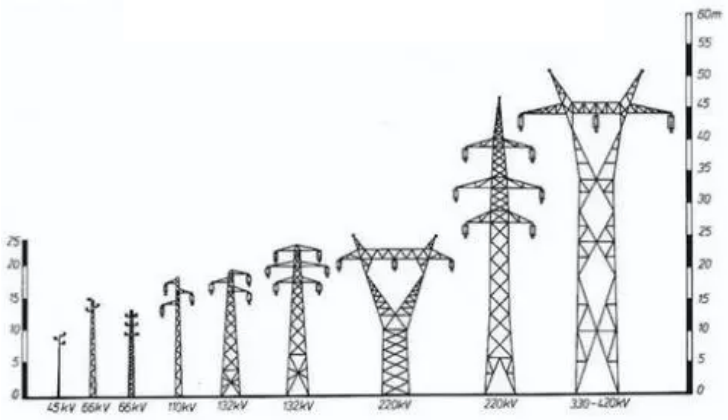
Em termos de uso de UAV aplicados ao exemplo em destaque, o que se pratica atualmente é a definição da missão com um *waypoint* associado para cada torre a ser observada, e quando a aeronave alcança um desses *waypoints*, a missão é interrompida para que a inspeção seja realizada, mas de forma manual (com o auxílio do operador). As demais torres são alcançadas

através de uma nova execução da missão original, considerando a localização atual como ponto de partida, o que implica em uma atualização no planejamento da missão.

As tarefas podem ser associadas com o deslocamento entre dois *waypoints*, ou seja, um estado de movimento da missão ($m_{j,k}$, com $k = j+1$). Considerando como exemplo a necessidade de registrar a evolução da vegetação ao longo de toda a linha de transmissão, o início de uma tarefa associada a um estado de movimento ($m_{j,k}$) pode ser representado pelo evento $ti_{j,k}$, e o encerramento da tarefa pode ser representado pelo evento $tf_{j,k}$.

Da mesma forma, uma tarefa pode ser associada a um estado da missão principal que representa um *waypoint* (j) da missão. Tais tarefas têm como objetivo avaliar determinadas situações associadas a localização específica do ponto destacado. Assim, considerando o mesmo exemplo, o objetivo de uma tarefa pode ser a inspeção de cada torre de transmissão, no sentido de identificar alguma falha estrutural. A Figura 36 ilustra diferentes tipos de torres de transmissão, sendo que cada torre tem a sua particularidade, em termos do seu porte, capacidade de transmissão, local de instalação, orientação geográfica, entre outras características. Essas características determinam, para a aeronave, um conjunto de manobras de voo diferenciadas.

Figura 36 – Características gerais de uma torre de transmissão.

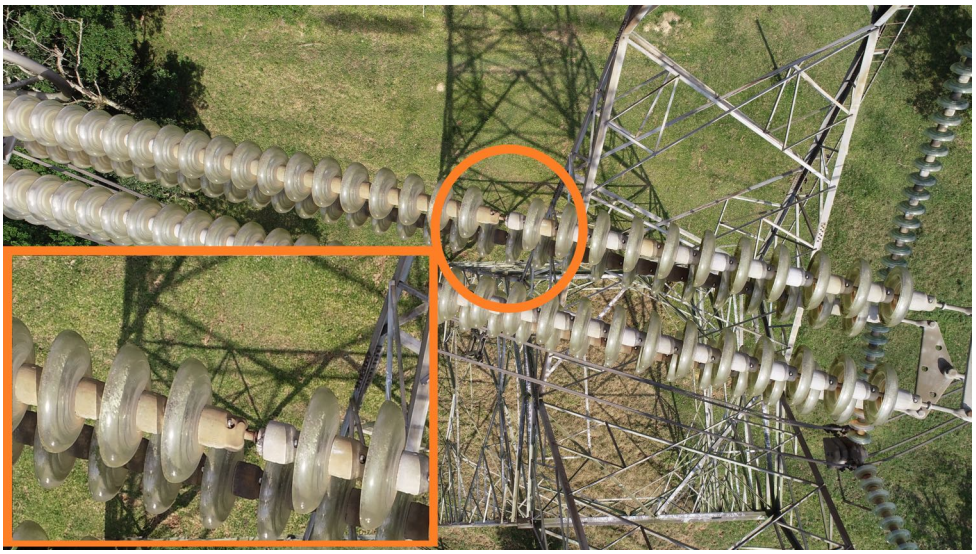


Fonte: Manual de instruções técnicas: manutenção de subestações e linhas de subtransmissão / COPEL, 2014.

Considerando o interesse em realizar toda a operação de inspeção de forma completamente automática, é preciso definir comportamentos específicos para cada tipo de torre. Tais comportamentos de voo são identificados como tarefas distintas, considerando cada tipo de torre, sendo que essas tarefas são modeladas na forma de missões alternativas.

Dando continuidade à análise do exemplo, uma tarefa pode ser definida de forma a permitir o registro das condições estruturais de uma torre de transmissão. Conforme indicado na Figura 37, o destaque foi feito para a identificação de um defeito estrutural, mais especificamente nos componentes de isolamento de uma torre de transmissão.

Figura 37 – Inspeção de uma linha de transmissão de energia elétrica, com identificação de defeito na componente de isolamento de uma das torres do sistema.

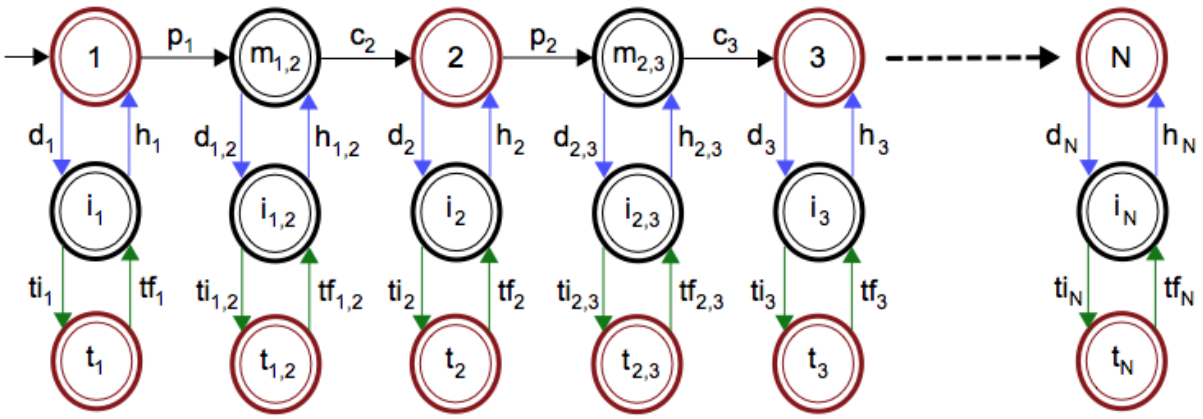


Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Para as tarefas associadas aos estados dos *waypoints*, os eventos associados são: para um estado associado ao *waypoint* j, o evento ti_j representa o início da tarefa. Já o evento tf_j representa a sua finalização.

Assim, com o objetivo de definir um modelo complementar que permita atender a tais possibilidades, propõe-se o uso do modelo ilustrado na Figura 38. Foram adicionados novos estados, t_j e $\mathrm{t}_{j,k}$ (com $j = 1,2,...,(N)$ e $k = j+1$), que representam a execução das tarefas, de uma forma abstrata.

Figura 38 – Modelo genérico de um DFA para missões de UAV, com destaque para a inclusão de tarefas.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Com o modelo definido, é possível observar o comportamento geral, associado a qualquer missão, o qual contempla as seguintes situações:

- A execução da missão planejada ocorre normalmente, considerando que não foi observada nenhuma necessidade de interrompe-la, situação em que apenas os estados j e $\mathrm{m}_{j,k}$ são alcançados;
- Surgiu a necessidade de interromper a missão, seja num *waypoint* ou durante a movimentação entre dois *waypoints*, situação na qual é alcançado um dos estados i_j ou $\mathrm{i}_{j,k}$, respectivamente, podendo em seguida dar continuidade à missão original;
- Surgiu a necessidade de execução de uma tarefa não prevista no planejamento de voo original e, para tanto, é feita a suspensão da missão principal em prol da execução de uma tarefa específica para a situação observada. Nesse caso, a tarefa é iniciada a partir dos estados i_j ou $\mathrm{i}_{j,k}$, fazendo uso do recurso de interrupção da missão principal.

Observação. *As tarefas não previstas na missão original são modeladas como missões alternativas, fazendo uso dos mesmos formalismos propostos neste trabalho. Já as tarefas que fazem parte da missão original não são descritas de forma explícita e podem fazer parte de um conjunto de ações relacionadas com os eventos p_j e c_k.*

A definição do sistema de coordenação de missões faz uso desses recursos, com destaque para o fato de que os modelos não são embarcados na aeronave, pois são avaliados no próprio coordenador, levando em consideração as informações obtidas, de forma contínua, através do canal de comunicação entre o coordenador e as aeronaves envolvidas (telemetria).

4.2 RESULTADOS ALCANÇADOS COM O REPLANEJAMENTO E INTERRUPÇÃO DE MISSÕES

Com o intuito de promover testes de validação, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que permite levar em consideração a informação de sensores adicionais, embarcados ou não, para a tomada de decisões em pontos intermediários da missão principal.

Essa ferramenta utiliza o modelo baseado em DES de uma missão principal, na qual é possível adicionar novas transições entre os pontos intermediários, com a finalidade de gerar pontos de decisão, particionando a missão principal em missões alternativas. A partir destas possibilidades de execução do voo automático, a ferramenta gera o código compatível para a placa controladora do UAV.

Se faz relevante destacar a motivação quanto a aplicação de sensores, pois, no primeiro momento, eles permitiram a implementação do conceito de interrupção de missões (foco do

trabalho, naquele momento), mas depois foi possível associar ao uso de sensores reais, considerando a interação das aeronaves com o ambiente.

A justificativa quanto ao uso de sensores para a tomada de decisões pode ser feita através de exemplos de missões de monitoramento de territórios. Por exemplo, em certos momentos do ano, é possível observar regiões do Brasil sofrendo com ocorrências de focos de incêndios, muitas vezes comprometendo áreas de grandes dimensões, dificultando a identificação e combate desses focos. Outro exemplo seria o monitoramento de regiões onde a segurança patrimonial (de estabelecimentos privados, por exemplo) depende de uma observação constante.

Em ambos os casos, o uso de sensores de imagens pode facilitar a identificação de uma situação de risco, e o processamento destas imagens pode determinar uma mudança automática de comportamento de um UAV em missão de monitoramento, sendo que o resultado da análise pode definir a adoção de uma nova missão mesmo durante o voo em execução.

Os experimentos foram realizados em um ambiente de execução real de missões, baseado na GCS *Mission Planner*, na qual o código é disponibilizado livremente. O desenvolvimento foi feito de forma a permitir o uso de recursos de sensoriamento virtual, visando identificar tomadas de decisão em plena execução da missão. Os detalhes de implementação são discutidos no Capítulo 7, visto que o foco do presente capítulo está na modelagem das missões.

Nesses experimentos, os resultados foram baseados em modelos simples para as missões (foi utilizado o modelo genérico da Figura 29), pois o objetivo foi validar a questão do uso de missões alternativas, sendo que para essa validação não se fez necessário representar os estados intermediários ($m_{j,k}$), e não havia então a necessidade de representar os estados de movimento e interrupção.

Tais resultados constituem o trabalho apresentado na *International Conference on Unmanned Aircraft Systems - ICUAS 2017* (MARTINS; ALMEIDA; LEAL, 2017b), no qual foram apresentadas contribuições no sentido de implementar novos recursos associados à GCS - Mission Planner e ao *firmware* da placa controladora - APM 2.6 (OBOURNE, 2014; ARDUPILOT, 2016). Também foram desenvolvidos módulos adicionais para a ferramenta Nadzoru (PINHEIRO et al., 2015), para a manipulação dos modelos de DES, associados às missões.

Um segundo trabalho foi apresentado no *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI 2017* (MARTINS; ALMEIDA; LEAL, 2017a), onde foi desenvolvida uma ferramenta computacional (simulador) para a validação de conceitos, fazendo uso dos modelos de DES definidos neste capítulo. No artigo, foram modelados recursos para o diagnóstico de falhas no sistema, considerando situações onde ocorrências de falha de comunicação (entre as aeronaves e a GCS) podem ser identificadas previamente, considerando um cenário associado a uma região de conflito.

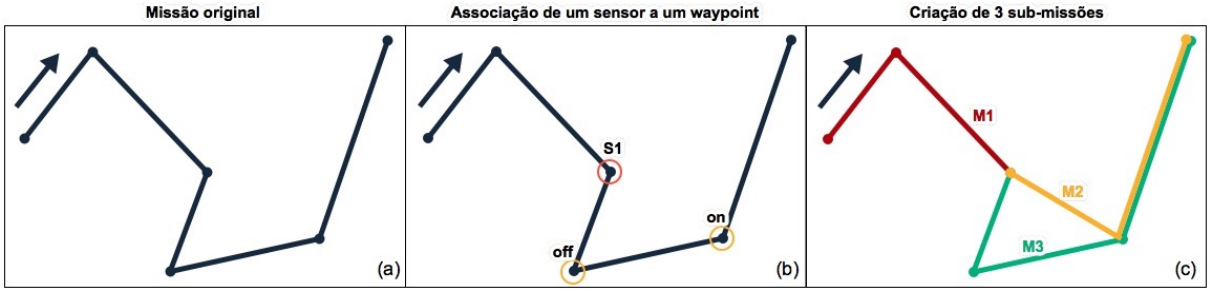
4.2.1 Replanejamento de uma missão automática

O conceito de modificar uma missão, através do uso de sensores de decisão, envolve:

- associar um sensor a um determinado *waypoint* da missão;
- identificar os *waypoints* de destino, considerando as opções identificadas pelo sensor; e
- criar as missões alternativas resultantes.

A Figura 39 ilustra o processo de modificação de uma missão. Neste exemplo, a alteração se resume em excluir a passagem pelo quarto *waypoint* (considerando a missão original), caso o sensor (S1) esteja ativo. Em outras palavras, a missão poderia ser executada de duas formas: M1 seguida de M2, ou M1 seguida de M3.

Figura 39 – Modificação de uma missão principal fazendo uso de um sensor para tomada de decisão: (a) missão original contendo 6 *waypoints*; (b) associação do sensor (S1) a um *waypoint*, bem como os *waypoints* de destino, após a tomada de decisão (on/off); e (c) identificação das missões alternativas resultantes (M1, M2 e M3).



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

4.2.2 Caracterização do replanejamento de uma missão

Considerando que o enlace de dados, utilizado para a telemetria das informações associadas à realização da missão, é bidirecional, o replanejamento de uma missão pode ser realizado em tempo real. No entanto, por considerar situações nas quais uma questão de segurança implica na realização desse replanejamento em solo, ou seja, antes que a missão tenha início, todos os procedimentos de replanejamento discutidos nesta seção são avaliados desta forma.

De fato, existem duas formas de realizar a programação das missões alternativas embarcadas na aeronave. A primeira consiste em carregar todas as missões alternativas na aeronave, e a GCS promover o monitoramento da missão, considerando também o estado que se encontra o sensor de decisão. De acordo com a informação obtida pelo sensor de decisão, a GCS promove

a interrupção da missão em andamento e ativa a respectiva missão alternativa. A segunda alternativa consiste em realizar o carregamento de cada missão alternativa somente no momento da demanda da aeronave.

Considerando a Figura 39(a) como sendo missão carregada na aeronave, e durante a execução da mesma, a aeronave pode evoluir em direção a posição associada ao sensor s1 (Figura 39(b)) e, de acordo com a leitura desse sensor, a continuação poderia evoluir para M2 ou M3 (Figura 39(c)), seja com todas as etapas de replanejamento armazenadas em solo, no momento anterior ao início da missão, ou com apenas a missão armazenada em solo, e as demais enviadas durante a execução da missão, de acordo com a demanda existente naquele momento.

Enquanto que a primeira alternativa se mostra mais conservadora, inclusive considerando a possibilidade de falha de comunicação entre a GCS e o UAV, a segunda alternativa torna o processo mais dinâmico, além de poupar recursos computacionais (memórias de armazenamento e de processamento). Mais ainda, a segunda alternativa permite o replanejamento de missões em tempo de execução.

Considerando a segunda alternativa como a escolha de implementação, após uma decisão ter sido tomada, é enviada para o UAV a missão alternativa, sendo que em seguida ao envio o UAV entra em modo de voo automático para que seja realizada a execução dessa nova missão. Assim, quando o UAV chega ao fim da missão, o mesmo entra em modo de espera (um modo de voo que permite que a aeronave permaneça nos arredores do *waypoint*) e a GCS analisa se existem arquivos de missões alternativas naquele determinado *waypoint*. Caso esses arquivos existam, o sensor é analisado e a decisão é tomada. Caso contrário, significa que a missão principal chegou ao seu fim. A Figura 40 ilustra o fluxograma deste recurso, intitulado *AutoWD*.

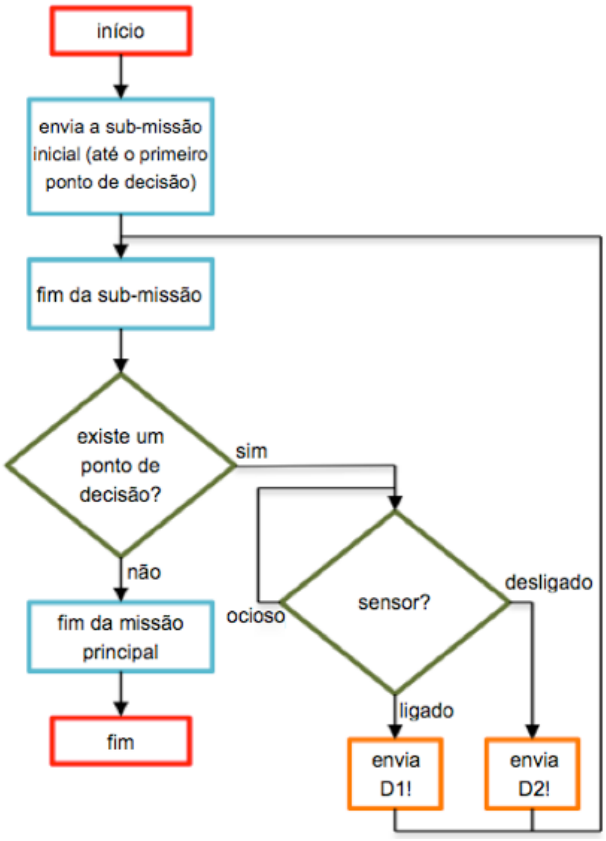
É possível observar que o algoritmo adotado define uma tomada de decisão baseada em opções binárias (D1 ou D2). Esta opção de implementação foi seguida apenas para simplificar o processo de desenvolvimento.

O processo de geração da missão principal ocorre na GCS e, com o desenvolvimento de um módulo para a ferramenta Nadzoru, é possível importar a missão da GCS, identificar o sensor e as tomadas de decisão, considerando os modelos em DES, e depois exportar esses modelos (associados às missões alternativas) de volta para o formato da GCS (Figura 41).

4.2.3 Validação da proposta de replanejamento de missões

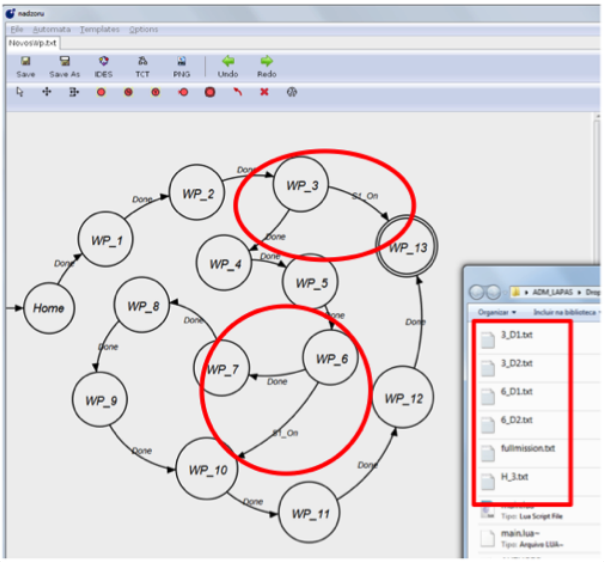
A estratégia adotada para a validação da proposta de replanejamento de missões foi definida em duas etapas: a primeira foi adotar uma técnica de simulação, visando minimizar a possibilidade de ocorrência de erros básicos neste desenvolvimento; e a segunda etapa foi efe-

Figura 40 – Fluxograma da estrutura da função AutoWD.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Figura 41 – Importação de uma missão, da GCS para o Nadzoru, e posterior exportação, com informações sobre o sensor virtual incorporadas à missão.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

tivamente realizada através de missões em um ambiente real, com uma aeronave executando voos planejados.

O uso da técnica *Hardware In the Loop* (HIL) foi identificado como uma alternativa segura, visando reduzir os riscos inerentes aos novos recursos, diretamente em uma plataforma de voo físico. A técnica HIL (ARDUPILOT, 2016; STEVENS; LEWIS; JOHNSON, 2003) é caracterizada pela operação de componentes reais em conexão com componentes simulados em tempo real. O processo consiste em simular, parcialmente ou totalmente, atuadores, sensores e processos físicos (ISERMANN; SCHAFFNIT; SINSEL, 1999). Os benefícios da utilização do HIL são:

- realizar os testes do controle do *hardware* e *software* sem a necessidade da real operação dos processos e sobre condições adversas extremas;
- testar os efeitos causados pelas falhas dos atuadores ou sensores, reproduzindo experimentos sem provocar acidentes ou colocar pessoas em situação de risco; e
- economizar recursos (tempo e recursos financeiros) no desenvolvimento, evitando possíveis avarias em ensaios físicos.

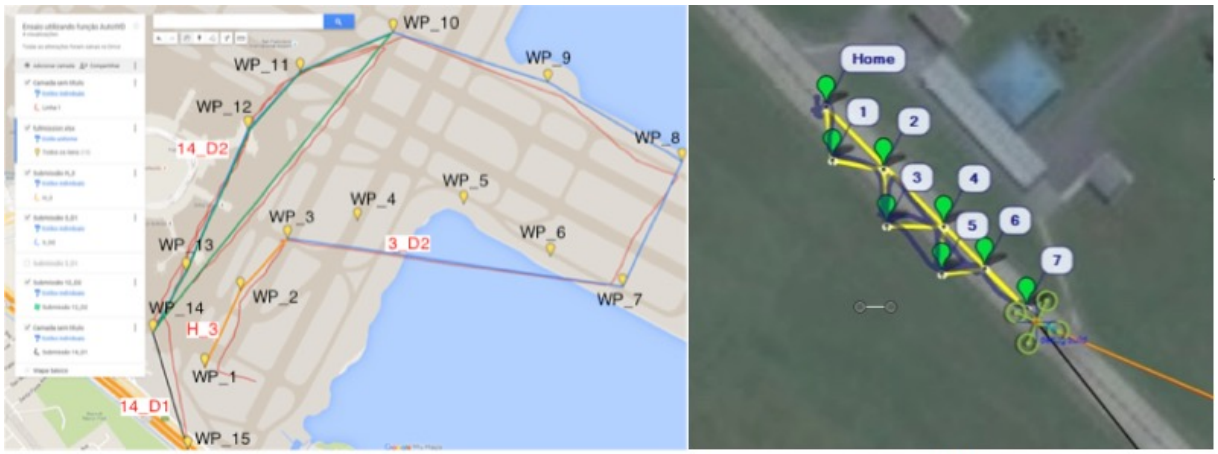
Para realização dos testes foi planejada uma missão com 15 *waypoints*. A missão principal foi importada para a ferramenta Nadzoru, permitindo adicionar duas transições: uma transição do *waypoint* 3 para o 7 e outra transição do *waypoint* 14 para o 10, totalizando 5 missões alternativas.

A Figura 42(a) ilustra o deslocamento do UAV no decorrer desta missão, sendo a linha vermelha o trajeto realizado pelo UAV e as linhas laranja (H_3), azul (3_D2), verde (14_D2) e preta (14_D1) as missões alternativas utilizadas nesse ensaio. A Figura 42(b) ilustra o planejamento de uma missão cujos experimentos foram realizados em uma pista de testes real. A missão possui 7 *waypoints*, sendo dois deles utilizados como referência quanto a tomada de decisão.

Vale destacar que, uma vez que o objetivo desse experimento consiste na validação do replanejamento de missões, ou mais especificamente, quanto ao processo de interrupção de uma missão, optou-se pela utilização do modelo simplificado de missão, mostrado na Figura 29, pois ele é suficiente para tal validação. Os resultados obtidos também são relevantes para o desenvolvimento associado ao sistema de coordenação de missões, tendo em vista que o padrão de representação das missões, na GCS, é o mesmo adotado nesses experimentos.

Os resultados alcançados, em termos de validação, foram obtidos por ensaios feitos através da técnica HIL, como também através do uso de missões reais, como é mostrado na Figura 42(b). Os objetivos foram alcançados, no sentido de que foi possível mostrar que o conceito de replanejamento de missões pode ser implementado, e que as missões alternativas podem

Figura 42 – Validação da proposta de replanejamento de missões: (a) experimentos realizados através da técnica HIL; e (b) experimentos realizados em ambiente real.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2020.

ser carregadas na placa controladora da aeronave em tempo de execução da missão. Em cada um dos ensaios realizados, a missão original foi segmentada, considerando cada *waypoint* escolhido como sendo aquele associado à um sensor virtual, associando-o com as transições que definem os momentos de decisão, considerando o DFA gerado através da ferramenta Nadzoru. O algoritmo implementado nessa ferramenta gera os segmentos da missão, considerando que a seleção de cada segmento está associada com as possibilidades atribuídas ao sensor.

O sensor adotado nos testes foi implementado na GCS, na forma de um sensor virtual, como pode ser verificado na Figura 43. Vale destacar que um mesmo sensor virtual pode ser utilizado de forma a determinar tomadas de decisão distintas, associadas aos *waypoints* destacados no momento do planejamento.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, apresentou-se uma nova proposta para representar o planejamento de uma missão de um UAV através do formalismo de DES, no sentido de caracterizar essa modelagem de forma genérica e consistente.

Assim, dois modelos genéricos foram propostos, com o intuito de tornar a representação de uma missão melhor definida, com destaque para os eventos associados ao comportamento de um sistema de coordenação de missões. Os modelos propostos neste trabalho permitem relacionar e distinguir a execução simultânea de um conjunto de missões de UAV, visando alcançar uma solução para a coordenação dessas missões, que ocupam um espaço aéreo em comum.

Figura 43 – Implementação do sensor virtual na GCS (Mission Planner).

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

O primeiro modelo proposto estende a forma de representação da evolução de uma missão, indo além da representação dos *waypoints*, no sentido de representar também as situações nas quais uma aeronave se encontra em deslocamento. Outra contribuição associada ao modelo proposto está na associação de eventos que permitem representar a interrupção de uma missão, característica fundamental para o replanejamento de missões.

O segundo modelo proposto adiciona ao modelo anterior a capacidade de representar tarefas que podem ser executadas durante uma missão, sendo que tais tarefas também são definidas na forma dos modelos propostos, ou seja, seguindo o conceito de replanejamento de missões.

Um conjunto de testes de validação foi realizado, no sentido de promover o reconhecimento de que a proposta atende as necessidades elencadas. Os resultados alcançados permitiram validar os modelos de missões alternativas e o conceito de replanejamento de missões.

Como foi discutido anteriormente, falhas de comunicação podem ocorrer, sendo que o recurso que permite contornar esta situação está na configuração de ações de *failsafe*, onde a aeronave detecta a ocorrência de falha na comunicação, e adota um procedimento de segurança, que poderia ser o de pousar a aeronave.

Resumo das contribuições deste capítulo. Os resultados alcançados, considerando o contexto desse capítulo, foram:

- Associação da teoria de DES com a problemática associada a missões de UAV;
- Apresentação dos conceitos associados ao modelos de representação de planos de missões de UAV, visando associa-los a um sistema que permita coordenar múltiplas missões;

- Definição de modelos genéricos que permitem representar os eventos necessários para a associação de recursos de controle de missões;
- Validação de modelos, realizada através de experimentos feitos com uma GCS, com a geração automática de modelos (geração realizada de forma transparente para o operador da GCS); e
- Identificação de um modelo específico para a devida associação com a proposta a ser feita, visando como resultado um sistema de coordenação de missões.

Ao final deste capítulo, foi definido um modelo genérico, formalizado segundo a teoria de DES, com todas as informações já existentes no modelo obtido a partir de uma GCS, acrescidas de eventos que representam situações pontuais da evolução de uma missão.

Esse modelo não será incorporado ao sistema das aeronaves (ele não será embarcado nas aeronaves), pois ele servirá como modelo para o sistema de coordenação, que avalia as atualizações de informações obtidas através do enlace de telemetria, analisando o estado de cada aeronave sob sua supervisão. A partir desta análise, o sistema poderá tomar decisões pontuais (para cada aeronave), mas seguindo uma estratégia que atenda requisitos de atendimento que envolva o comportamento global, associado com as características do ambiente e dos recursos disponíveis.

5 PROPOSIÇÕES PARA A GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE ESPECIFICAÇÕES DE CONTROLE ENVOLVENDO MÚLTIPLAS MISSÕES DE UAVS

Na etapa de revisão bibliográfica deste trabalho identificou-se que existe uma expectativa relevante quanto ao uso do espaço aéreo por aeronaves não tripuladas, sendo que as missões a serem definidas podem conter a caracterização do uso de regiões e recursos em comum.

Considerando esse cenário, foram destacadas duas questões fundamentais, ou seja, situações que podem ser observadas de forma ampla, envolvendo qualquer tipo de caracterização de missão, considerando como base a definição do seu deslocamento ao longo do espaço aéreo associado. São eles: as regiões de conflito e o bloqueio de recursos.

Os modelos introduzidos no Capítulo 4 permitem representar qualquer missão, em termos do planejamento definido para a execução do deslocamento de uma aeronave, ocupando parte do espaço aéreo em observação. Esses modelos são empregados neste capítulo no intuito de padronizar a representação das missões de UAVs, bem como para fornecer recursos suficientes para a definição de regras de controle específicas para cada missão. O principal objetivo está em atender as necessidades de todas as aeronaves que estejam executando o voo de forma paralela.

Portanto, dos elementos tratados no capítulo anterior, dois deles são fundamentais:

- A modelagem genérica de uma missão, que permite definir qualquer missão apresentada por um operador, através do uso de uma GCS; e
- O conceito de replanejamento de uma missão, que permite modificar uma missão em execução.

Este capítulo traz os conceitos associados aos dois problemas identificados, fazendo uso de um certo nível de abstração, pois o detalhamento associado à proposta de implementação será apresentado no Capítulo 6. Os elementos em destaque, aqui apresentados, estão associados à caracterização de partes específicas de cada missão, bem como os eventos que devem ser identificados, pois eles servem como base para a formulação das especificações de controle, em cada problema tratado.

Visando garantir que as especificações de controle sejam obtidas de forma automática e com um custo computacional reduzido, são apresentadas também duas propostas de soluções genéricas para os problemas destacados.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DE UMA REGIÃO DE CONFLITO

O primeiro problema é identificado quando a caracterização de mais de uma missão envolve uma situação de conflito, ou seja, no momento da análise do planejamento das missões

envolvidas identifica-se uma região onde uma ou mais coordenadas do espaço aéreo envolvido possibilitem que mais de uma aeronave ocupe tal região ao mesmo tempo. Tal situação caracteriza uma região com riscos de colisão entre as aeronaves.

Assim, surge a necessidade de definir mecanismos de controle adequados para tratar do problema aqui nomeado como região de conflito, associado à ocupação do espaço aéreo, ao longo da trajetória que cada aeronave envolvida irá executar, de acordo com a sua missão estabelecida.

O problema associado a um conflito, quanto a ocupação de um espaço em comum é motivo de estudo para os veículos terrestres, sendo que propostas associadas a modelagem dinâmica do sistema representam um número significativo na literatura. Como exemplo, Zhang, Malikopoulos e Cassandras (2016) tratam do problema da coordenação contínua (*online*) de um fluxo de veículos autônomos, considerando os cruzamentos de uma via urbana, no sentido de promover o controle da aceleração de cada veículo que se encontra próximo a um cruzamento de vias. Nesse contexto, soluções que envolvem modelos dinâmicos são motivadas pelo fato de não existir um planejamento prévio do caminho a ser percorrido por cada veículo.

Por outro lado, considerando um sistema de veículos que faça uso de um planejamento do deslocamento, ou seja, cada veículo possui a sua trajetória definida antes que ele inicie o seu deslocamento, a análise das regiões pode ser realizada de forma *offline*, ou seja, antes da execução de cada deslocamento, caracterizando quais delas tem o potencial de serem regiões de conflito. Em outras palavras, dependendo do momento de execução de cada uma das missões que estão envolvidas numa região de conflito, a possibilidade de colisão pode não mais existir. De qualquer forma, a definição dessas regiões é fundamental para que se possa identificar as possíveis colisões antes mesmo do início da execução das missões planejadas.

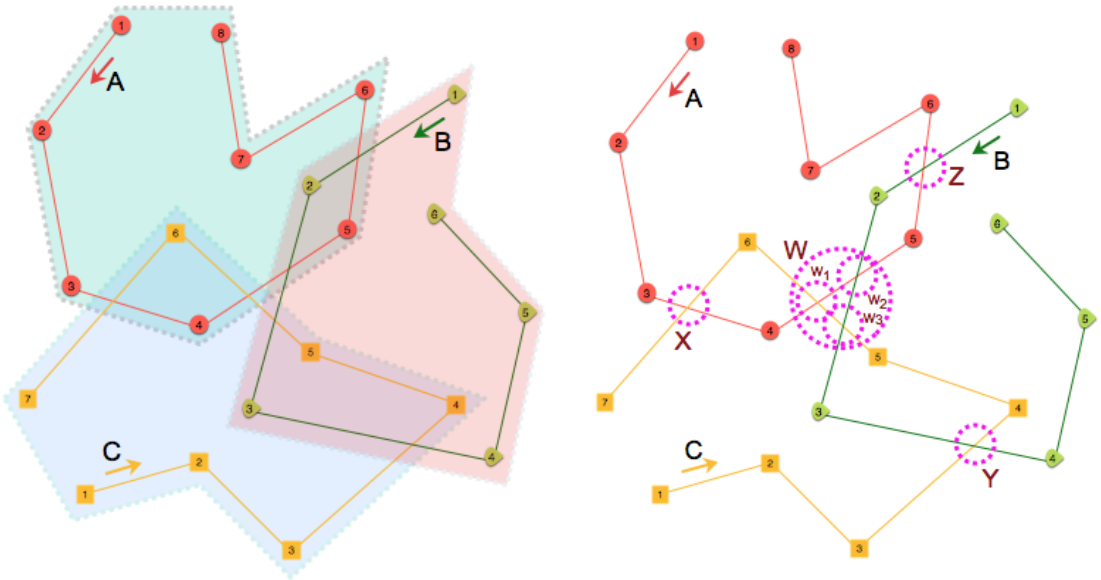
Para ilustrar tal situação, a Figura 44 permite apresentar um exemplo simplificado, considerando a definição de três missões de UAVs.

Em termos de detalhamento de cada missão (Figura 44a), tem-se que:

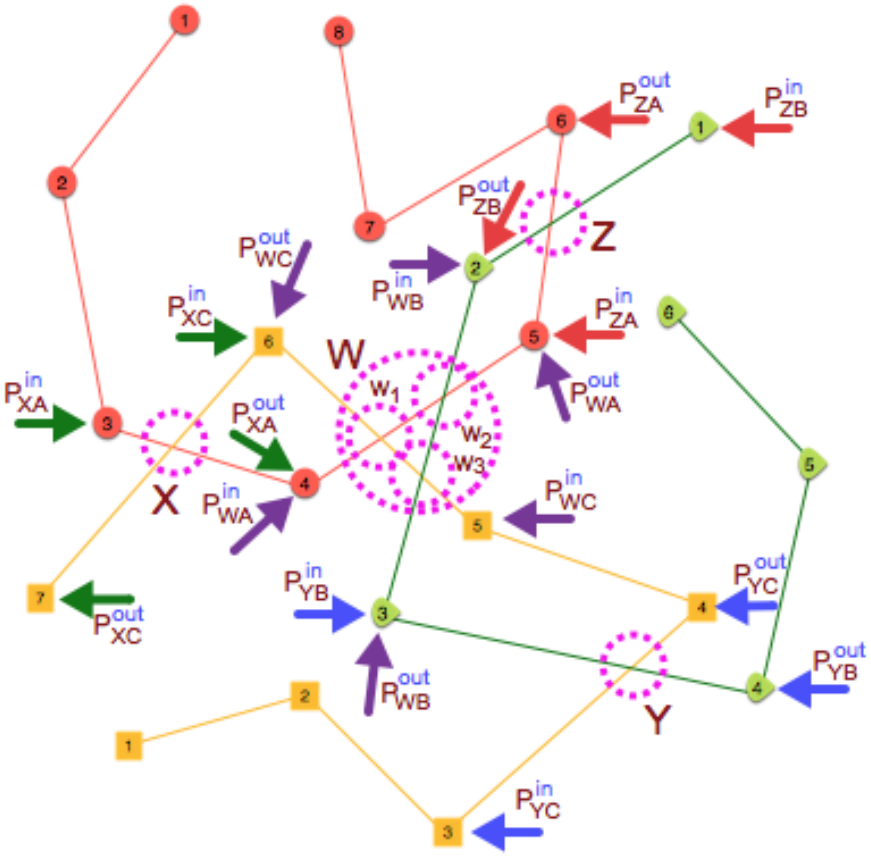
- A missão A possui 8 *waypoints*, sendo que dois deles estão posicionados em regiões associadas às demais missões (*waypoints* 4 e 5);
- A missão B possui 6 *waypoints*, e dois deles estão posicionados em regiões associadas às demais missões (*waypoints* 2 e 3); e
- A missão C possui 7 *waypoints*, e três deles estão posicionados em regiões associadas às demais missões (*waypoints* 4, 5 e 6).

Quanto as regiões em comum, identificadas por X, Y, Z e W, é possível caracterizá-las conforme ilustrado na Figura 44b, da seguinte forma:

Figura 44 – Ilustração do planejamento de três missões de UAVs (A, B e C), com destaque para a caracterização de quatro regiões de conflito.



(a) Ilustração do espaço aéreo, ocupado por cada missão, e de 4 regiões de conflito (X, Y, Z e W).



(b) Caracterização de quatro regiões de conflito e seus respectivos pontos de atuação, detalhado a partir da Figura 44a.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

- A região X é caracterizada pela possibilidade de colisão entre as aeronaves das missões A e C, sendo que os pontos mais próximos (anteriores e posteriores) a essa região são: P^{in}_{XA}, P^{out}_{XA}, P^{in}_{XC} e P^{out}_{XC};
- A região Y é caracterizada pela possibilidade de colisão entre as aeronaves das missões B e C, sendo que os pontos mais próximos (anteriores e posteriores) a essa região são: P^{in}_{YB}, P^{out}_{YB}, P^{in}_{YC} e P^{out}_{YC};
- A região Z é caracterizada pela possibilidade de colisão entre as aeronaves das missões A e B, sendo que os pontos mais próximos (anteriores e posteriores) a essa região são: P^{in}_{ZA}, P^{out}_{ZA}, P^{in}_{ZB} e P^{out}_{ZB}; e
- A região W é caracterizada pela possibilidade de colisão entre as três aeronaves, sendo que os pontos mais próximos (anteriores e posteriores) a essa região são: P^{in}_{WA}, P^{out}_{WA}, P^{in}_{WB}, P^{out}_{WB}, P^{in}_{WC} e P^{out}_{WC}.

Os pontos identificados como sendo anteriores e posteriores às regiões de conflito são fundamentais para a definição de mecanismos de controle, no sentido de um sistema de coordenação atuar de forma a interferir nas missões envolvidas, interrompendo-as momentaneamente.

É possível ainda observar que a região W foi identificada a partir de três outras regiões de conflito (W_1, W_2 e W_3), sendo que essa associação foi feita considerando que tais regiões se encontram muito próximas [1], além do fato de não existir nenhum ponto mais próximo daqueles já identificados. Nesse sentido, as regiões identificadas foram agrupadas em uma única região, agora envolvendo as três missões. Assim, não se tem a preocupação de quantificar a distância mínima necessária para caracterizar duas ou mais regiões distintas que podem ser representadas por uma única região.

Por outro lado, a identificação dos pontos[2] de aproximação ($P^{in}_{r,m}$) e de saída ($P^{out}_{r,m}$), associados a uma região de conflito, é importante para a associação de ações de controle, no sentido de promover a interrupção ou a continuação de cada missão, visando conceder o acesso ao espaço aéreo compartilhado para uma aeronave específica.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DE UMA REGIÃO DE BLOQUEIO

Primeiramente, é importante mencionar que a noção de bloqueio adotada neste trabalho está associada à situações nas quais uma aeronave não consegue fazer uso de um recurso que estava planejado na missão para ser acessado pela mesma num determinado *waypoint*. Neste

[1] Neste momento do texto, a consideração quanto a proximidade entre as aeronaves ou regiões de conflito é feita de forma qualitativa, sendo que a formulação da solução desta questão é apresentada no Capítulo 6.

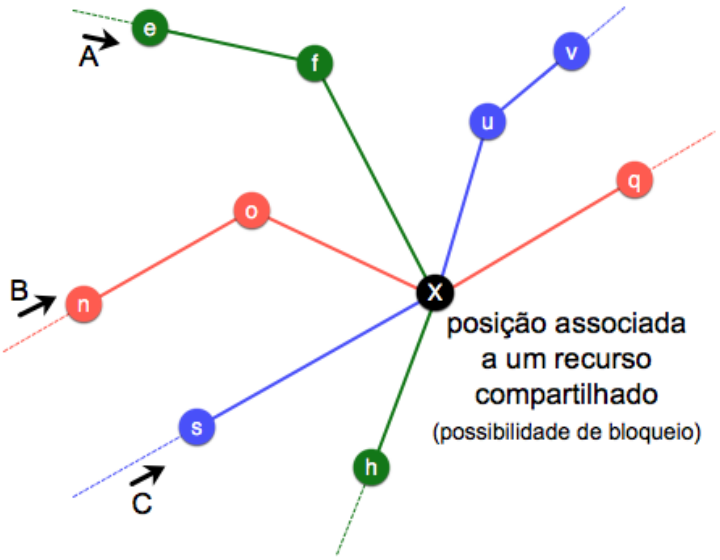
[2] Considerando 'r' como sendo a identificação da região de conflito, e 'm' sendo a identificação da missão.

sentido, é dito que a aeronave se encontra em uma situação de bloqueio, no que diz respeito ao uso de um determinado recurso.

Fanti et al. (2018) apresentam uma solução descentralizada para o controle e coordenação de AGV (*Autonomous Guided Vehicles*), sendo que um dos objetivos está em evitar situações de bloqueio (*deadlock*). O sistema possui uma rede de caminhos guiados, indicando os movimentos que os veículos podem executar, possuindo também posições do ambiente, definidas de forma semelhante aos *waypoints*. Assim, existe um conjunto de rotas predefinidas para que o movimento entre as posições estabelecidas seja possível. Como naquele trabalho todas as trajetórias são previamente definidas, os desafios estão associados a evitar colisões, além de procurar proibir movimentos que levem a posições já ocupadas por outros veículos, pois tais movimentos caracterizariam situações de bloqueio.

De forma diferente, neste trabalho as trajetórias (em termos de movimentos entre os *waypoints*) não são previamente definidas. Além disso, o acesso a um *waypoint* de oferecimento do recurso pode ser tratado de modo a ser caracterizado como uma região de conflito que contém o *waypoint* associado ao recurso, conforme apresentado na sessão anterior. Sendo assim, o bloqueio aqui caracterizado se difere da noção de bloqueio adotada por Fanti et al. (2018) pelo fato de existir uma associação entre *waypoints* específicos e um conjunto finito de recursos disponíveis, sendo que o exemplo adotado neste trabalho remete ao uso de um conjunto de bases de recarga de combustível para as aeronaves. A Figura 45 ilustra uma situação pontual para auxiliar no entendimento.

Figura 45 – Exemplo envolvendo três missões que podem fazer uso de um recurso compartilhado associado a um *waypoint* comum.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

O conceito de um conjunto de recursos estar associado a um determinado *waypoint* leva a uma segunda definição, ao nível do sistema, no sentido de caracterizar o *waypoint* de uma forma que o sistema identifique a intenção do operador, no momento que ele define o planejamento da missão. Assim, todos os operadores que fazem uso do sistema que coordena as missões devem ter o conhecimento das coordenadas específicas deste ponto de acesso aos recursos (as coordenadas geográficas associadas, por exemplo, a uma altura específica), bem como das informações associadas aos recursos disponíveis (capacidade e política de atendimento, entre outras).

Quando uma das aeronaves alcança o *waypoint* associado aos recursos compartilhados, o sistema deve se encarregar de:

- Suspender a missão original;
- Encaminhar a aeronave para uma posição adequada, visando o uso do recurso;
- Reposicionar a aeronave, após o uso do recurso, retornando-a para o ponto X; e
- Resgatar a continuidade da missão original da aeronave.

No caso de todos os recursos disponíveis estarem sendo utilizados, o sistema deve realocar as aeronaves para posições de espera, adotando uma política de espera (FIFO[3], por exemplo) para o gerenciamento e realocação das aeronaves.

5.3 PROPOSTA DE UM MODELO GENÉRICO PARA O TRATAMENTO DO PROBLEMA DE CONFLITO DE MISSÕES

Nesta seção, introduz-se um modelo genérico para a especificação de controle destinada a solucionar o problema de conflito de missões. Para tanto, utiliza-se um exemplo de duas missões que são executadas em uma região em comum, conforme ilustrado na Figura 46.

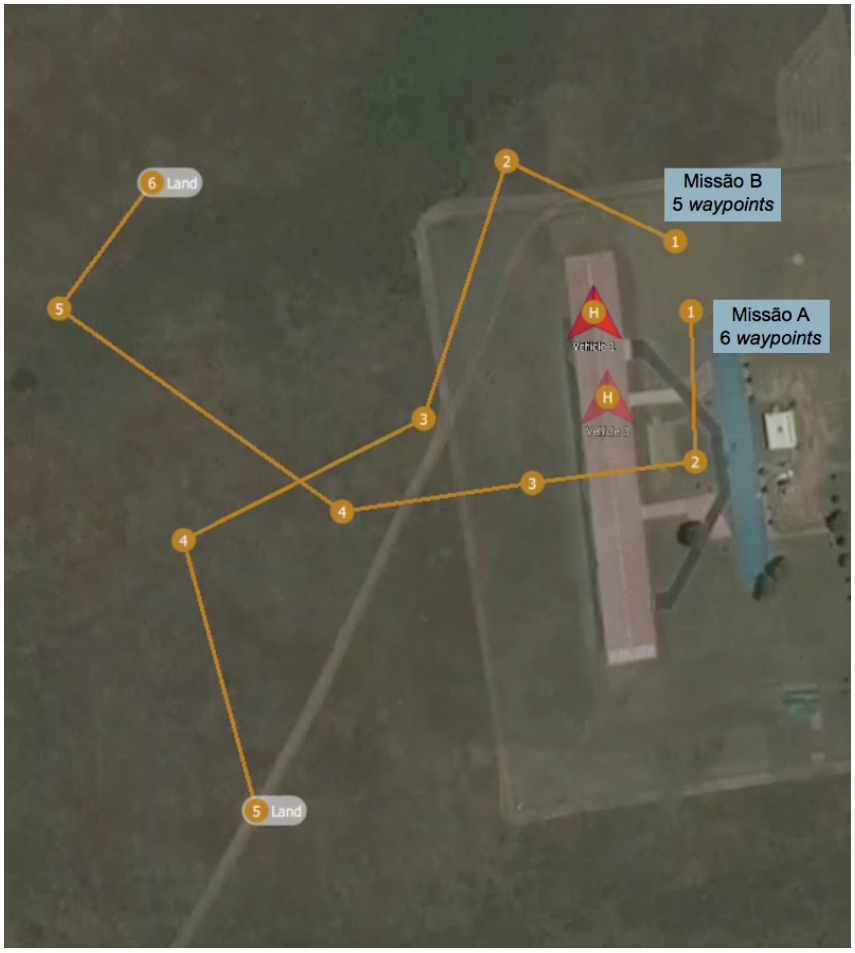
Nesse exemplo, a missão A possui 6 *waypoints* e a missão B possui 5 *waypoints*. É possível observar também que existe uma região de conflito entre os *waypoints* 4 e 5 (missão A) e entre os *waypoints* 3 e 4 (missão B).

Com base no modelo genérico apresentado na Figura 34, é possível definir a representação de cada uma das missões do exemplo acima, seguindo a proposição apresentada na Figura 47. Uma simplificação foi feita (representação dos estados finais, sem os círculos duplos), com o objetivo de tornar o entendimento do modelo mais fácil. Assim, todos os estados dos modelos devem ser considerados marcados.

Considerando os modelos apresentados, algumas ponderações devem ser feitas, com o objetivo de esclarecer algumas questões particulares do exemplo:

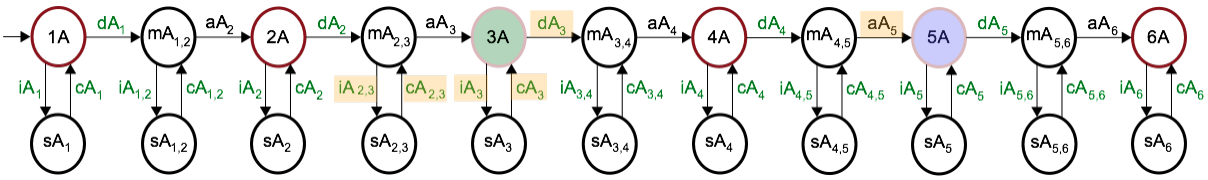
[3]FIFO: First In First Out - política de gerenciamento/atendimento de solicitações de recursos, onde as demandas mais antigas tem prioridade de atendimento.

Figura 46 – Um exemplo de duas missões sendo executadas em uma região em comum.

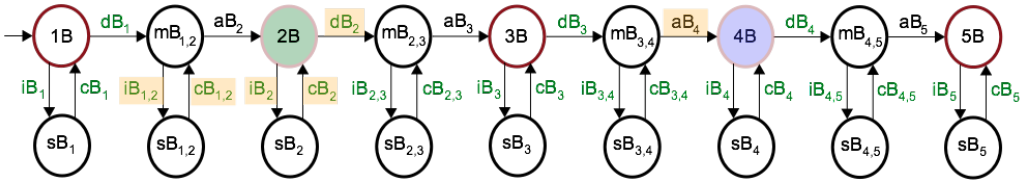


Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Figura 47 – Representação das missões A e B associadas ao exemplo da Figura 46, através de DES.



(a) DFA da missão A.



(b) DFA da missão B.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

- O exemplo aqui apresentado será discutido também no Capítulo 6, onde o detalhamento dos cálculos da região de conflito é apresentado e, dentre eles, está o fato dos *waypoints* associados aos pontos que antecedem a região de conflito terem sido deslocados[4] (do *waypoint* 4 para o *waypoint* 3, na missão A, e do *waypoint* 3 para o *waypoint* 2, na missão B);

- Em cada uma das missões, foram marcados 6 eventos e dois estados, sendo que eles estão associados com identificação da região de conflito;

- Os *waypoints* de entrada e saída da região de conflito, relativos à missão A, são: 3 e 5 (referentes aos estados 3A e 5A, respectivamente);

- Os *waypoints* de entrada e saída da região de conflito, relativos à missão B, são: 2 e 4 (referentes aos estados 2B e 4B, respectivamente);

- Os eventos dA_j e dB_j representam as partidas dos *waypoints* j de cada missão (associados aos estados jA e jB), sendo eles eventos controláveis;

- Os eventos aA_j e aB_j representam as chegadas aos *waypoints* j de cada missão (associados aos estados jA e jB), sendo eles eventos não-controláveis;

- Os eventos iA_j e iB_j representam as interrupções associadas aos *waypoints* j, sendo eles eventos controláveis;

- Como no caso anterior, o mesmo ocorre para os eventos $iA_{j,k}$ e $iB_{j,k}$, associados aos estados $mA_{j,k}$ e $mB_{j,k}$, respectivamente;

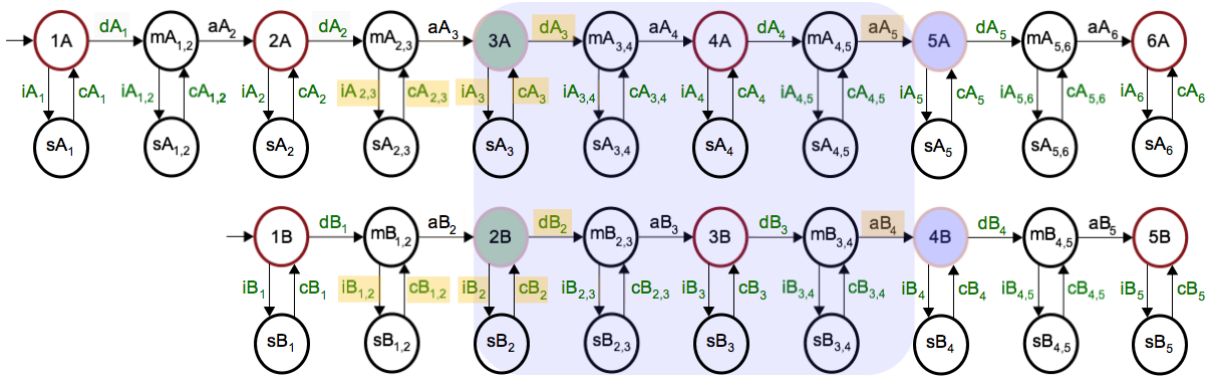
- Os eventos cA_j e cB_j representam o encerramento das interrupções associadas aos *waypoints* j (associados aos estados sAj e sBj), sendo eles eventos controláveis; e

- Como no caso anterior, o mesmo ocorre para os eventos $cA_{j,k}$ e $cB_{j,k}$, associados aos estados $sA_{j,k}$ e $sB_{j,k}$, respectivamente.

Outro detalhe a ser destacado está no fato dos eventos do tipo d (partida de um *waypoint*) e i (interrupção de uma missão, em um determinado *waypoint*) possuírem um comportamento excludente, ou seja, a ocorrência de um implica na inviabilidade da ocorrência do outro, considerando cada um dos *waypoints*.

Com o objetivo de tornar mais clara a relação entre as missões, no que diz respeito a caracterização da região de conflito, na Figura 48 apresenta-se a associação dessa região com

Figura 48 – Associação das duas missões com a região de conflito.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

os estados de cada modelo. Assim, os estados associados aos *waypoints* de entrada e saída da região de conflito são identificados (3A/5A e 2B/4B).

A formulação de uma especificação de controle envolve a identificação dos eventos associados à região de conflito e, neste sentido, os apontamentos feitos na sequência são relevantes:

- Em cada uma das situações, a ocorrência de um dos eventos (dA_3 ou dB_2) indica que a região em destaque foi ocupada por uma das aeronaves, e que não deve ser ocupada pela outra;

- Os eventos de interrupção ($iA_{2,3}$, iA_3, $iB_{1,2}$ e iB_2) devem ocorrer para que uma missão seja interrompida, caso a outra tenha entrado na região de conflito; e

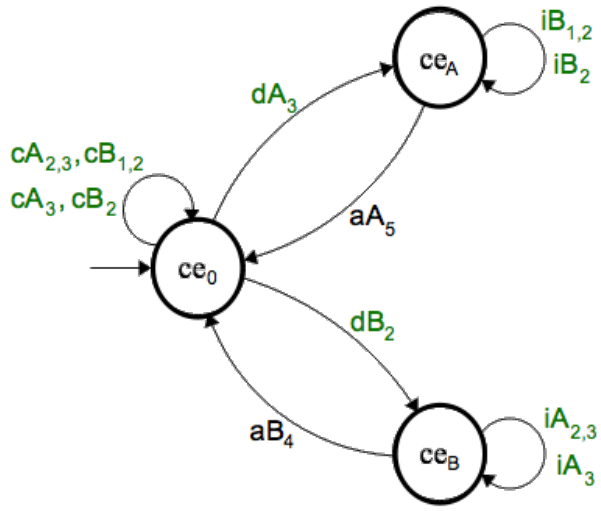
- A observação da saída de uma das aeronaves da região de conflito, através do evento aA_5 ou do evento aB_4 possui o significado da liberação da região de conflito.

Com base nas informações apresentadas, o autômato mostrado na Figura 49 representa a especificação de controle que deve ser usada para resolver o problema de conflito em análise. Trata-se, de fato, da aplicação de uma solução clássica, chamada de "exclusão mútua", na qual a ocupação do espaço em questão, por uma aeronave, impede que outra avance nesse mesmo sentido.

Para obter o DFA que representa o comportamento global do sistema (G) em malha aberta (i.e., o comportamento das duas missões sendo executadas sem interferência externa), é preciso executar a composição síncrona dos modelos associados às duas missões (Figura 48). Essa composição resulta em um autômato G com 396 estados, o qual não é mostrado aqui uma vez que ele não agrega informação relevante.

[4] O deslocamento dos pontos ocorre devido a adoção de uma distância de segurança, entre as aeronaves.

Figura 49 – Especificação de controle associada à região de conflito identificada no exemplo.



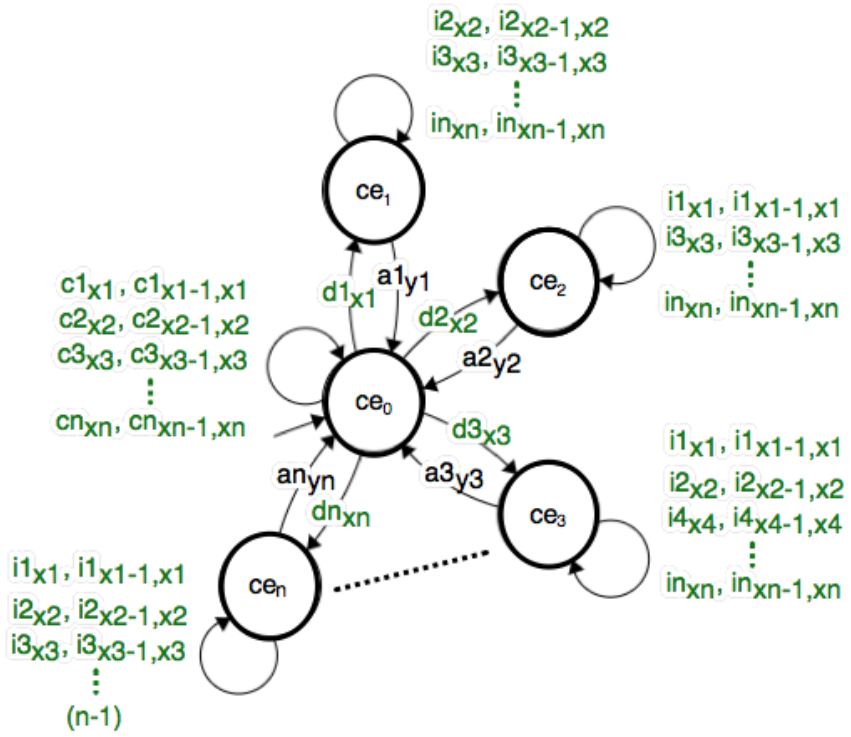
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Conforme apresentado no Capítulo 3, o próximo passo na síntese do supervisor consiste em encontrar o autômato R, que representa os comportamentos fisicamente possíveis (previstos nos modelos das missões) que atendem às especificações de controle. Fazendo-se então a composição síncrona $R = G||E$ obtém-se um DFA com 114 estados. Vale lembrar que a linguagem representada por esse DFA é dada por $L_m(R) = K$ e representa o comportamento desejado para o sistema em malha fechada, o qual pode não ser controlável. Assim, é necessário obter a máxima sublinguagem de K que é controlável em relação à L(G), ou seja, calcular $\mathrm{SUP_C}$(G, K). Conforme previsto, esse cálculo resultou no mesmo DFA de 114 estados, o que significa que a linguagem K é controlável e, dessa forma, a própria especificação de controle (E) pode ser usada como lógica de controle. Em outras palavras, para a solução do problema de conflito desse exemplo pode-se utilizar como controlador (supervisor) o DFA mostrado na Figura 49, o qual possui três estados e 12 transições, sem a necessidade de utilizar um modelo mais complexo (de 114 estados).

Considerando que todas as missões possuem como característica, em termos da sua execução desde o início do planejamento até o último *waypoint*, uma evolução sequencial, é possível formular uma especificação de controle genérica que faça todas as restrições de controle, considerando um conjunto de n missões envolvidas. A Figura 50 representa essa solução, no sentido de representar a solução clássica de uma forma genérica.

Assim, cada estado da especificação de controle determina a condição observada na região de conflito em destaque. Por exemplo, quando o estado $\mathrm{ce_0}$ é o estado atual, ele representa a disponibilidade de acesso à região de conflito, pois nenhuma aeronave está ocupando o espaço aéreo associado a tal região. Quanto aos demais estados, quando um deles for o estado atual,

Figura 50 – Especificação de controle genérica, associada a uma região de conflito que envolve *n* missões.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

significa que a aeronave associada a esse estado está ocupando a região de conflito, impedindo que as demais aeronaves (que estão executando suas missões naquele momento) tenham acesso à essa região. Sendo assim, cada aeronave com a missão ativa e que se encontrar próxima à região de conflito deverá aguardar o momento adequado para ocupar o espaço em destaque.

5.4 PROPOSTA DE UM MODELO GENÉRICO PARA O TRATAMENTO DO PROBLEMA DE BLOQUEIO DE MISSÕES

Conforme mencionado anteriormente, o exemplo tratado neste capítulo faz uso de um cenário envolvendo um recurso compartilhado, associado à necessidade de definir pontos de reabastecimento. Assim, um conjunto de estações de reabastecimento é definido, e o coordenador fica responsável pelo gerenciamento desse recurso, bem como o devido reposicionamento das aeronaves.

Seja um sistema que permite realizar o reabastecimento de aeronaves, com uma localização definida (latitude/longitude/altitude, considerando uma faixa de tolerância, em termos de variação desses valores) e do conhecimento de todos os operadores desse sistema. A Figura 51 traz uma ilustração, com o objetivo de iniciar a apresentação do problema, sendo que aquelas aeronaves que não utilizam a altitude especificada para a recarga estão indicando para o sistema

que não têm no seu planejamento uma parada para recarga, e as suas missões continuam sendo executadas como planejado, sem nenhuma ação de intervenção.

Figura 51 – Exemplo de duas missões planejadas, compartilhando um *waypoint* específico, caracterizado como base para recarga de combustível.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Para que o sistema possa atender as demandas associadas às missões sob sua coordenação, ele deve possuir um conjunto de bases para recarga de combustível (sistema de recargas - S_R, contendo *n* bases de recarga). O sistema também deve possuir um conjunto de bases (sistema de espera - S_E, contendo *m* bases de espera), visando atender as aeronaves que pretendem fazer o uso do recurso de recarga, mas que não podem ser atendidas no momento da chegada à localização do sistema, considerando a possibilidade de todas as bases de recarga se encontrarem ocupadas. A Figura 52 ilustra esses dois conjuntos de bases, sendo conjuntos de recursos finitos, e que possuem uma disposição territorial adequada para o encaminhamento das aeronaves. Existem três formas de encaminhamento das aeronaves:

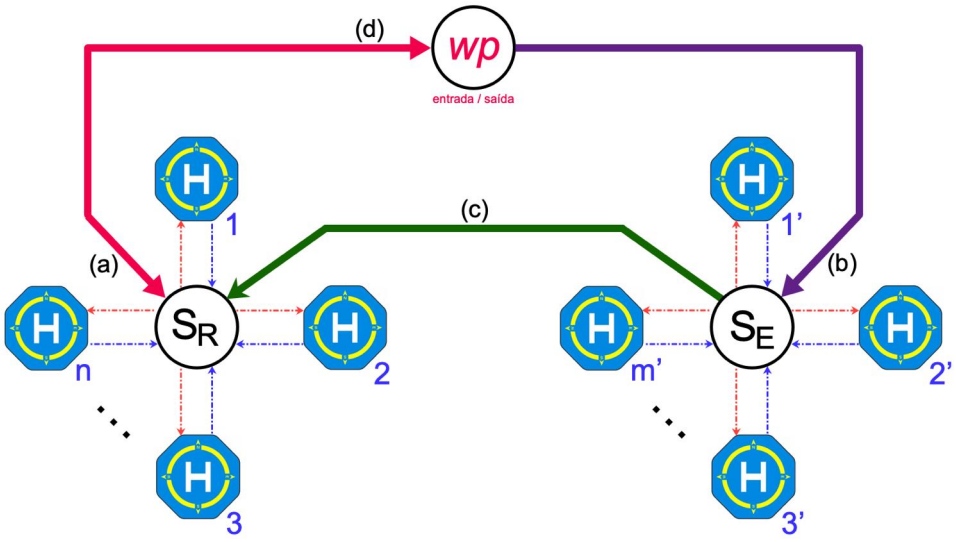
a) Encaminhamento de uma aeronave que se encontra no ponto de entrada do sistema (*wp*), com destino a uma base de recarga disponível (pertencente a S_R). E, da mesma forma, aquela que já se encontra em uma base de recarga (após o seu abastecimento), e que deve ser redirecionada para a sua missão original, através de *wp*;

b) Encaminhamento de uma aeronave que se encontra no ponto de entrada do sistema (*wp*), com destino a uma base de espera disponível (pertencente a S_E), pois não existe base de recarga disponível no momento; e

c) Encaminhamento de uma aeronave que se encontra em uma base de espera (pertencente a S_E), no momento em que uma base de recarga se torna disponível, redirecionando a aeronave para a base de recarga livre.

A localização de cada uma das bases (tanto de S_R como de S_E) é distinta das demais, sendo associada a uma trajetória única entre o ponto de entrada no sistema (S_R ou S_E) e a sua posição. Assim, o sistema de coordenação tem a capacidade de gerenciar a movimentação das aeronaves, visando garantir a segurança durante esse deslocamento.

Figura 52 – Organização das bases de recarga (S_R) e de espera (S_E), com destaque para: (a) o encaminhamento das aeronaves para as bases de recarga, quando existir disponibilidade, e posterior redirecionamento para a missão original (d); (b) o encaminhamento das aeronaves para as bases de espera, quando não existir base de recarga disponível; e (c) o encaminhamento das aeronaves que se encontram nas bases de espera, quando uma base de recarga estiver disponível.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Quando uma aeronave alcança a localização que identifica a estação de recarga (*wp*), o sistema de coordenação deve verificar a situação dos recursos existentes e, caso exista base de recarga disponível, ele deve proceder da seguinte forma:

- Suspender a missão da aeronave, atualmente em execução;
- Carregar a nova missão a ser executada, pois é feito o replanejamento que envolve o deslocamento da aeronave entre o ponto de entrada do sistema (*wp*) até a base de recarga disponível, passando pelo ponto de entrada das bases de recarga (S_R);
- Dar início ao abastecimento, após a chegada da aeronave à base de recarga; e
- Após a finalização do abastecimento, dar início à missão que representa a continuidade da missão original, com início desde a posição atual da aeronave (recarga), passando pelo

ponto de entrada das bases de recarga (S_R) e pelo ponto de entrada do sistema (*wp*), para então dar seguimento à missão original.

No entanto, se não existe uma base de recarga disponível para o atendimento de uma aeronave que alcançou a localização da estação de recarga (*wp*), o sistema de coordenação deve encaminhar essa aeronave para uma base de espera disponível (b), sendo que os seguintes procedimentos devem ser adotados:

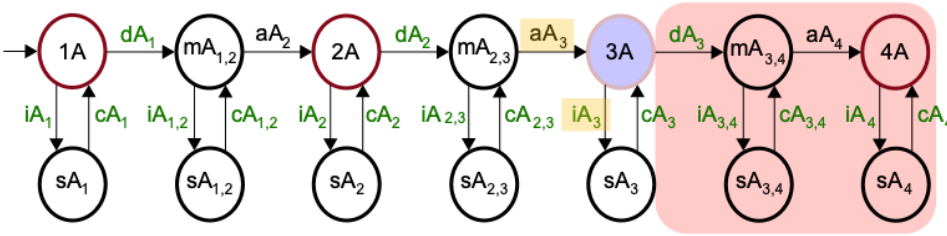
- Suspender a missão da aeronave, atualmente em execução;
- Carregar a nova missão a ser executada, pois é feito o replanejamento que envolve o deslocamento da aeronave entre o ponto de entrada do sistema (*wp*) até a base de espera disponível, passando pelo ponto de entrada das bases de recarga (S_E);
- Aguardar a indicação de disponibilidade de uma base de recarga;
- Promover a execução da missão (replanejamento) que permite realizar o deslocamento seguro entre a base de espera, na qual a aeronave se encontra, passando pelo ponto de entrada das bases de espera (S_E), seguindo em direção ao ponto de entrada das bases de recarga (c), para então dirigir a aeronave para a base de recarga disponível; e
- Seguir com o procedimento de abastecimento (descrito anteriormente), para o posterior reencaminhamento da missão original.

Dando continuidade ao exemplo da Figura 51, no qual a estação de recarga está associada aos *waypoints* 3 e 4 das missões A e B, respectivamente, a modelagem das missões envolvidas em uma região de bloqueio segue o mesmo padrão definido para o caso das regiões de conflito (modelos de DES). Assim, as duas missões podem ser modeladas de acordo com a Figura 53, na qual foi destacada a etapa de cada missão (após os *waypoints* 3A e 4B) associada à necessidade de replanejamento, após cada procedimento de recarga de combustível.

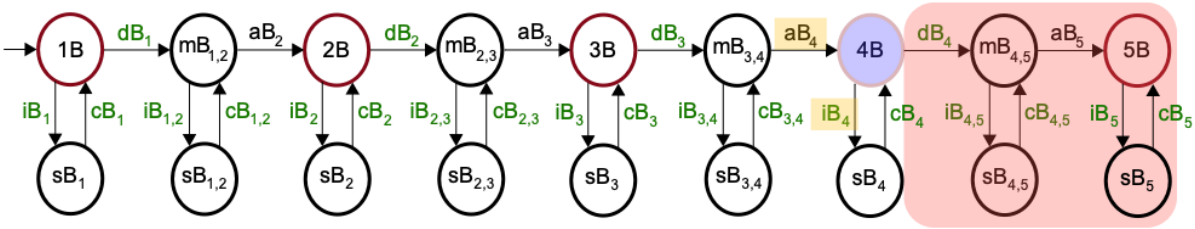
A atuação do sistema de coordenação, em relação ao tratamento do problema de bloqueio de recurso, ocorre de forma diferente daquela descrita para o problema associado a regiões de conflito. No caso da especificação de controle para uma região de conflito, é calculada uma especificação de controle que pode envolver um conjunto de duas ou mais missões. Já no caso da especificação de controle que deve tratar uma situação de bloqueio, cada missão possui a sua especificação de controle própria.

Neste sentido, a apresentação que se segue é formulada somente a partir da missão A, referente ao exemplo em discussão, pois o procedimento para a missão B (ou qualquer outra missão) é equivalente, com a distinção apenas quanto a identificação da missão.

Figura 53 – Representação das missões A e B (referente ao exemplo da Figura 51), através de DES, com destaque para etapa associada ao replanejamento de cada missão, após a recarga de combustível.



(a) DFA da missão A.

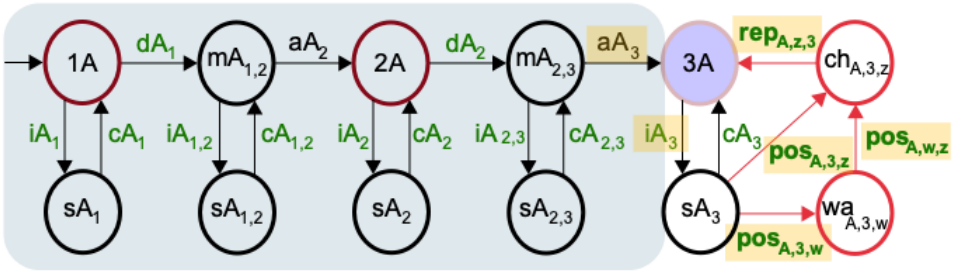


(b) DFA da missão B.

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Assim, a Figura 54 destaca a modificação realizada na missão A, considerando a necessidade de recarga de combustível no *waypoint* 3A. Tal representação foi feita de forma abstrata, considerando os eventos $pos_{A,3,W}$, $pos_{A,3,Z}$ e $rep_{A,Z,3}$, pois eles representam uma ação de posicionamento da aeronave que pode ser descrita com apenas um único *waypoint* de destino, como também um conjunto destes pontos (por exemplo, devido a necessidade de promover desvios na trajetória, com o objetivo de evitar obstáculos do ambiente).

Figura 54 – Modificação da missão A (referente ao exemplo da Figura 51), com a caracterização do uso do recurso compartilhado.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Os eventos de posicionamento possuem os seguintes significados:

- O evento $pos_{A,3,W}$ indica o movimento (ou uma série de movimentos, em termos de *waypoints*) em direção a um ponto de espera w, partindo do *waypoint* 3A;

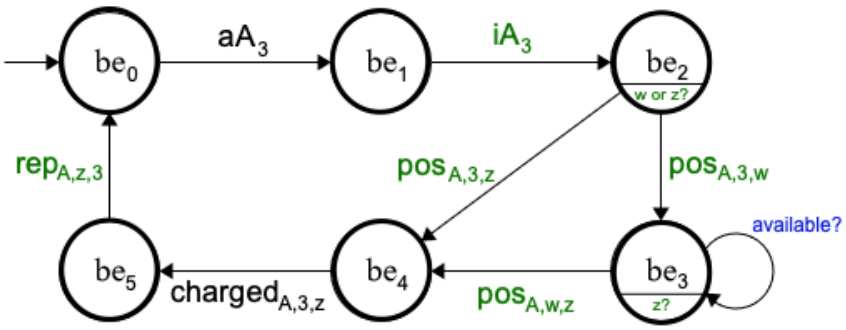
- O evento $pos_{A,3,z}$ indica o movimento (ou uma série de movimentos, em termos de *waypoints*) em direção a um ponto de recarga z, partindo do *waypoint* 3A;
- O evento $pos_{A,w,z}$ indica o movimento (ou uma série de movimentos, em termos de *waypoints*) em direção a um ponto de recarga z, partindo do *waypoint* w; e
- O evento $rep_{A,z,3}$ indica o movimento de reposicionamento da aeronave, sendo realizado através de um ou mais movimentos (em termos de *waypoints*), em direção ao ponto original da missão, associado no momento da identificação da região de bloqueio (*waypoint* 3A).

A especificação de controle para a missão A que trata da região de bloqueio é apresentada na Figura 55. O destaque dessa especificação está no uso de um transdutor (autômato com saída, associando ações com estados do modelo). Tais ações são executadas a partir do momento em que o estado é alcançado.

Assim, a especificação determina que o evento que identifica a chegada ao *waypoint* 3A deve ser observado, sendo que a missão deve ser interrompida (evento iA_3) para ser encaminhada para uma base de recarga.

Os estados be_2 e be_3 possuem ações/saídas associadas à identificação de disponibilidade de uma base de recarga (z) ou de espera (w), sendo que os eventos que ocorrem após esses estados terem sido alcançados dependem dessa identificação para ocorrerem, seja para posicionar a aeronave para uma base de recarga (evento de maior prioridade) ou uma base de espera. No estado be_3 existe um evento (available?) responsável por consultar se existe uma base de recarga disponível, atualizando, então, o sistema de coordenação com essa informação.

Figura 55 – Especificação de controle associada ao tratamento da região de bloqueio, específica para a missão A (referente ao exemplo da Figura 51).

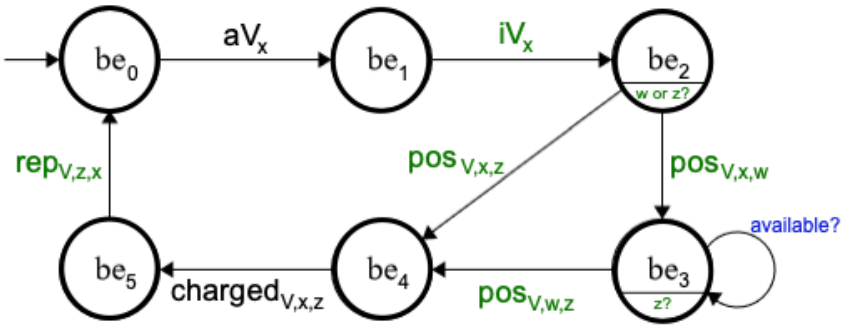


Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Com o fim da recarga de combustível, a aeronave é reposicionada para a sua localização original (3A), sendo que a missão original é resgatada, no sentido dela ser continuada, a partir do ponto de parada antes do momento da recarga.

A partir da discussão feita nesse exemplo, apresenta-se a seguir um modelo genérico para a especificação de controle destinada a tratar do problema de bloqueio de uma missão. Tal modelo é apresentado na Figura 56.

Figura 56 – Especificação de controle genérica, associada ao tratamento de uma região de bloqueio.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

Essa especificação pode ser utilizada de forma ampla, como já mencionado, devido a forma como as missões são caracterizadas (os operadores definem as suas missões levando em consideração apenas as condições do ambiente e os recursos compartilhados disponíveis). Outro fator está no gerenciamento individualizado do sistema de coordenação, que define qual base (de recarga ou de espera) deve ser utilizada, fazendo também a contabilidade do uso dessas bases.

5.5 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foram discutidos dois conceitos associados aos problemas de conflito e de bloqueio de missões.

Duas ou mais missões podem se envolver em uma situação de conflito quando elas possuem uma região em comum associada às suas definições de missão, caracterizando um risco em potencial de colisão.

Duas ou mais missões podem se envolver em uma situação de bloqueio quando elas possuem uma posição específica (*waypoint*) de suas missões em comum, caracterizando uma possível proibição em alcançar tal posição.

A resolução dos problemas de conflitos de ocupação de um espaço aéreo em comum envolve a interrupção de uma ou mais missões, visando o benefício de uma determinada missão que deve ser priorizada/executada, levando em conta alguns elementos de análise. O posicionamento geográfico será o elemento de análise adotado neste trabalho, mas ele pode ser composto

de outros elementos, como a adoção de uma função complementar de custo, que poderia levar em conta, por exemplo, o total de combustível remanescente e a distância ainda a ser percorrida.

A segunda situação tratada neste trabalho envolve cenários onde recursos compartilhados estão disponíveis para um conjunto de aeronaves, considerando uma determinada posição no espaço aéreo que é coordenada por um sistema que trata de situações de bloqueio de recursos, já que os recursos são limitados/finitos. Neste caso, o sistema deverá identificar quais aeronaves poderão fazer uso dos recursos compartilhados, bem como dar o encaminhamento para as demais aeronaves que não podem fazer uso de tais recursos, de forma imediata.

Como recurso compartilhado, pode-se identificar também uma determinada trajetória comum, em uma região sob a responsabilidade do sistema de coordenação, que por uma característica do ambiente, permite o deslocamento de apenas um conjunto finito de aeronaves ao mesmo tempo. Assim, as demais aeronaves devem aguardar até que o recurso solicitado esteja disponível, e o sistema pode gerenciar o destino destas aeronaves que estão aguardando, reposicionando-as em locais próprios, com o objetivo de preservar a quantidade de combustível remanescente, bem como posicioná-las em um local mais seguro.

Outra característica relevante, associada às propostas apresentadas, está no recurso de replanejamento de missões, fundamental para todas as soluções apresentadas. Esse recurso será destacado no Capítulo 7, no momento da apresentação dos resultados com a implementação de um sistema de coordenação centralizada de missões de UAV.

Os modelos genéricos das especificações de controle são utilizados a partir do momento em que os estados associados aos *waypoints*, que definem o tipo de problema, são identificados.

Resumo das contribuições deste capítulo: Este capítulo apresentou duas contribuições fundamentais para o desenvolvimento de um sistema de coordenação centralizado de missões de UAV.

- A definição de modelos genéricos de especificações de controle para tratar de dois problemas comuns, em se tratando de missões de UAV; e
- A identificação de recursos suficientes para a execução automática de medidas de correção, através da adoção de um sistema de coordenação.

O próximo capítulo apresenta a definição de um *framework* de coordenação centralizada de UAV, com a descrição de suas funcionalidades, bem como procedimentos complementares para a identificação dos pontos de atuação, considerando os problemas identificados.

6 DEFINIÇÃO DE UM FRAMEWORK DE COORDENAÇÃO CENTRALIZADA DE MÚLTIPLAS MISSÕES DE UAVS

Conforme discutido anteriormente, para a definição de uma missão, o operador faz uso de uma GCS, ferramenta computacional que lhe permite planejar cada missão, definindo estratégias de ação e atuando sobre as aeronaves sob seu controle. O objetivo principal está em garantir que cada missão previamente planejada seja executada sem erros.

No entanto, como cada operador tem o conhecimento das suas missões, mas faz uso de um espaço aéreo compartilhado, seus recursos isolados não lhe garantem que outras aeronaves venham ocupar o mesmo ambiente e ao mesmo tempo.

Neste sentido, um UTM que envolve a coordenação de missões deve tratar do compartilhamento de recursos, e para isto, questões associadas com restrições espaciais e temporais devem ser consideradas.

A coordenação espacial de missões envolve o compartilhamento do espaço aéreo em uso por um conjunto de UAV, no sentido de garantir que cada aeronave seja capaz de desenvolver a sua missão planejada, mas considerando também os planos das demais missões envolvidas em uma região, bem como questões associadas com obstáculos em potencial. Já a coordenação temporal de missões depende de uma sincronização entre diferentes veículos, nos mais diversos tipos de aplicações.

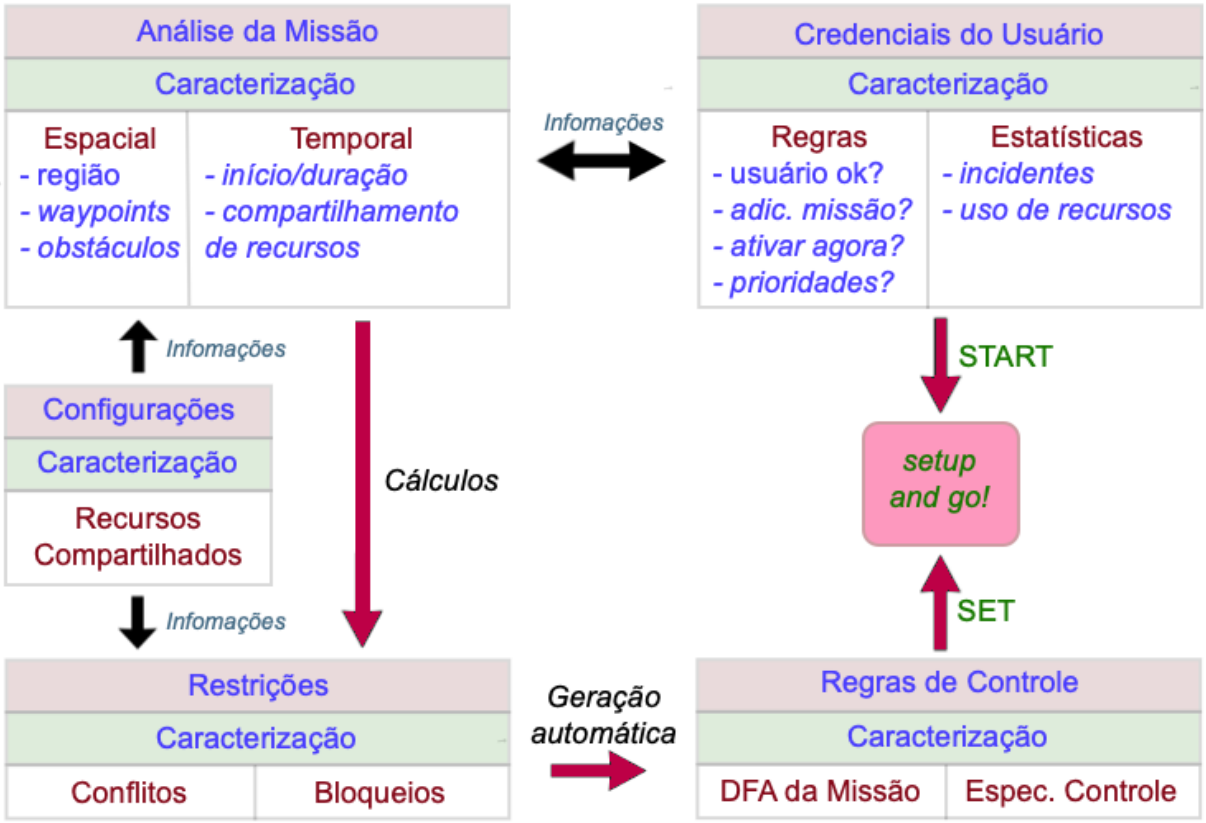
O *framework* trata da problemática associada aos dois tipos de restrições identificados, envolvendo uma região no espaço (previamente definida) que é controlada por um sistema que desempenha o papel de coordenador das missões. A definição de um *framework* para o coordenador representa uma abstração do conjunto de elementos do sistema que promove a sua funcionalidade primária, bem como detalhes funcionais que tratam de questões específicas.

6.1 APRESENTAÇÃO DA ESTRUTURA DO FRAMEWORK PROPOSTO

O *framework* do coordenador de missões, cuja representação é ilustrada na Figura 57, pode ser definido a partir de 5 funcionalidades básicas:

- Credenciais do usuário;
- Análise da missão;
- Configurações;
- Restrições; e
- Regras de controle.

Figura 57 – *Framework* proposto neste trabalho.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

As relações existentes entre as funcionalidades identificadas pelo *framework* podem ser identificadas como: relações principais, que promovem a geração de resultados (alcançados em uma determinada funcionalidade) identificados como fundamentais para que uma segunda funcionalidade desempenhe o seu papel; e as relações complementares, que fomentam informações adicionais para uma funcionalidade desempenhar o seu papel. Assim, são identificadas 4 relações principais no *framework* proposto:

- Cálculos: associada às funcionalidades de "análise da missão" e de "restrições", essa relação permite que as restrições associadas a uma missão sejam identificadas, sendo necessárias informações (complementares) a respeito da caracterização da missão e das configurações associadas aos recursos compartilhados existentes;

- Geração automática: associada às funcionalidades de "restrições" e de "regras de controle", essa relação possibilita a criação de regras de controle a partir dos resultados obtidos através da funcionalidade de "restrições", identificando cada modelo formal da missão como também as especificações de controle associadas a cada uma das restrições identificadas;

- SET: associada às funcionalidades de "regras de controle" e de ativação da missão ("*setup and go!*"), é capaz de identificar que a missão está habilitada para ser iniciada, em termos das suas configurações associadas ao sistema de coordenação; e

- START: associada às funcionalidades de "credenciais do usuário" e de ativação da missão ("*setup and go!*"), é capaz de identificar que a missão está habilitada para ser iniciada, em termos das informações associadas ao usuário do sistema de coordenação.

Assim, com a identificação das relações associadas ao modelo proposto, as funcionalidades identificadas no modelo são apresentadas de forma detalhada a seguir.

6.1.1 Credenciais do usuário

Um sistema de coordenação de missões de UAV necessita de uma associação entre as missões que ele coordena com os usuários do sistema, que são os operadores destas missões. Assim, a funcionalidade associada às credenciais do usuário tem como principal característica a promoção desta associação, sendo que para cada missão deve existir uma aeronave associada.

O credenciamento de um usuário envolve a sua identificação (registro como usuário do sistema), bem como a identificação das aeronaves que ele utiliza. No entanto, apesar das informações associadas a uma aeronave não possuírem uma relação direta com as missões que ela possa executar (com exceção de informações sobre a autonomia de voo, classificação da aeronave quanto ao pouso e decolagem, e ferramentas utilizadas para a execução de tarefas específicas), informações sobre as características da aeronave, horas de voo executadas, incidentes ocorridos, entre outras informações, são relevantes para o sistema de coordenação, no sentido de permitirem que um histórico seja criado para cada aeronave. Com isto, estatísticas de voo podem ser geradas, disponibilizando conhecimento para gestores do sistema de coordenação, como também para os demais usuários.

Conforme ilustrado no Capítulo 1 (Figura 2), cada operador deve associar as suas aeronaves a uma GCS, sendo definida também a necessidade de um módulo batizado como "Cred/Com", responsável pela identificação do operador (credenciais) e pela associação da GCS utilizada com o coordenador, em termos de recursos de comunicação.

O conceito associado ao módulo "Cred/Com" também remete a possibilidade da relação entre a GCS e o sistema de coordenação ser transparente, no sentido de possibilitar o uso de diferentes protocolos de comunicação entre eles. Em termos de configuração da rede de comunicação, o módulo de comunicação deve relacionar a configuração da rede local com o canal de comunicação (seja uma conexão direta ou pelo intermédio da Internet, por exemplo), para que a comunicação fim-a-fim ocorra sem problemas.

É importante destacar que as aeronaves possuem recursos configuráveis, permitindo a associação de uma abordagem de emergência no caso da observação de uma falha de comunicação, sendo uma configuração comum o comando de pouso imediato ao identificar essa falha.

6.1.2 Análise da missão

Basicamente, a descrição de uma missão (em termos do uso de uma GCS) possui elementos básicos associados à sua evolução. Assim, não existe qualquer recurso nesta descrição que a relacione com possíveis ações de controle definidas por um sistema de coordenação.

Com isto, tal funcionalidade deve atender a necessidade de caracterizar uma missão, agregando recursos relevantes para a sua associação com os comandos de um sistema de coordenação, que atua perante situações caracterizadas com a necessidade de uma intervenção, por parte do sistema.

A análise espacial de uma missão remete a região na qual ela foi definida, considerando os *waypoints* e o território vinculado. Os dados levantados são úteis para a identificação de situações que podem caracterizar uma região de conflito.

A análise temporal de uma missão está associada ao momento de início da missão, sendo possível também a avaliação da sua duração. Isto se deve ao fato da missão possuir definições associadas à velocidade da aeronave, o que torna possível ponderar a respeito do momento no qual a aeronave iniciou a sua missão, permitindo avaliar, por exemplo, quando ela poderá alcançar uma determinada localização associada a um recurso compartilhado.

Assim, esta funcionalidade deve contemplar recursos implementados que visam a geração de uma representação da missão, como aquelas definições apresentadas no Capítulo 4.

6.1.3 Configurações

O sistema de coordenação deve permitir que alguns elementos do sistema sejam configuráveis, permitindo ao coordenador associar (tais configurações) a sua interação com o conjunto de missões em andamento.

A configuração de tal sistema, considerando a proposta apresentada no Capítulo 5, está vinculada aos recursos compartilhados pelos quais o sistema de coordenação é responsável em gerenciar. Conforme apresentado, são configurados os *waypoints* que estão associados a tais recursos, sendo que tais informações devem ser conhecidas também pelos operadores das missões, para que eles possam estar cientes de cada localização, e assim fazer o devido uso no planejamento de suas missões.

Por outro lado, seria possível associar políticas de atendimento a qualquer recurso, fazendo uso de regras de prioridade para um determinado grupo de operadores. Como exemplo, é possível associar o uso de uma base de abastecimento de forma diferenciada, considerando que os operadores podem ter níveis de prioridade distintos quanto ao atendimento , implicando no uso de uma política de prioridades, quanto ao atendimento à fila de espera (considerando as aeronaves que alcançaram o ponto de recarga), mas estão aguardando em bases de espera.

6.1.4 Restrições

Essa funcionalidade está associada com a caracterização das possíveis regiões de conflito e bloqueio, levando em consideração a representação de cada missão, obtida através da funcionalidade de análise de missões.

Para promover a geração automática das especificações de controle, os procedimentos especificados no Capítulo 5 devem ser implementados, sendo que procedimentos complementares são apresentados ainda neste capítulo.

6.1.5 Regras de controle

A cada nova missão cadastrada no sistema, o coordenador deve atualizar as suas informações de controle, gerando uma nova versão das ações de controle definidas para a operação do sistema.

É importante destacar que as regras de controle tornam-se ativas a partir do momento que o sistema de coordenação toma conhecimento (através do cadastramento das missões), mas o coordenador atua somente após o início de cada missão. Em outras palavras, as missões inativas não provocam um comportamento diferenciado do coordenador.

A proposta deste trabalho visa tratar de duas situações comuns, quando se observa a caracterização da execução de múltiplas missões, considerando ainda o uso de uma região do espaço aéreo em comum. São eles:

- O problema de conflitos associado à ocupação do espaço aéreo, ao longo da trajetória que cada aeronave irá ocupar, de acordo com a missão estabelecida; e
- O problema que envolve recursos compartilhados limitados.

Os problemas de conflitos de ocupação de um espaço aéreo em comum necessitam de interrupções de uma ou mais missões, visando o benefício de uma determinada missão que deve ser priorizada/executada, levando em conta alguns elementos de análise. O posicionamento geográfico é o elemento de análise adotado neste trabalho.

Quanto a segunda situação, o coordenador deve identificar quais aeronaves podem fazer uso dos recursos compartilhados, bem como dar o encaminhamento para as demais aeronaves que não podem fazer uso de tais recursos de forma imediata.

Neste trabalho, o exemplo utilizado trata da necessidade de pontos de reabastecimento (conjunto de bases de reabastecimento), caracterizado assim como um recurso compartilhado. Assim, o sistema de coordenação é responsável pelo gerenciamento desses recursos, bem como o devido reposicionamento das aeronaves, no caso de não existir bases disponíveis.

6.2 ANÁLISE DAS RESTRIÇÕES

Visando promover uma análise quanto a identificação de possíveis restrições, foi definida uma avaliação prévia de cada missão que venha a ser cadastrada no sistema. Assim, a descrição de cada missão define a ocupação do espaço associada à uma parcela da região que está sendo administrada pelo coordenador.

6.2.1 Identificação das regiões de conflito

A estratégia inicial para a identificação das regiões de conflito tem como base a divisão da região sob a responsabilidade do coordenador, em termos de quadrantes, como pode ser observado na Figura 58(a). Basicamente, um quadrante é uma região definida por lados de tamanhos iguais, com uma dimensão que deve estar de acordo com as características de atendimento do coordenador, da demanda esperada e das características geográficas da região atendida.

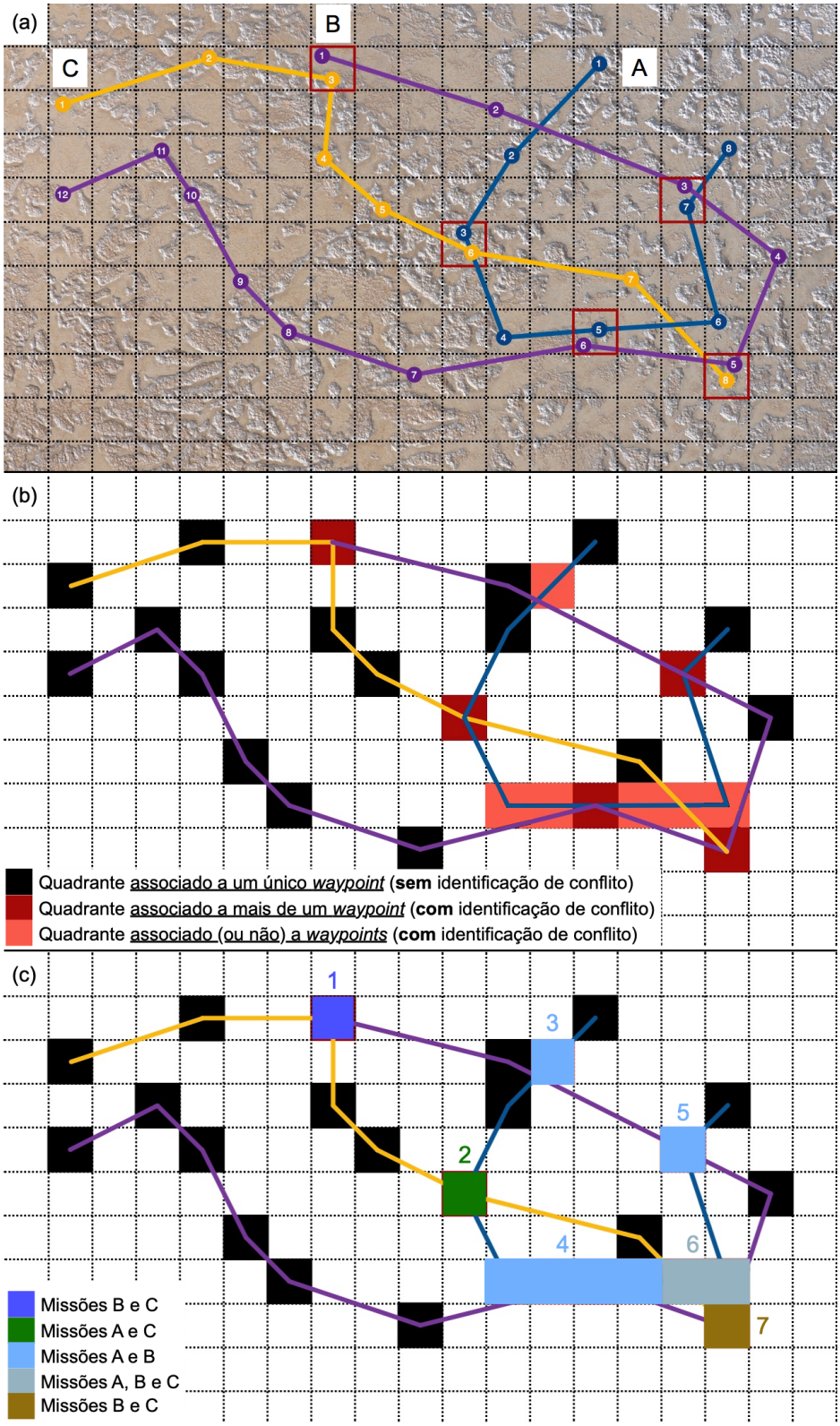
Assim, essa é uma configuração inicial que depende de uma avaliação criteriosa, pois erros de avaliação podem causar a sobrecarga de uma certa região identificada como sendo de conflito. Em outras palavras, a identificação de uma grande região de conflito pode levar a interrupções de missões de forma desnecessária, se as dimensões não forem observadas de forma detalhada.

A identificação dos quadrantes leva em consideração distâncias associadas a um plano cartesiano, ou seja, o coordenador precisa fazer a conversão de todas as coordenadas geográficas para esse plano de referência, sendo que essa estratégia foi adotada para simplificar os cálculos necessários para a identificação das regiões de conflito.

O exemplo da Figura 58 apresenta três missões, com as seguintes características:

- A missão A possui 8 *waypoints*, e o coordenador identifica que ela está envolvida em 5 regiões de conflito (regiões identificadas: 2, 3, 4, 5 e 6);

Figura 58 – Exemplo de uma região sob a responsabilidade de um coordenador, contendo as missões A, B e C, com a representação por quadrantes, associando-os aos *waypoints* e trajetórias entre dois ou mais pontos, bem como a identificação das regiões de conflito.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

- A missão B possui 12 *waypoints*, e o coordenador identifica que ela está envolvida em 6 regiões de conflito (regiões identificadas: 1, 3, 4, 5, 6 e 7); e
- A missão C possui 8 *waypoints*, e o coordenador identifica que ela está envolvida em 4 regiões de conflito (regiões identificadas: 1, 2, 6 e 7).

O algoritmo implementado realiza os cálculos através de uma execução cíclica, avaliando se uma nova missão foi registrada. Assim, apenas novas adições de missões geram demanda de cálculo para o coordenador. A primeira etapa do processo é representada pelo algoritmo abaixo:

Algoritmo 1: Associa cada *waypoint* da missão aos quadrantes, classificando os quadrantes quanto a condição de conflito.

```
while (is_new(mission)) do
    for (each wp_i in mission_wps) do
        include(wp_i, quadrants(i))
    for (each q in quadrants) do
        if |q| > 1 then
            include(q, quadrants_conflit)
```

Como resultado, o algoritmo identifica aqueles quadrantes que contêm mais de um *waypoint*, registrando essa informação no conjunto $quadrants_{conflit}$.

A segunda etapa consiste em fazer a associação entre dois quadrantes consecutivos, ou seja, agrupando dois ou mais quadrantes para identificar uma única região de conflito. Essa verificação é realizada através da análise da relação construída entre os *waypoints* e os quadrantes, no sentido de identificar a associação de vizinhança existente (Figura 58(c)).

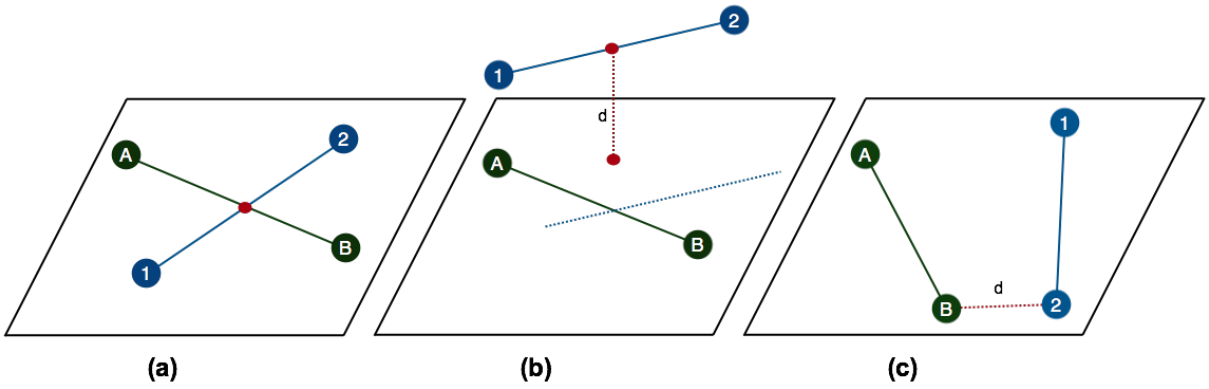
Existe ainda a necessidade de identificar regiões de conflito que não são formadas por pelo menos dois *waypoints* (Figura 58(b)), mas por um *waypoint* e uma trajetória sobre o quadrante em destaque, ou até mesmo nenhum *waypoint*, mas que existam trajetórias conflitantes. Seria o caso da região 3, que não possui nenhum *waypoint*, e para isto, o algoritmo que identifica os eventos associados ao acesso a essa região trata desta questão.

Fazendo uso de conceitos de geometria espacial, dois segmentos de reta podem representar deslocamentos de duas missões distintas, e esses segmentos podem ter um ponto em comum (intersecção) somente se for possível associar um único plano no espaço para esses segmentos. Na Figura 59 ilustram-se algumas relações entre dois segmentos de reta.

A análise por quadrantes permite fazer uma avaliação em termos de duas dimensões, e quando uma situação de conflito é identificada, o detalhamento é realizado através do procedimento agora em destaque.

Quando não existe um ponto de intersecção entre dois segmentos de reta, e ainda, esses segmentos não são paralelos, eles são ditos reversos, significando que eles estão em planos

Figura 59 – Identificação das relações entre dois segmentos de reta (associados a deslocamentos de missões): (a) com um ponto de intersecção entre dois segmentos de reta (no mesmo plano); (b) sem um ponto de intersecção entre os dois segmentos de reta (planos distintos); e (c) segmentos de reta no mesmo plano, mas sem um ponto de intersecção.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

diferentes, conforme ilustrado na Figura 59(b), onde existe um ponto em cada segmento que, juntos, caracterizam a distância (d) mínima entre eles. Existe também a possibilidade desses segmentos serem paralelos, caracterizando a existência de uma reta comum, perpendicular aos dois segmentos e que determina a distância fixa entre eles, ou não paralelos (como ilustrado na Figura 59(c), onde é identificada uma distância mínima entre eles).

Com os elementos aqui apresentados, a análise necessária para identificar regiões de conflito entre duas missões considera as relações entre os deslocamentos (identificados por segmentos de retas), considerando duas etapas:

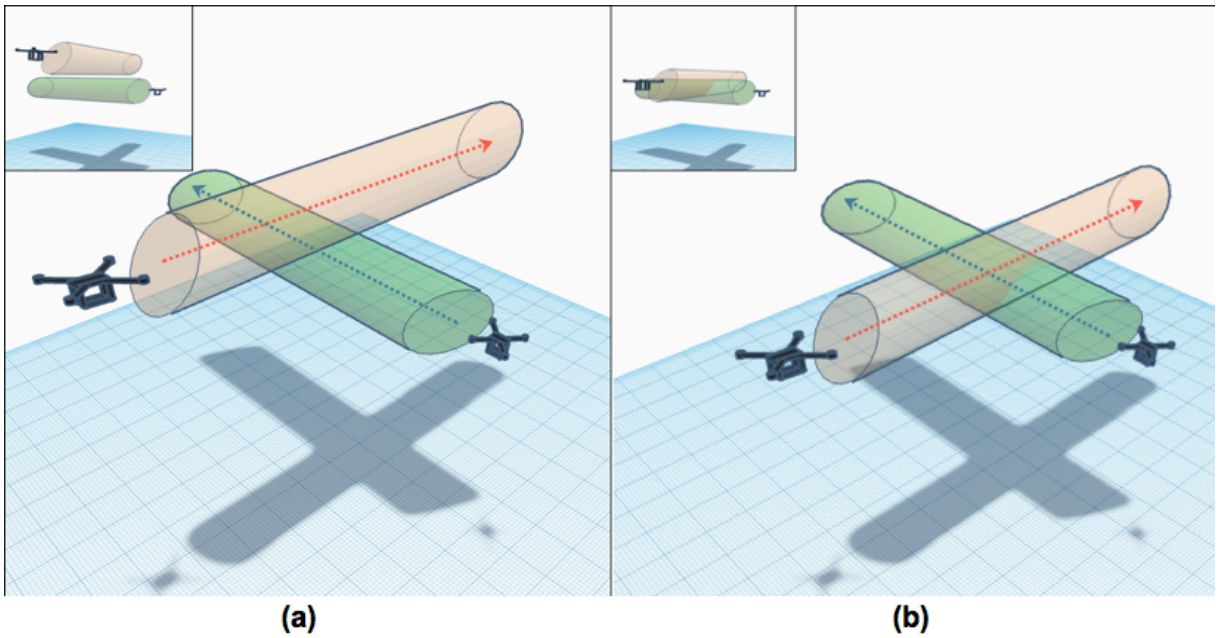
- a primeira análise pode ser realizada através da associação das trajetórias com equações de retas, transformando os pontos de coordenadas geográficas (latitude e longitude) para distâncias em metros, e promovendo a verificação da existência de pontos de interseção;

- a segunda análise considera uma distância entre as trajetórias (latitude, longitude e altitude), no sentido de verificar se ela está de acordo com um deslocamento seguro, prevendo que aeronaves devam se deslocar sempre com a consideração de uma garantia (distância segura – d_1), prevendo perturbações como o vento ou até mesmo a necessidade de mudanças de trajetórias pontuais que tem como objetivo evitar a colisão com objetos estáticos do ambiente.

Existe ainda a necessidade de relacionar cada conjunto de missões com uma determinada região de conflito, no sentido de caracterizar essa região de conflito de forma tal que o coordenador opere com um número significativo de missões, mas com a capacidade de limitar/adequar a região identificada. Assim, a distância segura será acrescida de uma dimensão de segurança

definida por cada coordenador (d_2). A Figura 60 traz uma representação importante para esta caracterização.

Figura 60 – Identificação de delimitadores seguros: (a) situação sem conflito; e (b) situação conflitante.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

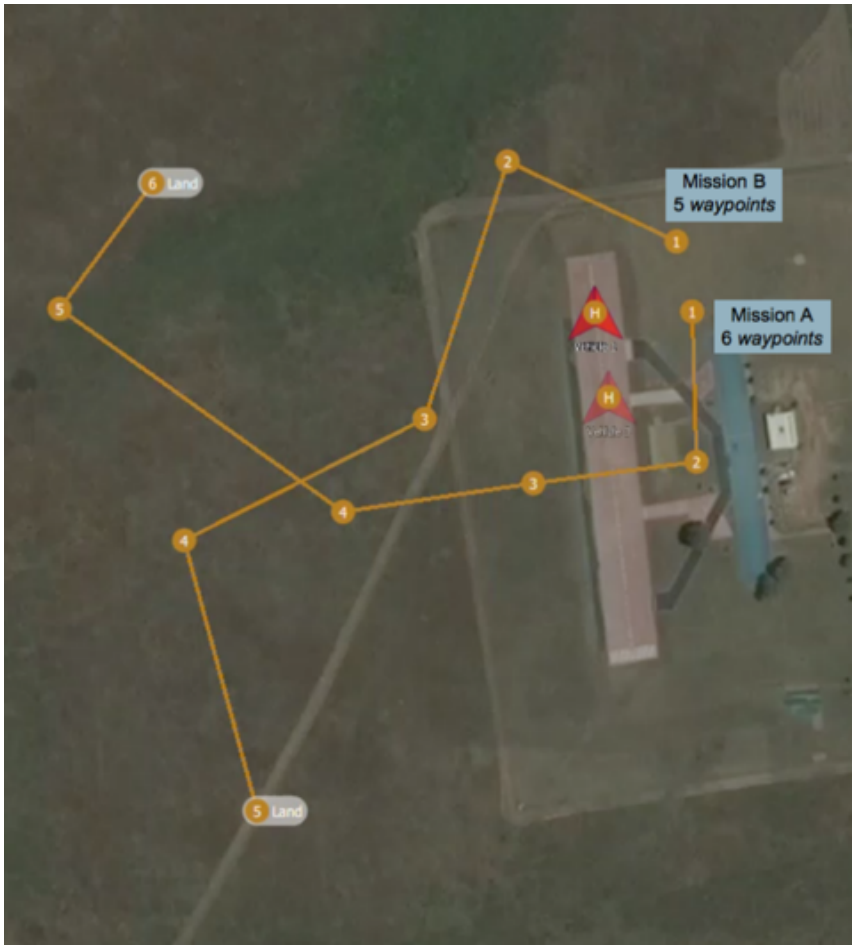
Os delimitadores seguros são representados por cilindros imaginários que envolvem a trajetória definida por uma missão, como se cada aeronave fosse envolvida por uma esfera (onde a aeronave é posicionada no seu centro), e o raio dessa esfera deve ser maior ou igual ao limite necessário para garantia de um deslocamento livre de interferências externas (d_1+d_2).

Como exemplo, uma distância segura poderia ser definida com o valor de 10 metros (d_1 = 10), e o raio de delimitação seria definido através do acréscimo de 15 metros (d_2 = 15), totalizando 25 metros associados a esse delimitador seguro (d_{total} = 25).

A identificação de uma região de conflito deve ser realizada pelo coordenador, a cada missão recebida através dos seus clientes (os operadores das missões). A explicação do algoritmo capaz de identificar tal região será feita em etapas, com o objetivo de destacar o conjunto de funcionalidades identificados neste trabalho. A Figura 61 ilustra o planejamento de duas missões conflitantes e será usada para subsidiar a discussão a respeito dessa região.

Neste momento, é importante destacar que o coordenador recebe as informações de uma missão, analisando cada posicionamento geográfico, relacionando essas informações de acordo com as demais missões já cadastradas. As missões apresentadas no exemplo (A e B) possuem uma localização geográfica em comum, caracterizando um conflito entre os *waypoints* 4-5 (mis-

Figura 61 – Representação do planejamento de duas missões (A e B).



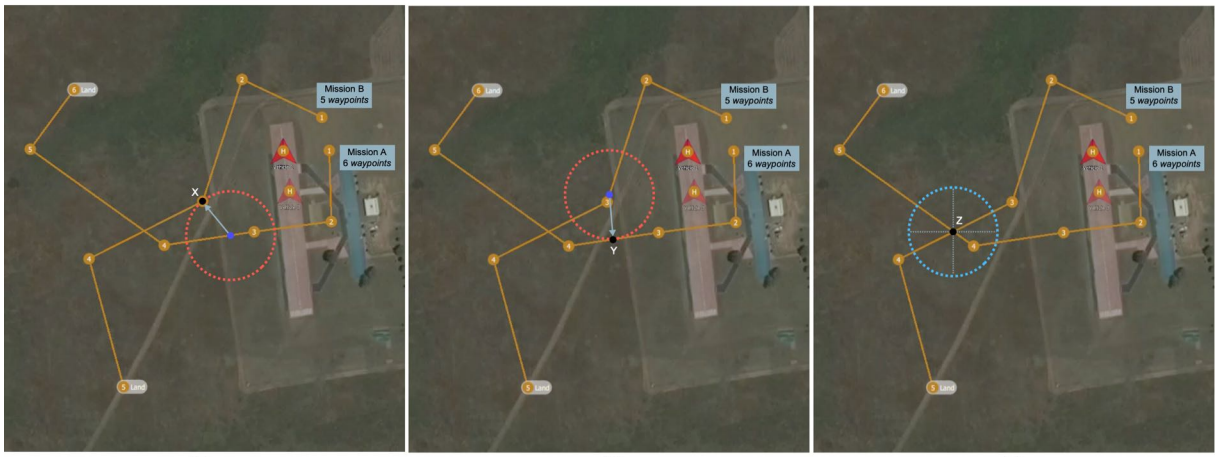
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

são A) e 3-4 (missão B). Isso implica na inadmissibilidade da ocupação dessa localização, ao mesmo tempo, pelas aeronaves envolvidas.

Uma maneira razoável de adquirir o conhecimento das missões consiste em comparar cada nova missão com a base de dados já do conhecimento do sistema. Neste sentido, considera-se a comparação entre as duas missões do exemplo, mas primeiro é preciso experimentar as formas de identificar uma região de conflito. Tais formas de reconhecimento de regiões de conflito estão representadas conforme a Figura 62.

As duas primeiras formas, representadas pelas Figuras 62(a) e 62(b), estão associadas com a distância (d_{total}) necessária para a realização de cada missão, de forma segura, considerando a trajetória da segunda missão envolvida. Assim, considera-se como distância mínima qualquer ponto localizado na circunferência que representa a esfera imaginária, cujo centro desta circunferência indica a localização da aeronave. Os exemplos apresentados identificam o primeiro momento de uma missão no qual é observado que esta distância coincide com um ponto da trajetória da outra missão. Na Figura 62(a), a circunferência associada à missão A

Figura 62 – Reconhecimento de uma região de conflito entre as missões A e B: (a) Identificação do delimitador seguro necessário para a realização da missão A, bem como o primeiro ponto comum (X), considerando também o sentido do deslocamento da aeronave (esfera que representa o delimitador seguro) e a trajetória da missão B; (b) Semelhante ao caso anterior, agora considerando o delimitador seguro necessário para a realização da missão B, com destaque para o primeiro ponto em comum (Y); (c) Identificação de um ponto em comum entre as trajetórias das missões A e B, caracterizado como sendo uma intersecção (Z).



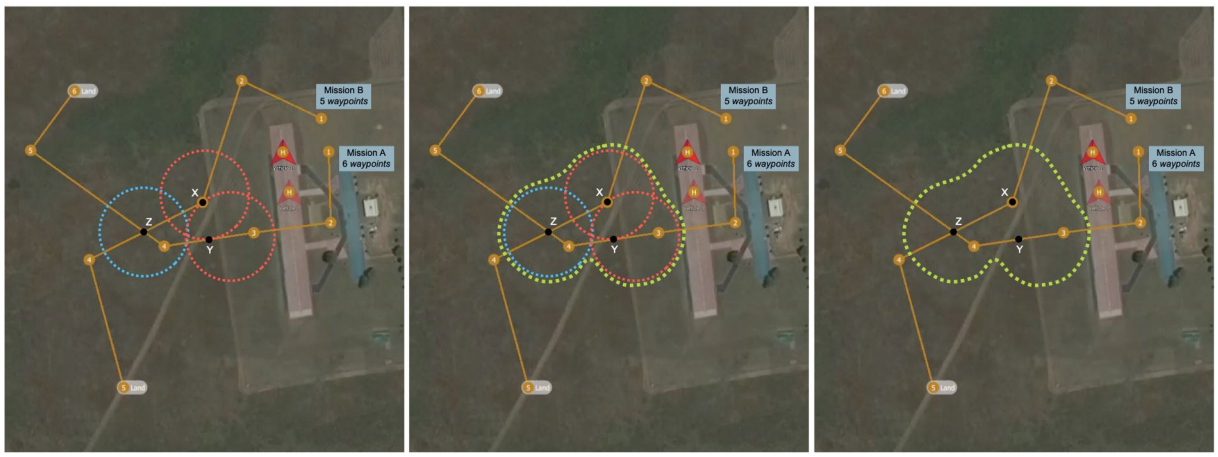
Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

identifica o ponto X (na trajetória da missão B), logo após o *waypoint* 3. A mesma situação pode ser observada na circunferência associada à missão B (Figura 62(b)), pouco antes do *waypoint* 3, identificando o ponto Y (na trajetória da missão A). A terceira forma de identificação de uma região de conflito, representada pela Figura 62(c), consiste na verificação de pontos em comum entre as missões analisadas. Assim, as missões A e B possuem um ponto em comum (Z, localizado entre os *waypoints* 4-5, na missão A, e 3-4, na missão B). Diferente dos casos anteriores, este conflito indica que o ponto em comum está presente explicitamente em cada uma das missões envolvidas. Importante destacar que foi utilizada a mesma representação de uma circunferência, cujo raio define a distância de segurança (d_{total}), associada à continuidade da missão.

Assim, a região de conflito é identificada, como indicado na Figura 63. Em um primeiro momento, a análise identifica que os três resultados obtidos constituem uma única região, considerando que as circunferências possuem uma relação de intersecção, associada aos espaços identificados, como é mostrado na Figura 63(a). Com as regiões definidas, é possível identificar uma área única, que constitui a região final, associada ao conflito (Figura 63(c)).

Com a identificação/reconhecimento de uma região de conflito, o próxima passo consiste em obter algumas informações complementares relacionadas à mesma. Deve-se então identificar os *waypoints* de cada missão envolvida, sendo aqueles imediatamente anteriores à região

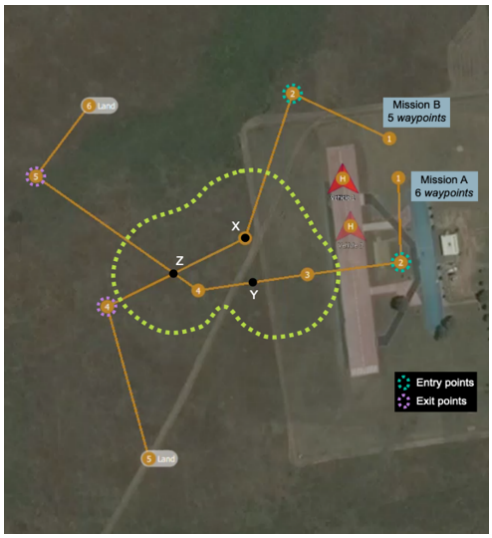
Figura 63 – Reconhecimento de uma região de conflito entre as missões A e B: (a) Identificação do delimitador seguro necessário para a realização da missão A, bem como o primeiro ponto comum, considerando o deslocamento da aeronave (esfera que representa o delimitador seguro) e a trajetória da missão B; (b) Semelhante ao caso anterior, agora considerando o delimitador seguro necessário para a realização da missão B; (c) Identificação de pontos em comum entre as trajetórias das missões A e B.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

de conflito identificada (entrada), bem como os *waypoints* localizados imediatamente após tal região (saída). Para o exemplo apresentado, a missão A tem como *waypoint* de entrada o ponto 2 (da sua trajetória), e o ponto 5 é o *waypoint* de saída da região de conflito. A missão B tem os *waypoints* 2 e 4, respectivamente, como pontos de entrada e saída da região de conflito. A Figura 64 ilustra este resultado, onde os pontos de entrada/saída da região de conflito serão utilizados para associar as ações de controle, no sentido de evitar as condições de risco.

Figura 64 – Reconhecimento da região de conflito (entradas e saídas).



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

6.2.2 Identificação das regiões de bloqueio

No Capítulo 5, foi apresentada a proposta de uma modelagem genérica de especificações de controle para uma região de bloqueio. Foi apresentado também que o posicionamento desta região está associado com um *waypoint* específico, e que a partir dele o coordenador disponibiliza e gerencia o uso do recurso compartilhado.

O *framework* define a funcionalidade de configuração dos recursos compartilhados, capacitando o sistema quanto à identificação de cada posição geográfica associada à um recurso compartilhado, bem como a divulgação destas posições para os operadores, através de um módulo de credencias e comunicação (vinculado à GCS do operador). Assim, é dessa forma que ocorre a identificação de uma região de bloqueio em potencial, ou seja, pelas informações difundidas para os usuários do sistema.

6.3 DEFINIÇÃO DAS REGRAS DE CONTROLE

Conforme apresentado no capítulo anterior, as regras de controle são definidas a partir de especificações formuladas segundo uma proposta de modelagem genérica, desenvolvida para os dois problemas identificados neste trabalho.

Assim, as regras de controle dependem apenas da identificação dos pontos de atuação, de acordo com as duas propostas apresentadas.

6.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Neste capítulo, foi apresentada a proposta de um *framework* para o papel de um sistema de coordenação de UAV, com o detalhamento das suas funcionalidades e as respectivas relações. As proposições apresentadas no Capítulo 5, estão de acordo com as funcionalidades deste *framework*, sendo também apresentada uma estratégia complementar para a identificação de regiões de conflito, fazendo uso da definição da área de atuação do coordenador pela sua segmentação por quadrantes.

Qualquer que seja a operação de coordenação a ser desempenhada, a ação fundamental neste processo de gerenciamento das missões está associada ao deslocamento seguro das aeronaves. Considerando que o espaço aéreo é de uso compartilhado, o principal papel do coordenador de missões, aqui proposto, está relacionado com o uso adequado deste recurso. Tal uso está associado aos deslocamentos executados por todas as aeronaves ativas que estão sob supervisão do coordenador.

A definição de uma região de conflito está associada diretamente com as trajetórias das aeronaves, ou seja, o coordenador deverá observar as situações onde exista a possibilidade de ocorrências de colisão, tendo em vista o espaço aéreo compartilhado. Com isto, são identificadas regiões de conflito em potencial, sendo que o coordenador atua no sentido de evitar situações de risco/colisão, somente quando as missões envolvidas estiverem sendo executadas.

Neste sentido, o coordenador pode ter, em seus registros, missões cadastradas que identificam o plano de voo das aeronaves registradas no sistema, sendo que alguns destes planos de voo podem não estar sendo executados (ou melhor, não foram ativados pelos seus operadores) e, consequentemente, não são considerados no processo de coordenação enquanto permanecerem desativados.

No próximo capítulo, é apresentado o detalhamento da implementação de um sistema de coordenação centralizada de missões de UAV, visando validar o *framework* proposto neste capítulo da tese, bem como as proposições de modelagem das missões e de especificações de controle.

Resumo das contribuições deste capítulo: Este capítulo apresentou duas contribuições fundamentais para o desenvolvimento de um sistema de coordenação centralizado de missões de UAV.

- Proposta de um *framework* que contempla as funcionalidades de UTM, visando estabelecer referências para o desenvolvimento de um sistema de coordenação centralizada de UAV;
- Definição de algoritmos complementares para a identificação de regiões de conflito, baseados no mapeamento da região atendida pelo coordenador através da segmentação por quadrantes; e
- Contribuições para o trabalho de Mestrado, do aluno J. L. Florencio (FLORÊNCIO, 2018) - o tema de trabalho do aluno envolve o conceito de coordenação de missões, aplicado a estratégias de controle que permitem a colaboração de aeronaves em tarefas complexas, como em sistemas de vigilância residencial e monitoramento de fronteira. O resultado alcançado envolve a implementação de um coordenador incorporado a uma GCS específica (*Mission Planner*), contando com recursos adicionais para a coordenação de múltiplas missões na mesma GCS. Os resultados foram obtidos através da técnica SIL (Software in the Loop), discutida no próximo capítulo. Com base nos resultados da dissertação, foi publicado o artigo (FLORENCIO et al., 2018): "*A Framework for Automatic Coordination of Request-Oriented Deployment of Multi-UAV with Cost Optimization*", tendo como autores: FLORENCIO, J. L. ; LEAL, A. B. ; MARTINS, R. F. ; e LOPES, Y. K.

7 IMPLEMENTAÇÃO DE UM COORDENADOR CENTRALIZADO

Com a definição do *framework*, desenvolvida no capítulo anterior, e baseando-se no conceito operacional de um sistema de controle do espaço aéreo e de gerenciamento de recursos compartilhados, para missões de UAV, o objetivo deste capítulo está na apresentação dos elementos associados a implementação realizada, no sentido de promover a validação dos conceitos apresentados, bem como associar o seu uso com um ambiente de missões de UAV. O modelo do *framework* possui 5 funcionalidades, que são: credenciais do usuário, análise da missão, configurações, restrições e regras de controle.

Foi necessário identificar uma plataforma adequada para o desenvolvimento do sistema, sendo que foram realizados experimentos utilizando uma arquitetura baseada no projeto Ardupilot[1]. A Figura 65 apresenta os detalhes desta arquitetura.

O projeto ArduPilot provê um conjunto de ferramentas capazes de operar sistemas veiculares não tripulados e autônomos, tratando-se de um projeto de código aberto.

O *firmware* do ArduPilot pode ser executado em várias plataformas de controle de veículos autônomos, com destaque para duas placas utilizadas neste trabalho: Pixhawk e NAVIO. Elas são duas das placas utilizadas durante os primeiros resultados obtidos ao longo de toda a tese. As diferenças entre elas estão mais associadas a recursos relacionados à operação da aeronave (estabilidade de voo, tempo de resposta aos comandos, entre outros). Para o propósito deste trabalho, ambas oferecem os mesmos recursos, principalmente quando diz respeito as necessidades de navegação no espaço aéreo.

O ArduPilot possui como camada superior aquela que representa os códigos de voo, acionados por uma GCS para executar movimentos em uma aeronave. Tais comandos são acionados através do envio de mensagens, seguindo o protocolo de mensagens MAVLink.

As mensagens MAVLink são definidas através de arquivos XML, sendo que cada arquivo define um conjunto de mensagens suportadas pelo sistema.

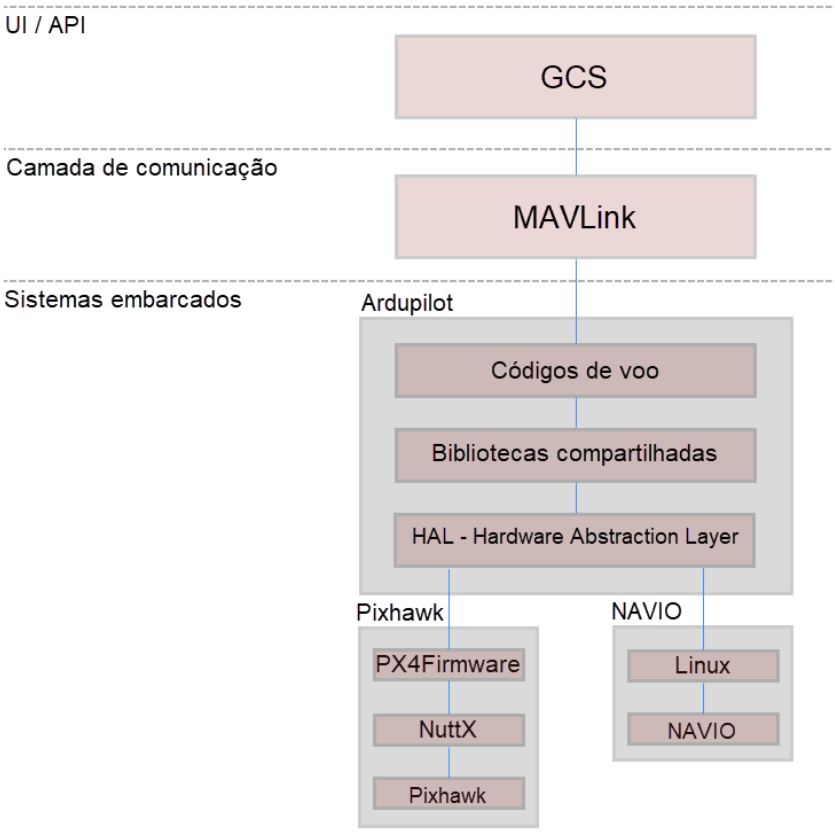
Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível realizar experimentos através de três alternativas de implementação:

- Ambiente de execução de missões reais;
- Ambiente de simulação baseado na técnica *Hardware In the Loop* (HIL); e
- Ambiente de simulação baseado na técnica *Software In the Loop* (SIL).

O desenvolvimento de um sistema em um ambiente de execução de missões reais implica em avaliar as condições climáticas, além do preparo antecipado das baterias (recarga).

[1] http://ardupilot.org

Figura 65 – Arquitetura geral - Projeto ArduPilot.



Fonte: Projeto ArduPilot - http://ardupilot.org, 2020.

O desenvolvimento de um sistema em um ambiente simulado, através da técnica HIL se faz relevante quando envole o uso de novos recursos embarcados, como sensores.

Já a abordagem baseada no uso de simulação dependente apenas do *software* em uso, a técnica (SIL) é mais indicada, pois depende de recursos já existentes. Este é o caso do projeto do coordenador centralizado, que depende apenas dos recursos de navegação já existente, pois nada que foi proposto é embarcado nas aeronaves. O próprio modelo de uma missão é armazenado no coordenador, e ele é responsável pela atualização do sistema, através das informações obtidas por telemetria.

Neste sentido, é importante destacar que o protocolo MAVLink opera sobre o protocolo TCP/IP, permitindo desta forma que a comunicação entre a GCS (considerando a arquitetura da Figura 65) e a aeronave seja realizada em máquinas distintas, e que essas máquinas podem ser físicas ou virtuais, bastando estarem conectadas em redes IP com rotas alcançáveis.

Assim, a arquitetura pode ser modificada, como mostrado na Figura 66, agora com a adição do coordenador de missões de UAV. O coordenador deve ter acesso as mesmas redes IP associadas às aeronaves, que devem estar operando de forma simulada.

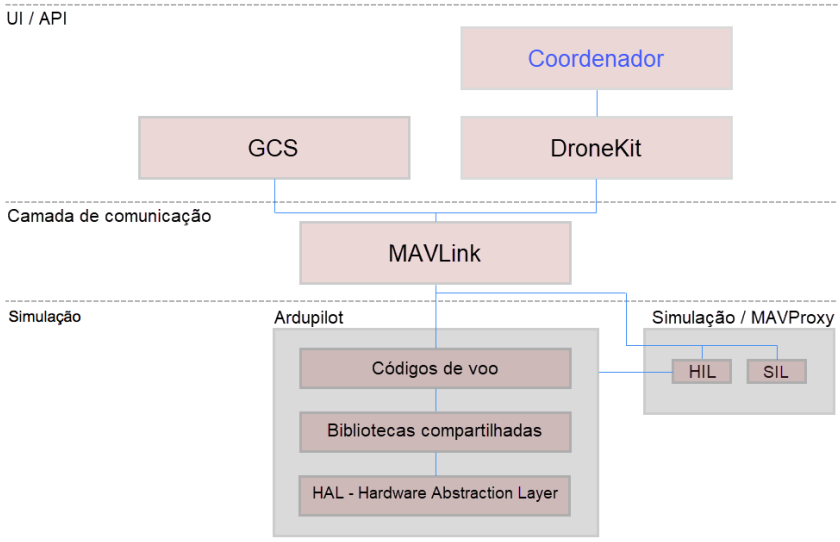
A seguir, são feitas complementações a arquitetura inicialmente apresentada, elencando os componentes adicionas que permitiram implementar um ambiente de simulação completo, envolvendo a simulação das aeronave, o acompanhamento conjunto da evolução das missões e a interação entre o coordenador e as aeronaves.

7.1 DESCRIÇÃO DO AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO E SIMULAÇÃO

Conforme apresentado anteriormente, para que o ambiente simulado, utilizado para realizar a validação da proposta do coordenador, seja funcional, todas as componentes do sistema devem estar acessíves através de uma rede IP acessível.

A Figura 66 apresenta a arquitetura utilizada para o desenvolvimento dos testes de validação do coordenador desenvolvido.

Figura 66 – Arquitetura de desenvolvimento escolhida para promover a validação do sistema de coordenação centralizada.



Fonte: Adaptado de Projeto ArduPilot - http://ardupilot.org, 2020.

Das 5 funcionalidades definidas no *framework*, apenas a funcionalidade de "Credencias do Usuário"não foi implementada, devido a necessidade de priorizar o desenvolvimento das demais funcionalidades (sendo essas fundamentais para a demonstração dos conceitos associados ao modelo). No entanto, essa decisão não inviabilizou o processo de validação aqui discutido, por dois motivos:

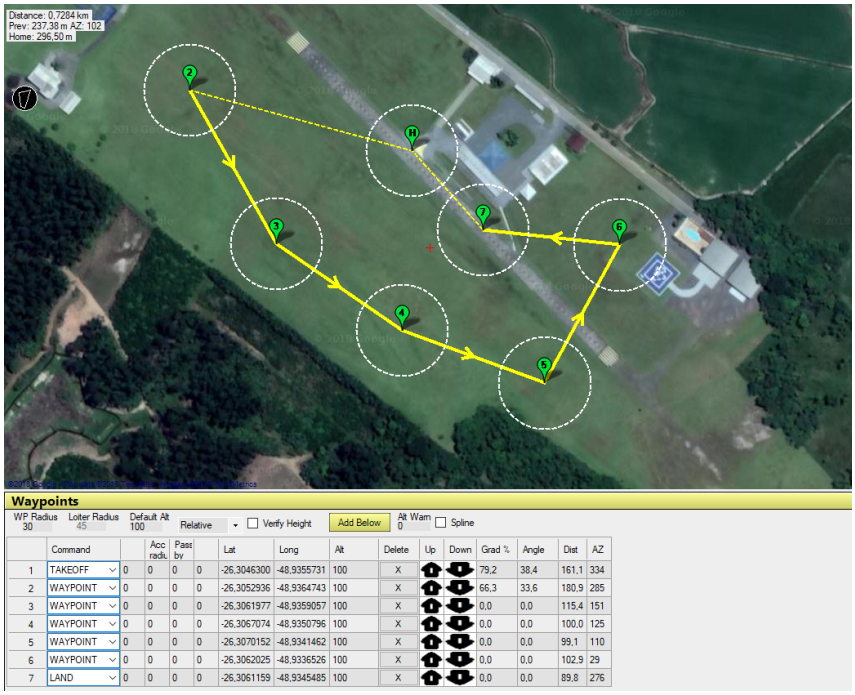
- As identificações dos usuários foram realizadas de forma manual, permitindo contornar uma parcela das consequências associadas à ausência da funcionalidade não implementada; e

- O coordenador foi configurado para ter acesso direto às aeronaves, permitindo assim o acesso a todas as informações associadas as UAV em ação, garantindo assim a cobertura de todas as questões associadas às consequências da ausência da funcionalidade de "Credenciais do Usuário".

Para que a arquitetura proposta seja plenamente funcional, é preciso fazer uso de outra ferramenta. A ferramenta MAVProxy, inicialmente desenvolvida pela organização CamberraUAV[2], possui um conjunto de recursos, desde simuladores completos de UAV, até recursos para auxiliar no roteamento em rede das aeronaves simuladas, resolvendo problemas de conectividade entre: GCS, UAV e o coordenador.

A Figura 67 apresenta uma missão definida por uma das GCS utilizadas na validação (foram utilizadas as GCS Mission Planner e QGround Control), com destaque para os detalhes da caracterização da missão (Figura 68).

Figura 67 – Exemplo de uma missão definida no ambiente de simulação, contendo 7 *waypoints*.



Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

O coordenador solicita a cada aeronave, via protocolo MAVLink, informações sobre o planejamento da missão, e realiza a conversão para o formato em XML.

A base do sistema de coordenação foi desenvolvida na linguagem C#, sendo que toda a comunicação entre o coordenador e as aeronaves foi realizada com o auxílio do pacote Dro-

[2]http://canberrauav.org.au

Figura 68 – Arquivo contendo informações da missão identificada (Figura 67).

```
QGC WPL 110
0       1       0       16      0       0       0       0       -26.305649      -48.935015      17.000000       1
1       0       3       22      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30463000    -48.93557310    100.000000      1
2       0       3       16      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30529360    -48.93647430    100.000000      1
3       0       3       16      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30619770    -48.93590570    100.000000      1
4       0       3       16      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30670740    -48.93507960    100.000000      1
5       0       3       16      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30701520    -48.93414620    100.000000      1
6       0       3       16      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30620250    -48.93365260    100.000000      1
7       0       3       21      0.00000000      0.00000000      0.00000000      0.00000000      -26.30611590    -48.93454850    100.000000      1
```

Fonte: Produção do próprio autor, 2020.

neKit[3], que viabiliza a comunicação entre qualquer dispositivo adaptado para comunicações através do protocolo MAVLink.

Assim, o código do coordenador faz chamadas de *scripts* escritos em Python, necessários para o uso do pacote DroneKit. Cada *script* descreve um comando ou consulta para uma aeronave.

As consultas são relacionadas com a solicitação de informações a respeito da caracterização de cada missão. Já os comandos são atuações do coordenador sobre uma determinada aeronave ou uma solicitação de informação a respeito da evolução de cada missão (telemetria).

O coordenador promove os cálculos associados às regiões de conflito e de bloqueio, assim que ele recebe as informações solicitadas para cada aeronave. Como não implementada a funcionalidade de Credenciamento de Usuários, foi criado um processo de consulta contínua, considerando que as aeronaves já possuem os seus endereços de rede definidos (cada endereço de rede assumem o papel de uma credencial).

7.2 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Como parte da proposta da tese, foi desenvolvido neste capítulo os elementos associados à implementação do coordenador de missões de UAV, de acordo com as funcionalidades definidas no *framework*.

Apesar da funcionalidade de "Credenciais do Usuário" não ter sido implementada, foi possível adotar uma solução alternativa, no sentido de garantir que as demais funcionalidades tivessem o seu funcionamento pleno.

[3] https://dronekit.io

8 CONCLUSÕES

O objetivo desta tese consistiu em desenvolver um *framework* para a coordenação de múltiplas missões de veículos aéreos não tripulados, que permite o gerenciamento de recursos compartilhados e a ocupação segura do espaço aéreo.

Para alcançar este objetivo, fez-se o mapeamento sistemático da literatura associando UAV com os termos: GCS, descrição de missão, controle de espaço aéreo, coordenação de missão, voo autônomo e, posteriormente com as teorias de DES e SCT. Concluiu-se o forte e crescente interesse da comunidade científica pelo tema de pesquisa, demonstrando sua relevância científica e tecnológica. No entanto, observou-se uma lacuna na literatura em relação à alocação de recursos e aos problemas associados à ocupação do espaço aéreo, considerando o uso das teorias de DES e SCT.

Gerou-se neste trabalho uma nova proposta para representar o planejamento de uma missão de um UAV através do formalismo de DES, gerando uma modelagem genérica e consistente. Os dois modelos genéricos propostos permitem relacionar e distinguir a execução simultânea de um conjunto de missões de UAV que ocupam um espaço aéreo em comum. O primeiro modelo estende a forma de representação da evolução de uma missão, que além de representar os *waypoints*, também inclui situações de aeronaves em deslocamento entre dois *waypoints*, podendo associar eventos que caracterizam todas as situações associadas ao deslocamento da aeronave, como também a interrupção de uma missão, fundamental para seu replanejamento. Por sua vez, o segundo modelo, acrescenta ao modelo anterior a capacidade de representar tarefas que podem ser executadas durante a missão. Testes de validação foram realizados, indicando que os modelos de missões alternativas e o conceito de replanejamento de missões atendem as necessidades elencadas.

Em relação às regiões de conflito e ao bloqueio de recurso, desenvolveu-se duas propostas de soluções genéricas, de custo computacional reduzido e com garantia de que as especificações de controle são obtidas de forma automática. Para isso, fez-se uso de diferentes exemplos que demonstram as propostas. A resolução dos problemas de conflito de ocupação de um espaço aéreo em comum envolveu a interrupção de uma ou mais missões, visando o benefício de uma determinada missão que deve ser priorizada/executada – considerando elementos de análise. Situações de bloqueio de recursos ocorrem quando os mesmos são limitados/finitos. Neste caso, o sistema proposto identifica quais aeronaves poderão fazer uso do recurso, bem como dá encaminhamento para as demais aeronaves que não podem fazer uso de tais recursos, de forma imediata, até que o recurso esteja disponível. O sistema gerencia o destino destas aeronaves,

reposicionando-as em locais próprios, preservando a quantidade de combustível remanescente, bem como sua segurança.

Por fim e atendendo ao objetivo geral, um *framework* de coordenação centralizada de UAV foi especificado e devidamente validado, assim como foram validadas as modelagens das missões e de especificações de controle. Também foram desenvolvidos algoritmos complementares para a identificação de regiões de conflito através da segmentação por quadrantes. Independente da operação de coordenação a ser desempenhada, a ação fundamental do processo de gerenciamento das missões desenvolvido neste trabalho está associada ao deslocamento seguro das aeronaves e uso adequado dos recursos disponíveis à todas as aeronaves ativas, sob supervisão do coordenador.

Considerando as validações realizadas, conclui-se que o *framework* desenvolvido contempla as funcionalidades de UTM com a particularidade de gerar modelos e especificações de controle de forma automática e tendo como ponto de partida os modelos de missões (planos de voo) definidos pelos operadores destas aeronaves.

Outros trabalhos podem ser desenvolvidos, dando continuidade aos resultados aqui apresentados. São eles:

- Propostas de ponderação quanto ao uso de recursos compartilhados, considerando serviços diferenciados e situações emergenciais, permitiriam acrescentar um valor significativo aos resultados já alcançados;
- A associação de especificações de controle com tarefas desempenhadas por um UAV, fazendo uso do segundo modelo de missão proposto, podem tornar a execução de tarefas mais dinâmica; e
- A arquitetura centralizada pode dar espaço para uma situação onde coordenadores centralizados podem agir de forma colaborativa, permitindo que o controle do espaço aéreo seja realizado por meio de acordos entre coordenadores que operam regiões próximas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUPILOT. **Loiter Mode**. 2009. Disponível em: <https://ardupilot.org/copter/docs/loiter-mode.html>.

ARDUPILOT. **Mission Planner**. 2016. Disponível em: <http://planner.ardupilot.com/>.

AUBERT, M. C.; ÜZÜMCÜ, S.; HUTCHINS, A. R.; CUMMINGS, M. L. Toward the development of a low-altitude air traffic control paradigm for networks of small, Autonomous unmanned aerial vehicles. In: **AIAA Infotech at Aerospace**. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9781624103384.

BARDHAN, R.; GHOSE, D. Resource allocation and coalition formation for UAVs: A cooperative game approach. **IEEE International Conference on Control Applications (CCA)**, 2013. 2013.

CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. **Introduction to Discrete Event Systems**. 2nd. ed. New York: Springer Science, 2008.

CHOMSKY, N. On certain formal properties of grammars. **Information and Control**, 1959. v. 2, n. 2, p. 137–167, jun 1959. ISSN 00199958. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0019995859903626>.

DEVAMBEZ, F. Brevel ground control station. In: **Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering**. [S.l.: s.n.], 1995. v. 2555, p. 76–84. ISBN 9780819419149. ISSN 0277786X.

DIESTEL, R. **Graph Theory**. 3rd. ed. Heidelberg: Springer-Verlag, 2000.

DUQUETTE, M. The common mission automation services interface. In: **AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit 2011**. [S.l.: s.n.], 2011. ISBN 9781600869440.

FANTI, M. P.; MANGINI, A. M.; PEDRONCELLI, G.; UKOVICH, W. A decentralized control strategy for the coordination of AGV systems. **Control Engineering Practice**, 2018. v. 70, p. 86–97, 2018.

FATEMI, M.; MILLAN, J.; STEVENSON, J.; YU, T.; O'YOUNG, S. Discrete Event Control of an Unmanned Aircraft. In: **9th International Workshop on Discrete Event Systems**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 352–357.

FLORÊNCIO, J. L. **Desenvolvimento de um sistema de coordenação automática de veículos aéreos não tripulados cujasmissões são orientadas por requisições**. Tese (Dissertação de mestrado) — UDESC - Universidade do Estado de Santa Catarina, 2018.

FLORENCIO, J. L.; LEAL, A. B.; MARTINS, R. F.; LOPES, Y. K. A Framework for Automatic Coordination of Request-Oriented Deployment of Multi-UAV with Cost Optimization. **IEEE/AIAA 37th Digital Avionics Systems Conference (DASC)**, 2018. 2018.

FURCI, M.; PAOLI, A.; NALDI, R. A supervisory control strategy for robot-assisted search and rescue in hostile environments. In: **IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA**. [S.l.: s.n.], 2013. ISBN 9781479908622. ISSN 19460740.

GONZALEZ, A. G. C.; ALVES, M. V. S.; VIANA, G. S.; CARVALHO, L. K.; BASILIO, J. C. Supervisory Control-Based Navigation Architecture: A New Framework for Autonomous Robots in Industry 4.0 Environments. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2018. v. 14, p. 1732–1743, 2018.

GORYCA, J.; HILL, R. C. Formal Synthesis of Supervisory Control Software for Multiple Robot Systems. In: **American Control Conference (ACC)**. Washington, DC, USA: [s.n.], 2013. p. 125–131.

HATTENBERGER, G.; LACROIX, S.; ALAMI, R. Planning and control for Unmanned Air Vehicle formation flight. **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**, 2006. 2006.

HUANG, Y.; LI, Z.; JIANG, Y.; CHENG, L. Cooperative Path Planning for Multiple MobileRobots via HAFSA and an Expansion Logic Strategy. **Applied Science (MDPI)**, 2019. v. 9, p. 10, 2019.

ISERMANN, R.; SCHAFFNIT, J.; SINSEL, S. Hardware- in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems. **Control Engineering Practice**, 1999. p. 643–653, 1999.

JIANG, T.; GELLER, J.; NI, D.; COLLURA, J. Unmanned Aircraft System Traffic Management: Concept of Operation and System Architecture. **International Journal of Transportation Science and Technology**, 2017. 2017.

JODEHY, N. M.; COBBZ, R. G. Autonomous flight path planning for traffic monitoring in wireless sensor networks. In: **AIAA Infotech at Aerospace**. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 9781624103384.

JU, C.; SON, H. I. Discrete event systems based modeling for agricultural multiple unmanned aerial vehicles: Automata theory approach. In: **International Conference on Control, Automation and Systems**. [S.l.: s.n.], 2018. v. 2018-Octob, p. 258–260. ISBN 9788993215151. ISSN 15987833.

JU, C.; SON, H. I. Modeling and Control of Heterogeneous AgriculturalField Robots Based on Ramadge–Wonham Theory. **IEEE Robotics and Automation Letters**, 2020. v. 5, n. 1, p. 48–55, 2020.

KARIMODDINI, A.; LIN, H.; CHEN, B. M.; LEE, T. H. Hybrid formation control of the Unmanned Aerial Vehicles. **Mechatronics**, 2011. v. 21, p. 886–898, 2011.

KE, Y.; TSOURDOS, A.; WHITE, B.; SILSON, P. Dynamic mission planning of multiple unmanned autonomous platforms for sensing and autonomous urban reconnaissance. In: **AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 9781563479786.

KLIMKOWSKA, A.; LEE, I.; CHOI, K. Possibilities of uas for maritime monitoring. In: **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives**. [S.l.: s.n.], 2016. v. 2016-Janua, p. 885–891. ISSN 16821750.

LAFORTUNE, S. Discrete event systems: Modeling, Observation, and Control. **Annual Review of Control, Robotics and Autonomous Systems**, 2019. v. 2, n. 1, p. 141–159, 2019.

LASCARA, B.; LACHER, A.; DEGARMO, M.; MARONEY, D.; NILES, R.; VEMPATI, L. Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts - Operational Concepts and Exploration Appoaches. **The MITRE Corporation**, 2019. p. 16, 2019. Disponível em: <https://www.mitre.org/sites/default/files/publications/pr-19-00667-9-urban-air-mobility-airspace-integration.pdf>.

LAWSON, M. V. **Finite Automata**. [S.l.]: Chapman and Hall/CRC, 2019. 320 p. ISBN 9780367394998.

LIM, H.; PARK, J.; LEE, D.; KIM, H. J. Build your own quadrotor: Open-source projects on unmanned aerial vehicles. **IEEE Robotics and Automation Magazine**, 2012. v. 19, n. 3, p. 33–45, 2012. ISSN 10709932.

LOPES, Y. K.; TRENKWALDER, S. M.; LEAL, A. B.; DODD, T. J.; GROSS, R. Supervisory control theory applied to swarm robotics. **Swarm Intelligence**, 2016. v. 10, n. 1, p. 65–97, 2016.

LUNDBERG, J.; PALMERIUS, K. L.; JOSEFSSON, B. Urban Air Traffic Management (UTM) Implementation in cities - Sampled side-effects. In: **AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference - Proceedings**. [S.l.: s.n.], 2018. v. 2018-Septe. ISBN 9781538641125. ISSN 21557209.

MARTINS, R. F.; ALMEIDA, G. L. N. de; LEAL, A. B. Planejamento de missões de VANTs utilizando modelagem por SEDs e sensores de decisão. In: **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 8.

MARTINS, R. F.; ALMEIDA, G. L. N. de; LEAL, A. B. Towards automatic code generation for UAV mission planning using decision sensors. In: **International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**. Miami: IEEE, 2017. p. 682–689. ISBN 978-1-5090-4495-5. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7991476/>.

MOLINA, L.; BASILIO, J. C.; FREIRE, E. O.; MOREIRA, M. V. Desenvolvimento de uma arquitetura de navegação deliberativa para robôs móveis utilizando a teoria de controle supervisório. In: **XVIII Congresso Brasileiro de Automática**. Bonito, MS, Brasil: [s.n.], 2010. p. 3231–3238.

MOORE, E. F. **Sequential Machines : Selected Papers**. [S.l.]: Addison-Wesley, Readiing, 1964.

NONAMI, K.; KENDOUL, F.; SUZUKI, S.; WANG, W.; NAKAZAWA, D. **Autonomous Flying Robots - Unmanned Aerial Vehicles and Micro Aerial Vehicles**. [S.l.]: Springer, 2010. 348 p.

OBOURNE, M. **Mission Planner Ground Control Station**. 2014. Disponível em: <https://github.com/diydrones/MissionPlanner>.

ONU. **ONU-HABITAT - Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos**. 2012. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/agencia/onuhabitat/>.

PETERSEN, K.; FELDT, R.; MUJTABA, S.; MATTSSON, M. Systematic Mapping Studies in Software Engineering. In: **12th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE)**. Italy: [s.n.], 2008. p. 10p.

PINHEIRO, L. P.; LOPES, Y. K.; LEAL, A. B.; ROSSO, R. U. J. Nadzoru: A Software Tool for Supervisory Control of Discrete Event Systems. **IFAC-PapersOnLine**, 2015. v. 48, n. 7, p. 182–187, 2015.

QGC. **QGroundControl - Intuitive and Powerful Ground Control Station for the MAVLink protocol**. 2019. Disponível em: <http://qgroundcontrol.com/>.

RAMADGE, P. J.; WONHAM, W. M. Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes. **SIAM Journal on Control and Optimization**, 1987. v. 25, n. 1, p. 206–230, 1987. ISSN 03630129.

RAMADGE, P. J.; WONHAN, W. M. The control of discrete event systems. **IEEE Special Issue on Discrete Event Dynamic Systems**, 1989. v. 77, p. 81–98, 1989.

ROHLOFF, K.; LAFORTUNE, S. Symmetry reductions for a class of discrete-event systems. In: **Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control**. [S.l.: s.n.], 2004. v. 1, p. 38–44. ISSN 01912216.

SEIBEL, C. W. **Uma metodologia formal para o planejamento e controle de missões de aeronaves não-tripuladas**. 120 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

SHAHZAD, A.; UR-REHMAN, R. An artificial intelligence based novel approach for real-time allocation of armament to hostile targets. In: **Proceedings of 2013 10th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology, IBCAST 2013**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 141–146. ISBN 9781467344265.

SHANMUGAVEL, M. **Path Planning of Multiple Autonomous Vehicles**. Tese (Doutorado) — CRANFIELD UNIVERSITY, 2007.

STEVENS, B.; LEWIS, F.; JOHNSON, E. **Aircraft Control and Simulation: Dynamics, Controls Design, and Autonomous Systems**. 3rd. ed. [S.l.]: Wiley-Blackwell, 2003. 768 p. ISBN 978-1-118-87098-3.

SU, R. Discrete-event modeling of multi-agent systems with broadcasting-based parallel composition. **Automatica**, 2013. v. 49, p. 3502–3506, 2013.

TOUSI, M. M.; AGHDAM, A. G.; KHORASANI, K. A hybrid fault diagnosis for a team of unmanned aerial vehicles. In: **2009 IEEE International Conference on System of Systems Engineering, SoSE 2009**. [S.l.: s.n.], 2009. ISBN 9781424421732.

TOUSI, M. M.; KHORASANI, K. Optimal hybrid fault recovery in a team of unmanned aerial vehicles. **Automatica**, 2012. v. 48, n. 2, p. 410–418, 2012. ISSN 00051098.

TOUSI, M. M.; KHORASANI, K. A hybrid fault detection and isolation strategy for a team of cooperating unmanned vehicles. **International Journal of Control**, 2015. v. 88, n. 1, p. 90–103, 2015. ISSN 13665820.

TSACH, S.; PELED, A.; PENN, D.; KESHALES, B.; GUEDJ, R. Development trends for next generation UAV systems. In: **Collection of Technical Papers - 2007 AIAA InfoTech at Aerospace Conference**. [S.l.: s.n.], 2007. v. 1, p. 490–503. ISBN 1563478935.

UGCS. **UgCS - Drone Control Software**. 2019. Disponível em: <https://www.ugcs.com>.

USACH, H.; VILA, J. A. Reconfigurable Mission Plans for RPAS. **Aerospace Science and Technology**, 2020. v. 96, 2020. ISSN 12709638.

ZEIGLER, B. P.; KIM, D. Multi-resolution modeling for adaptive uav service systems. In: **Simulation Series**. [S.l.: s.n.], 2019. v. 51, n. 1. ISBN 9781510892521. ISSN 07359276.

ZHANG, Y. J.; MALIKOPOULOS, A. A.; CASSANDRAS, C. G. Optimal Control and Coordination of Connected and Automated Vehicles at Urban Traffic Intersections. **American Control Conference (ACC)**, 2016. p. 8, 2016.