



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Um Modelo de Planejamento Multiagente para a Gestão das Operações em Solo nos Aeroportos

Patrick Cisuaka Kabongo

Dissertação apresentada como requisito parcial para
conclusão do Mestrado em Informática

Orientador
Prof. Dr. Li Weigang

Brasília
2017

Dedicatória

Ao meu pai, Sr. Paul Mukengebantu Mpela pelas lições e exemplo de humanidade.

À minha mãe, Sra. Marie Mujinga Bitshibiabo, pelo amor e carinho em todos os momentos.

À minha esposa, Antônia Lopes Sousa Kabongo, pelo seu amor e apoio que sempre foi de coração.

Agradecimentos

Muitas pessoas me apoiaram durante o curso e na conclusão desta pesquisa, pessoas a quem devo agradecimento e reconhecimento.

Agradeço imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Li Weigang e ao Dr. Alessandro Ferreira Leite pela compreensão, pelos seus conhecimentos e pelo incentivo à pesquisa, que contribuíram para a concretização deste trabalho.

Agradeço aos professores da UnB que sempre me apoiaram. Em especial aos doutores e doutoras: Alba Cristina Magalhaes Alves de Melo; Maria Emília Machado Teller Walter; André Costa Drumond; Célia Ghedini Ralha os quais tive o prazer de assistir as suas aulas.

Aos colegas do Laboratório de Modelos Computacionais para Transporte Aéreo - TRANSLAB

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pelo apoio financeiro fornecido a esta dissertação.

A Deus por ter concedido forças para seguir com esta pesquisa.

Muito obrigado a todos!

Resumo

A indústria da aviação consiste em uma série de procedimentos altamente dinâmicos e complexos. Ela exige principalmente dois fatores importantes: tempo e segurança. Um dos principais motivos de atraso de vôo é aeronave em solo, pois envolve várias operações com equipes de atendimento ao aeroporto e veículos. A gestão de operações em solo nos aeroportos têm sido apontada como tendo uma forte influência nos atrasos dos voos. As falhas na comunicação e no processo de colaboração entre as partes interessadas são algumas das razões que dificultam a gestão de operações em solo nos aeroportos. Portanto, baseado no método de planejamento multiagente (MAP), que é um método que envolve a coordenação dos recursos e atividades de múltiplos agentes, este trabalho propõe um arcabouço para ajudar na gestão de operações em solo nos aeroportos. O arcabouço proposto possui duas fases. A primeira identifica os serviços e os recursos necessários para o atendimento dos voos em solos; enquanto na segunda fase um plano de execução é criado assim como o monitoramento da sua execução com objetivo de reduzir tanto os atrasos como os custos operacionais. Neste caso, a contribuição deste trabalho inclui um modelo de planejamento multiagente para coordenação das operações em solo nos aeroportos no contexto da estratégia de tomada de decisão colaborativa (A-CDM), o planejamento das atividades de operações em solo e o monitoramento das atividades.

Um protótipo foi desenvolvido e as simulações foram elaboradas com base em dados reais para o Aeroporto Internacional de Brasília. Portanto a interface com o sistema foi simulada por meio do tratamento de algumas aeronaves em solo de uma companhia aérea durante um intervalo de tempo definido. Os resultados obtidos foram satisfatórios. O planejamento das operações em solo pode reduzir o custo associado aos atrasos, comprovando a eficácia da modelagem proposta.

Palavras-chave: Gestão Aeroportuária, Operações em Solo, Tomada de Decisão Colaborativa, Planejamento Multiagente

Abstract

Aviation industry consists of a series of highly dynamic and complex procedure. It mainly demands two most important factors: time and safety. One of the major reasons of flight delay is aircraft on ground because it involves various operations with airport service teams and vehicles. Airport ground handling operations have been considered as one main influence factor for flight delays due to the unsuccessful information sharing and collaborations among various airport's stakeholders. Therefore, based on the Multi-Agent Planning (MAP) method which is a method that involves the coordination of the resources and activities of multiple agents, this work proposes a framework to improve airport ground handling management (GHM) operation. The proposed framework comprises two major phases. The first one identifies the services and resources, and the second one creates the plans and coordinates their executions trying to reduce both the delays and the operating costs. In this case, the contribution of this work includes a MAP model to coordinate airport ground handling operation in the context of the airport collaborative decision making (A-CDM) strategy and the planning of the ground handling activities.

A prototype was developed and the simulations were performed using actual data from the International Airport of Brasilia. Therefore the interface with the systems was simulated through the evaluation of some aircraft on the ground of an airline company for a defined period of time. The obtained results were satisfactory. The planning of ground handling could reduce the cost associated to the delays, demonstrating the efficacy of the modeling herein proposed.

Keywords: Airport Management Operations, Ground Handling, Collaborative Decision Making, Multi-Agent Planning

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Motivação	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do Trabalho	3
2	Fundamentação Teórica	5
2.1	Sistemas Multiagentes	5
2.1.1	Conceitos	5
2.1.2	Motivação	7
2.2	Planejamento	7
2.2.1	Planejamento Multiagente	8
2.2.2	Planejamento de Ordem Parcial - POP	11
2.3	Modelo de Planejamento Multiagente	13
3	Modelo de Planejamento Multiagente para Frente - FMAP	15
3.1	Formalização da Tarefa	15
3.1.1	Privacidade em Planos Parciais	18
3.1.2	Linguagem de Definição	19
3.2	Procedimento de Planejamento de Refinamento no FMAP	20
3.2.1	Sistema de Planejamento de Ordem Parcial de Encadeamento para Frente	21
3.2.2	Completude e Solidez	23
3.2.3	Função Heurística baseada em Grafo de Transição de Domínio	24
3.2.4	Limitações do FMAP	26
3.2.5	Implementação do FMAP	27
4	As Operações em Solo nos Aeroportos	29
4.1	Gerenciamento de Tráfego Aéreo	29
4.2	Tomada de Decisão Colaborativa (CDM)	30
4.2.1	Tomada de Decisão Colaborativa nos Aeroportos	30

4.3	A Gestão de Operações em Solo nos Aeroportos	32
4.3.1	Processo de Embarque/Desembarque de Passageiros	33
4.3.2	Processos de Carga/Descarga de Bagagem	35
4.3.3	Processo de Limpeza	35
4.3.4	Processo de Catering	36
4.3.5	Processo de Abastecimento de Combustíveis	37
4.3.6	Processos de Abastecimento de Água Potável e de Saneamento . . .	38
4.3.7	Processo de degelo	39
4.3.8	Processo de <i>Push-back</i>	40
4.4	Operações em Solo como um Processo Complexo Multi-atividade	40
4.4.1	Exemplos de Processos das Operações em Solo	41
4.4.2	A Dimensão Temporal das Operações em Solo	42
4.5	Análise da Organização da Gestão das Operações em Solo nos Aeroportos .	46
4.5.1	Parceiros Envolvidos nas Operações em Solo	46
5	Trabalhos Relacionados	50
5.1	Gestão de uma Frota de Ônibus de Passageiros	50
5.2	Gestão de Caminhões de Abastecimento	51
5.3	Gestão de uma Frota de Bagagem de Conexão	53
5.4	Gestão de Frotas de <i>Catering</i>	54
5.5	Abordagens globais	55
5.5.1	Uma Abordagem Centralizada para o Problema de Atribuição das Operações em Solo	55
5.5.2	Abordagens descentralizadas do problema de atribuição global das operações em solo	57
5.6	Análise e Conclusão	60
6	Framework de Planejamento para a Gestão de Operações em Solo nos Aeroportos	62
6.1	<i>Stakeholders</i> Envolvidos	62
6.2	Framework de Planejamento proposto para a Gestão das Operações em Solo	63
6.3	Modelo de Planejamento Multiagente para a Gestão das Operações em Solo no Aeroporto	64
6.3.1	Justificativa da Abordagem Metodológica	64
6.3.2	Planejamento Colaborativo	64
6.3.3	Modelagem do Cenário	65
6.3.4	Modelagem dos Gestores das Operações em Solo	66
6.3.5	Cooperação Entre os Agentes	67

7	O Sistema de Planejamento Multiagente para a Gestão das Operações em Solo nos Aeroportos	69
7.1	Descrição do Sistema	69
7.2	Requisitos Operacionais	70
7.3	Implementação do Protótipo	71
7.3.1	Ambiente de Desenvolvimento	71
7.3.2	Módulos do Sistema Proposto	72
7.4	Algoritmos de Planejamento	74
7.4.1	Arquivo de <i>Domínio</i>	74
7.4.2	Arquivo de <i>Problema</i>	76
8	Simulações e Resultados	80
8.1	Descrição do Cenário	80
8.2	Planejamento da Simulação	81
8.2.1	Caso 1: Comparação entre o Planejamento Único agente e Planejamento Multiagente	81
8.2.2	Caso 2: Análise de Escalabilidade	84
8.2.3	Caso 3: Comparação Entre o Modelo Proposto e um Modelo Existente	85
9	Conclusão e Trabalhos Futuros	88
9.1	Apresentação	88
9.2	Contribuições	89
9.3	Limitações e Trabalhos Futuros	89
9.4	Publicações	90
	Referências	92

Lista de Figuras

2.1	Agente no seu ambiente [86].	5
4.1	Visão geral do A-CDM [39].	32
4.2	Localização de operações em solo dentro do processo de <i>turnaround</i> [41].	33
4.3	Operações relacionadas a aeronave em aeroportos [41].	34
4.4	Diferentes dispositivos para lidar com os passageiros nos processos de embarque e desembarque [41].	35
4.5	Processos de carga/descarga de bagagem [41].	36
4.6	Equipe de limpeza no estande de estacionamento de uma aeronave [41].	36
4.7	Processo de <i>catering</i> [41].	37
4.8	Diferentes processos de abastecimento de aeronave [41].	38
4.9	Processo de saneamento [41].	39
4.10	Processo de abastecimento de água potável [41].	39
4.11	Processo de degelo em curso [41].	40
4.12	Processo de <i>Push-back</i> [41].	40
4.13	Arranjo de manutenção de aeronaves–Boeing 777-300ER [14].	41
4.14	Processo das Operações em Solo para um Boeing B737 [14].	42
4.15	Processo das Operações em Solo no Aeroporto Internacional de Belgrado [66].	43
4.16	Processo das Operações em Solo no Aeroporto de Estocolmo [83].	43
4.17	Turnaround com as atividades de operações em solo com tempo expandido [41].	44
4.18	Turnaround com as atividades de operações em solo com tempo reduzido [41].	44
4.19	Durações típicas de operações em solo no Boeing 777-200 [14].	45
4.20	Durações típicas de operações em solo no Airbus 330-300 [1].	45
6.1	Framework proposto.	63
7.1	Estrutura do sistema desenvolvido.	73
8.1	O processo de operações em solo da simulação 1.	81
8.2	O processo de operações em solo da simulação 2.	82

8.3	O processo de operações em solo da simulação 3.	83
8.4	Resultados de escalabilidade do modelo proposto	84

Lista de Tabelas

7.1	Horário de chegada previsto dos voos da empresa GOL	76
8.1	Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada	81
8.2	Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada	82
8.3	Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada	83
8.4	Horário de chegada e partida previsto dos voos da empresa GOL	85
8.5	Duração de tempo em minutos das ações dos agentes	86
8.6	Atrasos dos voos em minutos gerados entre a abordagem proposta e a abordagem existente	86

Lista de Abreviaturas e Siglas

A-CDM Tomada de Decisão Colaborativa no Aeroporto (*Airport Collaborative Decision Making*).

ASM Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*).

ATC Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*).

ATFM Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*).

ATM Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*).

CDM Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*).

FMAP Planejamento Multiagente para frente (*Forward Multi-Agent Planning*).

ICAO Organização de Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization*).

PDDL Linguagem de definição de domínio de planejamento (*the Planning Domain Definition Language*).

POP Planejamento de ordem parcial (*Partial-order Planning*).

SMA Sistema Multiagente.

Capítulo 1

Introdução

O aumento na demanda do tráfego aéreo tem levado o serviço de tráfego aéreo a desenvolver novos procedimentos operacionais baseados na tecnologia de processamento de informações disponíveis. Esses procedimentos iniciaram na década de 60, com a criação da AGIFORS (*Airlines Group of IFORS*) pelas principais companhias aéreas que utilizavam os primeiros computadores de grande porte disponíveis naquela época. Atualmente, na era da Internet, as operações do serviço de transporte aéreo envolvem diretamente atores globais (Aeroportos, Companhias aéreas, Controle de Tráfego Aéreo, Gerenciamento de Tráfego Aéreo) bem como atores locais através de redes de informação interligadas [41].

A gestão dos aeroportos desempenha um papel importante dentro desse sistema complexo já que a demanda por transporte aéreo tem origem no aeroporto de referência e vários índices de eficácia são baseados em eventos ocorridos no aeroporto e nas estatísticas correspondentes. Além da proteção e segurança, que são questões prioritárias e que proporcionam um ambiente operacional nos aeroportos, atrasos no tráfego de aeronaves nos aeroportos e mais particularmente atrasos de partida de voos são também vistos como questões permanentes de gestão aeroportuária. Além dos itens anteriores, outros objetivos importantes da gestão do tráfego nos aeroportos são as melhorias de eficiência operacional reduzindo os atrasos de aeronaves, a otimização dos recursos aeroportuários para reduzir custos e o aumento da previsibilidade dos horários de partida de voos efetivos [22].

Atualmente, os atrasos e os congestionamentos tornaram-se uma situação comum nos aeroportos em todo o mundo, o que resulta em um alto custo financeiro e social para as companhias aéreas e passageiros [62] [12]. Por exemplo, em 2014, cerca de 19,1% dos voos domésticos no Brasil foram cancelados ou sofreram atrasos maiores que 30 minutos [3]. Uma forma de reduzir os atrasos dos voos é expandir a infraestrutura aeroportuária. Entretanto, trata-se de uma atividade com alto custo financeiro e que pode levar anos para ser concluída. De fato, existe um consenso entre os especialistas na indústria de transporte aéreo em que o desenvolvimento de infraestrutura por si só não é suficiente para

satisfazer os aumentos significativos de atraso dos voos [7]. Se os atrasos resultantes do mau tempo são na maior parte inevitáveis, atrasos resultantes de desempenho insuficiente de gestão do tráfego no aeroporto podem ser reduzidos através da busca de novas abordagens operacionais visando melhorar o desempenho geral do aeroporto.

A gestão das operações em solo, em inglês, *Ground Handling Management* (GHM), compreende os serviços exigidos por uma aeronave enquanto ela está no solo em um terminal ou em uma posição remota no aeroporto, seja no momento da sua chegada no aeroporto ou no momento da sua partida para um novo voo. Isso inclui também as atividades de embarque/desembarque de passageiros, carga/descarga de bagagens, bem como as atividades de manutenção da aeronave como o abastecimento de combustíveis, a limpeza e saneamento, dentre outras [39].

A tomada de decisão colaborativa do aeroporto (A-CDM) é um conceito amplamente aceito que cria um procedimento comum de gestão em solo para os diferentes componentes do Sistema de Transporte Aéreo (ATS). O objetivo deste conceito é melhorar a comunicação entre os diferentes intervenientes do aeroporto como o controle de tráfego aéreo, as autoridades do aeroporto e as companhias aéreas [42].

O planejamento multiagente (MAP) é um método de Inteligência Artificial que tem como objetivo à resolução de problemas através do planejamento em domínios onde várias partes interessadas planejam de modo independente e agem em conjunto e têm de compartilhar recursos, atividades e objetivos. Em outras palavras, no planejamento multiagente, o planejamento e a sua execução ocorrem de maneira distribuída [80]. Numa abordagem cooperativa, onde os agentes são considerados cooperativos, a ênfase é colocada em como o planejamento pode ser estendido a um ambiente distribuído.

Considera-se que o MAP é sobre a construção de um curso de ação (plano) entre vários agentes heterogêneos que têm capacidades diferentes e diferentes visões do mundo. Portanto, o objetivo principal deste trabalho é propor uma estrutura que cria um plano solução global através da composição dos planos individuais propostos pelos participantes para melhorar e otimizar o desempenho das operações em solo compatível com o conceito A-CDM.

A solução proposta, chamada GH-MAP, foi modelada através da teoria de planejamento multiagente. Essa abordagem, é inovadora na solução do problema de planejamento das operações em solo onde permite aos seus gestores elaborar um plano conjunto que será executado posteriormente pelos mesmos.

1.1 Motivação

Os aeroportos estão cada vez mais privatizando suas operações em solo. As operações em solo que têm sido tradicionalmente subsidiadas para as divisões corporativas do aeroporto ou da companhia aérea nacional estão agora sendo oferecidas em livre concorrência. Na União Europeia, a privatização do mercado de operações em solo pela Directiva 96/67/EC, provocou um aumento no número de empresas terceirizadas de operações em solo de mais de 80% entre 1996 e 2007 [21]. Esse aumento da concorrência causou o aumento da necessidade de maior efetividade nas suas operações.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor uma estrutura de planejamento multiagente para elaboração de um plano solução global por meio de uma gestão colaborativa das operações em solo nos aeroportos. Os objetivos específicos são:

- Analisar outros métodos existentes, verificando as vantagens e desvantagens de cada método.
- Definição de um protocolo de coordenação entre agentes cooperativos na tomada de decisão para compartilhar informações sobre os planos dos agentes;
- Desenvolvimento de algoritmos para o planejamento e alocação de recursos de operações em solo as aeronaves de acordo com seus tempos de chegada e partida.
- Verificação da validade da estrutura de planejamento multiagente.

1.3 Estrutura do Trabalho

Após este capítulo, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo 2, é exposta a fundamentação teórica dos conceitos explorados. São estudados os conceitos sobre sistemas multiagentes e planejamento multiagente, um dos pilares teóricos deste trabalho.

No Capítulo 3, são elucidados importantes conceitos concernentes ao modelo de planejamento multiagente para frente (FMAP). São introduzidos os conceitos sobre a formalização da tarefa MAP e procedimento de planejamento de refinamento no FMAP.

O Capítulo 4 explicita algumas noções conceituais a respeito do tráfego aéreo. A tomada colaborativa de decisão (CDM) é apresentada em detalhes, com o aprofundamento da metodologia aplicada ao escopo aeroportuário. São descritas também as diversas fases das operações em solo e são expostos os conceitos gerais nesta modalidade de transporte.

O Capítulo 5 apresenta alguns trabalhos relevantes como estado da arte no problema de planejamento das operações em solo nos aeroportos.

No Capítulo 6, o framework de planejamento para gestão das operações em solo é proposto. O modelo proposto tem como base o conceito de sistemas multiagentes e planejamento multiagente para analisar a colaboração entre as entidades.

O Capítulo 7 descreve a arquitetura do protótipo desenvolvido para o modelo proposto.

A descrição dos procedimentos de simulação, as bases de dados utilizadas são apresentados no Capítulo 8. Ainda neste capítulo, são averiguados os resultados obtidos e é elaborada a análise dos mesmos.

O Capítulo 9 apresenta as conclusões do trabalho, as contribuições e os trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Este capítulo descreverá os fundamentos teóricos que compreendem conceitos sobre Sistemas Multiagentes e conceitos sobre Planejamento Multiagente.

2.1 Sistemas Multiagentes

2.1.1 Conceitos

Segundo Russell *et al.* [72], um agente é algo capaz de perceber seu ambiente por meio de sensores e de agir sobre esse ambiente por meio de atuadores como é mostrado na Figura 2.1. Exemplos incluem agente humano, robô e *software*.

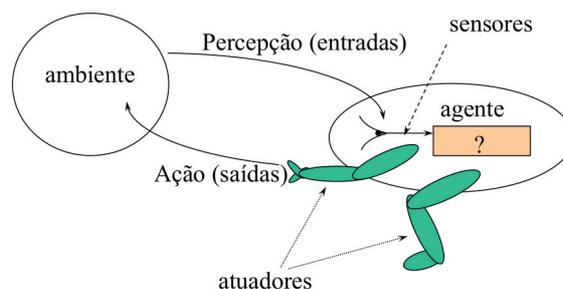


Figura 2.1: Agente no seu ambiente [86].

Segundo Wooldridge [86], um agente é um sistema computacional que está localizado em algum ambiente, e que é capaz de ação autónoma nesse ambiente, a fim de cumprir seus objetivos de projeto. Wooldridge adotou duas noções de agentes: a noção fraca e a noção forte. Na noção fraca de agentes, o agente é um sistema computacional, sendo *hardware* ou *software*, com certas propriedades tais como autonomia, habilidade social, reatividade e pró-atividade. Na noção forte de agentes, mais adotada pelos pesquisadores

ligados a área de Inteligência Artificial, o agente possui, além das propriedades acima citadas, propriedades relacionadas ao comportamento humano tais como conhecimento, crença, intenção e obrigação [86].

Algumas propriedades são essenciais para uma melhor caracterização de agente. A primeira é a **autonomia**, isto é, ser capaz de agir independentemente com seu ambiente através de seus próprios sensores ou com as suas próprias percepções com o objetivo de realizar alguma tarefa [59]. Operar sem intervenção humana e ter algum tipo de controle sobre suas ações e seu estado interno.

Associado à autonomia está:

- A **reatividade** que é a capacidade que o agente tem de perceber seu ambiente e responder rapidamente as alterações que ocorrem no ambiente a fim de satisfazer seus objetivos.
- A **pró-atividade** que nada mais que a capacidade que o agente tem de exibir um comportamento baseado em objetivos para *tomar iniciativas* a fim de satisfazer seus objetivos.
- A **habilidade social** que é a capacidade que o agente tem de interagir com outros agentes.

Os Sistema Multiagentes são sistemas computacionais compostos por múltiplos agentes autônomo, que interagem com os outros a fim de desempenhar determinadas tarefas ou satisfazer um conjunto de objetivos [71].

Um dos pontos essenciais para permitir a construção de SMA, consiste em coordenar as interações e as dependências das atividades dos diferentes agentes no contexto do SMA, i.e., coordenar esses agentes. Desta forma, a coordenação desempenha um papel essencial nos SMA porque estes sistemas são inerentemente distribuídos [59].

Duas metodologias de coordenação foram propostas por diferentes autores : metodologias aplicáveis em domínios contendo agentes competitivos (“*self-interested*”), i.e., agentes preocupados com o seu bem próprio, e as metodologias aplicáveis a domínios contendo agentes cooperativos, i.e., agentes que incluem uma noção de preocupação pelo bem do grupo. Relativamente à coordenação de agentes cooperativos interessa estudar as metodologias que permitem construir equipes de agentes. Neste contexto assume-se particular relevância as metodologias que permitem definir uma organização estrutural da sociedade de agentes, a definição e troca de papéis, a definição e alocação de tarefas aos diversos agentes e o planejamento conjunto multiagente [59].

2.1.2 Motivação

Conforme Louro *et al.* [59], a principal motivação dos SMAs encontra-se relacionada com o fato de grande parte dos problemas mais frequentemente encontrados, serem inerentemente distribuídos de uma ou várias formas. Outras motivações estão relacionadas com:

- A dimensão do problema ser demasiado elevada para ser resolvido por um único agente monolítico;
- Permitir a interconexão e interoperação de múltiplos sistemas legados (“*legacy*”), i.e., sistemas de gerações anteriores cuja manutenção do código já não é possível;
- Providenciar uma solução natural para problemas geográfica e/ou funcionalmente distribuídos.

2.2 Planejamento

O planejamento é a arte de construir algoritmos de controle que sintetizam um curso de ação para alcançar um conjunto desejado de objetivos a partir de uma situação inicial. O objetivo de um planejamento é o de usar funções de utilidade, normalmente chamadas de heurísticas, para avaliar as ações a serem executadas [45].

Assim, o planejamento clássico pode ser visto como um processo de busca em que um único agente sintetiza um conjunto de ações que lhe permite atingir seus objetivos. Os planejadores clássicos enfrentam duas questões importantes: a definição de linguagens robustas e expressivas para a modelagem das ações e das mudanças, e a organização da busca dos planos capazes de atingir os objetivos, isto é, o desenvolvimento de técnicas eficientes de resolução de problemas.

Os paradigmas de planejamento podem ser classificados de acordo com os seguintes conceitos [73]:

- **Representação de nó:** Um planejador pode realizar uma pesquisa baseada em estado, onde um nó na árvore de pesquisa representa uma situação específica ou uma pesquisa baseada em plano, na qual os nós representam planos.
- **Tipo de encadeamento:** Um planejador de encadeamento para frente (*forward-chaining*) parte do estado inicial para resolver os objetivos do problema. Os planejadores de encadeamento para trás (*backward chaining*) executam o processo de busca na direção oposta, o que reduz a ramificação da árvore de busca, pois a pesquisa é guiada pelos objetivos.
- **Representação do plano:** Os planejadores de ordem total criam soluções parciais como seqüências de ações completamente ordenadas, enquanto os planejadores de

ordem parcial estabelecem restrições de ordem parcial entre as ações de cada solução parcial.

Os primeiros planejadores realizaram uma busca baseada em estado, modelando-a em termos de exploração do espaço dos estados do mundo, com as transições entre estados sendo afetadas pelas ações. Posteriormente, tornou-se evidente a necessidade de manipular planos parciais durante a busca, o que levou ao projeto de algoritmos de busca plano-espaço que exploram o espaço de planos parciais [70][8][85]. A abordagem de Planejamento de Ordem Parcial (POP) prossegue refinando os planos parciais através da adição de ações, ligações causais e restrições de ordenação. Outras abordagens aplicam um tipo diferente de refinamento substituindo as ações abstratas por fragmentos de plano que são capazes de realizar essas ações. Isso é conhecido como Planejamento de Tarefas Hierárquicas (HTN) [38], no qual um problema de planejamento é decomposto em um conjunto ordenado de níveis de abstração e as ações são sucessivamente refinadas sendo que as ações restantes podem ser executadas por um único agente.

Nos últimos anos, vimos uma série de abordagens promissoras que aumentam significativamente a eficiência dos sistemas de planejamento. Os mais proeminentes entre estes são GRAPHPLAN [13], SATPLAN [54] e planejamento de pesquisa heurística [15]. GRAPHPLAN e SATPLAN trabalham em etapas, construindo estruturas adequadas e, em seguida, procurando-lhes soluções. No GRAPHPLAN, a estrutura é um grafo, enquanto que no SATPLAN é um conjunto de cláusulas. Na abordagem de planejamento heurístico, uma função heurística é derivada da especificação da instância de planejamento e usada para guiar a pesquisa através do espaço de estados. Esta abordagem revelou-se muito bem sucedida como demonstrado pelo planejador FF [50].

Além disso, a comunidade de planejamento ainda é ativa na tarefa de encontrar técnicas de pesquisa eficiente para o planejamento clássico de agente único, particularmente em projetar técnicas de domínio independente que permitem que sistemas de planejamento totalmente automatizados melhorem seus desempenhos [81].

2.2.1 Planejamento Multiagente

O termo planejamento multiagente (MAP) refere-se ao problema do planejamento em domínios em que várias entidades (agentes) independentes planejam e agem em conjunto. Ele pode envolver agentes planejando por um objetivo comum, um agente coordenando os planos (fusão de planos) ou o planejamento de outros, ou agentes refinando seus próprios planos ao negociar sobre tarefas ou recursos [24]. Os agentes de planejamento podem colaborar para alcançar objetivos comuns ou podem agir egoisticamente para satisfazer seus próprios objetivos. Assim, a natureza dos problemas MAP introduz alguns desafios

que não estão presentes no planejamento clássico, como por exemplo, como os agentes interagem para desenvolver um plano distribuído, como a informação do planejamento é distribuída, quais informações sobre o problema eles possuem, como os objetivos comuns são distribuídos ou como os objetivos privados são tratados.

Os problemas MAP e soluções para ambientes multiagentes diferem consideravelmente de seu homólogo, agente único. O conhecimento de domínio é normalmente distribuído entre agentes, de modo que os agentes normalmente trabalham com um domínio incompletamente conhecido e, provavelmente, não têm acesso a todas as informações sobre o estado inicial do problema MAP. Algumas abordagens MAP permitem que o estado inicial de um problema de planejamento seja incompleto [19] e abordem o problema do planejamento com informações incompletas seguindo uma abordagem de planejamento de acordo com Hoffmann *et al.* [49]. Outras abordagens adotam a construção de bases de conhecimento completas, o que possibilita a geração de propostas de planejamento através do planejamento com informações completas [10].

O problema do planejamento distribuído tem sido abordado a partir de diferentes perspectivas: uma abordagem começou com um foco no planejamento e como ele pode ser estendido para um ambiente distribuído e a outra abordagem começou com ênfase no problema de controle e coordenação das ações de múltiplos agentes em um ambiente compartilhado [36]. A primeira abordagem está mais relacionada ao problema do planejamento por múltiplos agentes e é a visão geralmente adotada pela comunidade de planejamento, enquanto a segunda abordagem está mais preocupada com o problema do planejamento de múltiplos agentes (atuando), e está intimamente ligada à pesquisa em sistemas multiagentes. No entanto, vários trabalhos compartilham características de ambas as abordagens, particularmente sistemas com agentes auto-motivados que devem cooperar em alguns pontos com um objetivo comum. Portanto, um problema MAP pode ser abordado a partir de diferentes direções dependendo se o plano pode ser distribuído entre uma variedade de sistemas de execução e se o processo de planejamento deve ser distribuído. Isso dá origem a um planejamento centralizado/distribuído para planos centralizados/distribuídos [34].

Os dois aspectos chaves em um problema MAP são a atividade de planejamento através da qual as entidades participantes devem desenvolver um curso de ação para atingir os objetivos do problema e um processo de coordenação que combinará as soluções parciais em um único plano competente que resolve o problema. Em geral, os seguintes passos podem ser distinguidos no processo de resolução de um problema MAP [34]: 1) refinamento de objetivos globais, 2) alocação de tarefas, 3) coordenação antes do planejamento, 4) planejamento individual, 5) coordenação após o planejamento e 6) execução do plano. Nem todos os passos precisam ser incluídos. Por exemplo, as etapas 1 e 2 não são necessárias se não houver objetivos comuns. Além disso, algumas abordagens combinam diferentes

fases. Por exemplo, os agentes já podem coordenar seus planos ao construir seus planos (combinação das fases 4 e 5), ou adiar a coordenação até a fase de execução (combinação das fases 5 e 6), como no caso do planejamento contínuo, um processo contínuo e dinâmico em que o planejamento e a execução são entrelaçados [64].

A próxima subseção apresenta alguns dos mecanismos de coordenação mais relevantes no planejamento multiagente.

Coordenação no MAP

Conforme descrito na seção anterior, um dos passos básicos no processo de resolução de uma tarefa MAP se concentra na coordenação da atividade dos agentes a fim de encontrar um plano solução. Esta tarefa pode ser realizada em diferentes fases do processo MAP [29]. Algumas abordagens realizam a coordenação antes do processo de planejamento atual, enquanto outras permitem que os agentes executem um planejamento individual e se concentrem em mesclar os planos resultantes em uma solução conjunta. Finalmente, alguns trabalhos combinam as atividades de planejamento e coordenação.

A maioria das abordagens MAP enfatiza o problema de distribuir o processo de planejamento entre vários agentes de planejamento e de mesclar os planos locais resultantes para chegar a um plano conjunto que atenda aos objetivos globais. Alguns trabalhos abordam este problema sob a abordagem de planejamento contínuo [36], no qual o planejamento e a execução são intercalados e a coordenação dos planos locais é realizada através da sincronização dos agentes em tempo de execução [19][25]. Outras abordagens supõem a existência de agentes auto-interessados e definem o MAP como o problema de encontrar um plano para cada agente que atinja seus objetivos, de modo que esses planos sejam coordenados e os objetivos globais também sejam atingidos [29]. Sob essa perspectiva, a ênfase é sobre como gerenciar as interdependências entre os planos dos agentes e escolher os mecanismos para resolver o problema de coordenação. Alguns frameworks utilizam, no entanto, uma abordagem de coordenação pré-planejamento, que estabelece um conjunto de restrições de coordenação antes do processo de planejamento, a fim de garantir que os planos resultantes sejam livres de conflitos.

Há um grande corpo de pesquisa focada em métodos de fusão de planos visando a construção de um plano conjunto. Uma das abordagens mais conhecidas para a coordenação de planos é o framework de Planejamento Global Parcial (PGP) [35]. No PGP, os agentes comunicam seus planos locais ao restante dos agentes, que por sua vez mesclam essas informações em seu próprio plano parcial global e tentam melhorá-lo. Tal plano melhorado é mostrado aos outros agentes, que podem aceitá-los, rejeitá-los ou modificá-los. Em [26], os autores propõem uma extensão do paradigma de Planejamento de Ordem Parcial (POP) para o caso multiagente, de forma que os agentes possam se beneficiar mutuamente

coordenando seus planos e evitando a duplicação de esforços. Algumas abordagens até mesmo propõem algoritmos para lidar com agentes insinceros e intercalar planejamento, coordenação e execução [37].

No entanto, alguns frameworks MAP seguem uma abordagem de coordenação pré-planejamento, através da qual estabelecem um conjunto de restrições de coordenação antes do processo de planejamento, a fim de garantir que os planos resultantes sejam livres de conflitos. Algumas dessas abordagens introduzem um conjunto de restrições chamadas leis sociais [75] [87] que devem ser seguidas pelos agentes. Essas restrições tornam o processo de fusão de planos mais fácil e garantem que os planos resultantes ficarão livres de conflitos. Outras abordagens de pré-planejamento tentam descobrir as interações entre as tarefas dos agentes de planejamento [78].

Uma vez que um problema MAP pode ser visto como o problema de ter agentes individualmente motivados cooperando para um objetivo comum (tipicamente a construção de um plano global competente), a negociação sustenta as tentativas de cooperação e coordenação, e é necessária tanto quando os agentes são auto-interessados e quando eles são cooperativos [52]. Podemos também encontrar trabalhos na literatura sobre negociação como uma ferramenta para coordenar agentes cooperativos no planejamento distribuído [58][63].

Outra tendência de pesquisa concentra-se no uso da argumentação para a coordenação no MAP. O sistema TRAINS [2], uma plataforma de pesquisa que considera o problema da representação de planos para o planejamento de iniciativas mistas, foi o primeiro framework a introduzir essa abordagem. O trabalho em [9][10] propõe uma abordagem baseada em argumentação para a coordenação de vários agentes, com o objetivo de discutir a validade das propostas do plano. Outras abordagens levam em conta as necessidades de comunicação que surgem quando os planos estão sendo executados [77].

2.2.2 Planejamento de Ordem Parcial - POP

Nas abordagens de Planejamento de Ordem Total, as ações do plano são obtidas na mesma ordem em que são executadas. Desta forma, se um planejador escolhe uma ação errada, terá que introduzir uma outra ação para desfazer os efeitos do primeiro. Como o oposto a estes modelos, o paradigma de Planejamento de ordem parcial (*Partial-order Planning*) [8] introduz uma abordagem mais flexível, estabelecendo relações de ordem parcial entre as ações no plano em vez de impor uma ordem concreta entre elas. Os planejadores baseados em POP trabalham simultaneamente sobre todos os objetivos de planejamento, mantendo relações de ordem parciais entre as ações sem comprometer uma ordem precisa entre elas, até que a própria estrutura do plano o determine. Esta estratégia baseada

em adiar decisões durante a pesquisa de planejamento é conhecida como estratégia *least commitment* [85].

Em vez de realizar uma pesquisa baseada em estado, os modelos POP adotam uma abordagem de pesquisa baseada em plano. Assim, um POP aborda o processo de construção de uma árvore de busca na qual cada nó representa um plano parcial diferente, sem manter a noção de estado de planejamento. O POP também é classificado de acordo com as abordagens de busca de encadeamento para trás uma vez que inicia a busca com o objetivo de satisfazer os objetivos da solução do problema e construir o plano para trás. Em conclusão, o POP pode ser considerado um processo de busca de encadeamento para trás baseado em planos [81].

Os planos parciais contêm um conjunto de *passos* [85], que são as representações das ações de planejamento dentro do plano parcial. Assim, cada etapa é composta por um conjunto de pré-condições e efeitos, exceto por dois passos fictícios, incluídos em cada plano parcial, que representam o estado inicial e os objetivos. Os passos são parcialmente ordenados através de um conjunto de *restrições de ordenação*. Uma restrição de ordem parcial indica apenas uma relação de precedência entre duas etapas. Portanto, as restrições de ordem parcial permitem que outras etapas sejam ordenadas entre as etapas que formam a restrição.

Um *objetivo aberto* é uma pré-condição que não é suportada por um *link causal*. Um link causal indica que um passo suporta uma pré-condição de outro passo, por ter um efeito que coincide com a pré-condição envolvida. A introdução de links causais em um plano parcial pode desencadear o aparecimento de *ameaças* como um efeito colateral. Uma ameaça ocorre quando há um passo que pode ser ordenado entre ambos os passos do link causal e tem um efeito que é complementar à pré-condição imposta pelo link causal. Ambos os objetivos abertos e ameaças são considerados como *falhas* do plano. Assim, o processo do POP se concentra na resolução de todas as falhas de um plano de ordem parcial através da introdução de links causais e restrições de ordenação [81].

O POP tornou-se o foco da pesquisa de planejamento na década de 1990. No entanto, ele enfrenta um importante desafio que tem levado a pesquisa de planejamento colocar a ênfase em abordagens baseadas no estado. Este problema está relacionado com a falta de escalabilidade dos algoritmos POP. O problema de definir uma heurística de alta qualidade para orientar o processo de busca de espaço-plano do POP permanece sem solução. Atualmente, não existe uma única heurística POP que possa tornar este processo competitivo contra os mais recentes frameworks de planejamento baseados em estado. Mesmo os mais recentes, embora melhorando o desempenho do POP [65], não são suficientemente eficientes para serem competitivos em relação às abordagens baseadas no estado. Por esta razão, o POP tem sido descontinuado pela vasta maioria da comunidade

de planejamento, em favor de abordagens baseadas em estado mais recentes. No entanto, o crescente interesse pelos frameworks MAP tornou o POP novamente relevante, uma vez que sua flexibilidade o torna uma boa alternativa para enfrentar problemas de planejamento multiagente [81].

2.3 Modelo de Planejamento Multiagente

Considera-se que o MAP refere-se a múltiplos agentes planejando e atuando de forma colaborativa. Mais especificamente, os agentes interagem para construir um plano que nenhum deles poderia ter gerado individualmente na maioria dos casos. Durante a construção do plano, os agentes têm em mente que o plano elaborado será executado conjuntamente por eles de modo que eles coletivamente alcançam seus objetivos individuais e comuns.

Conforme descrito na seção 2.2.2, as informações de domínio no MAP normalmente são distribuídas entre os agentes de planejamento, portanto, não é provável que eles tenham acesso a todas as informações sobre o estado inicial do problema. Neste método, a informação incompleta de um agente refere-se apenas à sua visão parcial do domínio e à ignorância sobre o conhecimento do resto dos participantes, mas o estado inicial do problema é conhecido entre todos os agentes. Assim, o estado inicial pode não ser totalmente conhecido de cada agente, bem como as capacidades ou os conhecimentos especializada de um agente pode ser também desconhecido para o resto dos agentes. Por outro lado, definimos um conjunto de objetivos comuns, conhecidos por todos os agentes e, possivelmente, um conjunto de objetivos individuais especificados como restrições *soft* [44]. Os objetivos individuais só são conhecidos por cada agente particular e, ao contrário dos objetivos comuns, o agente não está comprometido em satisfazê-los.

De forma informal, define-se um problema MAP da seguinte forma: dada uma descrição do estado inicial, um conjunto de objetivos globais, um conjunto de agentes, e para cada agente as suas capacidades e seus objetivos privados, encontrar um plano para cada agente, de tal forma que esses planos juntos sejam coordenados e os objetivos globais do problema sejam atendidos [29]. Nesta abordagem, denota-se um processo de planejamento distribuído entre vários agentes de planejamento/execução que elaboram um plano conjunto não linear que será posteriormente executado pelos mesmos agentes. Assume-se que os agentes são especificamente projetados para serem cooperativos, mas também podem ter seus próprios objetivos privados. Assim, as decisões do agente não devem ser apenas derivadas dos objetivos coletivos, mas também das decisões dos outros agentes.

A complexidade de uma tarefa MAP é muitas vezes descrita por meio de seu nível de acoplamento [80], que é medido como o número de interações que surgem entre os agentes

durante a resolução de uma tarefa. De acordo com este parâmetro, as tarefas MAP podem ser classificadas em tarefas ligeiramente acopladas (que apresentam poucas interações entre agentes) e tarefas fortemente acopladas (que envolvem muitas interações entre agentes). Portanto, os agentes em um contexto MAP querem minimizar as informações que compartilham uns com os outros, seja por razões estratégicas ou simplesmente porque não é relevante para o resto dos agentes, a fim de abordar a tarefa de planejamento.

Na literatura, existem duas abordagens principais para a resolução de tarefas MAP. Uma é a estratégia centralizada e a outra é a estratégia descentralizada. Por um lado, o centralizado depende de um agente intermediário que deve ter informações completas sobre as tarefas. A adoção de uma abordagem centralizada pode ajudar a melhorar o desempenho do planejador, aproveitando a estrutura inerente das tarefas MAP [57], no entanto, isso pode representar um problema quando há dados sensíveis que devem ser mantidos privados [74]. A abordagem distribuída ou descentralizada, por outro lado, propaga a responsabilidade do planejamento entre os diferentes agentes, que devem coordenar suas soluções locais, se necessário [69].

Neste trabalho, o Planejamento Multiagente para frente (*Forward Multi-Agent Planning*) é usado como o modelo básico, pois é um sistema MAP de domínio independente que é projetado para lidar com uma grande variedade de tarefas de planejamento de diferentes complexidade e nível de acoplamento [80].

Capítulo 3

Modelo de Planejamento

Multiagente para Frente - FMAP

Este capítulo apresenta o modelo de planejamento multiagente no qual o modelo proposto será baseado. Ele também descreve o procedimento seguido pelos agentes para a construção e a troca de planos entre eles.

3.1 Formalização da Tarefa

Os agentes no modelo FMAP trabalham com conhecimento limitado da tarefa de planejamento assumindo que as informações que não estão representadas no modelo de um agente são desconhecidas para o agente. Os estados do mundo são modelados através de um conjunto finito de variáveis de estado, V , cada uma das quais está associada a um domínio finito, D_v , de valores mutuamente exclusivos que se referem aos objetos no mundo. Atribuindo um valor d a uma variável $v \in V$ gera um fluente. Um fluente positivo é uma tupla $\langle v, d \rangle$ que indica que a variável v iguala ao valor d . Um fluente negativo é representado como $\langle v, \neg d \rangle$, indicando que v não toma o valor d . Um estado S é um conjunto de fluentes positivos e negativos.

Uma *ação* é uma tupla $\alpha = \langle PRE(\alpha), EFF(\alpha) \rangle$, onde $PRE(\alpha)$ é um conjunto finito de fluentes que representa as pré-condições de α e $EFF(\alpha)$ é um conjunto finito de variáveis positivas e negativas que modelam os efeitos de α . A execução de uma ação α em um estado S resulta em um novo estado S' como resultado da aplicação de $EFF(\alpha)$ sobre S . Um efeito da forma $(v = d)$ atribui o valor d à variável v , isto é, adicionar o fluente $\langle v, d \rangle$ a S' bem como adicionar um conjunto de fluentes $\langle v, \neg d' \rangle$ para cada outro valor d' no domínio de variável a fim de ter uma representação de estado consistente. Além disso, qualquer fluente em S da forma $\langle v, \neg d \rangle$ ou $\langle v, d'' \rangle$, $d'' \neq d$, é removido no estado S' . Esta última modificação remove qualquer fluente que contradiga $\langle v, d \rangle$. Por outro

lado, uma atribuição ($v \neq d$) adiciona o fluente $\langle v, \neg d \rangle$ a S' e remove $\langle v, d \rangle$ de S' , se tal fluente existe em S .

Uma **tarefa MAP** é definida como uma tupla $T_{MAP} = \langle AG, V, I, G, A \rangle$, onde:

- $AG = \{1, \dots, n\}$ é um conjunto finito não vazio de agentes.
- $V = \bigcup_{i \in AG} V^i$, onde V^i é o conjunto de variáveis de estado conhecido por um agente i .
- $I = \bigcup_{i \in AG} I^i$ é um conjunto de fluentes que define o estado inicial do T_{MAP} .
- G é o conjunto de objetivos do T_{MAP} .
- $A = \bigcup_{i \in AG} A^i$ é o conjunto de ações de planejamento dos agentes. A inclui duas ações α_i e α_f que não pertencem ao conjunto de ações de qualquer agente específico: α_i representa o estado inicial do T_{MAP} , isto é, $PRE(\alpha_i) = \emptyset$ e $EFF(\alpha_i) = I$ enquanto que α_f representa os objetivos globais do T_{MAP} , isto é, $PRE(\alpha_f) = G$, e $EFF(\alpha_f) = \emptyset$.

A visão de um agente i em uma tarefa MAP é definida como $T_{MAP}^i = \langle V^i, A^i, I^i, G^i \rangle$. V^i é o conjunto de variáveis de estado conhecido pelo agente i ; $A^i \subseteq A$ é o conjunto de suas capacidades (ações de planejamento); I^i é o subconjunto de fluentes do estado inicial I que são visíveis ao agente i ; e G é o conjunto de objetivos globais de T_{MAP} . Como os agentes no FMAP são totalmente cooperativos, todos os agentes têm conhecimento dos objetivos globais da tarefa.

As variáveis de estado de um agente i são determinadas pela visão que o agente tem sobre o estado inicial, I^i , as ações de planejamento que ele pode realizar, A^i , e o conjunto de objetivos do T_{MAP} . Isso também afeta o domínio D_v de uma variável v . Define-se $D_v^i \subseteq D_v$ como o conjunto de valores da variável v que são conhecidos pelo agente i .

Os agentes no FMAP interagem uns com os outros compartilhando informações sobre suas variáveis de estado. Para cada par de agentes i e j , as informações compartilhadas são definidas como $V^{ij} = V^{ji} = V^i \cap V^j$. Além disso, alguns dos valores no domínio de uma variável também podem ser conhecidos pelos agentes. O conjunto de valores de uma variável v que são públicos para um par de agentes i e j é definido como $D_v^{ij} = D_v^i \cap D_v^j$.

O modelo FMAP é um modelo de planejamento de refinamento multiagente, que é um método geral baseado no refinamento do conjunto de todos os planos possíveis. O raciocínio interno dos agentes no modelo FMAP é configurado como um procedimento de busca de Planejamento de Ordem Parcial (POP). Outras estratégias de pesquisa local são aplicáveis, desde que os agentes criem planos de ordem parcial. Os conceitos e definições a seguir são termos padrão do paradigma POP [45], que foram adaptados a variáveis de

estado. Além disso, as definições também consideram a natureza multiagente da tarefa de planejamento e as vistas locais da tarefa pelos agentes.

Um **plano de ordem parcial** ou plano parcial é uma tupla $\Pi = \langle \Delta, OR, CL \rangle$. $\Delta = \{\alpha | \alpha \in A\}$ é o conjunto de ações em Π . OR é um conjunto finito de restrições de ordenação (\prec) sobre Δ . CL é um conjunto finito de links causais da forma $\alpha \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \beta$ ou $\alpha \xrightarrow{\langle v, \neg d \rangle} \beta$, onde α e β são ações em Δ . Um link causal $\alpha \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \beta$ impõe pré-condições $\langle v, d \rangle \in PRE(\beta)$ através de um efeito $(v = d) \in EFF(\alpha)$ [45]. Da mesma forma, um outro link causal $\alpha \xrightarrow{\langle v, \neg d \rangle} \beta$ impõe pré-condições $\langle v, \neg d \rangle \in PRE(\beta)$ através de um efeito $(v \neq d) \in EFF(\alpha)$ or $(v = d') \in EFF(\alpha)$, $d' \neq d$.

Um plano parcial vazio é definido como $\Pi_0 = \langle \Delta_0, OR_0, CL_0 \rangle$, onde OR_0 e CL_0 são conjuntos vazios e Δ_0 contém apenas a ação inicial fictícia α_i . Um plano parcial Π para uma tarefa T_{MAP} sempre conterá α_i .

A introdução de novas ações em um plano parcial pode desencadear a aparência de *falhas*. Existem dois tipos de falhas em um plano parcial: pré-condições que ainda não foram resolvidas (ou suportadas) através de um link causal e ameaças. Uma *ameaça* sobre um link causal $\alpha \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \beta$ é causado por uma ação γ que não é ordenada com relação a α ou β e potencialmente pode modificar o valor de v [45] ($(v \neq d) \in EFF(\gamma)$ ou $(v = d') \in EFF(\gamma)$, $d' \neq d$), tornando o link causal inseguro. As ameaças são endereçadas pela introdução de uma restrição de ordenação $\gamma \prec \alpha$ ou uma restrição de ordenação $\beta \prec \gamma$. Um plano livre de falhas é um plano parcial livre de ameaças, no qual as pré-condições de todas as ações são suportadas por meio de ligações causais.

Agentes de planejamento no modelo FMAP cooperam para resolver tarefas MAP, refinando progressivamente um plano Π inicialmente vazio até que uma solução seja alcançada. A definição de *plano de refinamento* está estreitamente relacionada com a pesquisa de planejamento de ordem parcial de encadeamento interno realizada pelos agentes. O planejamento de refinamento é uma técnica que é amplamente utilizada por muitos planejadores onde uma primeira solução inicial é progressivamente refinada até o tempo de deliberação expirar [74].

Um **plano de refinamento** $\Pi_r = \langle \Delta_r, OR_r, CL_r \rangle$ sobre um plano parcial $\Pi = \langle \Delta, OR, CL \rangle$ é um plano parcial livre de falhas que estende Π , isto é, $\Delta \subset \Delta_r$, $OR \subset OR_r$ e $CL \subset CL_r$. Π_r introduz uma nova ação $\alpha \in \Delta_r$ em Π , resultando em $\Delta_r = \Delta \cup \alpha$. Todas as pré-condições em $PRE(\alpha)$ estão ligadas a ações existentes em Π através de links causais, isto é, todas as pré-condições são suportadas: $\forall p \in PRE(\alpha), \exists \beta \xrightarrow{p} \alpha \in CL_r$, onde $\beta \in \Delta$.

Os planos de refinamento no FMAP incluem ações que podem ser executadas em paralelo por diferentes agentes. Alguns modelos MAP consideram que duas ações paralelas

ou não sequenciais são mutuamente consistentes se nenhuma delas modifica o valor de uma variável de estado em que a outra se baseia ou afeta [19]. Também considera-se que as pré-condições de duas ações mutuamente consistentes têm de ser consistentes [16]. Portanto, duas ações não-sequenciais $\alpha \in A^i$ e $\beta \in A^j$ são mutuamente consistentes se nenhuma das seguintes condições se mantiver:

- $\exists(v = d) \in EFF(\alpha)$ e $\exists(\langle v, d' \rangle \in PRE(\beta) \vee \langle v, \neg d \rangle \in PRE(\beta))$, onde $v \in V^{ij}$, $d \in D_v^{ij}$, $d' \in D_v^j$ e $d \neq d'$ ou vice-versa, isto é, os efeitos de α e as pré-condições de β (ou vice-versa) não se contradizem nas condições especificadas.
- $\exists(v = d) \in EFF(\alpha)$ e $\exists(\langle v, d' \rangle \in EFF(\beta) \vee (v \neq d) \in EFF(\beta))$, onde $v \in V^{ij}$, $d \in D_v^{ij}$, $d' \in D_v^j$ e $d \neq d'$ ou vice-versa, isto é, os efeitos de α e os efeitos de β (ou vice-versa) não se contradizem nas condições especificadas.
- $\exists \langle v, d \rangle \in PRE(\alpha)$ e $\exists(\langle v, d' \rangle \in PRE(\beta) \vee \langle v, \neg d \rangle \in PRE(\beta))$, onde $v \in V^{ij}$, $d \in D_v^{ij}$, $d' \in D_v^j$ e $d \neq d'$ ou vice-versa, isto é, as pré-condições de α e as pré-condições de β (ou vice-versa) não se contradizem nas condições especificadas.

Os agentes abordam o paralelismo pela resolução de ameaças sobre os links causais do plano. Assim, a consistência entre quaisquer duas ações não-sequenciais introduzidas por diferentes agentes é sempre garantida como planos de refinamento são planos livre de falhas.

Um **plano solução** para T_{MAP} é um plano de refinamento $\Pi = \langle \Delta, OR, CL \rangle$ que aborda todos os objetivos globais G do T_{MAP} . Um plano solução inclui a ação fictícia final α_f e garante que todas as suas pré-condições (observe que $PRE(\alpha_f) = G$) sejam satisfeitas, isto é, $\forall g \in PRE(\alpha), \exists \beta \xrightarrow{g} \alpha_f, \beta \in \Delta$, que é a condição necessária para garantir que Π resolve T_{MAP} .

3.1.1 Privacidade em Planos Parciais

Cada vez que um agente i refina um plano parcial introduzindo uma nova ação $\alpha \in A^i$, ele comunica o plano de refinamento resultante ao restante dos agentes no T_{MAP} . Conforme mencionado acima, a informação que é pública para um par de agentes é definida de acordo com as variáveis de estado e os valores de domínio comuns. Para preservar a privacidade, o agente i só comunicará ao agente j os fluentes em ação α cujas variáveis são comuns a ambos os agentes. As informações de um plano de refinamento Π que o agente j recebe do agente i configura sua *visão* desse plano, $view^j(\Pi)$. Mais especificamente, dado dois agentes i e j e um fluente $\langle v.d \rangle$, onde $v \in V^i$ e $d \in D_v^i$ (equivalente para um fluente negativo $\langle v, \neg d \rangle$), distingue-se três casos:

- **Fluente público:** se $v \in V^{ij}$ e $d \in D_v^{ij}$, o fluente $\langle v, d \rangle$ é público para os agentes i e j e assim o agente i enviará ao agente j todos os links causais, pré-condições e efeitos sobre $\langle v, d \rangle$.
- **Fluente privado para o agente i :** se $v \notin V^{ij}$, o fluente $\langle v, d \rangle$ é privado para o agente i com relação ao agente j , e assim o agente i vai incluir as pré-condições e os efeitos sobre $\langle v, d \rangle$ ao agente j . Os links causais da forma $\alpha \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \beta$ serão enviados ao agente j como restrições de ordenação $\alpha \prec \beta$.
- **Fluente parcialmente privado para o agente i :** se $v \in V^{ij}$ mas $d \notin D_v^{ij}$, o fluente $\langle v, d \rangle$ é parcialmente privado para o agente i em relação ao agente j . Em vez de $\langle v, d \rangle$, o agente i vai enviar ao agente j um fluente $\langle v, \perp \rangle$, onde \perp é o *valor indefinido*. Assim, as pré-condições da forma $\langle v, d \rangle$ serão enviadas como $\langle v, \perp \rangle$, os efeitos da forma $(v = d)$ serão substituídas por $(v = \perp)$ e os links causais $\alpha \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \beta$ adotarão a forma $\alpha \xrightarrow{\langle v, \perp \rangle} \beta$.

Se um agente j recebe um fluente $\langle v, d \rangle$, \perp é interpretado como: $\forall d \in D_v^j, \langle v, \neg d \rangle$. Isto é, \perp indica que v não é atribuído nenhum dos valores conhecidos para o agente j (D_v^j). Esse mecanismo é usado para informar um agente de que um recurso não está mais disponível em sua área de influência.

3.1.2 Linguagem de Definição

Há uma grande quantidade de trabalho sobre as linguagens de especificação de tarefa de planejamento. Uma vez que o planejamento tem sido tradicionalmente considerado como um problema centralizado, as linguagens de definição mais populares, tal como as diferentes versões do PDDL (Linguagem de definição de domínio de planejamento (*the Planning Domain Definition Language*)), são projetadas para modelar tarefas de planejamento de agente único. O MAP apresenta um conjunto de requisitos que não estão presentes no planejamento de agente único que motiva o desenvolvimento de linguagens de especificação para o planejamento multiagente [80].

Existem muitas abordagens diferentes para MAP como *MA-STRIPS* [17], que foi concebida como uma extensão minimalista para *STRIPS* [40]. *MA-STRIPS* é uma das linguagens MAP mais comuns. Ele permite definir um conjunto de agentes e associar as ações de planejamento que eles podem executar. O FMAP apresenta vários recursos avançados que motivaram a definição da sua própria linguagem de especificação baseada em PDDL (a sintaxe da linguagem é detalhada em [79]) ao invés de usar *MA-STRIPS*.

Como os estados do mundo no FMAP são modelados através de variáveis de estado em vez de predicados, a linguagem MAP é baseada em PDDL3.1 [55]. Ao contrário de seus

predecessores, que modelam as tarefas de planejamento através de predicados, o PDDL 3.1 incorpora variáveis de estado que mapeiam para um domínio finito de objetos da tarefa.

Em uma linguagem de agente único, o usuário especifica o domínio da tarefa (operadores de planejamento, tipos de objetos e funções) e o problema a ser resolvido (objetos da tarefa, estado inicial e objetivos).

3.2 Procedimento de Planejamento de Refinamento no FMAP

O FMAP baseia-se em um procedimento de planejamento cooperativo de refinamento, no qual os agentes exploram conjuntamente uma árvore de busca plano-espaco multiagente. Uma árvore de pesquisa multiagente é aquela em que os planos parciais dos nós são construídos com as contribuições de um ou mais agentes [80].

Os agentes mantêm uma cópia da árvore de pesquisa multiagente, armazenando a visão local que eles têm de cada um dos planos nos nós da árvore.

O FMAP aplica uma pesquisa multiagente A^* que explora iterativamente a árvore multiagente. Uma iteração do FMAP compreende as seguintes etapas: 1) Os agentes selecionam um dos nós folha inexplorados da árvore para expansão; 2) os agentes expandem o plano selecionado gerando todos os planos de refinamento sobre este nó; e 3) os agentes avaliam os nós sucessores resultantes e comunicam os resultados ao resto dos agentes. Em vez de usar uma estrutura de controle de transmissão, a FMAP usa liderança democrática, na qual um papel de coordenador é definido entre os agentes. Um dos agentes adota o papel de coordenador em cada iteração. Mais especificamente, uma iteração FMAP constitui:

- **Seleção do plano base:** Entre todos os nós abertos (nós folha inexplorados) da árvore de pesquisa multiagente, o agente coordenador seleciona o plano mais promissor, Π_b , como base para refinar na iteração recente. Π_b é selecionado de acordo com a avaliação dos nós abertos (detalhes sobre a avaliação e a seleção do nó são apresentadas na Seção 3.2.3). Na iteração inicial, o plano base é o plano vazio Π_0 .
- **Geração do plano de refinamento:** Os agentes expandem Π_b e geram seus nós sucessores. Um nó sucessor é um plano de refinamento sobre Π_b que um agente gera individualmente através de seu planejador de ordem parcial de encadeamento para frente embutido (ver a Seção 3.2.1).
- **Avaliação do plano de refinamento:** Cada agente i avalia seus planos de refinamento Π_r aplicando uma função de avaliação clássica A^* ($f(\Pi_r) = g(\text{view}^i(\Pi_r)) +$

$h(\text{view}^i(\Pi_r))$). A expressão $g(\text{view}^i(\Pi_r))$ representa o número de ações de Π_r . Como os agentes visualizam todas as ações dos planos (mas não necessariamente todas as suas pré-condições e efeitos), $g(\text{view}^i(\Pi_r))$ é equivalente a $g(\Pi_r)$. $h(\text{view}^i(\Pi_r))$ aplica a heurística baseada em DTG (ver Seção 3.2.3) para estimar o custo de alcançar um plano de solução a partir de Π_r .

- **Comunicação do plano de refinamento:** Cada agente comunica seus planos de refinamento ao restante dos agentes. As informações que um agente i comunica sobre o seu plano Π_r para o resto dos agentes depende do nível de privacidade especificado por cada um deles. Junto com o plano de refinamento Π_r , o agente i comunica o resultado da avaliação de Π_r , $f(\Pi_r)$.

Uma vez que a iteração é concluída, a liderança é entregue a outro agente, que adota o papel de coordenador, e uma nova iteração começa. O próximo agente coordenador seleciona o nó aberto Π que minimiza $f(\Pi)$ como o novo plano base Π_b , e então, os agentes procedem a expansão. Este processo iterativo continua até que Π_b se torna um plano solução que suporta a ação final α_f , ou quando todos os nós abertos foram visitados.

Um plano de refinamento Π é avaliado apenas pelo agente que o gera. O agente comunica Π juntamente com $f(\Pi)$ para o resto dos agentes. Portanto, a decisão sobre o plano base seguinte não é afetada pelo agente que desempenha o papel de coordenador, uma vez que todos os agentes gerenciam o mesmo valor $f(\Pi)$ para cada nó aberto Π .

3.2.1 Sistema de Planejamento de Ordem Parcial de Encadeamento para Frente

Os agentes do FMAP usam um sistema POP de encadeamento para frente para gerar os planos de refinamento; este será referido como FLEX no restante do capítulo. À semelhança de outras abordagens, a FLEX explora o potencial da pesquisa avançada para suportar o planejamento de ordem parcial. OPTIC [11], por exemplo, combina estruturas de ordem parcial com informações sobre o *estado fronteira* do plano. Informalmente falando, o estado fronteira do plano parcial de um nó de árvore é o estado resultante depois de executar as ações em tal plano. Dado um plano de refinamento $\Pi = \langle \Delta, OR, CL \rangle$, define-se seu *estado fronteira* $FS(\Pi)$ como o conjunto de fluentes $\langle v, d \rangle$ alcançados por ações $\alpha \in \Delta \mid \langle v, d \rangle \in EFF(\alpha)$, tal que qualquer ação $\alpha' \in \Delta$ que modifica o valor da variável v ($\langle v, d \rangle \in EFF(\alpha') \mid d \neq d'$) não é alcançável a partir de α seguindo as ordenações e links causais em Π .

As únicas ações que a OPTIC acrescenta a um plano são aquelas cujas pré-condições se encontram no estado fronteira. Esse comportamento força a OPTIC a alguns compromissos iniciais. No entanto, isso não sacrifica a completude, porque a pesquisa pode retroceder.

Além disso, TFPOP [57] aplica um POP de encaminhamento para frente centralizado para múltiplos agentes, mantendo um *thread* de execução seqüencial por agente.

As abordagens acima mencionadas permitem apenas a introdução de ações que sejam aplicáveis no estado fronteira do plano. Em contraste, o FLEX permite inserir ações em qualquer posição do plano sem assumir que qualquer ação no plano já tenha sido executada. Esta é uma abordagem mais flexível que também é mais compatível com o princípio de menor comprometimento que tipicamente guia o POP de encadeamento para frente.

O algoritmo 1 resume o procedimento FLEX invocado por um agente i para gerar planos de refinamento.

Algorithm 1 Algoritmo de busca do FLEX para um agente i

```

 $RP^i \leftarrow \emptyset$ 
if potentiallySupportable( $\alpha_f, view^i(\Pi_b)$ ) then
    return solutionPlans
end if
CandidateActions  $\leftarrow \emptyset$ 
for all  $\alpha \in A^i$  do
    if potentiallySupportable( $\alpha_f, view^i(\Pi_b)$ ) then
        CandidateActions  $\leftarrow CandidateActions \cup \alpha$ 
    end if
end for
for all  $\alpha \in CandidateActions$  do
    Plans  $\leftarrow \{view^i(\Pi_b)\}$ 
    repeat
        Select and extract  $\Pi_s \in Plans$ 
        Flaws( $\Pi_s$ )  $\leftarrow unsupportedPrecs(\alpha, \Pi_s) \cup Threats(\Pi_s)$ 
        if Flaws( $\Pi_s$ ) =  $\emptyset$  then
             $RP^i \leftarrow RP^i \cup \Pi_s$ 
        else
            Select and extract  $\Phi \in Flaws(\Pi_s)$ 
            Plans  $\leftarrow Plans \cup solveFlaws(\Pi, \Phi)$ 
        end if
    until Plans =  $\emptyset$ 
end for
return  $RP^i$ 

```

A primeira operação de um agente i que executa FLEX é verificar se a ação final fictícia α_f é suportável em Π_b , ou seja, se um plano solução pode ser obtido a partir de Π_b . Quando verdadeiro, o agente gera um conjunto de planos solução que abranja todas as formas possíveis para suportar as pré-condições de α_f através de links causais.

Se um plano solução não for encontrado, o agente i analisa todas as suas ações de planejamento A^i e estima se elas são suportáveis em Π_b . Dado uma ação $\alpha \in A^i$, a função

$potentiallySupportable(\alpha, \Pi_b)$ verifica se $\forall \langle v, d \rangle \in PRE(\alpha), \exists \beta \in \Delta(\Pi_b) \mid (v, d) \in EFF(\beta)$, isto é, o agente estima que α é suportável se para cada pré-condição de α houver um efeito correspondente entre as ações de Π_b .

O procedimento $potentiallySupportable$ é uma estimativa porque não verifica realmente as possíveis falhas que surgem ao suportar uma ação. Assim, um agente analisa as alternativas que suportam cada ação candidata α gerando uma árvore de pesquisa POP para aquela ação particular (loop *repeat* no Algoritmo 1). Todos os nós folha da árvore (armazenados na lista *Plans* no Algoritmo 1) são explorados, cobrindo assim todas as formas possíveis de introduzir α em Π_b .

Como no POP de encadeamento para frente, FLEX introduz a ação α em Π_b , suportando suas pré-condições através de links causais e resolvendo as ameaças que surgem durante a pesquisa. O conjunto de planos livre de falhas obtidos a partir desta busca são armazenados em RP^i como planos de refinamento válidos do agente i sobre Π_b . Este procedimento é realizado para cada ação candidata. A completude é garantida, uma vez que todos os possíveis planos de refinamento sobre um determinado plano de base são gerados pelos agentes envolvidos no T_{MAP} .

3.2.2 Completude e Solidez

Como explicado na seção anterior, os agentes refinam o plano base simultaneamente, analisando todas as formas possíveis de suportar suas ações no plano base. Uma vez que esta operação é feita por cada agente e por todas as suas ações, pode-se concluir que o FMAP é um procedimento completo que explora todo o espaço de busca.

Quanto à solidez, um plano de ordem parcial é consistente se for um plano livre de falhas. O algoritmo FLEX aborda inconsistências entre ações em um plano parcial, detectando e resolvendo ameaças.

Quando um agente i introduz uma ação α num plano base Π , o FLEX estuda as ameaças que α causa nos links causais de Π e as ameaças que as ações de Π podem causar nos links causais que suportam as pré-condições de α . Em ambos os casos, i é capaz de detectar todas as ameaças seja qual for a sua visão do plano, $view^i(\Pi)$. Ou seja, a solidez do FMAP é garantida independentemente do nível de privacidade definido entre os agentes.

No que diz respeito às ameaças causadas pelos efeitos de uma nova ação, a privacidade pode impedir o agente de ver alguns dos links causais do plano. Suponha que o agente i introduz uma ação α_t com um efeito ($v = d'$) no plano Π . Além disso, há um link causal em Π da forma $cl = \alpha_0 \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \alpha_1$ introduzido por um agente j ; como cl não é ordenado em relação a α_t , esta situação gera uma ameaça. De acordo com $view^i(\Pi)$, o agente i pode encontrar uma das seguintes situações:

- Se $\langle v, d \rangle$ é *público* a i e j , então cl está dentro de $view^i(\Pi)$, e assim a ameaça entre cl e α_t será corretamente detectada e resolvida promovendo ou rebaixando α_t .
- Se $\langle v, d \rangle$ é *privado* a j em relação a i , então α_t não pode conter um efeito (v, d') pois $v \notin V^i$. Portanto, a ameaça descrita acima nunca pode ocorrer em Π .
- Se $\langle v, d \rangle$ é *parcialmente privado* a j em relação a i , então $cl = \alpha_0 \xrightarrow{\langle v, d \rangle} \alpha_1$ será visto como $cl = \alpha_0 \xrightarrow{\langle v, \perp \rangle} \alpha_1$ em $view^i(\Pi)$. Uma vez que $\perp \neq d$, o agente i será capaz de detectar e abordar a ameaça entre α_t e cl .

Conseqüentemente, um agente sempre pode detectar as ameaças que surgem quando ele adiciona uma nova ação, α_t , no plano. Agora, deve-se estudar se as ameaças potenciais causadas por ações em Π sobre as links causais que suportam a ação α_t são corretamente detectadas pelo agente i . Supõe-se que existe um link causal $cl' = \beta \xrightarrow{\langle v', e' \rangle} \alpha_t$, e uma ação γ com um efeito $(v' = e')$ que não é ordenada em relação a α_t . Novamente, o agente i pode encontrar-se em três cenários diferentes de acordo com sua visão de $(v' = e')$:

- Se $(v' = e')$ é *público* a i e j , A ameaça entre cl e γ será detectada corretamente por i .
- Se $(v' = e')$ é *privado* a j em relação a i , então nenhuma das variáveis em $PRE(\alpha_t)$ estão relacionadas a v' pois $v' \notin V^i$. Portanto, essa ameaça nunca pode ocorrer em Π .
- Se $(v' = e')$ é *parcialmente privado* a j em relação a i , então $(v' = e')(v' = e')$ será visto como $(v' = \perp)$ em $view^i(\Pi)$. Uma vez que $\perp \neq e$, a ameaça entre γ e cl' será detectado corretamente pelo agente i .

Observe que a privacidade não impede que os agentes detectem e resolvem ameaças nem ela afeta a complexidade do processo. Se o fluente é público ou parcialmente privado, o agente que está refinando o plano será capaz de detectar a ameaça, porque vê o valor da variável ou vê \perp , e ambos contradizem o valor da variável no link causal. Se o fluente é privado, então não há tal ameaça. Isso prova que o FMAP é sólido.

3.2.3 Função Heurística baseada em Grafo de Transição de Domínio

O último aspecto do FMAP a ser analisado é como os agentes avaliam os planos de refinamento. O FMAP orienta a pesquisa através de uma função heurística de domínio independente, como a maioria dos sistemas de planejamento [28]. Ele utiliza as informações fornecidas pelos estados fronteira para realizar a avaliação heurística dos planos contidos nos nós da árvore.

De acordo com a definição apresentada na seção 3.2.1, o estado fronteira de um plano Π , $FS(\Pi)$, pode ser facilmente calculado como o conjunto finito de fluentes que resulta da execução das ações do plano Π em I , o estado inicial do T_{MAP} . Como os planos de refinamento não são planos seqüenciais, as ações em Δ devem ser *linearizadas* para calcular o estado fronteira. A linearização de um plano de refinamento Π envolve o estabelecimento de uma ordem total entre as ações em Δ . Dadas duas ações $\alpha \in \Delta$ e $\beta \in \Delta$, se $\alpha \prec \beta \in OR$ ou $\beta \prec \alpha \in OR$, mantem-se essa restrição de ordenação no plano linearizado. Se α e β são ações não-seqüenciais, estabelecemos uma ordem total entre elas.

Os estados fronteira permitem fazer uso de heurísticas baseadas em estado, como h_{FF} , a heurística do grafo de planejamento relaxado (RPG) de FF [50]. No entanto, a abordagem distribuída e o modelo de privacidade do FMAP torna a aplicação do h_{FF} inadequada para guiar a pesquisa. Uma vez que nenhum dos agentes tem conhecimento suficiente para construir um RPG por si só, usar h_{FF} para estimar a qualidade de um plano de refinamento envolve agentes construindo um RPG distribuído [88]. Este é um processo caro que requer muitas comunicações entre os agentes para coordenar uns aos outros, e tem que ser repetido para a avaliação de cada plano de refinamento. Portanto, o custo computacional alto e previsível da aplicação de h_{FF} levou a descartar essa escolha e optar por uma heurística que se baseia em grafos de transição de domínio (DTGs) [46].

O DTG é um grafo direcionado que mostra as maneiras pelas quais uma variável pode mudar seu valor [46]. Cada transição é rotulada com as condições necessárias para que isso aconteça; isto é, as pré-condições que são comuns a todas as ações que induzem a transição. Como os DTGs são independentes do estado do plano, os recálculos são evitados durante o processo de planejamento.

A privacidade é mantida em DTGs através do uso do valor indefinido \perp . Esse valor é representado em um DTG como o restante dos valores das variáveis, sendo a única diferença que as transições de/para \perp são rotuladas com os agentes que as induzem.

Para um determinado plano Π , a função heurística baseada em DTG (h_{DTG}) retorna o número de ações de um plano relaxado entre o estado fronteira $FS(\Pi)$ e o conjunto de objetivos de T_{MAP} , G . h_{DTG} realiza uma busca para trás introduzindo as ações que suportam os objetivos G no plano relaxado até que todas as suas pré-condições sejam suportadas. Assim, o princípio subjacente ao h_{DTG} é semelhante ao h_{FF} , exceto pelo fato de que os DTGs são usados em vez dos RPGs para construir o plano relaxado.

A avaliação h_{DTG} de um plano Π começa pelo cálculo do estado fronteira $FS(\Pi)$. Em seguida, um procedimento iterativo é realizado para construir o plano relaxado. Este procedimento gera uma lista de fluentes, *openGoals*, inicialmente definida para G . O processo iterativamente extrai um fluente de *openGoals* e suporta ele através da introdução de uma ação no plano relaxado. As pré-condições de tal ação são incluídas na

lista *openGoals*. Para cada variável $v \in V$, o procedimento gerencia uma lista de valores, $Values_v$, que é inicializada para o valor de v no estado de fronteira $FS(\Pi)$. Para cada ação adicionada ao plano relaxado que tem um efeito ($v = d'$), d' será armazenado em $Values_v$. Uma iteração do processo de avaliação de h_{DTG} executa as seguintes etapas:

- **Seleção do objetivo aberto:** A partir do conjunto *openGoals*, o procedimento extrai o fluente $\langle v, d_g \rangle \in OpenG$, que requer o maior número de transições de valor a ser suportado.
- **Cálculo do caminho DTG:** Para cada valor d_0 em $Values_v$, esta etapa calcula a seqüência mais curta de valor de transições em DTG de v de d_0 para d_g . Cada caminho é calculado aplicando o algoritmo de Dijkstra entre os nós d_0 e d_g no DTG associado à variável v . O caminho com o comprimento mínimo é armazenado como $minPath = ((d_0, d_1), (d_1, d_2), \dots, (d_{g-1}, d_g))$.
- **Construção do plano relaxado:** Para cada transição de valor $(d_i, d_{i+1}) \in minPath$, a ação de custo mínimo α_{min} que produz tal transição é introduzida no plano relaxado; isto é, $\langle v, d_i \rangle \in PRE(\alpha_{min})$ e $(v = d_{i+1}) \in EFF(\alpha_{min})$. O custo de uma ação é calculado como a soma do número mínimo de transições de valor necessário para suportar suas pré-condições. As pré-condições não suportadas de α_{min} são armazenadas em *openGoals*, então elas serão suportadas nas iterações subsequentes. Para cada efeito $(v' = d') \in EFF(\alpha_{min})$, o valor d' é armazenado em $Values'_v$, assim d' pode ser usado nas seguintes iterações para suportar outros *openGoals*.

O procedimento de avaliação iterativo continua até que todos os objetivos abertos tenham sido suportados, ou seja, $openGoals = \emptyset$, e h_{DTG} retorna o número de ações no plano relaxado.

3.2.4 Limitações do FMAP

Nesta seção, apresenta-se algumas limitações do FMAP que merecem ser discutidas. FMAP baseia-se no paradigma POP, assim ele pode lidar com planos com ações paralelas e só impõe uma ordenação quando estritamente necessário. A FMAP, no entanto, ainda não gerencia explicitamente as restrições de tempo. Um planejador baseado em POP pode facilmente ser estendido para incorporar o tempo porque a aplicação do princípio de menor comprometimento proporciona um alto grau de flexibilidade de execução [76]. Em resumo, o POP representa uma maneira natural e muito apropriada de incluir e administrar o tempo em um framework de planejamento.

O FLEX envolve a construção de uma árvore POP para cada ação potencialmente suportável. Este procedimento é mais caro do que as operações exigidas por um planejador

padrão para refinar um plano. No entanto, as árvores de pesquisa são independentes umas das outras, o que torna possível implementar o FLEX usando várias threads de execução. A paralelização melhora o desempenho do FLEX e a capacidade do FMAP de se expandir.

Atualmente, o FMAP está limitado a objetivos cooperativos, o que significa que todos os objetivos são definidos como objetivos globais para todos os agentes participantes (ver seção 3.1).

O FMAP é um procedimento geral destinado a resolver qualquer tipo de tarefa MAP. Em particular, resolver tarefas fortemente acopladas exige uma grande quantidade de coordenação. A coordenação multiagente em sistemas distribuídos onde os agentes devem cooperar é sempre uma questão importante. Esta dependência da coordenação torna o FMAP uma abordagem que depende da comunicação. Os agentes não só têm de comunicar os planos de refinamento que constroem em cada iteração, mas também têm de se comunicar durante a avaliação heurística dos planos de refinamento para manter a privacidade (ver seção 3.2.3). O uso de um agente coordenador reduz efetivamente a necessidade de comunicação. Os resultados experimentais mostrou que o FMAP pode efetivamente lidar com grandes instâncias do problema.

A gestão da privacidade é outra questão que potencialmente piora o desempenho da FMAP. Na Seção 2.3.1.1, define-se um mecanismo para detectar e tratar ameaças em planos parciais, mesmo quando os agentes não têm uma visão completa desses planos. A privacidade não adiciona complexidade extra ao FLEX, uma vez que os agentes gerenciam o valor indefinido \perp como qualquer outro valor no domínio de uma variável. Contudo, ele torna mais complexa a fase de comunicação do plano de refinamento porque, quando um agente i envia $view^j(\Pi)$ a um agente j , isso implica que i precisa adaptar previamente a informação de Π de acordo com as regras de privacidade definidas em relação a j .

A privacidade também afeta a avaliação heurística dos planos em termos de qualidade. Uma vez que um plano de refinamento só é avaliado pelo agente que o gera e esta avaliação é influenciada pela visão do plano do agente, o resultado pode não ser tão preciso como se o agente tivesse uma visão completa do plano. Os resultados empíricos, no entanto, mostraram que, mesmo com essas limitações, a função heurística fornece bom desempenho em uma ampla variedade de domínios de planejamento [79].

3.2.5 Implementação do FMAP

A maioria das aplicações multiagentes, hoje em dia, faz uso de plataformas multiagente *middleware* que lhes fornecem os serviços de comunicação exigidos pelos agentes [68]. O código inteiro do FMAP é implementado em Java e construído sob a plataforma Magentix²¹. Magentix2 fornece um conjunto de bibliotecas para definir o comportamento dos agentes,

¹<http://www.gti-ia.upv.es/sma/tools/magentix2>

juntamente com os recursos de comunicação exigidos pelos agentes. Os agentes Magentix2 se comunicam por meio da linguagem de comunicação do agente FIPA [67]. As mensagens são realizadas através do corretor QPid da Apache², que é um componente crítico para os agentes FMAP.

O FMAP é otimizado para aproveitar ao máximo as *threads* de execução da CPU. O procedimento FLEX, que gera planos de refinamento em um determinado plano de base, desenvolve uma árvore de pesquisa POP para cada ação potencialmente suportável do domínio do agente. Como as árvores POP são completamente independentes umas das outras, os processos de construção das árvores executam em paralelo para cada agente [79].

Os agentes sincronizam suas atividades no final da fase de geração do plano de refinamento. Conseqüentemente, o FMAP atribui o mesmo número de threads de execução a cada agente para que todos eles gastem uma quantidade semelhante de tempo para concluir o procedimento FLEX. Um agente pode avaliar simultaneamente tantos planos quanto os threads de execução que foram alocados [79].

Testes em [79] mostram que o FMAP supera outros métodos MAP porque é capaz de resolver tarefas fortemente acopladas e objetivos cooperativos, bem como tarefas ligeiramente acopladas. O desempenho do FMAP é afetado apenas pelas extensas comunicações entre os agentes. De acordo [79], o FMAP é atualmente o sistema MAP cooperativo independente do domínio mais competitivo.

²<http://qpido.apache.org/>

Capítulo 4

As Operações em Solo nos Aeroportos

Neste capítulo são apresentados os conceitos sobre o gerenciamento de tráfego aéreo, os conceitos sobre a tomada de decisão colaborativa e os principais conceitos envolvidos na gestão de operações em solo nos aeroportos.

4.1 Gerenciamento de Tráfego Aéreo

O setor de transporte aéreo executa um papel fundamental para o desenvolvimento e o crescimento de um país. Os voos operados diariamente têm uma importância reconhecida em diversas áreas, atendendo as atividades necessárias ao ser humano [60]. Os fluxos culturais, comerciais e industriais são afetados por serviços aéreos, bem como, seus resultados influenciam fortemente as contas internas e externas dos governos, por meio de receitas e despesas realizadas em moeda nacional e internacional [27].

Para controlar o fluxo dessas aeronaves, a atividade do Gerenciamento de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Management*) tem por objetivo garantir a segurança e a fluência de voos, tratando possíveis desbalanceamentos entre a demanda pela utilização do espaço aéreo e a capacidade da infraestrutura aeronáutica e aeroportuária existente [84].

O ATM segue normas e métodos bem definidos, recomendados pela Organização de Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization*). No Brasil, essas normas e métodos são segmentados em três atividades principais, onde cada uma é composta por processos específicos, coordenados, cooperativos e simultâneos.

O primeiro serviço prestado pelo ATM realiza atividades referentes ao Gerenciamento do Espaço Aéreo (*Air Space Management*), buscando prover um nível de disponibilidade suficiente para atender à demanda de tráfego. O segundo serviço prestado é o órgão de Controle de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Control*), sendo responsável por atividades

de separação segura entre aeronaves, e o fornecimento de informações aos pilotos, de forma a organizar e agilizar o fluxo de tráfego, evitando colisões. A terceira atividade é o Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo (*Air Traffic Flow Management*), sendo responsável por garantir o melhor fluxo de tráfego aéreo possível, através de procedimentos de ajuste de fluxo.

Segundo Crespo e Weigang [27], o ATFM é considerado uma tarefa extremamente complexa, altamente especializada e fortemente baseada na experiência do gerente de tráfego. Suas atividades tratam de questões críticas como eficiência (fluência e redução de atrasos), equidade (trabalhar com diferentes companhias aéreas), adaptabilidade (tratar condições meteorológicas), confiança e segurança (gerenciar aeroportos).

Conforme definido pela ICAO, o ATFM é aplicado segundo três fases de planejamento, o Estratégico, o Pré-tático e o Tático [51].

No estágio Estratégico, as ações são tomadas com antecedência de dois a seis meses antes de entrar em vigor. A fase de Planejamento Pré-tático envolve ações que devem ser tomadas no dia anterior ao dia em que entrará em vigor. E na fase de operações Táticas, as ações são realizadas no dia em que as mesmas entrarão em vigor.

Com o objetivo de melhorar os processos vinculados ao ATFM, foi criada a filosofia da Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*).

4.2 Tomada de Decisão Colaborativa (CDM)

Nos anos 1990, a filosofia da Tomada de Decisão Colaborativa (*Collaborative Decision Making*) foi considerada um novo paradigma para o gerenciamento de fluxo de tráfego aéreo (ATFM). Ela foi elaborada com base na premissa de que uma evolução nos processos de comunicação e na troca de informações entre os órgãos de controle de tráfego aéreo (ATC) e as companhias aéreas levaria a melhores decisões no gerenciamento do tráfego de aeronaves [5][6][48].

4.2.1 Tomada de Decisão Colaborativa nos Aeroportos

Na Europa, a Tomada de Decisão Colaborativa no Aeroporto (*Airport Collaborative Decision Making*) é baseada na troca de dados entre os participantes do processo de forma a melhorar a compartilhamento de informações do cenário presente [20]. Ela fornece uma estrutura focada na gestão de operações de decolagem e procura eliminar a mentalidade *first come first serve* do gerenciamento das pistas dos aeroportos. Este sistema está em uso em muitos aeroportos europeus, incluindo Bruxelas, Munique e Frankfurt. O A-CDM é dividido nos seguintes elementos:

- Compartilhamento de informações
- Marcos de Aproximação
- Tempo de taxiamento Variável
- Sequenciamento pré-decolagem
- Condições Adversas
- Gerenciamento Colaborativo de Atualização de Voos

Um membro do processo A-CDM é um interveniente de um aeroporto que participa do processo CDM. Logo, o A-CDM é implementado no ambiente do aeroporto, através da introdução de procedimentos operacionais e processos automatizados.

Os principais parceiros do processo A-CDM, segundo *European Telecommunications Standards Institute (ETSI)*, são:

- Operador do Aeroporto
- Operadores das Aeronaves
- Operadores em Solo
- Companhias de Degelo de Aeronaves
- Provedores de Serviço de Navegação Aérea (ATC)
- Operadores de Rede
- Serviços de Suporte (Polícia, Imigração, etc.)

Na Figura 4.1 é apresentado um resumo dessas informações.

O CDM já foi aplicado em alguns dos principais aeroportos europeus onde melhorou os desempenhos destes e recebeu uma boa aceitação pelos diferentes atores. No entanto, dentro do processo de *turnaround* (tempo de bloqueio) de aeronaves nos aeroportos, a gestão de operações em solo não foi desenvolvida especificamente na abordagem CDM, mesmo que tenha um papel importante na fluidez dos movimentos em terra das aeronaves nos aeroportos [42].

O conceito de A-CDM baseia-se principalmente nos seguintes princípios gerais [42]:

- Compartilhar, no momento certo, dados relevantes entre os diferentes parceiros.
- A qualidade dos dados trocados deve contribuir para a previsibilidade dos eventos e a capacidade de planejamento dos tomadores de decisão.
- As decisões da interface são atribuídas a um dos parceiros envolvidos.
- Todos os parceiros são informados *on-line* das decisões adotadas.

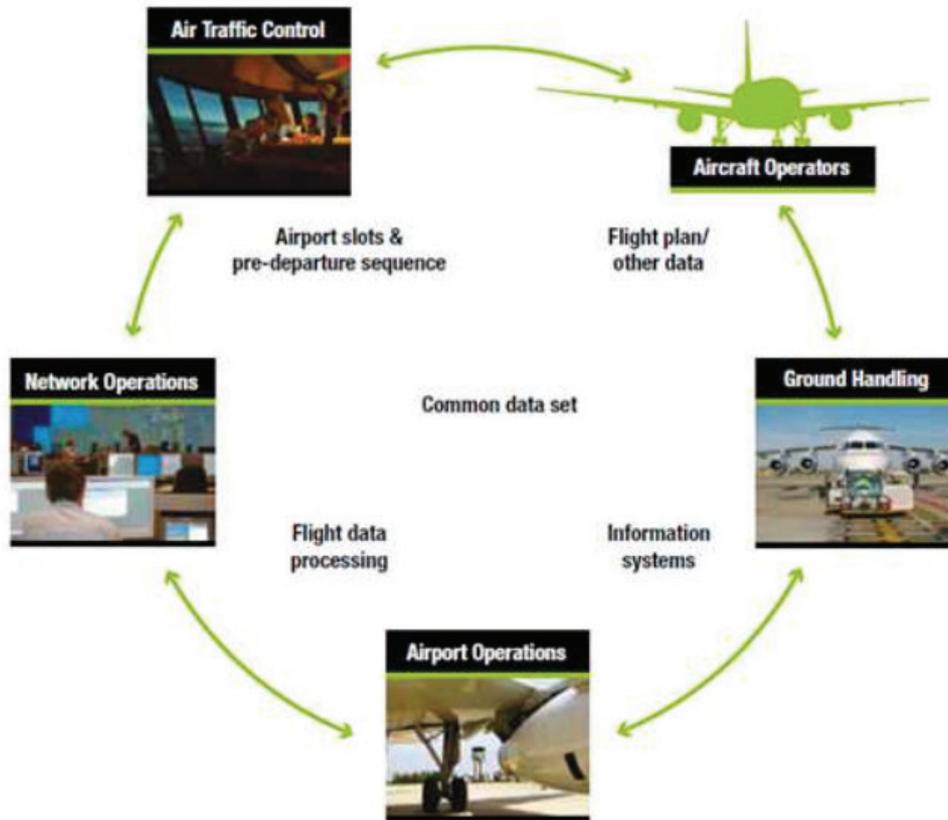


Figura 4.1: Visão geral do A-CDM [39].

4.3 A Gestão de Operações em Solo nos Aeroportos

As operações em solo nos aeroportos são compostas de um conjunto de operações aplicadas a uma aeronave para torná-la pronta para um novo voo ou para finalizar um voo que acabou de chegar. Em geral as atividades da tripulação técnica e comercial na chegada e partida são realizadas pelas companhias aéreas e não são consideradas como parte das atividades das operações em solo dos aeroportos [41].

Um processo típico de operações em solo é composto das seguintes etapas: desembarque de passageiros, descarregamento de bagagens, abastecimento, *catering*, limpeza, saneamento, abastecimento de água potável, embarque de passageiros, carregamento de bagagens, degelo e o *push back* da aeronave [41].

A tripulação técnica e comercial desembarca uma vez que todos os passageiros deixaram a aeronave. Enquanto isso, outras atividades de operações em solo de chegada podem ser realizadas. Dependendo da característica de *turnaround*, eles podem permanecer a bordo para realizar o próximo voo. Caso contrário, a tripulação técnica e comercial irá embarcar na aeronave antes do início das atividades das operações de partida [41].

O *turnaround* (ou tempo de bloqueio) é o período de tempo em que o avião está na

rampa do aeroporto, a partir do bloqueio na chegada de aeronave até o bloqueio na partida da aeronave [41].

A principal característica das operações em solo nos aeroportos é o envolvimento de diversas atividades, equipamentos, veículos [41].

As atividades das operações em solo interagem com as atividades de tráfego de aeronaves e assistência de passageiros/carga em terminais.

A Figura 4.2 fornece uma visão global de operações em solo dentro do processo de *turnaround* enquanto a Figura 4.3 ilustra detalhadamente a posição do processo de operações em solo dentro do sistema aeroportuário na interface entre o processamento de passageiros/carga e procedimentos de chegada/partida de aeronaves.

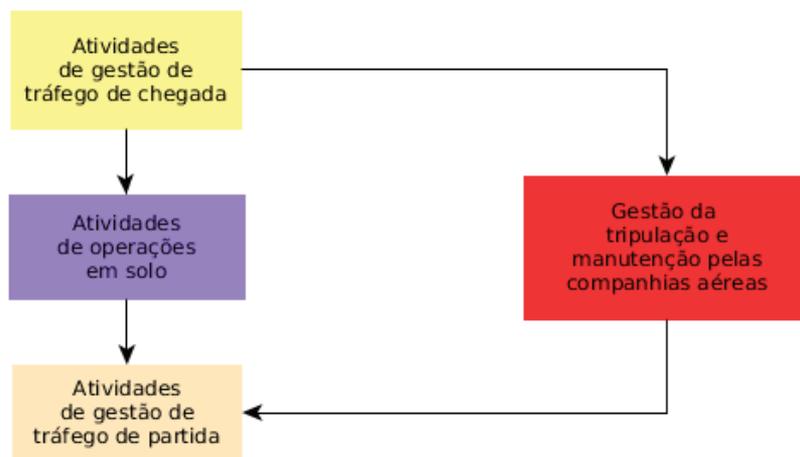


Figura 4.2: Localização de operações em solo dentro do processo de *turnaround* [41].

4.3.1 Processo de Embarque/Desembarque de Passageiros

O embarque compreende as atividades para a entrada de passageiros em uma aeronave e termina com a conclusão dos assentos de todos os passageiros e o fechamento das portas. Ao contrário das operações de embarque, as operações de desembarque são realizadas na ordem inversa. No entanto, em ambos os processos, são utilizadas escadas aéreas (*airstairs*) ou pontes aéreas (*airbridges*) [41].

Os processos de embarque e desembarque dependem da política das companhias aéreas e os recursos disponíveis em um aeroporto [39].

Usando pontes aéreas, apenas a porta dianteira esquerda da aeronave é utilizada enquanto por meio de escadas (escadas móveis ou escadas integradas), uma segunda escada para a porta traseira esquerda da aeronave pode ser utilizada de modo a acelerar o processo. Assim, a operação com escadas aéreas é mais rápida do que o processo com pontes aéreas,

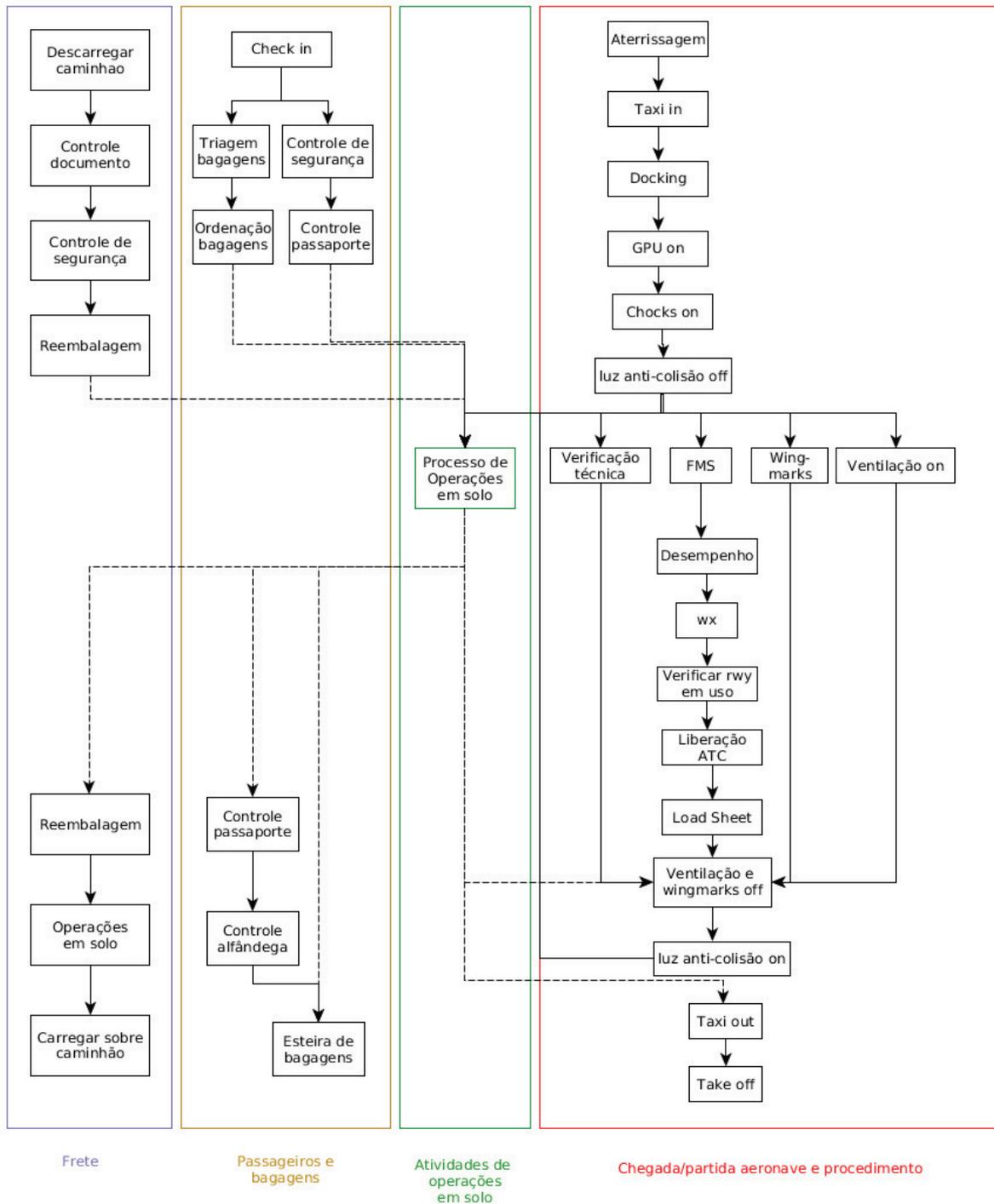


Figura 4.3: Operações relacionadas a aeronave em aeroportos [41].

particularmente se elas são carregadas pela aeronave. No entanto, essa última armação é verdadeira apenas quando nenhum ônibus é necessário para transportar os passageiros entre o estande de aeronaves e o terminal de passageiros. Caso contrário a operação com

pontes aéreas é mais eficaz e mais rápida [41].

Essas operações são supervisionadas pelo pessoal de solo e a tripulação de cabine. Além disso, o embarque e desembarque podem ser realizados simultaneamente com o carregamento e descarregamento de bagagens uma vez que esses serviços não necessitam da mesma área ao redor da aeronave [41].

A Figura 4.4 apresenta exemplos dos diferentes meios para embarque/desembarque de passageiros.



Figura 4.4: Diferentes dispositivos para lidar com os passageiros nos processos de embarque e desembarque [41].

4.3.2 Processos de Carga/Descarga de Bagagem

As bagagens podem ser arrumadas na aeronave de duas maneiras diferentes: em pilhas ou em recipientes pré-embalados. Como os recipientes podem ser embalados antes de a aeronave chegar ao aeroporto, o tempo de processo das operações em solo para a carga de bagagem será menor com o carregamento do recipiente do que com pilhas se o número de bagagem for grande. As bagagens, em um voo, têm de ser sorteadas, a menos que seja um voo *charter*, onde todas as bagagens têm a mesma prioridade e destino. Caso contrário, elas podem ser divididas em bagagens de transferência, bagagens de alta prioridade ou bagagens de tamanho ímpares e assim por diante [41].

A Figura 4.5 mostra os processos de carga/descarga de bagagem.

4.3.3 Processo de Limpeza

As companhias aéreas podem solicitar diferentes tipos de serviços de limpeza para as aeronaves. Durante o dia, a limpeza pode levar de cinco minutos (tirar lixo) até 40 minutos (evacuação de lixo, limpeza de assento-bolsos, colocação de cintos, aspiração, etc.). Esse último só é realizado em aeronave com tempo de *turnaround* mais longos. A maior e mais cuidadosa limpeza é realizada durante o período noturno, quando a aeronave está no solo e permanece por um tempo mais longo [41].



Figura 4.5: Processos de carga/descarga de bagagem [41].

Na maioria das aeronaves, a limpeza e o *catering* podem ser realizados ao mesmo tempo, mas para alguns aviões, não há espaço suficiente para realizar as duas atividades ao mesmo tempo [41].

As equipes de limpeza podem proceder diretamente de uma aeronave para outra, mas nos intervalos e quando eles precisam de material adicional, elas têm que voltar para a base. Não há diferença significativa entre os processos de limpeza em diferentes tipos de aeronaves, assim todas as equipes de limpeza podem ser atribuídas a qualquer tipo de aeronave [32].

A Figura 4.6 mostra uma equipe de limpeza no estande de estacionamento de uma aeronave.



Figura 4.6: Equipe de limpeza no estande de estacionamento de uma aeronave [41].

4.3.4 Processo de Catering

O *catering* envolve a retirada de sobras de alimentos e bebidas do voo anterior e o abastecimento das aeronaves com alimentos frescos e bebidas para o próximo voo. O *catering* pode começar quando todos os passageiros deixam o avião. As empresas de catering usam altos carregadores para colocar os armários de comida para dentro e para

fora da aeronave. Eles não cabem em todos os tipos de aeronaves, por isso o planejamento de atribuição de altos carregadores para vôos é necessário [41].

O processo de *catering* demanda em geral 5 e 75 minutos dependendo de quanto alimento é necessário e da forma como é embalado. As equipes de *catering* precisam voltar para o depósito entre servir duas aeronaves, afim de esvaziar o lixo e colocar novo alimento [31].

O coordenador de *catering* faz estimativas aproximadas da mão de obra necessária para realizar o *catering* ao longo das semanas e o planejamento detalhado, de quem está servindo cada aeronave são realizados todos os dias [31].

A Figura 4.7 representa dois exemplos do processo de *catering*.



Figura 4.7: Processo de *catering* [41].

4.3.5 Processo de Abastecimento de Combustíveis

O abastecimento pode ser realizado de duas maneiras. Em alguns estandes, há um sistema de hidrante com tubos de combustível no solo aos quais os caminhões distribuidores podem se conectar afim de encher o avião. No estande da aeronave onde o sistema de hidrante não está disponível, o abastecimento é realizado por petroleiros [41].

Existem diferentes tipos de caminhões distribuidores: os tipos maiores podem servir todos os tipos de aeronaves, enquanto os menores só podem servir a pequenas aeronaves [39].

No entanto, os tipos menores podem ser preferidos quando a área em torno da aeronave é fortemente limitada. Além disso, os petroleiros variam em tamanho; em geral, a sua capacidade varia de 8 a 40 metros cúbicos de combustível [32].

O abastecimento não pode ser realizado simultaneamente com a carga e descarga de bagagem uma vez que esses serviços necessitam da mesma área ao lado do avião. Antes da empresa de combustível começar a encher, ela sempre verifica o teor de água no combustível. A área ao redor da aeronave tem que ser planejada para que o caminhão distribuidor ou petroleiro tenha um caminho livre para a evacuação. Há também algumas companhias

aéreas com regras específicas sobre abastecimento enquanto os passageiros estão a bordo. A maioria das companhias aéreas permitem, mas apenas sob certas condições por exemplo, deve haver extintor de incêndio pronto nas imediações da aeronave [31].

O tempo de abastecimento depende da capacidade dos tubos na aeronave e, claro, a quantidade de combustível necessária. O piloto decide quanto combustível é necessário e deve informar para a empresa de abastecimento antes de poder começar a encher a aeronave [41].

Atualmente, não há nenhum horário pré-planejado para cada caminhão. Não até que um pedido de abastecimento seja emitido pelo piloto e o coordenador da empresa de abastecimento atribua uma equipe de abastecimento a ele. Isso quer dizer que uma vez que um serviço de abastecimento é solicitado, uma equipe de abastecimento será atribuída ao pedido e realizará o reabastecimento [31].

A Figura 4.8 mostra os diferentes meios utilizados para realizar o processo de abastecimento.



Figura 4.8: Diferentes processos de abastecimento de aeronave [41].

4.3.6 Processos de Abastecimento de Água Potável e de Saneamento

A aeronave deve liberar a água utilizada a ser reabastecida com água fresca para o próximo voo. Isso é realizado por dois tipos de veículos que mais frequentemente operam em uma

aeronave ao lado oposto da carga/descarga de bagagem e do lado do abastecimento de combustíveis. Isso significa que a água e o saneamento podem ser realizados simultaneamente com a descarga/carga de bagagem ou o abastecimento de combustíveis, mas eles não devem ser realizados simultaneamente por restrições de segurança e de espaço [41].

A Figura 4.9 mostra o processo de saneamento e a Figura 4.10 mostra o processo de abastecimento de água potável.



Figura 4.9: Processo de saneamento [41].

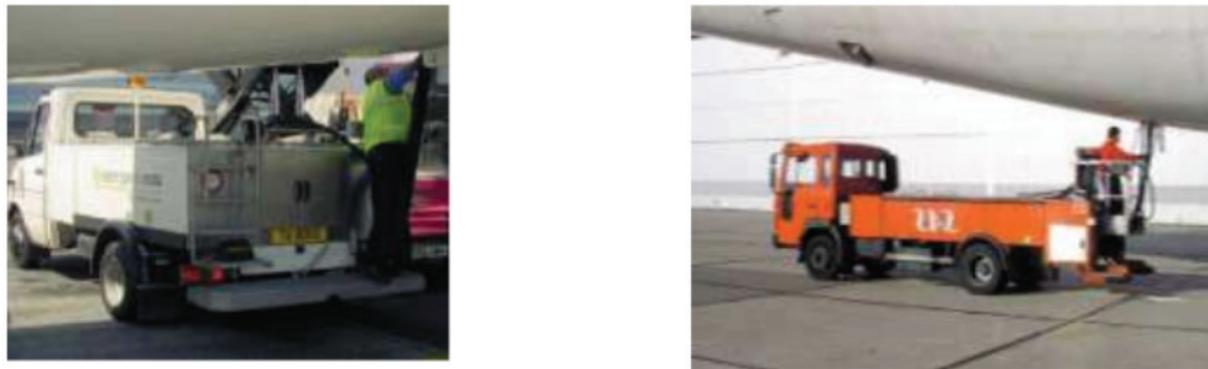


Figura 4.10: Processo de abastecimento de água potável [41].

4.3.7 Processo de degelo

Uma vez que as camadas muito finas de geada e de gelo na aeronave possuem um efeito negativo sobre a força de elevação e de controle de uma aeronave, o degelo é necessário se qualquer parte da aeronave é coberta com neve ou gelo, ou se houver uma precipitação que poderia se transformar em gelo [41]. No Brasil, o processo de degelo não se aplica devido ao clima.

A Figura 4.11 mostra como os caminhões realizando uma operação de *de-icing*.



Figura 4.11: Processo de degelo em curso [41].

4.3.8 Processo de *Push-back*

Quando o processo de *turnaround* se conclui, a aeronave já pode voar. Ela precisa então ser empurrada usando tratores específicos. As aeronaves em estandes exigem um *push-back* que depende da configuração do estande. Em alguns estandes, a aeronave pode começar a se deslocar sozinha uma vez que o motor pode ser iniciado no estande. O processo de *push-back* marca uma transição de interação entre o operador aéreo das operações em solo e a aérea de ATC [31].

A Figura 4.12 representa exemplos do processo de *push-back*.



Figura 4.12: Processo de *Push-back* [41].

4.4 Operações em Solo como um Processo Complexo Multi-atividade

Cada uma das atividades que incluem processo de operações em solo faz uso de equipamento especializado que deve ser disponibilizado no local de estacionamento das aeronaves para reduzir os atrasos. Algumas das atividades das operações em solo devem ser realizadas o mais cedo possível após a chegada da aeronave em seu estande de estacionamento e outras

devem ser realizadas apenas em algum momento antes da partida a partir de seu estande de estacionamento [32].

Dependendo do funcionamento da aeronave, esses dois subconjuntos de atividades podem ser realizados em sequência imediata ou são separados por um período inativo de duração variável de acordo com os horários de chegada e de partida de uma dada aeronave [41].

A Figura 4.13 mostra uma situação padrão de uma aeronave passando por um processo de *turnaround* (*turnaround process*), onde o espaço é um recurso bastante limitado e algumas tarefas não podem ser realizadas simultaneamente, principalmente por razões de segurança [31].

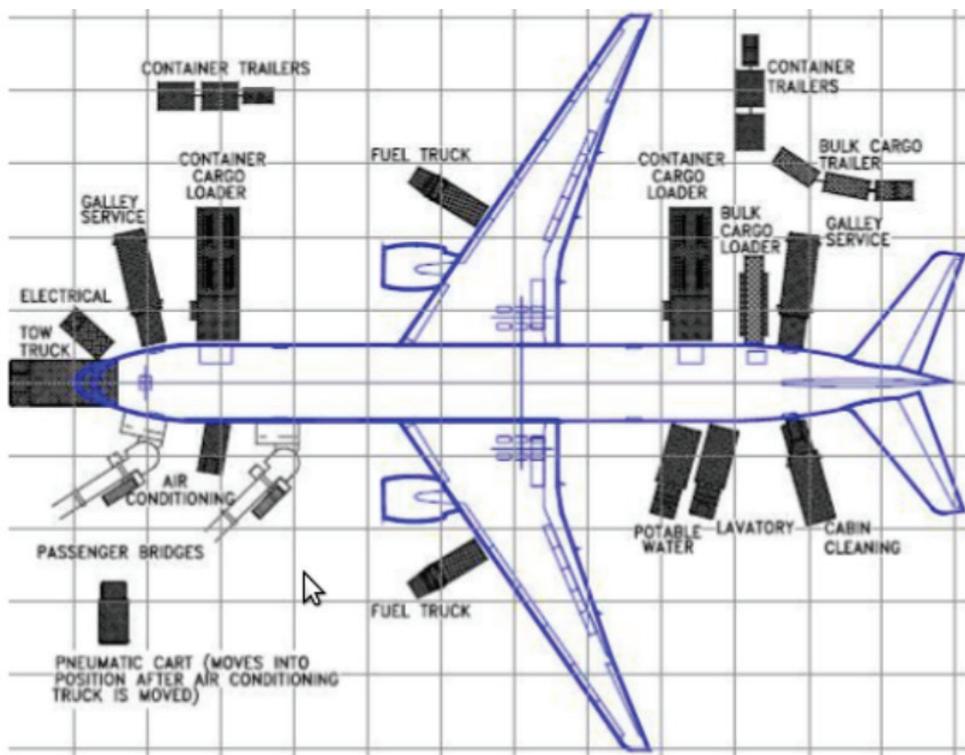


Figura 4.13: Arranjo de manutenção de aeronaves–Boeing 777-300ER [14].

4.4.1 Exemplos de Processos das Operações em Solo

O processo de *turnaround* de operações em solo pode variar de acordo com o arranjo de manutenção e as tarefas necessárias para os tipos de aeronaves, diferentes operadores, necessidades específicas de algumas frotas, o *layout* do aeroporto e também a sua política de gestão aeroportuária [32].

A Figura 4.14 mostra a composição padrão e a sequência das atividades das operações em solo para um Boeing B737. A Figura 4.15 mostra a composição e sequência das atividades de operações em solo para um avião de médio porte no Aeroporto Internacional de Belgrado enquanto a Figura 6.1 mostra a composição e sequência das atividades de operações em solo para um Airbus A320 no Aeroporto Internacional de Estocolmo.

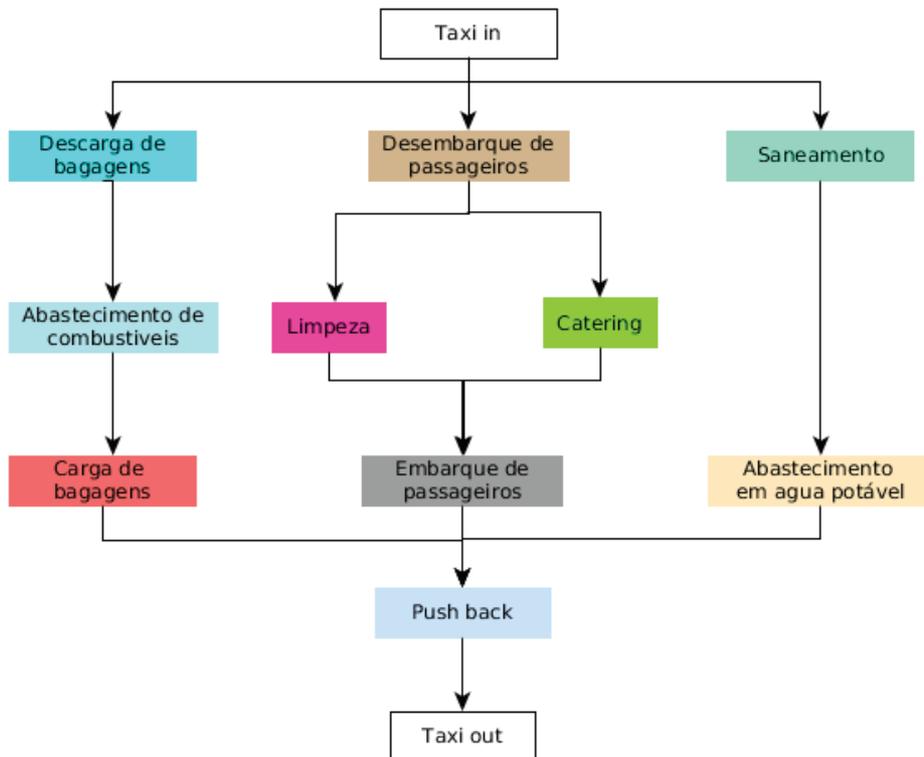


Figura 4.14: Processo das Operações em Solo para um Boeing B737 [14].

4.4.2 A Dimensão Temporal das Operações em Solo

O *turnaround* inclui a posição do trator de *push back* e da barra de reboque para o processo de *push back*. Assim, o período de *turnaround* abrange todos os atrasos necessários para realizar as atividades de operações em solo, bem como alguns tempos inativos (Figura 4.17). Em uma operação comercial com tempo reduzido, o *turnaround* mínimo será igual ao período mínimo de tempo necessário para completar todas as atividades de operações em solo (Figura 4.18) organizadas em um processo em série/paralelo.

A duração do *turnaround* com relação às operações em solo pode assumir diferentes valores, dependendo do:

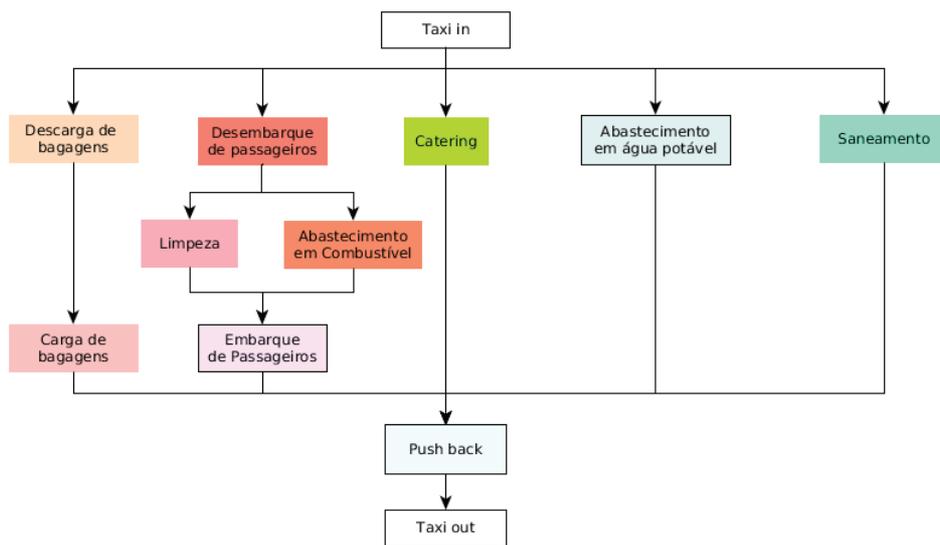


Figura 4.15: Processo das Operações em Solo no Aeroporto Internacional de Belgrado [66].

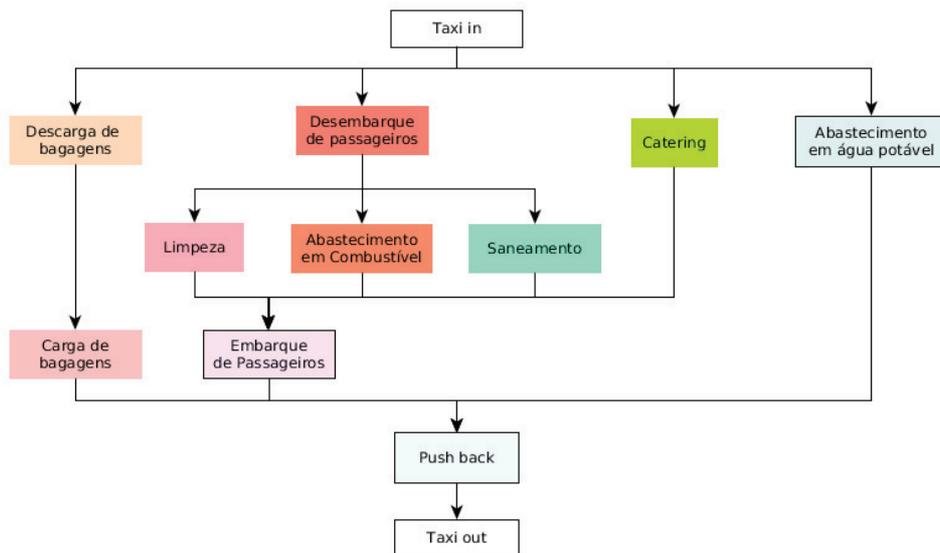


Figura 4.16: Processo das Operações em Solo no Aeroporto de Estocolmo [83].

- **Tamanho da aeronave:** as aeronaves maiores precisam de tempo de *turnaround* mais longo. Por exemplo, de acordo com os manuais do Airbus o tempo mínimo de *turnaround* para um A320 é de 23 minutos, enquanto para um A340 é 43 minutos [1].
- **Tipo de voo:** os voos de curta distância são operados com maior frequência do que os de longa distância. Os voos de curta distância operam muitas vezes em condições apertadas, enquanto voos de longo curso, que exigem mais tempo de manutenção

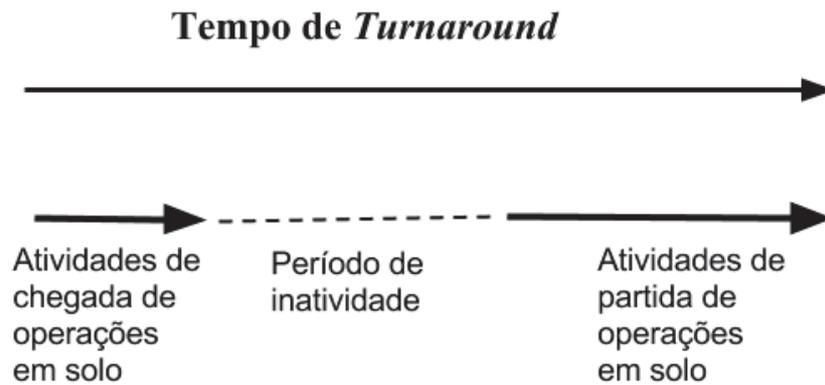


Figura 4.17: Turnaround com as atividades de operações em solo com tempo expandido [41].

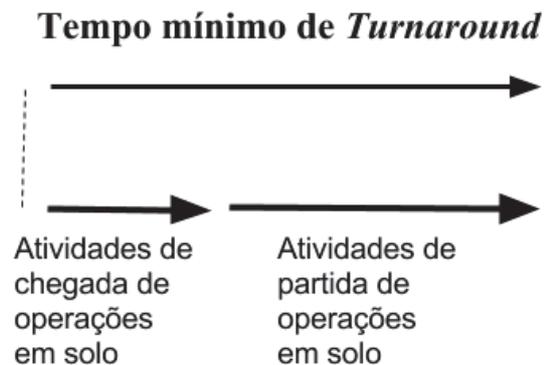


Figura 4.18: Turnaround com as atividades de operações em solo com tempo reduzido [41].

pré-voo, dispõem, em geral, de margens de tempo maiores [1].

- **Número de passageiros ou do tamanho da carga a ser processada** [1].
- **Estratégia de companhia:** algumas companhias aéreas podem decidir inserir um tempo de buffer ao planejar os *turnarounds* para que seus horários de chegada/partida sejam mais robustos para atrasos inesperados das operações em solo [1].

Os construtores de aviões fornecem aos seus clientes, os procedimentos de operações em solo considerando as questões de segurança. Eles descrevem, para cada atividade, as durações nominais, bem como valores mínimos e máximos. Os dados armazenados nesses gráficos assumem condições operacionais padrão. De fato, como foi mencionado antes, eles também são dependentes de regulamentos locais, sobre os procedimentos de companhias aéreas e condições reais das aeronaves [43].

A Figura 4.19 apresenta durações nominais das atividades de operações em solo de um B777-200 [14], enquanto a Figura 4.20 apresenta durações nominais para as atividades de operações em solo para um A330-300 [1].

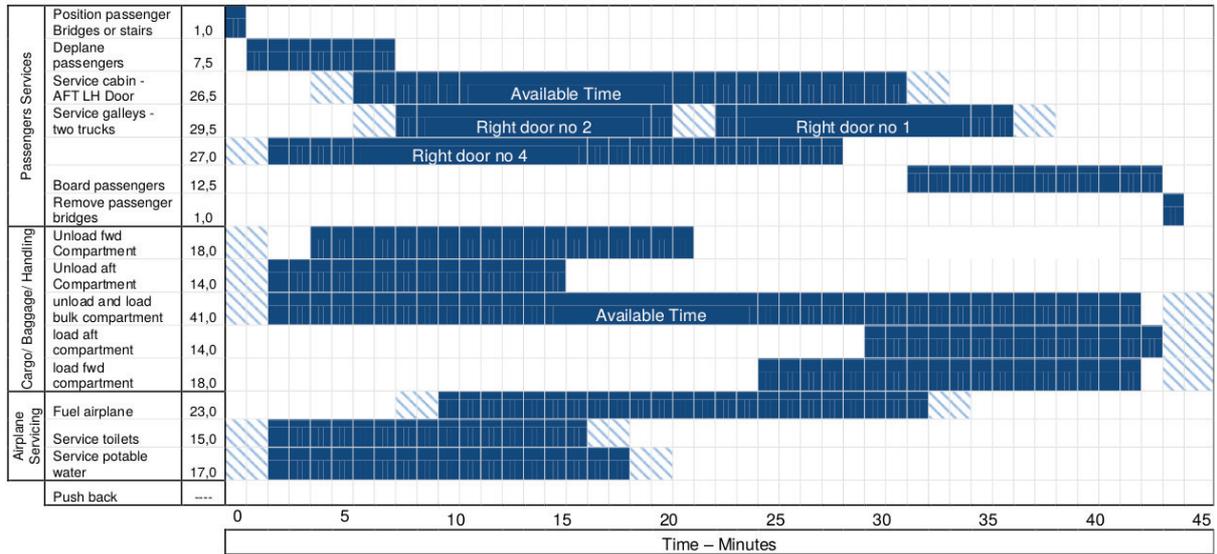


Figura 4.19: Durações típicas de operações em solo no Boeing 777-200 [14].

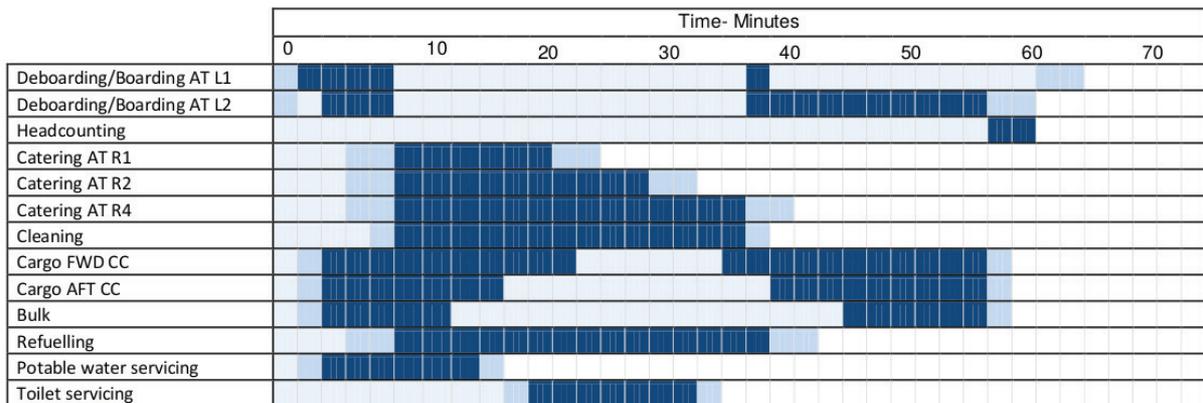


Figura 4.20: Durações típicas de operações em solo no Airbus 330-300 [1].

A Figura 4.19 mostra que o tempo total de *turnaround* é de cerca de 45 minutos para o B777-200 e a Figura 4.20 indica que o tempo total de *turnaround* é de cerca de 64 minutos para o A330-300.

Os valores acima são em relação a dois aviões projetados para voos de longa duração. Muitas tarefas são executadas simultaneamente de acordo com a seqüência de operações apresentada na seção anterior. Nas figuras, as avaliações são baseadas na configuração de

classe econômica. Supõe-se que todos os equipamentos estão funcionando corretamente e que as condições climáticas são normais. Como as atividades da aeronave e as condições em que essas operações são efetuadas são diferentes para cada aeroporto e companhia aérea, valores diferentes podem ser produzidos com respeito à duração dessas tarefas [43].

4.5 Análise da Organização da Gestão das Operações em Solo nos Aeroportos

4.5.1 Parceiros Envolvidos nas Operações em Solo

Ao considerar diferentes aeroportos no mundo, parece que uma grande variedade de parceiros podem estar envolvidos com a gestão de operações em solo. Para a distribuição das funções de operações em solo entre os parceiros, não há um padrão geral ou uma regra que pode ser aplicada a aeroportos. As operações em solo podem ser realizadas sob a gestão direta ou indireta dos seguintes parceiros: as autoridades aeroportuárias, as companhias aéreas e as empresas de operações em solo especializadas [21]. Portanto as operações em solo podem ser gerenciadas globalmente ou parcialmente:

- Diretamente pelos gestores de operações em solo do aeroporto;
- Diretamente pelos gestores de operações em solo das companhias aéreas;
- Pelas empresas de operações em solo trabalhando para o aeroporto;
- Pelas empresas de operações em solo trabalhando para as companhias aéreas;
- Ou por combinações dessas situações.

Em todas essas situações, subcontratantes especializadas podem ser chamadas para realizar atividades de operações em solo específicas.

A organização da gestão de operações em solo nos grandes aeroportos depende, muitas vezes, de sua estrutura operacional que pode incluir, além de áreas comuns para as companhias aéreas secundárias, terminais de *hub* para as companhias aéreas operacionais principais. Com relação às autoridades do aeroporto, eles estão principalmente preocupados com a gestão da infra-estrutura do aeroporto para fornecer capacidade de processamento de tráfego de aeronaves e dos fluxos de passageiros/carga [31].

Historicamente, os aeroportos e as companhias aéreas estavam envolvidos em atividades de operações em solo, mas com o desenvolvimento do transporte aéreo e da necessidade de mais serviços de operações em solo especializados, esses serviços foram delegados a empresas de operações em solo especializadas. No entanto, em muitos aeroportos, o

envolvimento de autoridades aeroportuárias em atividades de operações em solo continua a ser importante [32].

A participação em atividades de operações em solo de autoridades de aeroportos, companhias aéreas e empresas de operações em solo especializadas representa para cada um deles várias vantagens e desvantagens que podem ser determinantes em muitos casos, resultando em uma organização de operações em solo em um aeroporto específico [41].

Em geral, o negócio de operações em solo não é uma área a partir da qual um lucro considerável pode ser esperado uma vez que os custos de pessoal e equipamentos de operações em solo são elevados enquanto a operação está sujeita a grandes variações durante um dia (horário de pico) e dentro de uma semana, com efeitos sazonais que podem ser muito pronunciados. No caso de uma gestão direta das atividades de operações em solo nos aeroportos, as receitas mal cobrem os custos de operações em solo e em muitos casos, elas podem ser menores do que os custos relacionados. Para o aeroporto, essas perdas podem ser cobertas pelas receitas de outras áreas, tais como taxas de pouso ou diversas receitas de concessão. As mesmas circunstâncias acontecem quando uma companhia aérea cuida de suas próprias operações em solo [33].

A. Dubai [33] apresenta os prós e os contras do envolvimento de autoridades do aeroporto, companhias aéreas e empresas de serviços no setor de operações em solo:

O ponto de vista das autoridades aeroportuárias:

1. Vantagens de participar das operações em solo:

- Dominar globalmente todos os processos de transferência seja para passageiros/bagagens ou cargas para garantir a ligação eficiente e a pontualidade.
- Fornecer uniformemente para os clientes a qualidade de serviço exigida pelo controle e otimização de todos os fluxos de processos e assim melhorar a competitividade no que diz respeito aos aeroportos concorrentes.
- Garantir que condições de segurança e de proteção globais dominem simultaneamente infra-estruturas e processos.
- Fornecer serviços de operações em solo, quando nenhum outro parceiro está fornecendo-o (por exemplo, o degelo que, por ser uma atividade sazonal não é atraente para os investidores).

2. Desvantagens de participar das operações em solo:

- Dificuldade em atender de forma eficiente as necessidades específicas das operações em solo das diferentes companhias aéreas que operam no aeroporto.
- Dificuldade de integrar e processar de forma eficiente o fluxo de informação adicional gerado por essa atividade.

- Dependendo do status comercial de alguns aeroportos (de propriedade pública), a dificuldade para impor uma organização eficaz das atividades de operações em solo.

O ponto de vista das companhias aéreas:

1. Vantagens de participar das operações em solo:

- Dominar globalmente os processos de transferência envolvendo seus clientes para garantir a continuidade e a pontualidade de passageiros, bagagem ou fluxos de carga.
- Controlar a qualidade do serviço (atrasos, ocorrências de bagagens perdidos, catering, limpeza ...) de operações em solo prestado aos seus clientes para proteger ou melhorar a imagem comercial da companhia aérea.
- Controlar de custos das operações em solo que têm um impacto sobre os preços dos passagens aéreas.
- Cobrir a indisponibilidade das operações em solo local ou a incapacidade do aeroporto para fornecê-lo com o nível de serviço aceitável.

2. Desvantagens de participar das operações em solo para companhias aéreas:

- Isso significa localizar os equipamentos e o pessoal adicional em um aeroporto que pode ser uma mera escala em sua rede comercial.
- Isso significa estar envolvido em problemas logísticos complexos, incluindo a disponibilidade de produtos das operações em solo.
- Penalizar restrições no que diz respeito à localização e ao tamanho de seus depósitos de operações em solo podem ser impostos pelas autoridades aeroportuárias, considerando as superfícies aeroportuárias disponíveis para outros parceiros.
- A falta de escala pode transformar as operações em solo para companhia aérea com custo menos atraente do que quando fornecida por um maior operador de operações em solo no aeroporto. Em alguns casos, as companhias aéreas podem se unir para prestar um serviço de operações em solo comum.

O ponto de vista dos fornecedores independentes de operações em solo:

1. Vantagens de participar das operações em solo em um determinado aeroporto:

- Oportunidade de lucro em um grande aeroporto com altos níveis de demanda por serviços de operações em solo.

- Adquirir uma grande fatia do mercado de operações em solo em alguns aeroportos importantes ou em uma rede de aeroportos.
- Adquirir uma posição sólida em aeroportos com perspectivas de desenvolvimento elevados no futuro próximo.

2. Desvantagens de participar das operações em solo em um determinado aeroporto:

- Perspectivas de lucro baixas no futuro próximo.
- Forte concorrência de fornecedores de operações em solo já estabelecidos.
- Más condições operacionais oferecidas pelas autoridades aeroportuárias.

Em teoria, algumas vantagens das operações em solo poderiam ser esperadas para as operações centralizadas de operações em solo. A única empresa que opera em todo o aeroporto pode esperar lidar com mais níveis de atividade regulares durante o dia e deve minimizar a duplicação de equipamentos e frotas de veículos de serviço. No entanto, pode-se esperar que as vantagens serão equilibradas pelas desvantagens que vêm de operações centralizadas e falta de concorrência. De qualquer forma as dimensões e a organização em diferentes áreas de grandes aeroportos transforma, em geral, inviável a idéia de operar equipamento de solo a partir de uma base única. De fato, para esses grandes aeroportos, a função das operações em solo deve ser subdividida em um número de organizações auto-suficientes ligadas aos terminais de grande porte [33].

No Brasil, as chamadas Esatas (Empresas de Serviços Auxiliares de Transporte Aéreo) estão presentes em 70% das operações da aviação comercial, seja na realização de serviços operacionais (abastecimento de água, catering, carregamento de bagagem etc), serviços de proteção e serviços de agenciamento de carga aérea. Os dados fazem parte do levantamento do 1º Anuário Brasileiro de Serviços Auxiliares de Transportes Aéreos, lançado no fim do ano passado [18]. Existe ainda companhias aéreas que realizam as suas principais atividades de operações em solo, caso do *LATAM*.

Capítulo 5

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo é feita uma revisão dos trabalhos baseados em planejamento para resolver os problemas de gestão das operações em solo.

Para o melhor conhecimento, não há muitas pesquisas com foco no planejamento das atividades de operações em solo. Acredita-se que alguns desses trabalhos podem ser a base de inspiração.

O processo de operações em solo tem recebido menos atenção do que outros problemas de gestão de recursos aeroportuários na literatura onde um número bastante pequeno de trabalhos publicados pode ser encontrado. A maioria dos estudos publicados está focada apenas em um tipo de recurso de operações em solo (ônibus de passageiros, veículos de *catering*, caminhões de combustível, etc.).

5.1 Gestão de uma Frota de Ônibus de Passageiros

Definição do Problema

Considera-se aqui o problema da gestão de uma frota de ônibus utilizados para transportar passageiros de aeronaves que chegam a terminais de passageiros e de terminais de passageiros a aeronaves que partem, onde em geral as aeronaves estão em posição remota e onde as áreas de estacionamento de aeronaves estão ligadas a terminais de passageiros por uma rede terrestre de pistas usadas em geral não apenas por ônibus, mas também por outros veículos das operações em solo. O principal objetivo é atribuir ônibus para aeronaves que chegam ou partem para que os passageiros cheguem a tempo no destino e os vôos não sejam atrasados. Outro objetivo permanente é limitar os custos operacionais gerados pela frota de ônibus, minimizando o total de distâncias percorridas.

Formulação do Problema

A gestão de uma frota de ônibus de passageiros que presta serviços à aeronave após sua chegada e partida antes de um novo voo foi considerada recentemente por Kuhn *et al.* [56]. Depois de analisar as operações reais com o despachante de veículos de serviço no aeroporto de Hamburgo, uma abordagem de janela de tempo móvel foi proposta por esses autores, onde a cada dez minutos um problema de atribuição é resolvido usando dados atualizados sobre a situação atual e previsões de curto prazo. Para resolver sucessivamente os problemas de planejamento estático resultantes, foi formulado um programa linear inteiro misto para obter soluções ótimas locais reais minimizando uma mistura dos atrasos totais de partida da aeronave e dos custos de combustível do fornecedor de serviços.

Abordagem de Solução

Kuhn *et al.* [56] consideraram primeiramente uma abordagem exata da solução baseada em uma técnica *branch and bound*, e a compararam a um algoritmo genético, a uma abordagem gulosa e às operações reais. Estas diferentes abordagens foram aplicadas a problemas com 6 ônibus de passageiros que servem 17 aeronaves no aeroporto de Hamburgo durante uma hora e a problemas com 25 veículos que servem a 1000 aeronaves no Aeroporto Dallas-Fort Worth durante 18 horas.

No aeroporto de Dallas-Fort Worth, a abordagem exata da solução não foi capaz de fornecer uma solução ótima dentro de um tempo aceitável. Nesse caso, a abordagem do algoritmo genético proporcionou os melhores resultados ao longo dos diferentes cenários considerados. Nesse caso, reduziu a distância média percorrida pelos ônibus de cerca de 300 quilômetros por dia e o atraso médio absorvido pelas aeronaves em 25% em relação à abordagem robusta cujo desempenho estava próximo das operações reais. Assim, a abordagem de janela de tempo variável, juntamente com uma heurística eficiente, parecia ser capaz de lidar de forma bastante eficiente com este problema.

5.2 Gestão de Caminhões de Abastecimento

Definição do Problema

Em muitos aeroportos o abastecimento de aeronaves é realizado por caminhões. Em grandes aeroportos com instalações subterrâneas de abastecimento de combustível estão disponíveis nas posições de estacionamento no pavimento, mas as posições de estacionamento remotas devem ser servidas de forma independente alimentando os caminhões. Em aeroportos de baixo tráfego, o abastecimento em geral só é realizado alimentando caminhões. Em geral,

o abastecimento de combustível é realizado apenas algum tempo antes da hora de partida programada de uma aeronave.

Formulação do Problema

Este problema foi abordado recentemente por Du *et al.* [32]. Eles estudaram as operações de rampa de combustível e consideraram o problema de programação de abastecimento de veículos e assim propuseram uma abordagem de solução baseada no Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo Restrito (VRPTTW) com múltiplos objetivos. Aqui n vôos devem ser servidos abastecendo caminhões em pontos diferentes no aeroporto. A cada voo I está ligada uma demanda de combustível d_i correspondente a um tempo de serviço de duração p_i e com uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ com a_i como a hora de início mais cedo e b_i como a hora de início mais recente.

Abordagem de Solução

Depois de mesclar alguns desses objetivos em um único e transformar os outros em restrições de nível, este problema pode ser formulado como um problema de otimização linear inteiro amplo. Contudo, pode ser facilmente concluído que a complexidade deste problema resultante é elevada, de modo que abordagens heurísticas devem ser concebidas para proporcionar soluções eficientes dentro de um tempo aceitável.

Assim, Du *et al.* [32] adotaram uma otimização de Colônia de Formiga especializada (ACO) para tentar resolver eficientemente este problema de otimização combinatória multiobjetivo. As aplicações numéricas mostram que o tempo de exploração deste algoritmo de Colônia de Formiga foi demasiado excessivo mesmo para problemas de tamanho médio. Então, para obter melhores resultados, eles introduziram uma heurística baseada na data de vencimento mais próxima. Esta heurística h seleciona o voo de acordo com o tempo devido mais cedo para servir quando os caminhões estão ociosos. Eles aplicaram este algoritmo a problemas com 20 a 154 voos para serem reabastecidos durante um dia. Eles compararam as soluções obtidas com a abordagem acima (limitada a 20 iterações) e um Primeiro Serviço Comprometido mais Próximo que consiste em escolher o primeiro caminhão disponível cada vez que um voo exige reabastecimento. Em termos de tamanho da frota de caminhão necessária, o método proposto foi melhor em 15% para problemas de tamanho pequeno para 25% para problemas maiores, enquanto os tempos de computação foram equivalentes.

5.3 Gestão de uma Frota de Bagagem de Conexão

Definição do Problema

Aqui é considerado o problema da gestão da frota de veículos terrestres encarregados de transportar bagagens para a conexão de passageiros entre os seus voos de chegada e partida em um aeroporto. Estes passageiros chegam ao aeroporto em voos de entrada e partem em voos de saída dentro de um período de tempo reduzido. Suas bagagens não são dirigidas aos salões de chegada como as bagagens dos passageiros do destino. Elas devem ser recolhidas separadamente e transportadas para os voos de partida. A empresa da operação deve, em geral, operar uma frota de veículos de transporte homogêneos que realizam todas as viagens de ida e volta de/para a unidade de expedição de bagagem enquanto serve voos e/ou estações da operação de bagagem. Cada veículo que regressa à unidade de expedição de bagagens é atribuído a uma nova viagem que deve ser realizada imediatamente ou não, dependendo da disponibilidade das bagagens.

Assim, o problema de decisão considerado aqui é relativo ao planejamento das rotas para os veículos de transporte, de modo que cada bagagem é entregue diretamente ao voo, ou à estação de bagagem, respeitando as restrições de janelas de tempo. O objetivo é, em geral, entregar a tempo à aeronave que parte a correspondente bagagem e quando isso não puder ser alcançado com a frota disponível de veículo de transporte, minimizar o número de bagagens que faltam os voos de partida dentro do período de um dia.

Formulação do Problema

No caso considerado por Clausen e Pisinger [23], a empresa da operação de bagagens opera uma série de terminais de triagem e despacho destas para processar a bagagem de conexão. A empresa é responsável pelo transporte da bagagem, seja diretamente para os voos de partida ou para as estações da operação de bagagem, onde são fundidos com as outras bagagens atribuídas ao mesmo voo. A entrega às estações da operação só é realizada se tal puder ser feita antes das bagagens dos passageiros de origem serem levados da estação para a aeronave.

Este problema foi formulado por Clausen e Pisinger [23] como um complexo problema de programação Integer onde N bagagens devem ser transportadas usando K veículos idênticos de capacidade Q . Cada veículo é atribuído a um número máximo de rotas R e retorna cada vez a um depósito para carregar a bagagem nova a ser entregue dentro de janelas determinadas de tempo em uma aeronave de partida ou em uma estação da operação.

Abordagem de Solução

Considerando o tamanho das instâncias da vida real e o aspecto dinâmico do problema, um algoritmo robusto foi proposto para resolver aproximadamente este problema. Com este algoritmo, cada veículo é programado individualmente e apenas para uma viagem de cada vez. A programação é realizada uma vez que um veículo chega à sala de expedição (no início de sua operação ou quando ele retorna de uma viagem de entrega anterior). Então, nesse momento, uma tarefa de entrega é gerada e atribuída ao motorista desse veículo. Esta tarefa indica qual conjunto de bagagens deve ser recolhido em cada local na sala de expedição e a lista de destinos de entrega para cada bagagem. O algoritmo é projetado para que bons conjuntos de tarefas sejam gerados. Um bom conjunto de tarefas tem sido definido tal como voos de partida iminentes são tratados com prioridade, a tarefa atribuída a um veículo deve lidar com tantas bagagens quanto possível e as rotas associadas com as tarefas de entrega deve ser o mais curto possível. Assim, a heurística proposta utiliza penalizações para lidar com esses subobjetivos.

Para testar o algoritmo, eles usaram dados reais sobre bagagens de transferência para uma semana completa de operações. O aeroporto considerado nos seus testes foi constituído por duas instalações de expedição. Os resultados numéricos mostraram que o algoritmo proposto é robusto em relação ao aspecto estocástico dos tempos de entrega dos bagagens e aos tempos de viagem do veículo.

5.4 Gestão de Frotas de *Catering*

Uma solução mais sofisticada foi proposta por Ho *et al.* [47] para abordar as operações de *catering* de companhias aéreas, incluindo a carga de trabalho do pessoal. Eles consideraram o problema como um problema de alocação de mão-de-obra com janelas de tempo e restrições de habilidade de trabalho. O objetivo de otimização consiste na maximização do número total de trabalhos atribuídos. Eles apresentaram uma comparação entre as abordagens de busca tabu e de recozimento simulado para resolver o problema. Para testar essas abordagens, eles usaram a instância da vida real fornecida por uma empresa de *catering* de uma companhia aérea. Os resultados mostram que a busca tabu oferece melhores soluções do que abordagens de recozimento simulado. Eles estudaram também o impacto da formação da equipe e descobriram que a extensão de permitir que os trabalhos sejam compartilhados entre duas equipes é um bom modo de operações.

5.5 Abordagens globais

Recentemente, alguns autores consideraram o problema de atribuição e planejamento global de operações em solo do aeroporto. A abordagem global foi abordada de duas formas principais: uma abordagem totalmente centralizada e uma abordagem totalmente descentralizada.

Dohn *et al.* [31] se concentraram na gestão da mão-de-obra em terra, considerando que as operações em solo são gerenciados por uma entidade central responsável pela construção dinâmica das equipes com as diferentes habilidades, que serão responsável por cada aeronave que chega ou que parte.

A abordagem de solução descentralizada do problema de atribuição global das operações em solo foi enfrentada de duas maneiras: *(a)* considerando que o problema de programação global de operações em solo é uma instância de um problema de programação de vários projetos e *b)* considerando que é um problema de tomada de decisão distribuído.

5.5.1 Uma Abordagem Centralizada para o Problema de Atribuição das Operações em Solo

5.5.1.1 Descrição do Problema

Aqui considera-se que cada demanda das atividades de operações em solo (chegada, partida ou ambos) é processada por unidades compostas de equipamentos/veículos e mão de obra especializada. A prestação de serviços a chegada ou partida de aeronave obedece a restrições de tempo que podem ser expressas como restrições de janela de tempo. Então, seguindo uma equipe das tarefas de operações em solo particular, ela é atribuída sucessivamente a diferentes serviços em diferentes locais e realiza um passeio que abrange parte dos estandes de estacionamento com aeronave imobilizada. Em seguida, pode-se considerar que cada unidade das tarefas de operações em solo realiza um sub-passeio enquanto espera-se que toda a aeronave imobilizada será visitada pelas equipes requisitadas dos operadores das operações em solo.

5.5.1.2 Formulação do Problema

Dohn *et al.* [31] propôs uma formulação do problema de escalonamento de pessoal nos aeroportos, onde o objetivo é minimizar o número total de tarefas não atribuídas e minimizar o custo de operação de cada equipe. Assim, eles introduziram o problema de alocação de mão de obra com janelas de tempo cuja formulação é a seguinte:

Seja $C = \{1, \dots, n\}$ um conjunto de n tarefas e considera um conjunto V de equipes heterogêneas de trabalhadores. Para cada tarefa, é associada uma duração, uma janela de

tempo, um conjunto de habilidades e um local. Supõe-se que cada tarefa $i \in C$ tem de ser realizada em uma janela de tempo $[a_i, b_i]$ onde a_i e b_i corresponde aos primeiros e aos últimos tempos de partida para uma tarefa i . Cada tarefa i é dividida em r_i tarefas de divisão. O tempo t_{ij} é o tempo de transporte entre cada par de tarefas (i, j) e do tempo de serviço a tarefa i . Se a equipe k tem as qualificações necessárias para executar a tarefa i , então $g_{ik} = 1$ caso contrário $g_{ik} = 0$. Cada equipe $k \in V$ opera dentro de uma janela de tempo de trabalho $[e_k, f_k]$ a partir de um centro de serviço único no local 0, comum a todas as equipes.

O objetivo selecionado aqui é minimizar o número total de tarefas não atribuídas ao atribuir, a cada equipe, seqüências viáveis de atividades ao longo de caminhos. Tais caminhos viáveis são turnos começando e terminando no local 0 e obedecendo a janelas de tempo e restrições de requisitos de habilidade. Eles são definidos pela seqüência de tarefas que visitam.

5.5.1.3 Abordagem de solução

Dohn *et al.* [31] consideraram que este problema está perto do problema de roteamento de veículos com janelas de tempo. Então eles adotaram uma técnica de geração de colunas (*Column Generation technique*) associado a uma técnica *Branch and Bound*, resultando em uma abordagem *Branch and Pricing* [30].

Aqui a abordagem da solução baseia-se na consideração de caminhos viáveis, em que um caminho viável é um turno que começa e termina na base de mão de obra. Um problema mestre inteiro foi introduzido para atribuir a cada equipe um caminho viável de modo que o número total de tarefas atribuídas seja maximizado, mas a sincronização entre as tarefas não pode ser diretamente abordada. O objetivo selecionado aqui é minimizar o número total de tarefas não atribuídas ao atribuir a cada equipe seqüências viáveis de atividades ao longo de caminhos. Tais caminhos viáveis são turnos começando e terminando no local 0 e obedecendo a janelas de tempo e restrições de requisitos de habilidade. Eles são definidos pela seqüência de tarefas que visitam.

Quando uma solução ótima não é obtida (solução não é inteira ou restrições de sincronização de tarefas não são cumpridas) uma ramificação é realizada de acordo com a solução de um problema de preços. Aqui o problema de preços resulta em um problema elementar do caminho mais curto com janelas de tempo para cada equipe, que são resolvidos usando um algoritmo de ajuste da etiqueta.

5.5.1.4 Aplicação para a gestão de mão de obra de limpeza

A limpeza de aeronave é essencial para manter os elevados padrões de qualidade do serviço prestado a bordo da aeronave pelas companhias aéreas aos passageiros. Dependendo da

forma como o avião é operado (voos de longa distância, conexões rápidas para as aeronaves nacionais/regionais) o serviço necessário pode ser fortemente condicionado por intervalos de tempo ou não, e estas restrições de tempo podem ser conhecidas com uma grande antecipação ou não. Em geral, a limpeza é realizada uma vez que passageiros deixaram o avião e antes que os outros passageiros cheguem. Em geral, o pessoal de solo da companhia aérea verifica se a limpeza foi concluída antes de permitir que os passageiros embarquem a bordo da aeronave. Dependendo da posição de estacionamento de aeronaves (na porta ou remoto) veículos terrestres são necessários para transportar as equipes de limpeza para a aeronave.

Dohn *et al.* [31] ilustraram sua abordagem para otimizar a alocação de mão de obra para as Operações em Solo com o caso da mão de obra de limpeza de aeronaves em um aeroporto. Para avaliar esta abordagem de eficácia, os conjuntos de dados de teste tirados de situações da vida real enfrentadas por empresas de limpeza de avião em dois grandes aeroportos europeus foram usados. O conjunto de dados de teste foi organizado em quatro tipos de problemas diferentes e cada tipo foi composto de três instâncias de problemas que abrangem períodos de 24 horas. De 10 equipes e 100 tarefas até 20 equipes com 300 tarefas foram consideradas. Os autores relataram que a abordagem da solução exata acima tem proporcionado resultados efetivos para as menores ocorrências após tempos de computação que medem de segundos a horas, enquanto situações de tempo esgotado ou de memória esgotada têm sido obtidos com instâncias maiores. Então esta abordagem de solução exata, que leva a dificuldades numéricas na situação *off-line*, não será de interesse no contexto *on-line*, a menos que os procedimentos heurísticos sejam introduzidos para substituir seus processos de pesquisa exata.

5.5.2 Abordagens descentralizadas do problema de atribuição global das operações em solo

5.5.2.1 Abordagem de escalonamento multiprojeto

Um trabalho representativo desta abordagem é a de Mao *et al.* [61], que propôs uma solução para resolver o problema de programação das operações em solo no aeroporto sob incerteza considerando que o problema de programação global das tarefas de operações em solo é uma instância de um problema de programação multiprojeto (*MPSP*), portanto, eles consideraram a aeronave como um agente de projeto que é composto por um conjunto de atividades e os fornecedores das operações em solo como agentes de recursos, cada um é responsável por um recurso que realizou um tipo específico de atividade.

Como um primeiro passo, eles forneceram uma descrição formal desta instância, tendo em conta a incerteza no nível do tempo de execução das operações. O segundo passo, afim

de lidar com a incerteza, eles propuseram uma abordagem de programação multiagente em tempo real. Nesta abordagem, eles apresentaram uma agenda em tempo real com base em um esquema cooperativo. Tem-se observado que esta abordagem poderia apenas lidar com a incerteza ao nível do tempo de libertação e foi difícil aplicá-la no caso da presença de perturbação na duração de processamento. Isso porque, na terceira etapa, afim de lidar com os diferentes tipos de perturbações, eles propuseram usar a mesma estrutura (*MPSP*) para inserir o tempo de folga entre as atividades. Este tempo de folga seria uma garantia, em caso de aparecimento de qualquer incidente, os recursos ainda funcionariam como o planejado.

A primeira abordagem foi aplicada em um ambiente determinístico, usando 10 tipos de procedimentos de resposta da aeronave, para cada procedimento haviam 10 instâncias de aeronave idênticas. Os resultados obtidos com a aplicação das duas abordagens de escalonamento multiagente: não-cooperativo e cooperativa, foram sendo comparados com 3 métodos heurísticos centralizados: *First Come, First Served (FCFS)*, *Maximum Total Travel Work Content First e Shortest Activity from the Shortest Project*. Os resultados mostraram que para as cinco abordagens de programação, o atraso total de projeto (tempo de *turnaround*) diminuiu com o aumento do custo de atraso por unidade de tempo.

Do ponto de vista de tempo de processamento, os métodos heurísticos *Maximum Total Travel Work Content First* e o *Shortest Activity from the Shortest Project* tiveram o tempo de processamento mais curto. No caso das medidas de nivelamento de recursos, têm-se observado que o agendamento multi-agente com o esquema cooperativo utilizado para realizar os processos das Operações em Solo o menor recurso de nivelamento. Assim, de acordo com os resultados, o esquema de agendamento *on-line* cooperativo foi uma das melhores heurísticas de agendamento centralizado.

Para a segunda abordagem proposta, afim de calcular o tempo de inatividade adequado para inserir no final de cada atividade, um algoritmo de aprendizagem genético foi empregado. Essa abordagem foi aplicada para os problemas dinâmicos (recursos ineficientes). Os resultados mostraram que essa abordagem foi capaz de absorver os atrasos ao nível do tempo de execução de atividades, para convergir para uma situação estável e para evitar o reescalonamento dos recursos.

5.5.2.2 Abordagem de Tomada de Decisão distribuída

Seguindo esta abordagem, Ansola *et al.* [4] consideraram os processos de operações em solo como um sistema distribuído de apoio à decisão. Para lidar com esse problema, eles criaram um novo sistema multiagente teórico e experimental chamado MAS-DUO. A arquitetura deste novo MAS foi baseada em uma combinação de muitas metodologias existentes. O MAS-DUO é uma divisão do modelo organizacional em duas plataformas: sistema de

modelo de informação e modelo físico. Cada plataforma foi tratada de forma independente para compreender melhor o sistema e para facilitar a criação e o desenvolvimento do SMA. Essa divisão permitiu políticas estratégicas para se refletir sobre as decisões físicas e informando ao sistema de informação superior sobre a distribuição física também.

A comunicação entre as duas plataformas foi assegurada pelo uso de um protocolo de interação baseado em parâmetros de compartilhamento da função de recompensa de Markov. Esta nova organização foi testada para gerir as atividades de operações em solo no Aeroporto Central de Ciudad Real na Espanha.

Relativo à gestão de operações em solo no aeroporto, Fitouri-Trabelsi *et al.* [42] propôs uma estrutura hierárquica para organizar a gestão de operações em solo compatível com o conceito A-CDM. A estrutura proposta introduz um coordenador de operações em solo que é considerado como uma interface de comunicação entre os parceiros do A-CDM e os diferentes gestores de operações em solo. Essa estrutura hierárquica permite o compartilhamento de informações com parceiros no A-CDM de um lado e do outro lado, interagindo com os gestores de operações em solo. O objetivo global é disponibilizar os recursos de operações em solo para que os vôos que chegam e partem sejam atendidos com o menor atraso possível.

Para resolver o problema de atribuição global das tarefas de operações em solo, Salma *et al.* [42] propuseram uma rápida solução heurística (abordagem gulosa). A ideia é ordenar aeronaves de chegada e partida de acordo com seus tempos de início planejados das tarefas de operações em solo correspondentes (seja as tarefas de operações em solo de chegada ou as tarefas de operações em solo de partida). Então o coordenador das tarefas de operações em solo irá processar nesta ordem cada atividade de operações em solo da aeronave ligando cada tarefa a uma rota para construir um dever de tarefas de operações em solo:

- Para cobrir a tarefa j na aeronave k , será procurado entre as rotas já criadas do tipo j , o que se pode lidar com ela, dentro do prazo previsto e no custo de transporte menor.
- Se nenhuma das rotas existente fornecerem uma solução viável:
 - e há capacidade de tipo j restante na base correspondente, uma nova rota do tipo j começando nesta base é criada com a primeira parada na aeronave k .
 - e não há capacidade de transporte restante na base do tipo j , adicione esta tarefa na rota do tipo j que minimiza a mistura de resultante de atraso para aeronave k e da distância percorrida para atingi-lo com o peso λ .

Então repita com todas as tarefas j de operações em solo esperadas.

Isto irá produzir conjuntos viáveis de deveres (rotas) a serem executados pelas diferentes frotas de tarefas de operações em solo. Então, esses dados serão utilizados pelo coordenador

de tarefas de operações em solo para calcular, o nível de recursos que cada gerente de tarefas de operações em solo deverá fornecer a cada período de tempo. Estes recursos serão depois ou efetivamente utilizados para processar a aeronave e os passageiros ou permanecerá como reserva para enfrentar perturbações e incidentes.

Os gestores de tarefas de operações em solo têm duas principais funções que são:

- **Planejar as operações**, isto é, resolver seu problema de emparelhamento para cobrir todas as demandas planejadas para seus serviços: durante o período de operações atual e criar as unidades de tarefas de operações em solo atribuindo seus recursos a seus deveres.
- **Gerenciar as operações**, isto é, atualizar a atribuição dos seus recursos a aeronave considerando a informação recebida do coordenador referente a:
 - Perturbação ao nível dos tempos de chegada da aeronave
 - Perturbação ao nível da duração da realização das tarefas
 - Condições climáticas

Para testar a eficiência desta abordagem, os horários de chegada precisos de cada voo considerado deve ser comunicado aos gerentes das operações em solo 30 minutos antes do efetivo pouso. Isto permite que os gerentes das operações em solo reatribuam os recursos das operações em solo considerando os horários de chegada atualizados nos estacionamentos dos voos anunciados pousarem dentro da próxima meia hora.

A aplicação da abordagem heurística proposta ao programa nominal de chegadas durante o dia de referência considerado proporcionou uma atribuição viável para cada gestor de operações em solo em 0,3 segundos no máximo. Estas soluções levaram a atrasos em relação ao cronograma de partida agendada envolvendo apenas 36 aeronaves, com um atraso máximo de 16 minutos. O atraso médio entre aviões atrasados foi de 7 minutos. Essa abordagem foi testada para gerenciar as operações em solo no aeroporto *Palma de Mallorca* na Espanha.

5.6 Análise e Conclusão

De acordo com Fitouri-Trabelsi [41], a maioria das aplicações de pesquisa operacional consideradas para resolver os problemas das operações em solo ao nível de operações, tratam de um problema nominal geral, sem perturbação com o cronograma de chegada de aeronaves ou para as operações das diferentes frotas terrestres. Mesmo neste caso nominal, os problemas de programação matemática correspondentes são de classe de complexidade forte com grandes dificuldades para obter soluções exatas para problemas de tamanho

real. Assim, algumas heurísticas foram construídas para fornecer uma solução para esses problemas nominais. Em geral, as heurísticas do tipo guloso podem ser adotadas para lidar com perturbações on-line, uma vez que tratam em seqüência as diferentes decisões a serem tomadas.

No que diz respeito às abordagens multiagentes, elas se concentram principalmente na minimização dos custos suportados por cada agente das operações em solo que são considerados ao mesmo nível que os atrasos suportados pelos passageiros.

Na primeira classe de estudos, Fitouri-Trabelsi [41] adotou implicitamente uma organização descentralizada baseada na programação das atividades de operações em solo, mas nenhum esquema de coordenação é proposto. Na segunda classe de estudos, a intensidade dos fluxos de informação necessária para processar mecanismos baseados no mercado ou executar tomada de decisão baseada em multiagente é tal que Fitouri-Trabelsi [41] preferiu uma abordagem centralizada.

Esse trabalho introduz o método MAP para planejar as atividades de operações em solo adotando uma organização descentralizada. O framework proposto utiliza uma abordagem de colaboração social onde múltiplos agentes trabalham em conjunto planejando tarefas que eles não são capazes de resolver por si mesmos, ou pelo menos realizá-los melhor através da cooperação. O método MAP coloca o foco no esforço coletivo de varios agentes para realizar tarefas, combinando seus conhecimentos e capacidades.

Capítulo 6

Framework de Planejamento para a Gestão de Operações em Solo nos Aeroportos

Neste capítulo, um framework de planejamento para gestão de operações em solo é proposto. A primeira seção introduzirá os parceiros envolvidos no framework. A segunda seção introduzirá um panorama geral do framework. Em seguida, a próxima seção fornecerá detalhes a cerca do modelo proposto. Um modelo foi desenvolvido e o conceito de planejamento multiagente é a teoria fundamental nesta pesquisa.

6.1 *Stakeholders* Envolvidos

Visando melhor entendimento do framework, a primeira seção fornecerá uma breve introdução sobre os participantes no planejamento das atividades de operações em solo, os quais incluem: controle do tráfego aéreo, companhias aéreas e gestores de operações em solo.

- *Controle do Tráfego Aéreo (ATC)*: é responsável por fornecer os horários previstos de chegada das aeronaves na posição de estacionamento. Supõe-se que a escolha da posição de estacionamento foi resolvida e informada através de uma troca direta entre o ATC e a companhia aérea correspondente.
- *Companhias Aéreas*: são responsáveis por fornecer aos gestores das operações em solo, dados sobre os horários previstos de chegada das aeronaves, as localizações respectivas das aeronaves e o processo das operações em solo da aeronave.
- *Gestores das Operações em Solo*: são responsáveis por criar um plano global a partir dos dados recebidos e seus recursos.

6.2 Framework de Planejamento proposto para a Gestão das Operações em Solo

Essa seção irá apresentar o Framework de planejamento proposto para gestão das atividades de operações em solo. A seguir, temos todos os participantes que estão conectados na Figura 6.1.

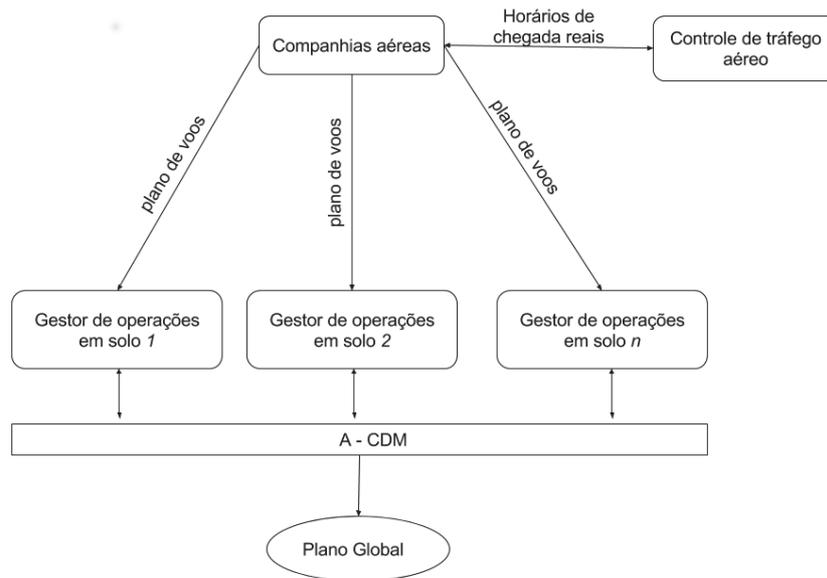


Figura 6.1: Framework proposto.

Geralmente, há três tipos de relação neste Framework:

1. O serviço de controle do tráfego aéreo do aeroporto junto com as companhias aéreas atualizam os dados sobre os horários previstos de chegada das aeronaves e a informação sobre as localizações das aeronaves no estacionamento;
2. As companhias aéreas transmitem esses horários e informações junto com o processo das operações em solo da aeronave aos gestores das operações em solo;
3. A partir dos dados recebidos, os gestores de operações em solo, usando seus recursos e trabalhando em conjunto, criam um plano global ligando cada recurso à aeronave. Esse plano será executado posteriormente pelos mesmos gestores.

6.3 Modelo de Planejamento Multiagente para a Gestão das Operações em Solo no Aeroporto

O processo de planejamento das tarefas das operações em solo nos aeroportos é o foco deste estudo. Por meio deste modelo, deseja-se a validação do framework acima a fim de que seja satisfeita a gestão colaborativa das operações em solo.

6.3.1 Justificativa da Abordagem Metodológica

O processo de planejamento das tarefas das operações em solo pode ser visualizado como um ambiente composto de n agentes, onde os agentes têm o conhecimento dos objetivos globais. Assim os agentes devem trabalhar em conjunto para criar um plano ótimo que alcance os objetivos globais.

A gestão das operações em solo é um caso em potencial para a aplicação do conceito de planejamento multiagente pois, neste contexto, os gestores das operações em solo são os agentes que buscam criar um plano ótimo global minimizando as ações realizadas para eles, isso reflete na redução dos custos introduzidos pelos atrasos dos voos. Os agentes gestores trabalham em conjunto por criar um plano global, condicionando suas ações às ações dos demais gestores na tarefa de buscar o cumprimento dos horários agendados de partida.

Após o estudo da seção 2.2, pressupõe-se que o planejamento eficiente das tarefas das operações em solo deve ser descrito por coalizões com os demais gestores das operações em solo envolvidos no cenário, de modo que suas preferências estritas por alcançar os objetivos globais sejam satisfeitas. No entanto, a racionalidade dos gestores das operações em solo, que exercem o papel de agentes, é limitada mas isso não garante que os gestores sejam atendidas em suas preferências estritas, o que naturalmente força situações de cooperação.

6.3.2 Planejamento Colaborativo

O presente trabalho propõe a utilização dos conceitos de MAP no planejamento das tarefas das operações em solo nos aeroportos, distribuindo de maneira eficiente e coordenada os recursos existentes, conforme demanda. É imprescindível que os agentes participantes do cenário tenham informação perfeita, ou seja, terem pleno conhecimento a respeito de si mesmo e dos demais agentes.

Este compartilhamento de informação é a base da metodologia CDM (Ver Seção 4.2) que conta com colaboração conjunto de todos os agentes. No modelo proposto, estes agentes são os gestores das operações em solo, que colaboram entre si para a realização do

plano global. O MAP se mostra adequado para resolver esse problema e, por este motivo, foi escolhido para a fundamentação metodológica do sistema.

A contribuição desta abordagem reside no fato de que uma parte das responsabilidades incidentes sobre os gestores das operações em solo é transferida diretamente para os agentes racionais. Estes atuarão em um cenário onde a força de cooperação será fator determinante no processo de planejamento das tarefas das operações em solo.

6.3.3 Modelagem do Cenário

O cenário será modelado com base nos parâmetros operacionais do aeroporto:

- F : conjunto das aeronaves (voos) em solo no aeroporto;
- t_c : horário previsto de chegada da aeronave no aeroporto;
- t_p : horário de partida previamente alocado para a aeronave com base no plano de voo;
- w : o processo das operações em solo;
- $P = \bigcup_{i \in F} P_i$ é o conjunto das posições de estacionamento das aeronaves, onde P_i , posição de estacionamento da aeronave i ;
- A : conjunto de todos os agentes participantes do cenário, isto é, agente companhia aérea, agente ATC e os agentes gestores das operações em solo;
- AG : conjunto de todos os agentes gestores das operações em solo participantes do cenário;
- T : conjunto das tarefas que os gestores das operações em solo desenvolvem nas aeronaves. Por exemplo: embarque, limpeza, abastecimento, etc sendo que cada gestor executa uma tarefa.
- $R = \bigcup_{i \in AG} R_i$ é o conjunto dos recursos veículos dos gestores das operações em solo, onde R_i é o recurso veículo de um agente gestor i . O recurso veículo é composto do estafe que deve realizar a tarefa e do equipamento usado. Um agente gestor tem n recursos veículos;
- $H = \bigcup_{i \in R} H_i$ é o conjunto das posições de estacionamento dos recursos veículos, onde H_i , posição de estacionamento dos recursos veículos do gestor i ;
- K : custo total dos atrasos.

O conjunto F é o conjunto das aeronaves no solo aguardando autorização para que as tarefas necessárias sejam nelas desenvolvidas. A aeronave F_i tem um horário previsto

de chegada no aeroporto t_c e um horário previsto de partida para o novo voo t_p e está estacionada em uma posição P_i esperando ser servida.

Neste cenário, os gestores das operações em solo em AG devem desenvolver suas tarefas em T em determinadas aeronaves em F seguindo o processo das operações em solo w . Cada gestor AG_i tem n recursos veículos R_i , estacionados em uma posição H_i esperando executar a tarefa.

A equação 6.1 define o custo total dos atrasos dos n voos através da somatória dos custos dos atrasos inerentes a cada voo $i = 1, \dots, n$.

$$K = \sum_{i=1}^n k_i \quad (6.1)$$

6.3.4 Modelagem dos Gestores das Operações em Solo

O modelagem dos gestores das operações em solo segue as configurações usadas no modelo FMAP (ver Capítulo 3) cuja a tarefa MAP é definida como uma tupla $T_{MAP} = \langle AG, V, I, G, A \rangle$, onde:

- AG representa o conjunto dos agentes gestores de operações em solo.
- Localizações são variáveis $\in V$, atribuídas a algum valor $d \in D_v$, que descreve as posições de estacionamento de recursos veículos e aeronaves.
- O conjunto de estado inicial I é :
 - $(recurso_1 \text{ no } local_1)$;
 - $(recurso_2 \text{ no } local_2)$;
 - $(recurso_n \text{ no } local_n)$;
 - $(voo_1 \text{ no } local_{v1})$;
 - $(voo_2 \text{ no } local_{v2})$;
 - $(voo_k \text{ at } local_{vk})$;
 - $(voo_1 \text{ com nenhuma tarefa realizada}), \dots, (voo_k \text{ com nenhuma tarefa realizada})$
- O conjunto de objetivos globais com todas as tarefas dos voos realizadas é $G = \{(voo_1 \text{ com todas as tarefas realizadas}), \dots, (voo_k \text{ com todas as tarefas realizadas})\}$.
- Cada agente de planejamento tem duas ações: $mover-recurso(de, para)$ e $realizar-tarefa(voo)$.

As pré-condições e os efeitos são:

$$- PRE(mover-recurso) = (estar \text{ no } local \ DE)$$

- $PRE(\text{realizar-tarefa}) = (\text{na mesma localização do voo}), (\text{voo com tarefa não realizada})$
- $EFF(\text{mover-recurso}) = (\text{não estar no local DE}), (\text{estar no local PARA})$
- $EFF(\text{realizar-tarefa}) = (\text{voo com tarefa realizada})$

No conceito de planejamento, um plano é uma sequência não linear das ações geradas por um ou mais agentes. O objetivo do planejamento das tarefas das operações em solo é criar um plano global que alcance os objetivos globais a partir das ações realizados pelos agentes gestores. Portanto seja a_0 , uma ação inicial e a_g , um objetivo global. Para ter um plano ótimo, deve-se calcular um caminho aplicando o algoritmo de Dijkstra (ver Seção 3.2.3) entre a ação a_0 e o objetivo global a_g . O caminho com comprimento mínimo é armazenado como:

$$\text{minPath} = ((a_0, a_1), (a_1, a_2), \dots, (a_{g-1}, a_g)) \quad (6.2)$$

onde a_0, \dots, a_{g-1} são as ações criadas pelos agentes e a_g , o objetivo global.

Portanto um plano ótimo global é um plano com caminhos de comprimento mínimo que alcance todos os objetivos globais.

6.3.5 Cooperação Entre os Agentes

Em um primeiro momento, as aeronaves são alocados em uma fila com a organização *FIFO*. Cada aeronave F_i é inserida no sequenciamento com o objetivo de anular k_i , o que acontece na situação ideal. Naturalmente, o atraso real de um voo em estado de espera em solo é igual $t_r - t_p$ onde t_r é o horário real de partida.

A cooperação entre os gestores das operações em solo devem ser implementada da maneira colaborativa com a observância das premissas do CDM. O objetivo da cooperação é criar um plano ótimo global, isso reflete na minimização do custo global dos atrasos dos voos. Para tanto, um gestor das operações em solo pode adotar uma das seguintes ações durante a cooperação:

1. mover um recurso veículo da sua localização inicial para a localização da aeronave;
2. realizar a sua tarefa na aeronave;

A cooperação dos gestores para criar o plano global deve ser feita minutos antes da chegada das aeronaves.

A importância da cooperação é dar aos gestores das operações em solo uma oportunidade de gerar o plano global antes de executar uma vez as aeronaves em solo. Sendo assim, cada gestor, exercendo o papel do *proponente*, poderá propor uma ação. A consequência é

a elaboração de uma ação que lhe trará benefício mesmo que esta ação não seja aceita *a priori*.

A cooperação dentro do modelo proposto deve ser matematicamente modelada de modo a considerar o aspecto dinâmico da interação entre os agentes. Para tal, a formalização de um conceito de planejamento multiagente mostra-se adequada.

No conceito de MAP desenvolvido no modelo proposto, cooperam n gestores que querem desenvolver as suas tarefas em determinadas aeronaves. Quando os gestores iniciam a cooperação, cada gestor AG_i gera as seguintes ações (ver Seção 3.2.1):

- *mover-recurso* r_i, l_i, l_j : o gestor AG_i move seu recurso veículo r_i da localização inicial l_i para o local da aeronave, l_j ;
- *realizar-tarefa* F_i : uma vez o recurso veículo r_i na mesma localização da aeronave F_i , realizar a tarefa do gestor AG_i .

Dadas estas duas alternativas, cada gestor AG_i deve avaliar cada ação gerada (ver Seção 3.2.3). Uma vez que as ações foram avaliadas, cada gestor comunica suas ações ao restante dos gestores.

Uma vez que a iteração é concluída, a liderança é entregue a outro gestor, que adota o papel do coordenador, e uma nova iteração começa. O próximo gestor coordenador seleciona a ação promissor (ver Seção 3.2.3) e então os gestores procedem a expansão. Este processo iterativo continua até que se chegue aos objetivos globais.

Capítulo 7

O Sistema de Planejamento Multiagente para a Gestão das Operações em Solo nos Aeroportos

Este capítulo descreve o funcionamento e a aplicação do modelo de planejamento multiagente na gestão das operações em solo nos aeroportos.

A seção 7.1 sucintamente apresenta um panorama do sistema proposto e como este modelo aborda o problema apresentado. A seção 7.2 elucida os requisitos de implementação que foram levantados. A descrição da implementação do protótipo desenvolvido é apresentada na seção 7.3, juntamente com os principais ambientes de desenvolvimento. Por fim, na seção 7.4 são descritos os algoritmos de planejamento

7.1 Descrição do Sistema

Ao serem estudados os dados a respeito da utilização da infraestrutura aeroportuária atualmente disponível no Brasil, percebem-se que é urgente a necessidade da implantação de melhorias no que tange à gestão das operações em solo nos aeroportos brasileiros.

O modelo proposto por meio do presente trabalho, é desenvolvido com o intuito de agregar a sistemas de planejamento das tarefas das operações em solo ainda não presente nos atuais sistemas utilizados pelos órgãos das operações em solo brasileiras. Para tanto, faz-se necessária a implementação de um protótipo para fins de validação metodológica. Nesta dissertação, este protótipo validador será denominado simplesmente *Sistema GH-MAP*.

O objetivo da implementação proposta é a disponibilização de uma ferramenta para o acompanhamento em tempo real a utilização dos recursos veículos dos gestores das operações em solo. A partir da integração de informações a respeito da situação das

aeronaves em solo, o GH-MAP busca uma sequência não linear ótima de ações a serem realizadas a cada instante com o intuito de minimizar os atrasos de partida de voos.

7.2 Requisitos Operacionais

A elicitación de requisito junto aos usuários é fundamental para a compreensão detalhada do problema e dos resultados esperados com a implantação da metodologia proposta. Esta etapa inicial do desenvolvimento foi realizada com a execução das seguintes tarefas:

- entrevistas com os usuários impactados, que são operadores dos órgãos de controle e gerenciamento e os operadores das operações em solo no Aeroporto Internacional de Brasília (SBBR);
- visitas e acompanhamento das atividades das operações em solo no Aeroporto Internacional de Brasília.

Naturalmente, a implementação do Sistema GH-MAP não poderá considerar como válido nenhum resultado que viole as normas de segurança do tráfego aéreo.

A principal funcionalidade do Sistema GH-MAP é elaborar um plano ótimo global, oferecendo suporte aos gestores das operações em solo para a execução das seguintes atividades:

- planejamento eficiente das tarefas das operações em solo;
- minimização de atrasos de partida dos voos.

Para o desenvolvimento do GH-MAP, o acesso a este sistema é simulado por meio de bases de dados estáticas que contêm os dados a serem tratados, sendo eles:

- nomes e horários previstos de chegada e partida dos voos;
- posições do estacionamento das aeronaves em solo
- posições do estacionamento dos recursos veículos dos gestores das operações em solo;
- número dos recursos veículos de cada gestor das operações em solo;
- processo das operações em solo da companhia aérea representado por um arquivo chamado arquivo de *domínio* que representa as ações de planejamento do gestor, os tipos de objetos e as variáveis de estado. Esse arquivo é um código escrito em pddl3.1 conforme a configuração mostrada na Seção 6.3.4.

7.3 Implementação do Protótipo

7.3.1 Ambiente de Desenvolvimento

Java + Eclipse Neon

- **Java**

O Java é uma linguagem de programação interpretada e orientada a objetos, desenvolvida na década de 90 pela empresa Sun Microsystems. O Java é atualmente a linguagem mais utilizada em todo o mundo, ainda em crescimento no ambiente empresarial a partir de novas adoções. Diferente das linguagens de programação convencionais, que são compiladas para um código nativo, a linguagem Java é compilada para um bytecode que é executado por uma máquina virtual. Com ele, bastando que o seu sistema operacional tenha uma JVM, será possível executar o Java nos sistemas operacionais Windows, GNU/Linux e Mac [53].

- **Eclipse Neon**

Eclipse é um IDE para desenvolvimento Java, porém suporta várias outras linguagens a partir de plugins como C/C++, PHP, ColdFusion, Python, Scala e a plataforma Android. Ele foi idealizado a partir do Java e segue o modelo *open source* de desenvolvimento de software. Atualmente faz parte do kit de desenvolvimento de software recomendado para desenvolvedores Android [53].

O projeto Eclipse foi iniciado na IBM, que desenvolveu a primeira versão do produto e o doou como software livre para a comunidade. O gasto inicial da IBM no produto foi de mais de 40 milhões de dólares. Hoje, o Eclipse é o IDE Java mais utilizado no mundo. Possui como características marcantes: o uso da SWT e não do Swing como biblioteca gráfica, a forte orientação ao desenvolvimento baseado em plug-ins e o amplo suporte ao desenvolvedor com centenas de plug-ins que procuram atender as diferentes necessidades de diferentes programadores [53].

Jade (Java Agent DEvelopment Framework)

É um framework de software totalmente implementado na linguagem Java. Ele simplifica a implementação de sistemas multiagentes através de um middleware que atende às especificações do FIPA (*Foundation for Intelligent Physical Agents*) e através de um conjunto de ferramentas gráficas que suportam as fases de depuração e implantação. Um sistema baseado em JADE pode ser distribuído entre máquinas (que nem mesmo precisam compartilhar o mesmo sistema operacional) e a configuração pode ser controlada através de uma GUI remota. A configuração pode ser alterada mesmo em tempo de execução movendo agentes de uma máquina para outra, como e quando necessário. JADE é completamente

implementado em linguagem Java e o requisito mínimo do sistema é a versão 5 do JAVA (o ambiente de tempo de execução ou o JDK).

A Linguagem de Definição de Domínios de Planejamento (PDDL)

Uma das principais questões que foram abordadas pela comunidade de planejamento é o problema de representação. O uso de uma boa linguagem de planejamento é um dos principais aspectos de um processo de planejamento eficiente.

A Linguagem de Definição de Domínio de Planejamento (PDDL) é uma tentativa de padronizar as linguagens de planejamento de Inteligência Artificial (AI). Foi desenvolvido pela primeira vez por Drew McDermott e seus colegas em 1998 principalmente para tornar possível a Competição Internacional de Planejamento (IPC) de 1998/2000 e, em seguida, evoluiu com cada competição.

A versão PDDL 3.1 que será usada nesse trabalho, foi a linguagem oficial da trajetória determinística da 6ª e 7ª Competição Internacional de Planejamento (IPC) em 2008 e 2011, respectivamente. Ela introduziu o *object-fluents* (isto é, a gama de funções agora poderia ser não somente numérica (inteiro ou real), mas poderia ser qualquer tipo de objeto também). Assim, o PDDL 3.1 adaptou a linguagem ainda mais às expectativas modernas com uma mudança sintática aparentemente pequena, mas semanticamente bastante significativa na expressividade.

FMAP: Sistema de Planejamento Multiagente de Encadeamento Direto

FMAP é uma ferramenta de planejamento multiagente (MAP) de uso geral totalmente distribuída projetada para lidar com tarefas de MAP cooperativas de qualquer nível de complexidade. As tarefas de planejamento são descritas em uma linguagem MAP baseada em *PDDL3.1* com algumas extensões para oferecer suporte à privacidade e à distribuição de informações [82].

O FMAP realiza uma pesquisa A^* com múltiplos agentes ($f = g + 2 * h_{DTG}$), onde h_{DTG} é uma nova função heurística distribuída baseada na noção de *Grafos de Transição de Domínio*. Os agentes constroem em conjunto uma árvore de pesquisa na qual os nós são planos de ordem parcial construídos de uma forma de encadeamento direto. Cada plano na árvore de pesquisa introduz e suporta totalmente uma nova ação com relação ao seu nó pai na árvore [82].

7.3.2 Módulos do Sistema Proposto

O processo de planejamento das tarefas das operações em solo na CDM é executado em dois módulos distintos (ver Figura 7.1).

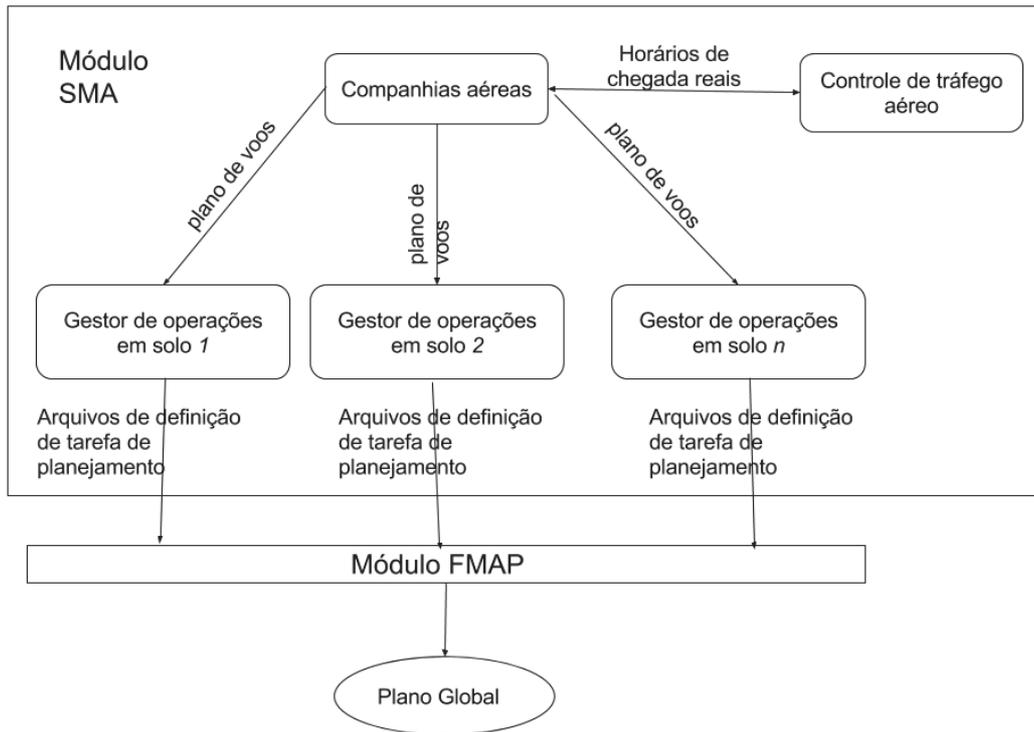


Figura 7.1: Estrutura do sistema desenvolvido.

Módulo SMA

Nesse módulo, uma base de dados para as simulações contam com valores reais, que são o números dos voos, o horário de chegada e partida dos voos e a posição do estacionamento dos voos para o dia 17 de Abril de 2017, disponibilizados pelo portal online do Aeroporto Internacional de Brasília¹. O acesso direto a estas informações é implementado pela classe *Airlines.java*. Essa classe representa o agente *companhias aéreas* que se destina apenas a acessar o arquivo com as informações e disponibilizá-las aos diferentes agentes gestores das operações em solo representados pelas classes *GHManagers.java*.

Com as informações recebidas, cada gestor das operações em solo representado pela classe *GHManager.java*, junto com uma base de dados contendo o número de veículos do gestor e as posições de estacionamento dos recursos veículos, cria um arquivo de definição de tarefa de planejamento. Esse arquivo é:

- um arquivo de *problema* que detalha os objetos atuais, o estado inicial e os objetivos.

Esse arquivo é um código escrito em pddl3.1 conforme a configuração mostrada na Seção 6.3.4.

¹<http://www.bsb.aero>

Módulo FMAP

Nesse módulo, a ferramenta FMAP começa recebendo e processando os arquivos de *domínio* e de *problema* de todos os gestores das operações em solo os quais configuram os seus sistemas POP internos (ver Seção 3.2.1). Em seguida, eles realizam o algoritmo MAP, que consiste em dois estágios diferentes:

- Uma primeira troca de informações, que é realizada uma vez, antes de iniciar o processo de planejamento. Nessa etapa, os agentes constroem um grafo de transição de domínio (DTG), que será útil para o processo MAP.
- O processo MAP real, pelo qual eles trocam e refinam soluções parciais até chegarem a um plano solução conjunta. Esta etapa intercala dois processos diferentes, uma fase de coordenação que permite aos agentes trocar propostas de refinamento e selecionar o próximo plano base e um processo POP individual pelo qual os agentes criam novos refinamentos sobre o plano base atual.

7.4 Algoritmos de Planejamento

Os arquivos de *domínio* e de *problema* dos agentes gestores das tarefas das operações em solo são algoritmos escritos em *PDDL3.1* criados seguindo as configurações do FMAP. Nessa seção, usará-se-á como exemplo um arquivo de domínio e um arquivo de problema gerado para um agente gestor da tarefa desembarque e falar-se-á de cada detalhe dos algoritmos.

7.4.1 Arquivo de *Domínio*

Esta seção apresenta um arquivo de *domínio* de um agente gestor desembarque. O arquivo ilustra um agente das operações em solo que usa seus recursos veículos para realizar suas tarefas para determinados voos. Para realizar suas tarefas com sucesso, ele terá que trabalhar em conjunto com o resto dos agentes no sistema.

O agente conhece com precisão a posição dos seus recursos veículos e a situação dos voos que eles têm de realizar tarefas.

O presente arquivo descreve as informações mais relevantes incluídas no arquivo de domínio do agente.

Algoritmo 1: Arquivo de domínio do agente gestor desembarque

1 (define (domain handling)

```

2 (:requirements :typing :equality :fluents)
3 (:types deboard flight agent place - object
4       deboarding catering refueling boarding - agent)
5 (:predicates
6   (myAgent ?a - deboarding))
7 (:fluents
8   (at ?d - deboard) - place
9   (in ?f - flight) - place
10  (performed ?f - flight) - (either deboarding catering
11                               refueling boarding))
12 (:action moveD
13   :parameters (?d - deboard ?x ?y - place)
14   :precondition (and (myAgent ?a) (= (at ?d) ?x))
15   :effect (and (assign (at ?d) ?y)))
16 (:action perD
17   :parameters (?f - flight ?d - deboard ?p - place)
18   :precondition (and (myAgent ?a) (= (at ?d) ?p) (= (in ?f) ?p)
19                 (not (= (performed ?f) ?d)))
20   :effect (and (assign (performed ?f) ?d)))
21 )

```

Nas linhas 3 e 4, tem-se que os objetos *deboard* são recursos veículos do agente desembarque responsáveis por realizar as tarefas dos voos. Cada recurso veículo pertence a um determinado agente, e só pode ser empregado por seu proprietário. Os objetos *flight* são usados pelos recursos veículos para a execução das tarefas. Os agentes também são modelados como objetos, já que cada um conhece o resto dos agentes presentes no sistema. Por fim, os agentes sabem a localização de cada voo.

Uma vez que os tipos foram definidos nas linhas 3 e 4, o código especifica os fluentes do objeto do domínio nas linhas 7 a 11. O fluente *at* indica que um recurso veículo está em uma determinada localização, o fluente *in* indica que um voo está em uma determinada localização, enquanto o fluent *performed* indica que uma tarefa foi realizado em um voo por um recurso veículo de um determinado agente.

Finalmente, nas linhas 12 a 21 são descritas as ações que o agente desembarque pode realizar. Neste exemplo, o agente pode realizar duas diferentes ações.

A ação *moveD(?d ?x ?y)* indica que o recurso veículo *?d* vai da localização *?x* para a localização *?y* e a ação *perD(?f ?d ?p)* indica que o recurso veículo *?d* realiza a tarefa do voo *?f*. Ambos recurso veículo e voo estão em uma localização *?p*.

7.4.2 Arquivo de *Problema*

O processo de criação do arquivo de *problema* é elucidado no algoritmo 2. Este método recebe como parâmetro o conjunto de todas as aeronaves em solo, os recursos veículos dos gestores das operações em solo, as posições de estacionamento das aeronaves em solo e dos recursos veículos e o número de agentes gestores participantes do cenário.

Algorithm 2 Algoritmo para criar o arquivo de *problema*

Require: aeronaves em solo, recursos veículos, posições de estacionamento das aeronaves e recursos veículos, número de agentes gestores no cenário.

for all *recursoVeiculos* **do**

 associar *recursoVeiculo* à *posicaoEstacionamento*

end for

for all *aeronaves* **do**

 associar *aeronave* à *posicaoEstacionamento*

end for

for all *agentesGestores* **do**

for all *aeronaves, recursoVeiculos* **do**

 associar *aeronave* ao *recursoVeiculo*

end for

end for

return arquivo do problema do agente gestor

Para exemplificar o arquivo de problema do agente com dados reais, usa-se os horários de chegada previsto dos voos da empresa GOL no Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF do dia 17 de abril de 2017 entre 08:10 a 08:40 de manhã².

Tabela 7.1: Horário de chegada previsto dos voos da empresa GOL

Voo	Origem	Chegada Prevista	Estacionamento de chegada
GLO1799	Rio Branco (RBR)	08:10	22
GLO1733	São Luis (SLZ)	08:15	15
GLO1717	Teresina (THE)	08:15	11
GLO1442	São Paulo (CGH)	08:20	05
GLO1408	Guarulhos (GRU)	08:25	03
GLO1821	Belém (BEL)	08:30	09
GLO1749	Marabá (MAB)	08:35	12
GLO1713	Várzea Grande (CGB)	08:40	19
GLO1737	Salvador (SSA)	08:40	02
GLO1725	Manaus (MAO)	08:40	07

²Fonte: Inframérica (<http://www.bsb.aero>, acessado em 17/04/2017)

Uma vez que não há dados sobre os estacionamentos dos recursos veículos, considera-se quatro estacionamentos (h1, h2, h3, h4) referentes a quatro agentes gestores das operações em solo no sistema.

Assim o arquivo de problema inclui os objetos do problema, objetivos, estado inicial e dados compartilhados.

Algoritmo 2: Arquivo de problema do agente gestor desembarque

```
1 (define (problem deboarding)
2 (:domain handling)
3 (:objects
4   deboarding catering refueling boarding - agent
5   vd1 vd2 vd3 - deboard
6   vc1 vc2 vc3 vc4 - cater
7   vr1 vr2 - refuel
8   vb1 vb2 vb3 - board
9   g22 g15 g11 g05 g03 g09 g12 g19 g02 g07
10  h04 h03 h02 h01 - place
11  GLO1799 GLO1733 GLO1717 GLO1442 GLO1408 GLO1821 GLO1749
12  GLO1713 GLO1737 GLO1725 - flight)
13 (:shared-data
14   ((performed ?x - flight) - deboard) - (either catering
15                                           refueling boarding))
16 (:init
17   (= (at vd1) h01)
18   (= (at vd2) h01)
19   (= (at vd3) h01)
20   (= (in GLO1799) g22)
21   (= (in GLO1733) g15)
22   (= (in GLO1717) g11)
23   (= (in GLO1442) g05)
24   (= (in GLO1408) g03)
25   (= (in GLO1821) g09)
26   (= (in GLO1749) g12)
27   (= (in GLO1713) g19)
28   (= (in GLO1737) g02)
29   (= (in GLO1725) g07))
```

```

30    (not (= (performed GLO1799) vd1))
31    (not (= (performed GLO1733) vd2))
32    (not (= (performed GLO1717) vd3))
33    (not (= (performed GLO1442) vd1))
34    (not (= (performed GLO1408) vd2))
35    (not (= (performed GLO1821) vd3))
36    (not (= (performed GLO1749) vd1))
37    (not (= (performed GLO1713) vd2))
38    (not (= (performed GLO1737) vd3))
39    (not (= (performed GLO1725) vd1)))
40  (:global-goal (and
41    (= (performed GLO1799) vd1)
42    (= (performed GLO1733) vd2)
43    (= (performed GLO1717) vd3)
44    (= (performed GLO1442) vd1)
45    (= (performed GLO1408) vd2)
46    (= (performed GLO1821) vd3)
47    (= (performed GLO1749) vd1)
48    (= (performed GLO1713) vd2)
49    (= (performed GLO1737) vd3)
50    (= (performed GLO1725) vd1)
51    (= (performed GLO1799) vc1)
52    (= (performed GLO1733) vc2)
53    (= (performed GLO1717) vc3)
54    (= (performed GLO1442) vc4)
55    (= (performed GLO1408) vc1)
56    (= (performed GLO1821) vc2)
57    (= (performed GLO1749) vc3)
58    (= (performed GLO1713) vc4)
59    (= (performed GLO1737) vc1)
60    (= (performed GLO1725) vc2)
61    (= (performed GLO1799) vr1)
62    (= (performed GLO1733) vr2)
63    (= (performed GLO1717) vr1)
64    (= (performed GLO1442) vr2)
65    (= (performed GLO1408) vr1)
66    (= (performed GLO1821) vr2)

```

```
67    (= (performed GLO1749) vr1)
68    (= (performed GLO1713) vr2)
69    (= (performed GLO1737) vr1)
70    (= (performed GLO1725) vr2)
71    (= (performed GLO1799) vb1)
72    (= (performed GLO1733) vb2)
73    (= (performed GLO1717) vb3)
74    (= (performed GLO1442) vb1)
75    (= (performed GLO1408) vb2)
76    (= (performed GLO1821) vb3)
77    (= (performed GLO1749) vb1)
78    (= (performed GLO1713) vb2)
79    (= (performed GLO1737) vb3)
80    (= (performed GLO1725) vb1))))
```

Como o código indica, o arquivo de problema define a situação dos voos, a localização dos recursos veículos e voos e os objetivos globais. A seção *:shared-data* define quais informações são compartilhadas entre os agentes no sistema.

Capítulo 8

Simulações e Resultados

Neste capítulo, apresentara-se tanto as simulações, os resultados e a análise de escalabilidade do modelo proposto como a comparação com um modelo existente. O ambiente de desenvolvimento utiliza as instalações do Laboratório de Pesquisa em Transporte Aéreo da Universidade de Brasília, ou simplesmente TransLab.

8.1 Descrição do Cenário

O cenário utilizado nas simulações é :

- O Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF. Este é o terceiro maior aeródromo do Brasil, movimentando cerca de 46 mil passageiros por dia, distribuídos em uma média de 267 pousos e 266 decolagens¹.
 - Nome ICAO: SBBR;
 - Nome IATA: BSB;
 - Área total: 28.995.153,00 m^2 ;
 - Capacidade anual: 11 milhões PAX;
 - Estacionamento de Aeronaves: 40 posições,
- O plano de voo da empresa GOL do dia 17 de abril de 2017 no Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF.
- Considera-se o caso com 10 voos, 20 voos e 40 voos em solo.
- Gestores de tarefas de operações em solo com respectivos recursos.
- Diferentes processos de operações em solo.

¹Fonte: Inframérica (<http://www.bsb.aero/projeto>, acessado em 05/03/2017)

8.2 Planejamento da Simulação

As simulações consistem em avaliar o plano solução global gerado pelo modelo proposto tanto na abordagem centralizado como na abordagem descentralizada, a análise de escalabilidade do modelo proposto e a comparação do modelo proposto com um modelo existente.

8.2.1 Caso 1: Comparação entre o Planejamento Único agente e Planejamento Multiagente

1. A primeira simulação, para fins de validação do modelo, é feita considerando quatro agentes gestores de operações em solo. São eles:

- Agente gestor desembarque com 3 recursos;
- Agente gestor catering com 4 recursos;
- Agente gestor abastecimento com 2 recursos;
- Agente gestor embarque com 3 recursos.

O processo de operações em solo abaixo:

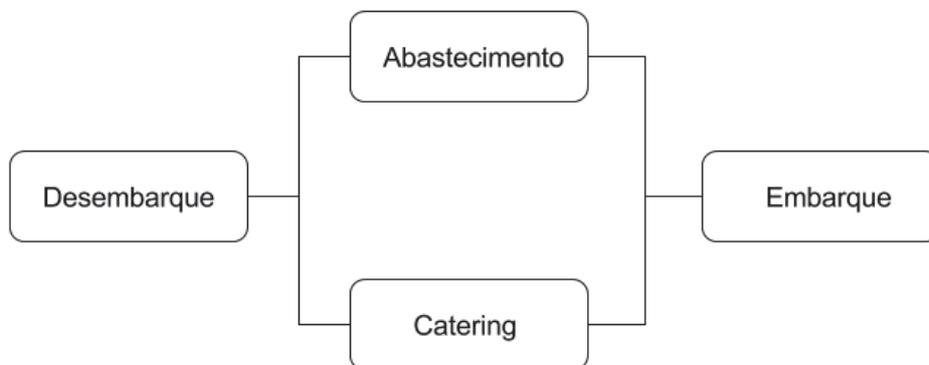


Figura 8.1: O processo de operações em solo da simulação 1.

Tabela 8.1: Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada

Planejamento multiagente		Planejamento único agente		
# Voos	# A	#T. Steps	# A	#T. Steps
10	80	60	80	80
20	160	120	160	160
40	320	240	320	320

A Tabela 8.1 mostra os resultados obtidos. # Voos indica o número de voos. # A e #T. Steps referem-se ao número de ações e *time steps* do plano solução elaborado (observe que não tomamos em consideração as ações fictícias dos planos).

Os *time steps* levam em conta as ações que podem ser realizadas simultaneamente para medir as unidades de tempo necessárias para executar o plano.

2. A segunda simulação, para fins de validação do modelo, é feita considerando cinco agentes gestores de operações em solo. São eles:

- Agente gestor desembarque com 3 recursos.
- Agente gestor catering com 4 recursos.
- Agente gestor abastecimento com 2 recursos.
- Agente gestor embarque com 3 recursos.
- Agente gestor limpeza com 3 recursos.

O processo de operações em solo abaixo:

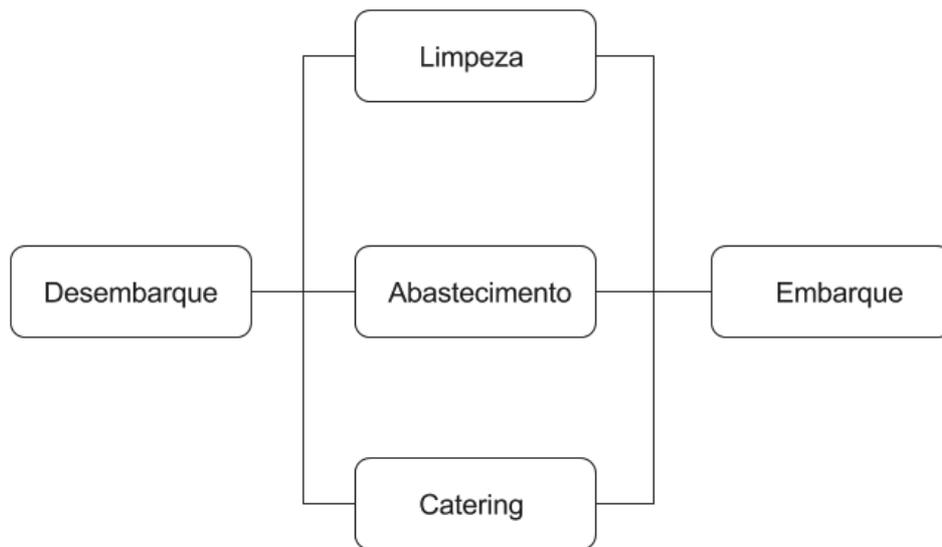


Figura 8.2: O processo de operações em solo da simulação 2.

Tabela 8.2: Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada

# Voos	Planejamento multiagente		Planejamento único agente	
	# A	#T. Steps	# A	#T. Steps
10	100	60	100	100
20	200	120	200	200
40	400	240	400	400

A Tabela 8.2 mostra os resultados obtidos. # Voos indica o número de voos. # A e #T. Steps referem-se ao número de ações e *time steps* do plano solução elaborado (observe que não tomamos em consideração as ações fictícias dos planos).

Os *time steps* levam em conta as ações que podem ser realizadas simultaneamente para medir as unidades de tempo necessárias para executar o plano.

3. A última simulação, para fins de validação do modelo, é feita considerando seis agentes gestores de operações em solo. São eles:

- Agente gestor desembarque com 3 recursos.
- Agente gestor catering com 4 recursos.
- Agente gestor abastecimento com 2 recursos.
- Agente gestor embarque com 3 recursos.
- Agente gestor limpeza com 3 recursos.
- Agente gestor pushback com 2 recursos.

O processo de operações em solo abaixo:

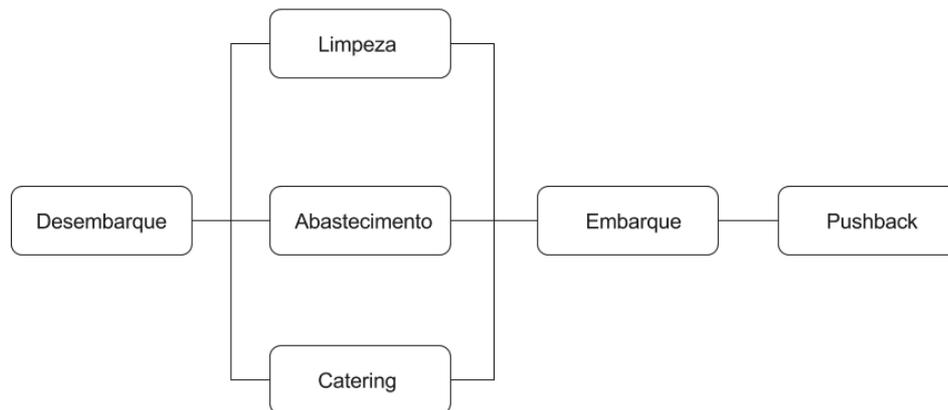


Figura 8.3: O processo de operações em solo da simulação 3.

Tabela 8.3: Comparação entre abordagem descentralizada e centralizada

Planejamento multiagente		Planejamento único agente	
# Voos	# A	#T. Steps	#T. Steps
10	120	80	120
20	240	160	240
40	480	320	480

A Tabela 8.3 mostra os resultados obtidos. # Voos indica o número de voos. # A e #T. Steps referem-se ao número de ações e *time steps* do plano solução elaborado (observe que não tomamos em consideração as ações fictícias dos planos).

Os *time steps* levam em conta as ações que podem ser realizadas simultaneamente para medir as unidades de tempo necessárias para executar o plano.

Considerações das simulações

Como pode ser observado, ambas as abordagens obtêm os mesmos resultados em termos do número de ações dos planos solução. No entanto, a maior diferença vem em termos dos *time steps*.

A abordagem descentralizada reforça esse paralelismo, uma vez que diferentes entidades de planejamento elaboram diferentes partes do plano que podem ser executadas ao mesmo tempo. A abordagem centralizada não é tão eficaz na introdução de ações paralelas.

8.2.2 Caso 2: Análise de Escalabilidade

Este caso de estudo avalia a escalabilidade do modelo proposto, isto é como o número de agentes gestores no modelo afeta sua eficiência. Para isso, foram preparados seis diferentes testes usando a última simulação do Caso de estudo 1 anterior como base. Cada teste aumenta o número de agentes gestores por um, mantendo inalterado o restante dos parâmetros da tarefa de planejamento, isto é, começa-se por um único agente planejando até seis diferentes agentes planejando.

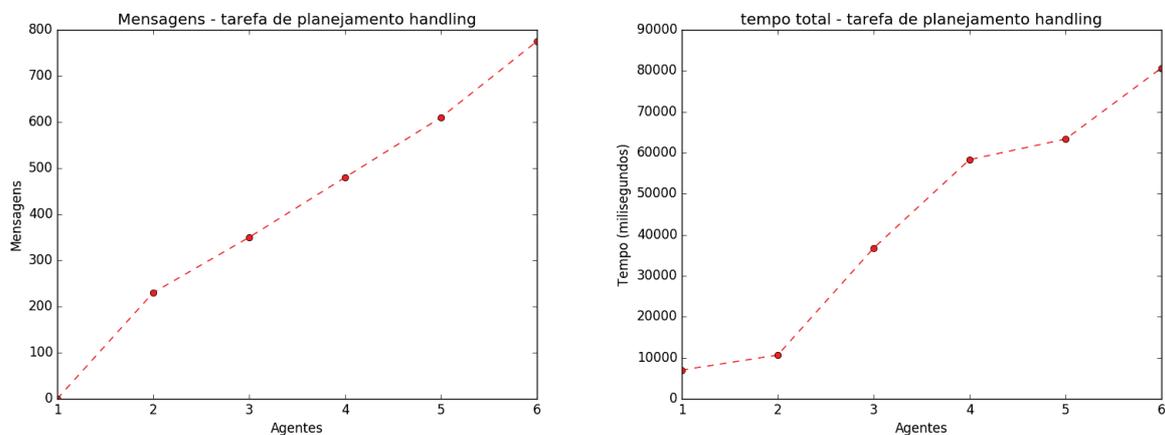


Figura 8.4: Resultados de escalabilidade do modelo proposto

Considerações da análise de escalabilidade

Como pode ser observado, o tempo de execução aumenta com cada novo agente gestor incluído no modelo proposto. O mesmo acontece com o número de mensagens trocadas entre os agentes gestores.

Esses resultados são causados pelo aumento de número de planos de refinamento elaborados pelos agentes gestores. Portanto, a adição de um agente gestor representa um importante aumento no número de mensagens trocadas.

Em conclusão, o número de agentes gestores no modelo proposto é um parâmetro que tem uma influência notável na sua eficiência, uma vez que a troca de mensagens entre os agentes gestores constitui um dos *bottlenecks* do modelo.

8.2.3 Caso 3: Comparação Entre o Modelo Proposto e um Modelo Existente

Este caso de estudo compara o modelo proposto nessa dissertação com o modelo proposto por Salma *et al.* [42]. Para comparar as duas abordagens, testa-se utilizando os voos da empresa GOL no Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF do dia 17 de abril de 2017 entre 08:10 a 08:40 de manhã como mostra a Tabela 8.4 abaixo.

Tabela 8.4: Horário de chegada e partida previsto dos voos da empresa GOL

Voo	Chegada Prevista	Estacionamento de chegada	Partida Prevista
GLO1799	08:10	22	08:50
GLO1733	08:15	15	08:55
GLO1717	08:15	11	09:00
GLO1442	08:20	05	09:00
GLO1408	08:25	03	09:10
GLO1821	08:30	09	09:10
GLO1749	08:35	12	09:20
GLO1713	08:40	19	09:20
GLO1737	08:40	02	09:25
GLO1725	08:40	07	09:25

As abordagens também foram testadas com o processo de operações em solo da Figura 8.1 mantendo inalterado os recursos de cada agente.

Vale notar que os processos de desembarque e embarque usam pontes aéreas como recursos, o processo de *catering* usa veículos que carregam comidas e cada recurso veículo precisa voltar para o depósito depois de servir duas aeronaves. O processo de abastecimento de combustíveis usa caminhões distribuidores onde cada um pode abastecer até 5 aeronaves antes de voltar para ser reabastecido. considera-se quatro estacionamentos de recursos veículos referentes a quatro agentes gestores das operações em solo.

Para simular a comparação, deve-se executar o plano criado pelo modelo proposto nessa dissertação e para fazer isso, deve-se atribuir a cada ação dos agentes gestores no cenário uma duração de tempo. A Tabela 8.5 abaixo mostra a duração de tempo das ações de cada agente.

Tabela 8.5: Duração de tempo em minutos das ações dos agentes

Ação	Embarque	Desembarque	Abastecimento	Catering
mover-recurso	3	3	3	3
realizar-tarefa	15	7	9	10

A Tabela 8.6 mostra os atrasos em minutos dos voos de cada abordagem considerada.

Tabela 8.6: Atrasos dos voos em minutos gerados entre a abordagem proposta e a abordagem existente

Voo	Chegada Prevista	Partida Prevista	Atraso modelo-pro	Atraso modelo-exis
GLO1799	08:10	08:50	1	1
GLO1733	08:15	08:55	1	1
GLO1717	08:15	09:00	2	2
GLO1442	08:20	09:00	7	7
GLO1408	08:25	09:10	4	4
GLO1821	08:30	09:10	10	10
GLO1749	08:35	09:20	5	5
GLO1713	08:40	09:20	12	12
GLO1737	08:40	09:25	13	13
GLO1725	08:40	09:25	18	18

Como pode ser notado, as duas abordagens apresentam os mesmos atrasos para cada voo. Assim todas as 10 aeronaves terão um atraso ao nível do horário de partida com um atraso máximo de 18 minutos e um atraso médio de 7 minutos. Esses atrasos são devidos ao período de tráfego de voo mais movimentado.

Conforme os dados históricos do dia 17 de abril de 2017 entre 08:10 a 08:40 de manhã do Aeroporto Internacional Juscelino Kubitschek, em Brasília-DF² para os voos da companhia aérea GOL indicam que cerca de 10 aeronaves de partida onde atrasadas por várias razões, incluindo uma das principais razões, atrasos das operações em solo. O atraso máximo observado é de cerca de 60 minutos e o atraso médio foi de 30 minutos. Existem informações sobre a utilização de um sistema específico para gerir as operações em solo nesse aeroporto.

Consideração da simulação

Como pode ser observado, ambos os modelos obtêm os mesmos resultados em termos dos atrasos dos voos e, em teoria, ambos os modelos proporcionam resultados significativamente melhores em relação aos atrasos de partida de voos. No entanto, a diferença é que o modelo proposto cria um plano ótimo global que os gestores das operações em solo usarão para

²Fonte: Inframérica (<http://www.bsb.aero>, acessado em 17/04/2017)

planejar as atividades e esse modelo pode ser usado em qualquer aeroporto. O modelo proposto por Salma *et al.* [42] é um modelo de pesquisa operacional e precisa de melhoria notável quando se quer aplicá-lo em diferentes aeroportos.

Capítulo 9

Conclusão e Trabalhos Futuros

Esta dissertação descreve o desenvolvimento do modelo GH-MAP, que utiliza os conceitos de CDM, Sistemas multiagentes e Planejamento multiagente para a gestão das operações em solo nos aeroportos. O GH-MAP é um protótipo implementado com fins acadêmicos para a validação metodológica da modelagem proposta. Neste capítulo, apresentará as conclusões da dissertação e revelará as suas limitações. Serão apresentados também os artigos publicados durante essa dissertação.

9.1 Apresentação

Esta dissertação apresentou um framework que auxilia as entidades do aeroporto no planejamento de operações em solo no aeroporto. A metodologia desenvolvida foi fundamentada na tomada de decisão colaborativa, nos sistemas multiagentes e no planejamento multiagente, portanto se baseou na colaboração entre as entidades envolvidas: o controle do tráfego aéreo, as companhias aéreas e os gestores de operações em solo a fim de criar um plano global que será executado posteriormente pelos gestores de operações em solo.

O desenvolvimento da metodologia declarada na seção 1.2 como objetivo geral exigiu o cumprimento dos objetivos específicos, conforme a seguir:

1. Foram estudadas as referências na área da gestão de operações em solo e o problema foi definido através dos relacionamentos entre os participantes baseados na colaboração.
2. Um framework das relações na gestão de operações em solo foi proposto para estudar as interações entre seus participantes. Os participantes, o escopo e as metodologias foram definidos.
3. Um modelo foi apresentado para auxiliar no entendimento de cada passo desde a concepção dos agentes até a criação do plano solução global.

4. Um sistema foi desenvolvido para verificar a eficácia do modelo proposto. O sistema foi construído por dois componentes: o Módulo SMA e o Módulo FMAP. Cada componente teve distintas funções e cooperaram para a finalização do trabalho.
5. O modelo foi analisado de acordo com os dados reais de operações em solo. Como os dados coletados pelo sistema desenvolvido, a tecnologia de simulação foi aplicada para analisar o desempenho do modelo proposto.

Considere-se, portanto, que o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação foram atingidos conforme estabelecido na seção 1.2.

9.2 Contribuições

Com o aumento de atrasos e congestionamentos nos aeroportos em todo o mundo, o que resulta em um alto custo financeiro e social para as companhias aéreas e passageiros, os custos de operações em solo representam uma parte bastante pequena mas o seu mau funcionamento pode gerar enormes custos adicionais para as companhias aéreas e aeroportos, bem como um elevado desconforto para os passageiros. Assim, um dos maiores desafios é melhorar a colaboração entre os diferentes stakeholders no planejamento das atividades de operações em solo. O controle do tráfego aéreo, as companhias aéreas e os gestores de operações em solo compõem os três principais participantes envolvidos na gestão de operações em solo.

Nesta dissertação, as teorias sobre a tomada de decisão colaborativa, sistemas multiagentes e planejamento multiagente são adotadas e um modelo é proposto.

O modelo recebe o plano de voo de uma companhia aérea (em colaboração com o controle de tráfego aéreo) e passa ele para os gestores de operações em solo. A partir do plano de voo recebido, cada gestor de tarefa de operações em solo junto com a sua base de dados cria um arquivo pddl chamado *arquivo de problema*. Os arquivos de problema criados pelos agentes gestores das operações em solo junto com os seus arquivos de domínio são introduzidos no sistema FMAP e um plano solução global é criado. Esse plano solução será executado posteriormente pelos mesmos gestores das operações em solo.

9.3 Limitações e Trabalhos Futuros

Contudo, embora esse trabalho possa ajudar os participantes da gestão de operações em solo no planejamento das tarefas, ainda há limitações. A gestão de operações em solo é um cenário bem mais complexo que o considerado neste trabalho. É um desafio captar todas

as características em apenas um modelo ou framework. Então, as premissas propostas na pesquisa tem o objetivo de facilitar a construção do modelo proposto.

Além disso, o tempo de execução e de mensagens trocadas entre agentes gestores no modelo proposto aumenta a cada novo agente incluído no modelo. Isso cria um dos gargalos do modelo proposto.

Portanto, nos trabalhos futuros, dedicará-se no aperfeiçoamento dos defeitos mencionados empregando outras terias e técnicas.

O modelo proposto tem recebido feedback positivo e foi publicado em várias conferências tanto internacionais como nacionais.

9.4 Publicações

No período de realização deste mestrado, houve a publicação dos seguintes artigos em revistas e em conferências.

Revista

- Tiancheng Li, Elton Sarmanho Siqueira, Patrick Cisuaka Kabongo, Li Weigang. "On Chinese and Western Family Trees: Mechanism and Performance". *Advances in Distributed Computing and Artificial Intelligence Journal*, Vol. 5, p. 11-22, 2016. **Capes Qualis CC 2013-2016: B5**

Conferências

- Patrick Cisuaka Kabongo, Thiago Mendonça Ferreira Ramos, Alessandro Ferreira Leite, Célia Ghedini Ralha, Li Weigang. "A Multi-Agent Planning Model for Airport Ground Handling Management". In: *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, Rio de Janeiro. Proceedings of IEEE ITSC. USA: IEEE, 2016. Vol. 1. p. 1-6. **Capes Qualis Event CC 2013-2015: B2**
- Elton Sarmanho Siqueira, Patrick Cisuaka Kabongo, Li Weigang. "Comparison Study Between Chinese Family Tree and Occidental Family Tree". *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 1ed.: Springer International Publishing, 2016, v. 474, p. 61-69. **Capes Qualis Event CC 2013-2015: B2**
- Patrick Cisuaka Kabongo, Alessandro Ferreira Leite, Daniel Alberto Pamplona, Li Weigang, Félix Mora-Carmino. "Um modelo de planejamento multiagente para a gestão das operações em solo nos aeroportos". In: *Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte*, 2016, Rio de Janeiro. XXX ANPET. Rio de Janeiro: ANPET, 2016. vol. 1. p. 1-12. **Capes Qualis CC 2012: C**

- Patrick Cisuaka Kabongo, Alessandro Ferreira Leite, Li Weigang. "Um modelo multi-agente para gestão das operações de ground handling nos aeroportos". In: *Seminário de Transporte Aéreo - SITRAER*, 2015, São José dos Campos. Anais de SITRAER 2015, 2015.

Referências

- [1] Airbus. Axxx airplane characteristics for airport planning. 2005. xi, 43, 44, 45
- [2] James F Allen, Lenhart K Schubert, George Ferguson, Peter Heeman, Chung Hee Hwang, Tsuneaki Kato, Marc Light, Nathaniel Martin, Bradford Miller, Massimo Poesio, et al. The trains project: A case study in building a conversational planning agent. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, 7(1):7–48, 1995. 11
- [3] ANAC. Anuário estatístico do transporte 2014. technical report. <http://www2.anac.gov.br/estatistica/anuarios.asp>, 2015. Acessado: 2017-06-02. 1
- [4] Pablo García Ansola, Andrés García Higuera, José Manuel Pastor, e F Javier Ota-mendi. Agent-based decision-making process in airport ground handling management. *Logistics Research*, 3(2-3):133–143, 2011. 58
- [5] Michael Ball, George Donohue, e Karla Hoffman. Auctions for the safe, efficient, and equitable allocation of airspace system resources. *Combinatorial auctions*, 1, 2006. 30
- [6] Michael Ball, Robert Hoffman, William Hall, e Alp Muharremoglu. Collaborative decision making in air traffic management: A preliminary assessment. *NEXTOR Project Report to FAA, August*, 1998. 30
- [7] Michael O Ball, Robert Hoffman, e Avijit Mukherjee. Ground delay program planning under uncertainty based on the ration-by-distance principle. *Transportation Science*, 44(1):1–14, 2010. 2
- [8] Anthony Barrett e Daniel S Weld. Partial-order planning: Evaluating possible efficiency gains. *Artificial Intelligence*, 67(1):71–112, 1994. 8, 11
- [9] Alexandros Belesiotis, Michael Rovatsos, e Iyad Rahwan. A generative dialogue system for arguing about plans in situation calculus. In *International Workshop on Argumentation in Multi-Agent Systems*, pages 23–41. Springer, 2009. 11
- [10] Alexandros Belesiotis, Michael Rovatsos, e Iyad Rahwan. Agreeing on plans through iterated disputes. In *Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems: volume 1-Volume 1*, pages 765–772. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2010. 9, 11
- [11] J Benton, Amanda Jane Coles, e Andrew Coles. Temporal planning with preferences and time-dependent continuous costs. In *ICAPS*, volume 77, page 78, 2012. 21

- [12] Dimitris Bertsimas e Michael Frankovich. Unified optimization of traffic flows through airports. *Transportation Science*, 50(1):77–93, 2015. 1
- [13] Avrim L Blum e Merrick L Furst. Fast planning through planning graph analysis. *Artificial intelligence*, 90(1):281–300, 1997. 8
- [14] Boeing. Bxxx airplane characteristics for airport planning. 2009. xi, 41, 42, 45
- [15] Blai Bonet e Héctor Geffner. Planning as heuristic search. *Artificial Intelligence*, 129(1):5–33, 2001. 8
- [16] Craig Boutilier e Ronen I Brafman. Partial-order planning with concurrent interacting actions. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14:105–136, 2001. 18
- [17] Ronen I Brafman e Carmel Domshlak. From one to many: Planning for loosely coupled multi-agent systems. In *ICAPS*, pages 28–35, 2008. 19
- [18] AVIAÇÃO BRASIL. O que as empresas de ground handling estão fazendo para reduzir o extravio de bagagem. <http://www.aviacaobrasil.com.br/o-que-as-empresas-de-ground-handling-estao-fazendo-para-reduzir-o-extravio-de-ba> 2016. [Online; acessado 10-Abril-2017]. 49
- [19] Michael Brenner e Bernhard Nebel. Continual planning and acting in dynamic multiagent environments. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 19(3):297–331, 2009. 9, 10, 18
- [20] Chris Brinton, Chris Provan, Steve Lent, Tom Prevost, e Susan Passmore. Collaborative departure queue management. In *Ninth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2011)*, 2011. 30
- [21] A. R. Center. Study on the impact of directive 96/67/ec on ground handling services 1996-2007. 2009. 3, 46
- [22] T. Clausen. Airport ground staff scheduling, 2011. 1
- [23] Tommy Clausen e David Pisinger. Dynamic routing of short transfer baggage. Technical Report 10, DTU Management Engineering, 2010. 53
- [24] Bradley J Clement. International conference on automated planning and scheduling icaps-05. In *Proceedings of the Workshop on Multi-agent Planning and Scheduling*, 2005. 8
- [25] Bradley J Clement e Anthony C Barrett. Continual coordination through shared activities. In *Proceedings of the second international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 57–64. ACM, 2003. 10
- [26] Jeffrey S Cox, Edmund H Durfee, e Thomas Bartold. A distributed framework for solving the multiagent plan coordination problem. In *Proceedings of the fourth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 821–827. ACM, 2005. 10

- [27] AF Crespo e L Weigang. Airspace complexity factor in atfm scenario evaluation. In *14th Air Transport Research Society (ATRS) World Conference 1. Porto-Portugal: ATRS-Air Transport Research Society*, pages 1–12, 2010. 29, 30
- [28] Tomás de la Rosa, Angel García-Olaya, e Daniel Borrajo. A case-based approach to heuristic planning. *Applied intelligence*, 39(1):184–201, 2013. 24
- [29] Mathijs De Weerd, Adriaan Ter Mors, e Cees Witteveen. Multi-agent planning: An introduction to planning and coordination. In *In: Handouts of the European Agent Summer*. Citeseer, 2005. 10, 13
- [30] Guy Desaulniers, Jacques Desrosiers, e Marius M Solomon. *Column generation*, volume 5. Springer Science & Business Media, 2006. 56
- [31] Anders Dohn, Esben Kolind, e John Haywood. Optimizing manpower allocation for ground handling tasks in airports using column generation. pages 2–11, 2008. 37, 38, 40, 41, 46, 55, 56, 57
- [32] Yuquan Du, Qian Zhang, e Qiushuang Chen. Aco-ih: An improved ant colony optimization algorithm for airport ground service scheduling. In *IEEE International Conference on Industrial Technology*, pages 1–6, 2008. 36, 37, 41, 47, 52
- [33] A Dubai. The costs of delays and cancellations—analysis and means for cost reductions. URL: <http://www.agifors.org/document.go>, 2008. 47, 49
- [34] Edmund H Durfee. Distributed problem solving and planning. In *Multi-agent systems and applications*, pages 118–149. Springer, 2001. 9
- [35] Edmund H Durfee e Victor R Lesser. Partial global planning: A coordination framework for distributed hypothesis formation. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 21(5):1167–1183, 1991. 10
- [36] Edmund H Durfee, Charles L Ortiz Jr, Michael J Wolverton, et al. A survey of research in distributed, continual planning. *Ai magazine*, 20(4):13, 1999. 9, 10
- [37] Eithan Ephrati e Jeffrey S Rosenschein. Deriving consensus in multiagent systems. *Artificial Intelligence*, 87(1):21–74, 1996. 11
- [38] Kutluhan Erol, James A Hendler, e Dana S Nau. Umcp: A sound and complete procedure for hierarchical task-network planning. In *AIPS*, volume 94, pages 249–254, 1994. 8
- [39] EUROCONTROL. *Airport CDM Applications Guide*. Eurocontrol, 2003. xi, 2, 32, 33, 37
- [40] Richard E Fikes e Nils J Nilsson. Strips: A new approach to the application of theorem proving to problem solving. *Artificial intelligence*, 2(3-4):189–208, 1971. 19
- [41] S. Fitouri-Trabelsi. Contribution a l’organisation des operations d’escale dans une plateforme aeroportuaire, 2013. xi, 1, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44, 47, 60, 61

- [42] Salma Fitouri-Trabelsi, Felix Mora-Camino, Carlos Alberto Nunes-Cosenza, e Li Weigang. Integrated decision making for ground handling management. *Global Journal of Science Frontier Research: F Mathematics and Decision Sciences*, 15(1):17–31, 2015. 2, 31, 59, 85, 87
- [43] H. Fricke e M. Schultz. Delays impacts onto turnaround performance optimal time buffering for minimizing delay propagation. *Eighth USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM)*, 2009. 44, 46
- [44] Alfonso Gerevini e Derek Long. Preferences and soft constraints in pddl3. In *ICAPS workshop on planning with preferences and soft constraints*, pages 46–53, 2006. 13
- [45] Malik Ghallab, Dana Nau, e Paolo Traverso. *Automated planning: theory & practice*. Elsevier, 2004. 7, 16, 17
- [46] Malte Helmert. A planning heuristic based on causal graph analysis. In *ICAPS*, volume 4, pages 161–170, 2004. 25
- [47] Sin C Ho e Janny MY Leung. Solving a manpower scheduling problem for airline catering using metaheuristics. *European Journal of Operational Research*, 202(3):903–921, 2010. 54
- [48] Robert L Hoffman. *Integer programming models for ground-holding in air traffic flow management*. Tese (Doutorado), 1998. 30
- [49] Jörg Hoffmann e Ronen I Brafman. Conformant planning via heuristic forward search: A new approach. *Artificial Intelligence*, 170(6):507–541, 2006. 9
- [50] Jörg Hoffmann e Bernhard Nebel. The ff planning system: Fast plan generation through heuristic search. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 14:253–302, 2001. 8, 25
- [51] ICAO. Doc 9854: Global air trac management operational concept. technical report doc 9854-an/458, international civil aviation organization. pages 21–25, 2005. 30
- [52] Nicholas R Jennings, Peyman Faratin, Alessio R Lomuscio, Simon Parsons, Michael J Wooldridge, e Carles Sierra. Automated negotiation: prospects, methods and challenges. *Group Decision and Negotiation*, 10(2):199–215, 2001. 11
- [53] Zheng Jianya. Uma investigação de relacionamentos baseados na competição entre stakeholders no comércio eletrônico utilizando teoria dos jogos, 2016. 71
- [54] Henry Kautz e Bart Selman. Pushing the envelope: Planning, propositional logic, and stochastic search. In *Proceedings of the National Conference on Artificial Intelligence*, pages 1194–1201, 1996. 8
- [55] Dániel L Kovács. Complete bnf description of pddl 3.1. 2011. url: ht tp. 19
- [56] Kenneth Kuhn e Steffen Loth. Airport service vehicle scheduling. 2009. 51
- [57] Jonas Kvarnström. Planning for loosely coupled agents using partial order forward-chaining. In *ICAPS*, 2011. 14, 22

- [58] Susan E Lander et al. Customizing distributed search among agents with heterogeneous knowledge. 1992. 11
- [59] Sérgio Louro, Luís Paulo Reis, e Eugénio Oliveira. Virtual 3d: Sistema multi-agente de visualização com controlo inteligente de câmara. 2004. 6, 7
- [60] Guglielmo Lulli e Amedeo Odoni. The european air traffic flow management problem. *Transportation Science*, 41(4):431–443, 2007. 29
- [61] Xiaoyu Mao, Nico Roos, e Alfons Salden. Stable multi-project scheduling of airport ground handling services by heterogeneous agents. pages 537–544, 2009. 57
- [62] Ruta Mehta e Vijay V Vazirani. An incentive compatible, efficient market for air traffic flow management. *arXiv preprint arXiv:1305.3241*, 2013. 1
- [63] Theresa A Moehlman, Victor R Lesser, e Brandon L Buteau. Decentralized negotiation: An approach to the distributed planning problem. *Group decision and Negotiation*, 1(2):161–191, 1992. 11
- [64] Karen L Myers. Cpef: A continuous planning and execution framework. *AI Magazine*, 20(4):63, 1999. 10
- [65] XuanLong Nguyen e Subbarao Kambhampati. Reviving partial order planning. In *IJCAI*, volume 1, pages 459–464, 2001. 12
- [66] Anna Norin, Tobias Andersson Granberg, P Varbrand, e Di Yuan. Integrating optimization and simulation to gain more efficient airport logistics. 2009. xi, 43
- [67] Paul D O’Brien e Richard C Nicol. Fipa—towards a standard for software agents. *BT Technology Journal*, 16(3):51–59, 1998. 28
- [68] Pinar Öztürk, Kari Rossland, e Odd Erik Gundersen. A multiagent framework for coordinated parallel problem solving. *Applied Intelligence*, 33(2):132–143, 2010. 27
- [69] Anshika Pal, Ritu Tiwari, e Anupam Shukla. Communication constraints multi-agent territory exploration task. *Applied intelligence*, 38(3):357–383, 2013. 14
- [70] J Scott Penberthy, Daniel S Weld, et al. Ucpop: A sound, complete, partial order planner for adl. *Kr*, 92:103–114, 1992. 8
- [71] MV Nagendra Prasad e Victor R Lesser. Learning situation-specific coordination in cooperative multi-agent systems. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2(2):173–207, 1999. 6
- [72] Stuart J. Russell e Peter Norvig. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Pearson Education, 2 edition, 2003. 5
- [73] O Sapena. *Planificación Independiente del Dominio en Entornos Dinámicos de Tiempo Restringido*. Tese (Doutorado), Tesis Doctoral de Informática, Universidad Politécnica de Valencia, 2005. 7

- [74] Oscar Sapena e Eva Onaindia. Planning in highly dynamic environments: an anytime approach for planning under time constraints. *Applied Intelligence*, 29(1):90–109, 2008. 14, 17
- [75] Yoav Shoham e Moshe Tennenholtz. On social laws for artificial agent societies: off-line design. *Artificial intelligence*, 73(1):231–252, 1995. 11
- [76] David E Smith, Jeremy Frank, e Ari K Jónsson. Bridging the gap between planning and scheduling. *The Knowledge Engineering Review*, 15(01):47–83, 2000. 26
- [77] Yuqing Tang, Timothy J Norman, e Simon Parsons. A model for integrating dialogue and the execution of joint plans. In *International Workshop on Argumentation in Multi-Agent Systems*, pages 60–78. Springer, 2009. 11
- [78] John Thangarajah, Lin Padgham, e Michael Winikoff. Detecting and avoiding interference between goals in intelligent agents. In *International Joint Conference on Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann Publishers, 2003. 11
- [79] Alejandro Torreño, Eva Onaindia, e Óscar Sapena. A flexible coupling approach to multi-agent planning under incomplete information. *Knowledge and information systems*, 38(1):141–178, 2014. 19, 27, 28
- [80] Alejandro Torreno, Eva Onaindia, e Oscar Sapena. Fmap: Distributed cooperative multi-agent planning. *Applied Intelligence*, 41(2):606–626, 2014. 2, 13, 14, 19, 20
- [81] Alejandro Torreño Lerma. Design and implementation of a multi-agent planning system. 2012. 8, 12, 13
- [82] Alejandro Torreño. FMAP: Forward-Chaining Multi-Agent Planning System. <http://users.dsic.upv.es/grupos/grps/tools/map/fmap.html>, 2014. [Online; acessado 12-Março-2017]. 72
- [83] Andrija Vidosavljević e V Tošić. Modeling of turnaround process using petri nets. 2010. xi, 43
- [84] Li Weigang, Marcos Vinicius Pinheiro Dib, Daniela Pereira Alves, e Antonio Marcio Ferreira Crespo. Intelligent computing methods in air traffic flow management. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 18(5):781–793, 2010. 29
- [85] Daniel S Weld. An introduction to least commitment planning. *AI magazine*, 15(4):27, 1994. 8, 12
- [86] Michael Woolridge e Michael J. Wooldridge. *Introduction to Multiagent Systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 2001. xi, 5, 6
- [87] Qiang Yang, Dana S Nau, e James Hendler. Merging separately generated plans with restricted interactions. *Computational Intelligence*, 8(4):648–676, 1992. 11
- [88] Jian Feng Zhang, Xuan Thang Nguyen, e Ryszard Kowalczyk. Graph-based multiagent replanning algorithm. In *Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, page 122. ACM, 2007. 25