

Transporte Robotizado de Bagagens em Aeroportos

PEDRO MATIAS LOPES LEMOS

Outubro de 2022

Transporte Robotizado de Bagagens em Aeroportos

Pedro Matias Lopes Lemos



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

2022

Este relatório satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Candidato: Pedro Matias Lopes Lemos, N.º 1190144, 1190144@isep.ipp.pt
Orientação científica: Manuel Fernando dos Santos Silva, mss@isep.ipp.pt
Coorientação científica: André Siqueira da Silva, and@isep.ipp.pt



Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Área de Especialização de Automação e Sistemas

Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

23 de outubro de 2022

Agradecimentos

Ao longo deste percurso foram várias as pessoas que desempenharam um papel fundamental, tanto a nível académico como pessoal, e sem as quais este seria muito mais difícil.

Em primeiro lugar, gostaria de fazer um agradecimento muito especial aos meus pais por todo o apoio e incentivo que me deram para continuar os meus estudos, com a realização do mestrado.

Aos meus amigos, um obrigado por toda a ajuda e companheirismo. Foi um prazer ter partilhado este caminho com um suporte e compreensão em épocas de exame. Sem querer esquecer de agradecer aos amigos que encontrei nestes dois anos, pelo apoio e as incontáveis horas que passámos a fazer os nossos projetos em conjunto.

Agradeço aos meus orientadores Professor Manuel Silva e Professor André Siqueira por me terem dado a oportunidade de desenvolver este projeto do qual apreciei esta experiência. Por me terem feito sentir muito confortável durante todo o processo, por todas as reuniões interessantes respondendo às minhas perguntas, tendo em elevada consideração todo o trabalho na leitura bem como as sugestões de revisão que permitiram enriquecer o documento desta Dissertação, por todo o apoio prestado relativo aos aspetos técnicos e às interessantes conversas sobre o funcionamento do aeroporto.

Gostaria de agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pela experiência académica durante estes anos, assim como a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta caminhada fosse concluída com sucesso.

Resumo

Nos dias de hoje a simulação está cada vez mais a tornar-se uma ferramenta importante, quando existe a necessidade de desenvolver ou melhorar projetos de forma mais eficiente sem correr qualquer risco económico. Neste documento apresenta-se e simula-se um projeto cuja atividade está relacionada com a robótica móvel em tarefas de serviços, mais concretamente, com a manipulação do transporte de bagagens em aeroportos, entre os aviões e terminais, através de um sistema automático de robôs denominado pela indústria como *Automated Guided Vehicle* (AGV). Esta é uma área que envolve uma grande intensidade de trabalho manual, em condições adversas e muitas vezes de risco, embora que controlado.

Para este estudo, foi necessário recolher toda a informação possível sobre os sistemas AGV atualmente existentes e a subsequente conceção preliminar, de forma a optar pela melhor abordagem possível, de acordo com o caso prático apresentado a partir do *layout* e regras de segurança existentes no aeroporto.

Foram também estudados artigos e investigações práticas para adquirir conhecimentos em implementações anteriores relacionados na mesma área de trabalho. Foi realizado um estudo de mercado para encontrar a melhor ferramenta de simulação de *software* no mercado para AGV, analisando as principais características de cada um. Embora muitos *softwares* satisfaçam os requisitos, foi realizada uma tabela comparativa de maneira a decidir a ferramenta que foi escolhida, incluindo as razões que levaram a essa opção.

Por fim, foi efetuada a avaliação do modelo 3D concebido recorrendo a uma análise da simulação efetuada, com gráficos gerados através dos dados recolhidos na simulação. Após discutir os resultados e as questões que foram enfrentadas durante o projeto, verificou-se que 16 é o número ótimo de AGV presentes no sistema, tendo em consideração todos os tempos de operação e à qualidade de melhoria no serviço este foi o número considerado como a melhor solução para o modelo.

Além disso, o trabalho realizado foi analisado como conclusão do projeto com uma secção com trabalho futuro para continuar a desenvolver este sistema.

Palavras-Chave: Robôs Móveis, AGV, Transporte de Bagagens, Aeroporto, FlexSim, Simulação

Abstract

Nowadays simulation is increasingly becoming an important tool when there is a need to develop or improve projects more efficiently without taking any economic risk. This thesis presents and simulates a project whose activity is related to robotics in service tasks, more specifically, with the handling of luggage transportation at airports, between the aircraft and the terminals, through an automatic robot system called by the industry as Automated Guided Vehicle (AGV). This is an area that involves a great deal of manual labor intensity, in adverse and often hazardous, albeit controlled, conditions.

For this study, it was necessary to collect all possible information about currently existing AGV systems and the subsequent preliminary design, in order to choose the best possible approach, according to the practical case presented from the existing airport layout and safety rules.

Articles and practical research were also studied to gain knowledge on previous related implementations in the same area of work. A market study was conducted to find the best software simulation tool on the market for AGV, analyzing the main features of each. Although many softwares meet the requirements, a comparison table was made in order to decide which tool was chosen, including the reasons that led to this choice.

Finally, an evaluation of the designed 3D model was performed using an analysis of the simulation performed, with graphs generated using the data collected in the simulation. After discussing the results and the issues that were faced during the project, it was found that 16 is the optimal number of AGV present in the system, taking into account all operation times and the quality of service improvement, this was the number considered as the best solution for the model.

In addition, the work done was analyzed as the conclusion of the project with a section with future work to further develop this system.

Keywords: Mobile Robots, AGV, Baggage Handling, Airport, FlexSim, Simulation

Índice

Agradecimentos	v
Índice	i
Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	ix
Acrónimos	xi
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Calendarização	2
1.4 Organização da Dissertação	4
2 Revisão Bibliográfica	5
2.1 Evolução Histórica dos Veículos Autónomos	5
2.2 Tipos de AGV	6
2.2.1 AGV Empilhador	7
2.2.2 AGV de Carga Unitária	8
2.2.3 AGV de Reboque/Tração	8
2.2.4 Automated Guided Cart	8
2.2.5 AGV Personalizado à Medida	9
2.3 <i>Autonomous Mobile Robots</i>	9
2.4 Sistemas de Direção e Tração	10
2.4.1 Configuração Diferencial	10
2.4.2 Configuração Triciclo	11
2.4.3 Configuração Quádrupla	11
2.4.4 Configuração Omnidirecional	12

2.5	Sistemas de Controlo	13
2.6	Sistemas de Navegação	15
2.6.1	Navegação Guiada por Laser (LGV)	15
2.6.2	Navegação por Fita Magnética	16
2.6.3	Navegação por Pontos Magnéticos	17
2.6.4	Navegação Natural ou Livre	18
2.7	Sistemas de Segurança	19
2.7.1	Medidas de Segurança Ativa	19
2.7.2	Medidas de Segurança Passiva	21
2.7.3	Medidas de Segurança Cibernética	23
2.8	Conclusão do Capítulo 2	24
3	Robótica Móvel para Tarefas de Logística	25
3.1	<i>Automated Guided Vehicles</i>	25
3.2	Aplicações de AGV	26
3.2.1	AGV de Transporte em Fundições de Alumínio	26
3.2.2	AGV em Terminais Portuários – Roterdão	27
3.2.3	Transporte Autónomo de Bagagem para Aviões no Aero- porto Internacional de Changi em Singapura	27
3.2.4	AGV <i>Vanderlande FLEET</i> para Ajudar os Passageiros no Check-in de Bagagens	28
3.2.5	AGV em Operações de Limpeza e Higienização do Ar no Aeroporto de Luton	29
3.2.6	Robôs de Entrega no Aeroporto de Cincinnati	30
3.2.7	AGV Arrumador de Carros	30
3.3	Conclusão do Capítulo 3	31
4	Simulação de Robôs Móveis	33
4.1	Simulação de Processos	33
4.1.1	FlexSim	34
4.1.2	Anylogic	35
4.1.3	Arena	36
4.1.4	Tecnomatix Plant Simulation	37
4.1.5	Simio Simulation Software	37
4.2	Seleção do <i>Software</i>	38
4.3	Conclusão do Capítulo 4	40
5	Arquitetura do Sistema	41
5.1	Pressupostos do Desenvolvimento	41
5.2	Descrição do Fluxo	44
5.2.1	Diagrama da Arquitetura em Alto Nível	45
5.2.2	Fluxograma de Bagagens	46

5.2.3	Fluxograma de Aviões	47
5.2.4	Fluxograma de AGV	50
5.3	Conclusão do Capítulo 5	51
6	Implementação do Modelo	53
6.1	<i>Layout</i>	53
6.1.1	Estações de Carga da Bateria	54
6.2	Classificação das Bagagens	55
6.3	Criação de Grupos no FlexSim	56
6.4	Lógica dos Aviões	57
6.4.1	Velocidade de Movimentação dos Aviões	57
6.4.2	Atribuição do Tipo de Avião	58
6.4.3	Controlo para Voos de Chegada	58
6.4.4	Avarias ou Cancelamentos	60
6.4.5	Controlo para Voos de Partida	61
6.5	Lógica dos AGV	62
6.5.1	Velocidade de Movimentação dos AGV	62
6.5.2	Rotina Principal de Controlo dos AGV	63
6.5.3	Processo de Carregamento de Bagagens	64
6.5.4	Processo de Descarregamento de Bagagens	65
6.6	<i>Process Flow</i> da Simulação	66
6.7	Dificuldades Encontradas Perante o Desenvolvimento	66
6.7.1	Criação da Lógica de Carregamento de Bateria dos AGV	66
6.7.2	Pontos de Bloqueio dos AGV	67
6.8	Conclusão do Capítulo 6	67
7	Análise e Discussão de Resultados	69
7.1	Planeamento dos Voos	69
7.2	Cenários e Resultados Obtidos	71
7.2.1	Cenário A: 8 AGV	72
7.2.2	Cenário B: 10 AGV	74
7.2.3	Cenário C: 12 AGV	76
7.2.4	Cenário D: 14 AGV	78
7.2.5	Cenário E: 16 AGV	80
7.2.6	Cenário Extra: Considerando a Extensão da Simulação	83
7.3	Número Ótimo de AGV	86
7.4	Conclusão do Capítulo 7	88
8	Conclusões	89
8.1	Conclusão do Projeto	89
8.2	Ideias para Desenvolvimentos Futuros	90
8.3	Reflexão Pessoal	90

Referências Bibliográficas	93
A <i>Process Flow</i> da Simulação	97
B FlexSim: <i>Schedule Source</i>	99
C Planeamento do Cenário Extra	101

Índice de Figuras

1.1	Plano de trabalho do projeto desenvolvido.	3
2.1	AGV empilhador [1].	7
2.2	AGV de carga unitária [1].	8
2.3	AGV de reboque/tração [1].	8
2.4	AGV de carga [1].	9
2.5	AGV personalizado [1].	9
2.6	AMR em aplicação industrial [2].	10
2.7	Configuração diferencial [3].	11
2.8	Configuração de rodas em triciclo [3].	11
2.9	Configuração quádrupla [3].	12
2.10	Roda <i>mecanum</i> [4].	12
2.11	Opções de movimento omnidirecional [5].	13
2.12	Elementos de controlo principais de um sistema AGV [6].	14
2.13	Robô empilhador LGV da Wellwit Robotics [7].	16
2.14	Instalação de navegação do AGV por linha magnética [8].	17
2.15	Percurso de AGV com instalação de pontos magnéticos [8].	17
2.16	AGV usando navegação por características naturais baseadas em SLAM, com o mapa do local previamente criado [9].	18
2.17	AGV que deteta um operador no campo de alerta, representado na zona a amarelo [10].	20
2.18	Pára-choques de AGV em contacto com uma peça de ensaio vertical [11].	21
2.19	Botão de pressão para paragem de emergência [12].	22
2.20	GRIBOT LIFTER com luz de advertência a indicar o seu estado de operação [13].	22
3.1	MAX, AGV de transporte em fundições de alumínio [14].	26
3.2	AGV num terminal portuário [15].	27
3.3	Robô autónomo em transporte de contentor de bagagens [16].	28
3.4	Robô Vanderlande FLEET para logística de bagagens [17].	29

3.5	Robôs para reforçar o regime de limpeza do aeroporto de Luton em Londres [18].	29
3.6	<i>Ottonomy</i> , robô de entregas totalmente autônomo [19].	30
3.7	AGV a estacionar carros em aeroportos muito movimentados [20]. . .	31
4.1	Simulação de célula fabril pelo <i>software</i> Flexsim [21].	34
4.2	Ambiente do simulador Anylogic, a) grafo (em cima), b) programação (em baixo) [22].	36
4.3	Estrutura de um modelo para simulação utilizado no Arena [23]. . . .	36
4.4	Visualização 3D de uma fábrica no <i>software</i> de simulação TX Plant Simulation [24].	37
4.5	Projeto em simulação de um aeroporto no Simio [25].	38
5.1	Diagrama de blocos geral da arquitetura de alto nível, a) chegadas, b) partidas.	46
5.2	Fluxograma das bagagens, a) chegadas, b) partidas.	47
5.3	Fluxograma especificado para o fluxo de aviões.	49
5.4	Fluxograma especificado para o fluxo de AGV.	51
6.1	<i>Layout</i> 3D desenhado no FlexSim.	54
6.2	<i>Layout</i> preparado para o percurso dos AGV.	54
6.3	Estações de carga.	55
6.4	Aspeto representativo de uma bagagem.	56
6.5	Representação do transporte de bagagens prioritárias e não prioritárias.	56
6.6	Configuração da operação de bagagens para os AGV.	57
6.7	Propriedades da rede de Aviões.	58
6.8	Propriedades da <i>Source</i> que gera os aviões e atribuição da respetiva <i>Label</i>	58
6.9	Rotina para os aviões de chegada.	59
6.10	Área remota designada para aviões com falha ou avaria.	60
6.11	Atribuição de situação de falha.	61
6.12	Rotina para os aviões de partida.	61
6.13	Propriedades da rede AGV.	63
6.14	Ciclo de decisão na rotina dos AGV.	64
6.15	Função <i>Run Sub Flow</i> , implementada com as propriedades de carga. .	65
6.16	Função <i>Run Sub Flow</i> , implementada com as propriedades de descarga.	65
6.17	Exemplo de ponto de bloqueio para os AGV.	67
7.1	Planeamento do Movimento Diário de Aviões (MDA).	70
7.2	Valor combinado de utilização ativa com 8 AGV.	72
7.3	Utilização individual dos 8 AGV presentes no sistema.	72
7.4	Gráfico de Gantt para 8 AGV em funcionamento ao longo do dia. . .	73
7.5	Número de AGV ativos em função do tempo.	73

7.6	Valor combinado de utilização ativa de 10 AGV.	74
7.7	Utilização individual dos 10 AGV presentes no sistema.	74
7.8	Gráfico de Gantt para 10 AGV em funcionamento ao longo do dia. . .	75
7.9	Número de AGV ativos em função do tempo.	75
7.10	Valor combinado de utilização ativa de 12 AGV.	76
7.11	Utilização individual dos 12 AGV presentes no sistema.	77
7.12	Gráfico de Gantt para 12 AGV em funcionamento ao longo do dia. . .	77
7.13	Número de AGV ativos em função do tempo.	78
7.14	Valor combinado de utilização ativa de 14 AGV.	78
7.15	Utilização individual dos 14 AGV presentes no sistema.	79
7.16	Gráfico de Gantt para 14 AGV em funcionamento ao longo do dia. . .	79
7.17	Número de AGV ativos em função do tempo.	80
7.18	Valor combinado de utilização ativa com 16 AGV.	81
7.19	Utilização individual dos 16 AGV presentes no sistema.	81
7.20	Gráfico de Gantt para 16 AGV em funcionamento ao longo do dia. . .	82
7.21	Número de AGV ativos em função do tempo.	82
7.22	Valor combinado de utilização ativa para três dias com 16 AGV. . . .	84
7.23	Utilização individual para três dias dos 16 AGV presentes no sistema.	84
7.24	Gráfico de Gantt para 16 AGV em funcionamento ao longo dos três dias.	85
7.25	Número de AGV ativos em função do tempo durante três dias.	85
7.26	Dados de utilização dos AGV consoante o cenário.	87
A.1	Aspeto final do <i>Process Flow</i> no FlexSim.	97
B.1	<i>Schedule Source</i> , a) chegadas, b) partidas.	99
C.1	<i>Schedule Source</i> cenário extra, a) chegadas, b) partidas.	101
C.2	<i>Schedule Source</i> cenário extra, a) chegadas, b) partidas.	102

Índice de Tabelas

4.1	Comparação do <i>software</i> de simulação.	39
5.1	Pressupostos para o desenvolvimento do modelo.	42
6.1	Listagem dos grupos utilizados no FlexSim.	57
7.1	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 8 AGV.	73
7.2	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 10 AGV.	75
7.3	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 12 AGV.	78
7.4	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 14 AGV.	80
7.5	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 16 AGV.	83
7.6	Resultados em minutos dos tempos obtidos com 16 AGV para três dias.	86

Acrónimos

Acrónimo	Descrição	Página
AGC	<i>Automated Guided Cart</i>	8
AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i>	1
AMR	<i>Autonomous Mobile Robot</i>	9
ASRS	<i>Automated Storage and Retrieval Systems</i>	8
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	17
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>	13
FMS	<i>Fleet Management System</i>	26
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>	13
GPS	<i>Global Positioning System</i>	27
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto	39
LGV	<i>Laser Guided Vehicle</i>	15
LiDAR	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>	15
MDA	Movimento Diário de Aviação	70
NAV	Navegação Aérea de Portugal	53
OPC	<i>Open Platform Communications</i>	14
QR	<i>Quick Response</i>	30
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>	16
SGV	<i>Self Guided Vehicle</i>	15
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i>	15
SQL	<i>Structured Query Language</i>	13
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i>	13
WIP	<i>Work in Progress</i>	37
WMS	<i>Warehouse Management System</i>	13
PC	<i>Personal Computer</i>	13
PLC	<i>Programmable Logic Controller</i>	13

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo fornece uma visão geral do projeto. Em primeiro lugar, o leitor encontrará uma breve contextualização do tema, em seguida, são especificadas as metas e objetivos, a calendarização e para concluir este capítulo é feita uma apresentação à organização deste relatório.

1.1 Contextualização

Os sistemas de robôs móveis automatizados transformaram-se numa componente chave das atuais tarefas logísticas. O padrão tecnológico e o atual nível de experiência com esta tecnologia de automação levaram à introdução de *Automated Guided Vehicle* (AGV) em quase todos os ramos da indústria e áreas operacionais.

A tecnologia provocou uma enorme mudança na forma como os aeroportos funcionam atualmente. A utilização de sistemas automatizados, *software* de navegação avançado, robôs autónomos ou operados à distância devem ser vistos como soluções inteligentes para o controlo eficiente do tráfego e dos fluxos operacionais, contribuindo para o aumento da capacidade e a eficiência aeroportuária.

Para esta dissertação, será utilizado um projeto num cenário real de um aeroporto em Portugal. É pretendido a introdução AGV para o transporte de bagagens entre diferentes pontos e transporte em redor dos terminais. Os dados necessários a este caso real de estudo foram fornecidos pelo Professor André Siqueira, tendo como fonte primária os serviços do aeroporto, esta informação está disponível para todos os operadores e serviços aeroportuários. Através da simulação, é pretendido prever o número ótimo de AGV antes da construção do sistema real.

1.2 Objetivos

O objetivo do projeto é estudar a introdução de um sistema AGV na frota de equipamento de apoio ao transporte autónomo de bagagens no Aeroporto Francisco Sá Carneiro. Este estudo é uma conceção preliminar do sistema que incluirá os tipos de veículos e os seus componentes, bem como o sistema de navegação e os melhores percursos.

É necessário realizar um estudo de mercado para identificar um *software* de simulação adequado para sistemas AGV a fim de construir um modelo de simulação baseado num estudo de caso no mundo real. O modelo de simulação criado deve, por sua vez, ser utilizado para prever o número ótimo de AGV para o sistema e para comparar o resultado com um cálculo de previsão manual.

Por conseguinte, os objetivos deste projeto são:

- investigação de trabalhos anteriores relacionados com o cálculo do número ótimo de AGV num sistema AGV;
- realização de um estudo de mercado para encontrar a melhor ferramenta de acordo com várias especificações para simular um sistema AGV;
- compreender o verdadeiro caso de estudo e todas as suas especificações para simular corretamente o sistema;
- desenvolver o sistema na ferramenta de simulação escolhida e obter dados;
- compreender os dados obtidos e fazer conclusões sobre os resultados em comparação com os diversos cenários.

1.3 Calendarização

Dado que o projeto a desenvolver sobre o Transporte Robotizado de Bagagens em Aeroportos requer bastantes pacotes de trabalho, incluindo estudos e análises, a sua prossecução conduziu à criação de várias tarefas agrupadas e listadas no planeamento apresentado na Figura 1.1, indicando o tempo despendido para a realização de cada uma. As tarefas para a definição da arquitetura do sistema e a aprendizagem do *software* foram as que ocuparam mais tempo.

1.4 Organização da Dissertação

A presente dissertação está dividida em oito capítulos que, embora interligados de uma forma lógica, tratam de assuntos distintos.

O primeiro capítulo é dedicado à realização do enquadramento da dissertação, apresentação dos objetivos e do tema deste projeto e a uma breve explicação do planeamento adotado para levar a cabo o seu desenvolvimento. Adicionalmente, na presente secção, é apresentada a estrutura da dissertação e as diferentes temáticas que, em cada capítulo, serão tratadas.

No capítulo seguinte, Capítulo 2, é realizada uma revisão da literatura acerca dos diferentes AGV de forma a providenciar ao projeto os alicerces teóricos necessários para garantir a sua relevância. Neste capítulo é também levada a cabo uma revisão literária acerca dos conceitos de controlo, segurança e navegação, descrevendo a forma como os AGV se orientam no espaço.

Seguidamente, no Capítulo 3, em primeiro lugar é feita uma descrição da definição de robôs móveis acompanhada da sua funcionalidade. Em segundo lugar, são apresentadas aplicações existentes, relevantes ao segmento do mercado em estudo, onde o uso de AGV já se encontra implementado.

O Capítulo 4 é relativo a uma pesquisa realizada com vista a selecionar o melhor *software* que seja capaz de simular robôs móveis. Com vista a identificar as principais diferenças entre eles, é efetuada uma comparação para concluir qual o mais direcionado ao projeto a desenvolver nesta dissertação.

No Capítulo 5 são apresentados os pressupostos ao desenvolvimento com vista a criar um cenário em ambiente de simulação o mais próximo do real. Ainda neste capítulo, são definidas as abordagens consideradas para o modelo com a descrição do fluxo através de fluxogramas, em termos de funcionalidade e arquitetura.

Efetuada a descrição da situação a simular, o Capítulo 6 expõe a implementação da lógica do modelo de simulação no *software* FlexSim, mostra como foi desenvolvida a programação, que blocos foram usados e como foram parametrizados. É exibido o *layout* do sistema concebido em 3D, assim como os trajetos e fluxo de instruções para os AGV, aviões e operação de bagagens.

De seguida, no sétimo capítulo, faz-se uma análise aos testes e resultados obtidos com a realização de uma comparação, entre as situações identificadas, nos diversos cenários para chegar ao número ideal de AGV presentes no modelo proposto.

No último capítulo, Capítulo 8, são reunidas as principais conclusões do projeto, perspetivados futuros desenvolvimentos e tecidas considerações finais. Por fim, é apresentada uma reflexão pessoal acerca deste percurso.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Este capítulo tem como principal objetivo fazer uma abordagem acerca das diversas temáticas que servirão de base a esta dissertação. Deste modo, será descrita a evolução histórica, introduzidos os diferentes tipos de Automated Guided Vehicle (AGV) que existem no mercado e os seus sistemas de controlo, navegação, direção e segurança.

2.1 Evolução Histórica dos Veículos Autónomos

Durante a retoma da indústria nos anos 50 as atividades manuais, empilhadores tripulados e tecnologia de transporte a nível do chão de fábrica dominaram o cenário nas instalações de produção. Muitos empresários tiveram, portanto, a ideia de substituir completamente o trabalho humano por máquinas. Isto acendeu o espírito inventivo de Arthur Barrett, proprietário da Barrett Electronics, em 1953, lançou o *Guide-O-Matic* [26], um trator de reboque modificado e reconfigurado para seguir um fio suspenso num armazém de mercearia. Pouco tempo depois, foram instalados fios no chão para que este “veículo sem condutor” se movimentasse. Foi só por volta de 1980 que o termo *Automated Guided Vehicle* (AGV) foi estabelecido, mas continua a ser creditado o mérito a Arthur Barrett de ter inventado o primeiro veículo guiado autonomamente. E embora tenham sido feitos avanços radicais desde então, os AGV modernos ainda seguem este mesmo princípio que tem por base ajudar os trabalhadores na movimentação de objetos em torno de um espaço de trabalho.

As notícias espalharam-se rapidamente sobre este “veículo sem condutor”, esta tecnologia apelava aos proprietários das fábricas que procuravam racionalizar os seus processos de fabrico. O próximo grande desenvolvimento ocorreu em 1973, quando engenheiros da fábrica de montagem automóvel Volvo em Kalmar, na

Suécia, desenvolveram um equipamento de montagem não-síncrona como alternativa à tradicional linha de montagem centrada no tapete rolante. Esta foi a primeira empresa internacionalmente conhecida a adotar AGV, instalando 280 robôs controlados por computador na sua fábrica automóvel. Isto revolucionou a tradicional linha de montagem do setor, e a marca acabou por comercializar os seus AGV de carga unitária a outras empresas automóveis.

Os AGV continuaram a evoluir ao longo da década de 1970. Em 1975 foi implementado o primeiro *Unit Load* [27], para transportar mercadorias pesadas através do chão de fábrica, e foi capaz de completar mais tarefas do que qualquer AGV no passado, porque veio com uma plataforma de trabalho, um dispositivo de transporte e estava ligado a um computador. Em 1979 foi construído o primeiro “piso inteligente” num espaço de trabalho, que utilizava uma corrente com fios elétricos no solo para guiar o veículo conhecido por filoguiado. Mais tarde, isto levou a que os fios fossem completamente eliminados em meados da década de 1980.

O termo “veículo guiado autonomamente” (AGV) é um termo geral que engloba todos os sistemas de transporte capazes de funcionar sem operação do condutor. O termo “autónomo” é frequentemente utilizado no contexto de veículos guiados automatizados para descrever aplicações industriais, utilizadas principalmente no fabrico e distribuição, que convencionalmente teriam sido operados por condutor.

Tal como os computadores são agora mais pequenos e mais potentes, os AGV também o são. Desde a sua introdução em 1953, os veículos guiados autónomos têm encontrado aplicações industriais generalizadas [26]. Os AGV são agora uma parte indispensável em determinados processos de fabrico, e podem ser encontrados em quase todos os tipos de indústrias, sendo as únicas restrições à sua utilização principalmente resultantes das dimensões das mercadorias a transportar ou de considerações a nível de espaço. Muitas aplicações dos AGV são tecnicamente viáveis, mas a aquisição e implementação de tais sistemas é geralmente baseada em considerações económicas.

2.2 Tipos de AGV

A escolha de um AGV mais adequado para determinada aplicação depende das suas necessidades de manuseamento. Os sistemas AGV são transportadores de carga controlados por computador, baseados em sistemas de mobilidade em rodas, que percorrem o espaço envolvente para recolher, transportar ou entregar cargas de um ponto para outro.

No entanto, tal como não há duas aplicações iguais, também os AGV diferem entre eles. Para satisfazer necessidades únicas, existe uma variedade de configura-

rações de transporte, o que significa que a escolha correta para cada operação depende tanto da própria carga como do tipo de movimento necessário.

Para ajudar a ter uma ideia do tipo de AGV ideal para cada aplicação, será descrita uma visão geral de cada tipo.

2.2.1 AGV Empilhador

Estes AGV são equipados com uma estrutura semelhante a um garfo e são indicados para manusear cargas em paletes, como se pode ver na Figura 2.1. Embora possam ser baseados nos empilhadores manuais, estes tipos de AGV navegam autonomamente e são concebidos para interagir com cargas empilhadas no chão, em bloco, estantes ou *conveyors*. O formato em forquilha é ideal para manusear paletes ou contentores de fundo aberto, tais como cestos de arame por exemplo, apresentando assim duas pernas horizontais estabilizadoras alinhadas diretamente sob as forquilhas. Com a sua forma compacta, estes robôs são altamente manobráveis em áreas com restrições de espaço.



Figura 2.1: AGV empilhador [1].

Dependendo da aplicação, são possíveis diversos tipos de arquiteturas que incluem, por exemplo, melhorias na movimentação de paletes, estantes ou rolos, equipados com um contrapeso para estabilizar a carga à medida que é transportada. Por norma, tendem a ser ligeiramente maiores face a outros AGV também baseados em garfos, com uma configuração mais estreita que se pode estender para além da largura do robô e da sua carga de modo a melhorar a estabilidade. Existe uma outra variante com garfos mais curtos e mais largos do que os modelos contrabalançados, e são frequentemente utilizados para manusear em áreas que requerem maior capacidade de manobra [1].

Para melhorar o alcance, os garfos montados nestes robôs estendem-se para levantar, colocar ou extrair a carga do local onde se encontra armazenada.

2.2.2 AGV de Carga Unitária

Este robô, ilustrado na Figura 2.2, é tipicamente compacto e rebaixado até ao solo e, uma vez que estes não podem captar cargas diretamente do chão, são normalmente carregados e descarregados por meios externos. Por vezes são chamados “transportadores superiores”, e transportam a carga diretamente sobre o convés de um elevador ou de um transportador. Em alguns casos podem interagir com outros transportadores ou sistemas automáticos de armazenamento e recuperação de dados (ASRS) para receber ou entregar a sua carga.

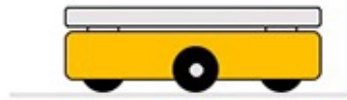


Figura 2.2: AGV de carga unitária [1].

2.2.3 AGV de Reboque/Tração

O tipo de AGV rebocador ou de tração, Figura 2.3, foi concebido para puxar uma ou mais cargas sobre rodas atrás dele, apresentando uma ligação manual ou automática a carrinhos carregados. Com uma boa relação custo-eficácia, estes AGV transportam múltiplas cargas em reboque numa única viagem. São frequentemente utilizados em operações de fabrico, e como movimentam as suas cargas numa configuração de “comboio”, os seus caminhos-guia são frequentemente menos complexos para acomodar o seu maior raio de viragem.



Figura 2.3: AGV de reboque/tração [1].

2.2.4 Automated Guided Cart

Geralmente concebidos para serem mais simples e mais pequenos, estas unidades representadas pela Figura 2.4, muitas vezes referidas como *Automatic Guided Cart* (AGC), manipulam normalmente cargas com peso inferior a uma tonelada. São mais frequentemente encontrados em automação de processos fabris, muitos destes sistemas funcionam em conjunto com sistemas de navegação simplificados

em vez de serem controlados por um computador e podem ser rebocados ou conduzidos sob uma carga.



Figura 2.4: AGV de carga [1].

2.2.5 AGV Personalizado à Medida

Como a área de automação está em crescimento, pode haver a necessidade de aplicações que recorram a novos projetos de engenharia completamente variáveis na sua forma, tamanho e capacidade de carga [1]. Os AGV personalizados, exemplificados pela Figura 2.5, são especificamente concebidos para lidar com cargas de formas únicas numa aplicação ou processo altamente definido e repetido de forma consistente. São frequentemente encontrados no fabrico para movimentar trabalhos em processos com grampos, tapetes transportadores, em docas de expedição ou receção para carga e descarga automática de reboques.



Figura 2.5: AGV personalizado [1].

2.3 Autonomous Mobile Robots

Os robôs móveis autónomos são mais flexíveis do que os AGV [2]. Os *Autonomous Mobile Robot* (AMR), ilustrados na Figura 2.6, fazem um mapa das instalações e armazenam-no na sua memória programável. Desta forma, não precisam de guias no chão para que consigam saber a trajetória a percorrer. Assim que um AMR recebe um destino, pode decidir sobre o melhor caminho para lá chegar. Os AMR têm uma série de sensores sofisticados que lhes permitem compreender e interpretar o seu ambiente: se houver um obstáculo no seu caminho, quer seja fixo ou variável, conseguem desviar-se à sua volta e podem ainda encontrar uma rota alternativa.



Figura 2.6: AMR em aplicação industrial [2].

2.4 Sistemas de Direção e Tração

Os sistemas AGV têm vários motores de acionamento para permitir a direção, tais como o movimento de raio zero, diagonal, esquerdo, direito, para trás e para a frente que oferecem uma manobrabilidade dentro de qualquer espaço de fábrica. Os AGV são habitualmente operados a bateria, também incluem uma opção manual para tirar o veículo da linha de forma a realizar tarefas de carregamento ou manutenção. Estão normalmente equipados com sensores de paragem de movimento e de impulso para maior segurança [3]. Cada AGV é programado para obedecer a velocidades pré-programadas de modo a personalizar ainda mais as aplicações específicas do cliente e as necessidades de montagem.

A direção do veículo é tipicamente controlada através da rotação sincronizada ou independente das suas rodas, que são amplamente utilizadas como meio de locomoção devido à sua simplicidade e perda de atrito mínima.

No entanto, existem certas limitações para veículos guiados autonomamente com rodas em ambientes de superfícies irregulares e desnivelados.

Existem quatro principais configurações de direção e tração que determinam a manobrabilidade, complexidade e custo do robô, dependendo do número de rodas e do tipo de meio onde vão ser conduzidas.

2.4.1 Configuração Diferencial

Esta configuração diferencial de rodas conduz o veículo utilizando a velocidade diferencial entre elas e a direção com 2 rodas motrizes. Esta configuração inclui dois motores redutores para as rodas motrizes e é extremamente manobrável, uma vez que pode rodar em torno do seu centro (ver Figura 2.7), embora o posicionamento angular seja menos preciso.



Figura 2.7: Configuração diferencial [3].

2.4.2 Configuração Triciclo

Esta configuração proporciona um seguimento preciso e a manobrabilidade é aceitável para a maioria das aplicações (ver Figura 2.8). Sendo constituída por uma roda motriz e duas rodas livres (não motrizes), são utilizadas numa configuração em triângulo. A única roda motriz está posicionada na parte dianteira, é utilizada tanto para conduzir como para mover o robô. Um motor de engrenagem é necessário para rodar tracionar a roda motriz, e outro motor é necessário para mudar de direção. As três rodas desta configuração proporcionam manobrabilidade suficiente para a maioria das aplicações AGV.



Figura 2.8: Configuração de rodas em triciclo [3].

2.4.3 Configuração Quádrupla

Esta configuração tem duas rodas motrizes e outras duas não motrizes (ver Figura 2.9), por isso é extremamente manobrável, embora mais complexa do que outras configurações de direção, com a vantagem de rodar em torno do seu centro e mover-se lateralmente, tal como a configuração diferencial permite.



Figura 2.9: Configuração quádrupla [3].

2.4.4 Configuração Omnidirecional

O robô é constituído por quatro rodas motrizes, do tipo *mecanum*, que permitem o movimento em qualquer direção (ver Figura 2.10).

Uma roda *mecanum*, por vezes referida como roda sueca [4], tem três graus de liberdade, sendo que um é a rotação em torno do eixo da roda, outro é a rotação em torno dos rolos, e por último a rotação em torno do ponto de contacto. São rodas convencionais com um número de cilindros ligados à sua circunferência. Estes rolos cilíndricos têm o seu eixo de rotação inclinado, e são fixados ao centro com juntas rotativas, de modo a poderem rodar livremente em torno dos seus eixos.



Figura 2.10: Roda *mecanum* [4].

O movimento omnidirecional é conseguido através da montagem de quatro rodas *mecanum* numa base de quatro lados, controlando as velocidades angulares e a direção de rotação de cada roda sem alterar a direção das rodas. Devido a estas razões, cada roda tem de ser movida por um motor singular. As possibilidades do movimento omnidirecional podem ser vistas na Figura 2.11.

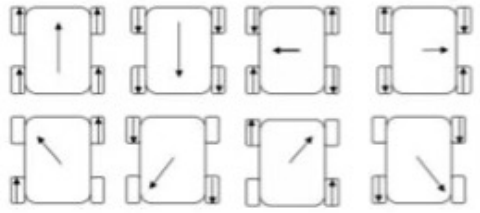


Figura 2.11: Opções de movimento omnidirecional [5].

2.5 Sistemas de Controlo

Os robôs móveis autónomos consistem em um ou mais transportadores de carga com rodas, controlados por *Programmable Logic Controller* (PLC) ou *Personal Computer* (PC), que navegam no chão da fábrica ou do armazém sem a necessidade de um condutor a bordo. Constituem um *software*, ou pacotes de diferentes *softwares* que permitem a navegação sem necessidade de um condutor a bordo. O sistema de controlo de um AGV pode ser instalado num servidor virtual do cliente final ou mesmo num servidor de nuvem externo [6].

O esquema da Figura 2.12 ajuda a entender como é que o controlo reúne todas as entradas do sistema, elabora-as, rastreia-as e classifica-as, de modo a fornecer a informação correta sobre as tarefas aos AGV.

As tarefas do *software* de controlo de um AGV incluem a gestão e otimização dos horários para as ordens de transporte, o controlo da frota de AGV e garante a comunicação com outros softwares de controlo que existam, tais como *Enterprise Resource Planning* (ERP) ou *Warehouse Management System* (WMS).

Este *software* é extremamente importante porque irá determinar o desempenho global e poderá levar a um nível de investimento mais baixo graças aos algoritmos elaborados para a otimização do tráfego e das encomendas.

O sistema de controlo assegura que as cargas são transportadas para o destino correto, no momento certo e da forma mais eficiente.

A integração do sistema de controlo da frota de AGV com sistemas de clientes pode ser feita utilizando diferentes padrões como *Structured Query Language* (SQL), base de dados, serviços *web*, *File Transfer Protocol* (FTP), filas de mensagens (MQ), protocolos *Transmission Control Protocol/Internet Protocol* (TCP/IP), entre outros [28].

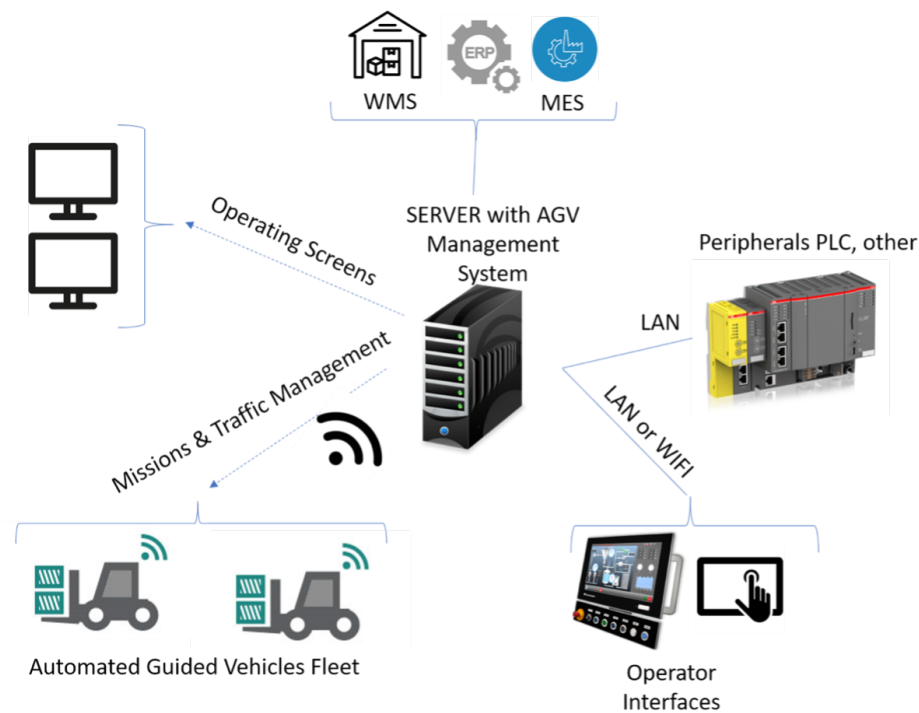


Figura 2.12: Elementos de controlo principais de um sistema AGV [6].

Alguns controlos avançados de gestão de frota de AGV podem escolher o melhor caminho para os AGV, reduzindo o tempo de espera e as viagens sem carga. Toda a frota de robôs pode ser encaminhada de forma dinâmica através do planeamento contínuo para uma utilização ótima do veículo de acordo com o estado da frota, espaço disponível no piso, *buffers* de armazenamento e fila de encomendas atuais.

O sistema de controlo da frota de AGV é também responsável pelo fornecimento de interface gráfica aos operadores e gera análises estatísticas, podendo desta forma interagir com o sistema AGV. Os periféricos para interface com os operadores podem ser ecrãs sensíveis ao toque, monitores, botões, entre outros [6].

Tanto o PLC ou outros dispositivos de automação necessários para comunicar com robôs são, normalmente, máquinas que comunicam através do protocolo *Open Platform Communications* () ou *Input/Output* (I/O) para trocar informações com estes elementos externos. O que é preciso saber é que, por exemplo, se o AGV tiver de abrir uma porta deslizante, será necessário instalar um dispositivo para comunicar com a porta.

A comunicação por *Wi-Fi* é a mais escolhida para o sistema de controlo comunicar com o AGV, uma vez que garante maior fiabilidade e boa qualidade,

permitindo uma troca de informação rápida e segura entre os diferentes elementos do sistema AGV.

2.6 Sistemas de Navegação

Independentemente do tipo de AGV, o robô requer um sistema de orientação automatizado que conduza o AGV e informe a parte do sistema de controlo sobre o seu posicionamento. Dependendo do tipo de navegação, podem também ser conhecidos por outros nomes, tais como *Laser Guided Vehicle* (LGV) ou *Self Guided Vehicle* (SGV). Os sistemas de navegação estão a melhorar dia após dia e os robôs móveis estão a atingir níveis de desempenho que estão a redefinir muitas indústrias e a trazer novos níveis de excelência.

Este desenvolvimento notável é também possível graças aos sensores de navegação precisos, fiáveis e rentáveis. Dependendo da aplicação, AGV e AMR navegam graças ao *Laser Imaging Detection and Ranging* (LiDAR) 2D ou 3D, sensores magnéticos, sensores ultrassónicos, câmaras, entre outros [29].

Os principais sistemas de navegação AGV são a navegação guiada por laser, a magnética, natural ou a navegação livre (incluindo a navegação *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) com sensores LiDAR), por pontos magnéticos, indutiva por fio, ótica ou por visão.

2.6.1 Navegação Guiada por Laser (LGV)

Um LGV ou *Laser Guided Vehicle* é um AGV que navega com um sistema de posicionamento a laser. Um dos sistemas de navegação mais populares é chamado Navegação a Laser, daí LGV para veículos guiados a laser [7].

A navegação a laser é amplamente utilizada em empilhadores automáticos, utilizados muitas vezes em aplicações de armazenamento. Cada veículo guiado a laser está equipado com um Laser de Navegação (simplesmente chamado Dispositivo de Navegação) posicionado no topo, tal como se representa na Figura 2.13, e que interage com alvos posicionados na área de trabalho do AGV.

O dispositivo de navegação envia a leitura através de matrizes laser rotativas com um padrão de 360 graus [7]. Estas matrizes atingem vários alvos refletores, podendo ser fitas refletoras apropriadas ou cilindros posicionados em estruturas de instalações, como colunas, paredes ou postes. O centro de reflexão deve ser posicionado à altura do dispositivo de navegação e a uma distância máxima de 30 metros de qualquer AGV. Os refletores enviam o sinal da matriz laser de volta para o dispositivo de navegação do AGV.

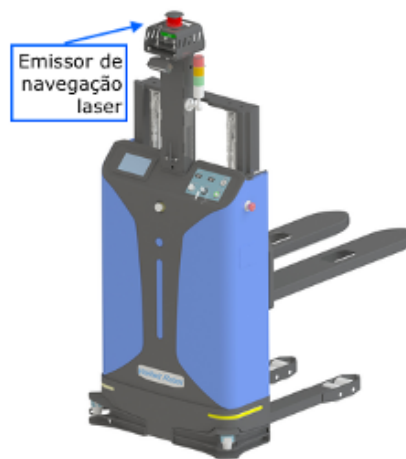


Figura 2.13: Robô empilhador LGV da Wellwit Robotics [7].

Os LGV devem adquirir pelo menos três destes *feedbacks* de matriz para permitir o cálculo do posicionamento graças a algoritmos eficientes que os tornam precisos que, dependendo do fabricante, conseguem calcular e corrigir o seu posicionamento entre 30 a 40 vezes por segundo.

2.6.2 Navegação por Fita Magnética

Neste caso, os robôs estão equipados com sensores magnéticos e seguem uma pista definida de fita magnética que é colocada no piso, ou também existe a opção de instalar ímanes permanentes enterrados no solo, espaçados entre si em intervalos iguais conhecidos e em forma de matriz. O sensor magnético do AGV deteta o campo magnético a partir dessa fita e segue o seu caminho. Este sistema de navegação indica ao AGV como e onde conduzir utilizando indicadores magnéticos colocados no piso ou etiquetas com tecnologia *Radio Frequency Identification* (RFID). Nestas posições pré-determinadas, o AGV pode decidir o que fazer: virar à esquerda, parar ou até engatar um carrinho [8].

A Figura 2.14 representa uma infraestrutura preparada para o estilo de navegação magnética, principalmente adequada para rotas bem definidas sem muitas opções de roteamento, são de fácil instalação e o utilizador final pode modificar as rotas de maneira simples colocando ou retirando a fita magnética adesiva do chão sem recorrer a qualquer alteração ou modificação da infraestrutura. No entanto, têm um grande problema e, por essa razão são muito pouco usadas uma vez que se estragam facilmente com o uso.



Figura 2.14: Instalação de navegação do AGV por linha magnética [8].

2.6.3 Navegação por Pontos Magnéticos

Os AGV podem navegar seguindo pequenos pontos magnéticos cilíndricos embutidos no chão, Figura 2.15. Os dispositivos magnéticos são geralmente ímãs cilíndricos com dimensões próximas de 20 x 10 mm. Este sistema resolve os problemas da fita magnética se deteriorar com o uso.



Figura 2.15: Percurso de AGV com instalação de pontos magnéticos [8].

Isto permite que os robôs viajem de um ponto para o outro utilizando sensores giroscópios e outros tipos de codificadores para calibrar contra erros de ângulo de direção.

Os AGV seguem um desenho CAD previamente carregado em memória enquanto que os pontos magnéticos fornecem uma referência de acordo com o mapa.

As tolerâncias de posicionamento são relativamente boas, alcançando uma margem de erro próxima dos 2,5 mm [8]. Esta tolerância é melhor que as obtidas por outros sistemas de navegação “livres”, tais como as que recorrem ao SLAM ou LiDAR. Para a instalação é necessário um pequeno orifício no chão onde o ímã é posicionado, após isso, o furo poderá ser coberto pelo material do piso protegendo

e prevenindo os custos de manutenção derivados do desgaste e também de modo a melhorar o aspeto da área envolvente.

2.6.4 Navegação Natural ou Livre

A tecnologia mais importante é a navegação SLAM. A Figura 2.16 mostra um AGV capaz de mapear o seu ambiente e localizar onde se encontra, graças à informação recebida do ambiente circundante.

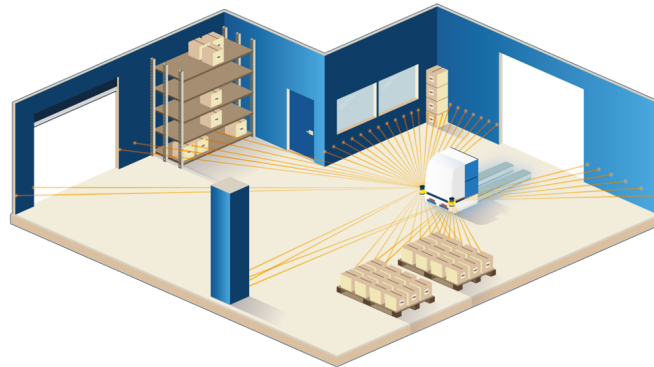


Figura 2.16: AGV usando navegação por características naturais baseadas em SLAM, com o mapa do local previamente criado [9].

Estes AGV são capazes de mapear o ambiente com diferentes sensores, tais como câmaras de visão, sensores de LiDAR ou até com os mesmos lasers utilizados para fins de segurança. Toda esta informação é combinada com a unidade interna de medição inercial para definir e recalcular o posicionamento real dos AGV. Todos estes cálculos são feitos por um algoritmo chamado SLAM.

Com este algoritmo o AGV irá mapear o ambiente circundante, criando um mapa de referência que é utilizado para navegar na próxima vez que passar no mesmo local; este mapeamento pode ser feito manualmente utilizando, por exemplo, um *joystick*. Para esta tecnologia, também é possível carregar um mapa AutoCAD (ou similar) das suas instalações para o sistema de controlo do AGV [9].

Com base em todos os conjuntos de dados combinados, o robô conduzirá automaticamente através da rota planeada, e verificará se o trajeto que está a percorrer é o mesmo que foi carregado na sua memória permitindo-lhe definir a sua posição. Todos os dados que o AGV adquire são combinados com outros dados provenientes da odometria e codificadores instalados a fim de melhorar a precisão.

A principal preocupação com a navegação natural é a sua fiabilidade em ambientes variáveis, tais como linhas de produção onde há um movimento contínuo de pessoas, artigos, caixas e paletes.

Nestas condições, o AGV poderá não conseguir saber onde se encontra e nestes casos, a aplicação do SLAM com LiDAR é uma grande solução para que se obtenham perfis e ambientes bem definidos com estruturas fixas tais como paredes e colunas. A navegação natural pode ser utilizada em armazéns de forma geral em qualquer ambiente com um baixo nível de entropia.

2.7 Sistemas de Segurança

Os AGV são uma solução de automatização considerada segura, estando equipados com sensores de segurança para evitar colisões. As normas de segurança AGV na Europa regem-se sob a EN ISO 3691-4:2020 “*Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 4: Driverless industrial trucks and their systems*” [30]. Este documento fornece as orientações e normas para, não só alcançar um risco residual aceitável num robô guiado automaticamente, mas também como implementar um sistema de segurança global incluindo elementos de conceção, operação e manutenção de plataformas móveis.

As medidas de redução de risco num veículo guiado automaticamente podem ser divididas em duas categorias principais, as medidas ativas ou passivas. As principais medidas ativas de redução de risco são representadas pelo sistema anti-colisão, pára-choques sensíveis à pressão e implementação de mecanismos de segurança no PLC. Enquanto que as medidas mais importantes de redução do risco passivo são os dispositivos de paragem de emergência, luzes de advertência no robô, avisos ou alarmes sonoros e a implementação de sinais de sensibilização na zona operacional.

A cibersegurança também pode ser considerada uma ameaça crescente para a automatização completa ou quase completa de um processo. Apesar de existirem métodos seguros de partilha de informação, os sistemas automatizados são suscetíveis a ataques de *malware* e perda de dados sensíveis. Uma quebra na segurança informática pode resultar em grandes perdas para as empresas e existe, portanto, um risco de segurança cibernética com a implementação da automatização.

2.7.1 Medidas de Segurança Ativa

Os *scanners* laser de segurança são um dos exemplos tipicamente utilizados na indústria dos AGV. Ao conseguir detetar pessoas ou objetos na sua trajetória a uma distância não inferior à borda dianteira do campo de deteção na direção principal da viagem, estes sistemas devem iniciar com segurança um comando de paragem do robô antes do contacto entre a sua estrutura e a pessoa ou objeto [10].

O primeiro é o “campo de aviso”: caso seja detetado um obstáculo pelo laser neste campo, o AGV desacelera (área amarela na Figura 2.17).



Figura 2.17: AGV que deteta um operador no campo de alerta, representado na zona a amarelo [10].

No caso de ser detetado um obstáculo pelo laser na área monitorizada, designada por “campo de segurança” ou “campo de proteção”, o AGV deve conseguir uma paragem completa (a área vermelha na Figura 2.17). Este é o único campo que contribui para a certificação de segurança dos AGV. Alguns robôs podem ser programados para ter mais campos (zona laranja) de maneira a serem utilizados como campo de aviso adicional, por exemplo, para ter uma redução de velocidade intermédia antes de parar o veículo.

A cada ponto do percurso, o AGV deve ter um campo de proteção específico para assegurar que o tempo e a distância até à paragem do veículo, evitará qualquer contacto com obstáculos. Há outros fatores a ter em consideração relativamente à distância de paragem, tais como o binário de travagem, material da roda, coeficiente de atrito com o chão, inclinação, entre outros. Um AGV deve mudar continuamente o seu campo de proteção enquanto viaja, dependendo destes fatores.

Os *scanners* laser de segurança monitorizam o campo de proteção associado, seguindo as instruções dadas pelo sistema de segurança que posteriormente deve cortar a energia às rodas do motor para fazer parar o robô sempre que necessário. Dependendo da arquitetura do AGV, todos os sistemas de segurança são ligados e monitorizados pelo PLC ou relés de segurança.

Não é obrigatório que os AGV obtenham uma cobertura de 360° por um *scanner* laser de segurança para evitar colisões. Em geral, os *scanners* laser de segurança cobrem a direção de movimento quando os AGV atingem uma velocidade relevante. Se o AGV estiver a funcionar rapidamente, deve parar

antes de colidir com qualquer coisa que possa resultar num perigo, prevenindo danos ao obstáculo ou a si próprio.

Muitos AGV incluem pára-choques de segurança nos lados ou arestas não monitorizados por *scanners* laser de segurança. As dimensões dos pára-choques de segurança AGV dependem da força aplicada pelo obstáculo e da distância de paragem do AGV [11].

Os pára-choques sensíveis à pressão, representados na Figura 2.18, são também conhecidos como extremidades de segurança, dispositivos sensores de contacto ou pára-choques sensores de segurança.



Figura 2.18: Pára-choques de AGV em contacto com uma peça de ensaio vertical [11].

O princípio desta medida ativa diz que a força exercida no embate não deve prejudicar o que se opuser à direção da marcha em relação ao pára-choques. A ativação do pára-choques deve parar o veículo em segurança dentro do seu intervalo dobrável. Isto é, antes do contacto com a estrutura do veículo representada por uma peça vertical na Figura 2.18.

O codificador de segurança monitoriza a velocidade de condução, bem como o ângulo de direção do robô. Esta informação é fornecida ao sistema de segurança, que recebe a informação do codificador e define o campo de segurança necessário para parar o AGV, caso seja detetado algum obstáculo no campo de proteção, ou para abrandar o AGV se algo entrar no campo de aviso.

2.7.2 Medidas de Segurança Passiva

Os sinais visuais e sonoros indicam a presença e o estado operacional do AGV. Estes sinais devem ser concebidos sem que sejam introduzidos novos perigos e tendo em consideração as condições ambientais do local de operação tais como, a iluminação ambiente, níveis de ruído e máxima visibilidade do robô.

De acordo com a norma EN ISO 3691-4:2020 [30], são necessários botões de paragem de emergência em cada AGV. O número e a posição dos dispositivos de paragem de emergência são definidos pela forma e dimensões de cada robô. Estes dispositivos devem ser claramente visíveis, distinguíveis e fáceis de alcançar de qualquer lado do AGV e em posições definidas do operador com comandos. Aconteça o que acontecer, um operador deve ser capaz de acionar um dos dispositivos de paragem de emergência localizado no AGV.

Quando um botão de paragem de emergência é ativado, Figura 2.19, o AGV entra numa condição de paragem de emergência e todo o movimento fica inativo até ser efetuado um reinício manual.



Figura 2.19: Botão de pressão para paragem de emergência [12].

Os tipos de avisos luminosos devem ser facilmente visíveis, tal como exemplificado na Figura 2.20. Estes podem indicar ser desenvolvidos para indicar estados diferentes de operação, com luzes de advertência a diferentes cores, ou ao aproximar-se de uma curva, indicar que vai virar numa determinada direção e alertar o pessoal da área qual é a sua intenção.



Figura 2.20: GRIBOT LIFTER com luz de advertência a indicar o seu estado de operação [13].

Antes da iniciação do movimento a partir de uma condição de repouso, o dispositivo de aviso, quer seja visual, audível, ou uma combinação, deve ser ativo indicando o movimento iminente sob controlo automático e deverá permanecer ativo durante todo o movimento. São utilizados diferentes tons ou melodias

distintas durante o funcionamento do robô, incluindo um tom de presença e um tom de alarme de forma a indicar vários estados do AGV.

A zona delineada para a deslocação do AGV na infraestrutura deve conter sinalética que indique, caso existam, as zonas de risco operacional. Todos os sinais instalados devem estar de acordo com a legislação local e devem ser altamente duráveis.

2.7.3 Medidas de Segurança Cibernética

Existem diversos desafios de segurança informática em torno dos AGV, seguindo uma série de diretrizes para a implementação segura contra atos ilícitos. Os cibercriminosos podem explorar vulnerabilidades e assumir o controlo de um dispositivo individual, de parte de um sistema, ou de todo o sistema, criando danos substanciais, incluindo interrupções de serviço, perda de dados, danos no equipamento, outras perdas de propriedade, ou ferimentos em pessoas. Ninguém deve correr o risco de cibersegurança em sistemas de manipulação de materiais de forma ligeira. Existe, por isso, a necessidade de criar um sistema resistente de manuseamento de materiais.

A criação de uma equipa especializada de resposta a incidentes, torna-se crucial para responder rapidamente a interrupções e saber como agir de acordo com o cenário. O registo dos ataques ocorridos e a sua partilha com os envolvidos aumenta o valor acrescentado das lições aprendidas [31].

Os aspetos de segurança devem ser abordados durante a conceção do sistema para que sejam determinadas potenciais ameaças, qual o seu impacto e elaborar um plano de contingências e atenuações. Caso este levantamento seja acrescentado na fase final do desenvolvimento, pode levar a controlos de segurança incorretos, incompletos, desnecessários ou à exposição de vulnerabilidades adicionais.

Deve ser garantida uma boa separação entre tecnologia informática e operacional, assegurando uma coordenação adequada entre as duas testando regularmente a segurança do próprio sistema para detetar vulnerabilidades que surjam atempadamente.

De maneira a proteger os AGV devem ser tidos em conta determinados fatores como autenticação e utilização de senhas fortes, configuração segura e fortalecida do sistema, registo e monitorização diária, sistemas de deteção de intrusão, segurança contra ataques que utilizam métodos de tentativa e erro para decifrar palavras-passe, credenciais de login ou chaves de encriptação, conhecidos como *Brute Force*, implementação de segurança para serviços de gestão remota e deve ser assegurada uma conectividade e comunicação de rede segura para o efeito [32].

2.8 Conclusão do Capítulo 2

Alguns fabricantes de AMR adotaram o termo AGV para descrever as suas máquinas autônomas, o que pode causar alguma confusão no mercado. Como se aprendeu acima, o requisito principal de um AGV é que este necessita de alguma infraestrutura para ser colocada dentro do espaço de trabalho dos veículos para permitir a navegação. Os AGV também não podem navegar em torno de um obstáculo. Ao longo deste documento irá ser usada, de forma indistinta, o termo AGV para a representação de robôs móveis.

Ao contrário da maioria dos equipamentos e sistemas convencionais de manuseamento de materiais, a implementação dos robôs móveis ou outro tipo de automatização fazem ou não sentido dependendo em grande parte das especificidades de cada aplicação.

Os robôs móveis devem ser alvo de uma prova de conceito de forma a modular e escalar a flexibilidade para que sejam concebidos e implementados de forma rentável. A avaliação dos riscos de segurança deve ser efetuada para cada aplicação e em colaboração com as medidas de saúde e segurança. Após este estudo inicial ficar completo, praticamente todo o sistema deve ser capaz de ser movido e integrado no sistema completo.

Capítulo 3

Robótica Móvel para Tarefas de Logística

Neste capítulo é revista a definição de AGV e a sua funcionalidade. Seguidamente, são apresentadas aplicações práticas e uma breve descrição sobre cada uma.

3.1 Automated Guided Vehicles

Devido aos rápidos desenvolvimentos, a automatização e a organização inteligente da indústria atual estão a alterar fundamentalmente a forma de trabalho [33]. Várias empresas estão a contribuir para o rápido progresso da indústria robótica através das suas soluções autónomas para operar em ambientes interiores, exteriores e multiconstrução.

Os veículos guiados de forma autónoma respondem a necessidades do mercado, tais como a procura de soluções chave na mão para diferentes setores e a procura de AGV personalizados, adaptados para operar em ambientes extremamente exigentes.

As soluções mais inovadoras podem ser qualificadas e implementadas sem interrupção ou modificação dos fluxos e infraestruturas existentes. Os robôs móveis conseguem trabalhar durante dia e noite, adaptam-se a diferentes cargas e ambientes, assumem tarefas pesadas, perigosas e repetitivas. Isto ajuda a otimizar a produção, reduzir custos e cumprir com as normas ambientais e de segurança.

Os robôs móveis autónomos desenvolvidos para utilização em espaços interiores e exteriores baseiam-se maioritariamente na tecnologia SLAM, mencionada no Capítulo 2, que permite ao robô reconhecer o seu ambiente, adaptando a sua

navegação e comportamento a uma dada situação. Isto permite uma interação dinâmica entre pessoas e outros veículos.

Existem grupos de empresas que são especializados em fornecer soluções específicas e de alta tecnologia para parceiros industriais mundialmente reconhecidos. Estas soluções são capazes de operar nos ambientes mais exigentes, tais como fundições de alumínio, centrais nucleares, fábricas aeroespaciais, aeroportos ou terminais portuários.

3.2 Aplicações de AGV

O estudo da pesquisa de mercado seguinte fornece uma perspectiva abrangente dos diferentes tipos de robôs do mercado AGV em aplicações exteriores e interiores já colocadas em prática nos aeroportos ou em ambientes semelhantes.

3.2.1 AGV de Transporte em Fundições de Alumínio

O grupo francês ECA, em parceria com a Rio Tinto Aluminum Pechiney, desenvolveu um veículo industrial autónomo, especialmente concebido para trabalhar nas fundições de alumínio, onde o tipo de logística pesada é complexa e dispendiosa. MAX é um dos primeiros veículos de autocondução a ser introduzido na indústria metalúrgica (Figura 3.1), e pode carregar cargas até 12 toneladas.



Figura 3.1: MAX, AGV de transporte em fundições de alumínio [14].

Esta solução dedicada à gestão autónoma de cargas pesadas em ambiente industrial, consiste num Sistema de Gestão de Frotas (FMS) e num ou mais veículos de autocondução de diferentes tipos, especificamente adaptados para o transporte de postes ou barrotes metálicos.

Este sistema de robôs opera tanto em ambientes interiores como exteriores com localização de alta precisão, trabalhando independentemente de qualquer

dispositivo externo, como satélites para o *Global Positioning System* (GPS) ou refletores para sistemas de posicionamento a laser.

3.2.2 AGV em Terminais Portuários – Roterdão

O terminal portuário APM Maasvlakte II, localizado em Roterdão, abriu em 2015 e continua a ser o terminal mais avançado do mundo totalmente automatizado, equipado para lidar com os maiores navios porta-contentores no futuro. Com áreas totalmente automatizadas, separando homens e máquinas, é também um dos mais seguros.

Cerca de 80 por cento dos movimentos das gruas são automatizados, sendo as restantes operações manuais executadas remotamente. A tecnologia de elevação dupla proporciona maior estabilidade, para que o trabalho possa continuar mesmo em condições climáticas severas. Cada grua está equipada com espalhadores duplos, permitindo a descarga e o carregamento de contentores.

Os AGV movidos a bateria, semelhantes ao da Figura 3.2, transportam contentores em redor do terminal com autonomia até oito horas com uma única carga, antes de regressarem a uma estação de recarga onde a bateria é substituída com a ajuda de um robô autónomo. Para além de zero emissões, a tração elétrica também produz uma poluição sonora mínima.



Figura 3.2: AGV num terminal portuário [15].

3.2.3 Transporte Autónomo de Bagagem para Aviões no Aeroporto Internacional de Changi em Singapura

Para melhorar a produtividade da mão-de-obra, tem-se vindo a explorar a tecnologia para melhorar o desempenho do fluxo de bagagem nos aeroportos. Além disso, ao automatizar os fluxos de tráfego aeroportuário, os operadores podem concentrar-se nas ações de gestão e tomada de decisão que são mais complexas e difíceis de automatizar, o que poupa tempo e eficiência no manuseamento de equipamentos logísticos.

Assim que as bagagens dos passageiros chegam à área de triagem, o operador coloca-a em contentores que se encontram anexados a este robô de bagagem. A Figura 3.3 ilustra este transporte.



Figura 3.3: Robô autónomo em transporte de contentor de bagagens [16].

Após isso, este robô de bagagem é um veículo inteligente que se desloca autonomamente pelo aeroporto para chegar até à aeronave, sendo o seu destino pré-programado através de um ecrã tátil. Ao aproximar-se da aeronave, o robô pára e o trabalhador assume o controlo do veículo para posteriormente carregar o contentor ou as bagagens no porão do avião. Posto isto, o veículo regressa à área de triagem de bagagem seguindo a mesma rota no sentido inverso, ou utiliza um percurso alternativo definido no sistema.

3.2.4 AGV Vanderlande FLEET para Ajudar os Passageiros no Check-in de Bagagens

O Aeroporto Internacional de Dallas Fort Worth é dos pioneiros a introduzir um sistema de robôs de manuseamento de bagagens, conhecido como FLEET. Quando os robôs de bagagem estão em ação, os passageiros levam a sua bagagem para as estações automáticas de *check-in*, depositam a sua bagagem num dos robôs, após efetuar todas as verificações do voo do passageiro entrega no tapete que as transporta até ao contentor correspondente ao voo.

Após o despacho da bagagem, por questões de segurança, o passageiro e pessoal não autorizado ou envolvido neste serviço já não tem acesso à mesma. O local ilustrado na Figura 3.4 já pertence à área técnica do aeroporto e não é acessível ao público.

Ao utilizar tecnologia autónoma inteligente, é possível substituir a necessidade de transportadores fixos e sistemas de triagem. Cada AGV da frota transporta uma única mala e determina o percurso mais otimizado através do aeroporto. Graças à sua conceção, o FLEET é tanto escalável como flexível, e as alterações são fáceis de fazer. É resistente a erros e caso uma unidade não funcione, apenas



Figura 3.4: Robô Vanderlande FLEET para logística de bagagens [17].

um AGV é afetado, dado que os outros veículos podem contorná-lo, garantindo assim um grau de certeza operacional.

O *software* deste robô contempla o comportamento coletivo dos veículos autônomos à medida que interagem localmente entre si e com o seu ambiente. Os sensores inteligentes a bordo indicam quando um veículo necessita de manutenção, e pode conduzir-se a si próprio para a área de manutenção ergonómica. Esta solução da empresa *Vanderlande* consome 50 por cento menos energia em comparação com os sistemas tradicionais de transporte de bagagens.

3.2.5 AGV em Operações de Limpeza e Higienização do Ar no Aeroporto de Luton

Equipados com câmaras e sensores, estes robôs automáticos da Ice Cobotics (Figura 3.5) são capazes de limpar vastas áreas do chão do aeroporto sem supervisão, libertando os operadores que anteriormente realizavam a mesma tarefa manualmente.



Figura 3.5: Robôs para reforçar o regime de limpeza do aeroporto de Luton em Londres [18].

Esta tecnologia inovadora está presente para ajudar os operadores de limpeza que continuam a recentrar a sua atenção em tarefas de alto valor, tais como a higiene das casas de banho e a limpeza de outros pontos de contacto.

Este tipo de robôs de limpeza autônomos, vão desde um pequeno aspirador a um grande varredor ou desinfetante de área, pode ser incorporado em operações de limpeza existentes e novas em ambientes comerciais, de transporte, armazéns de fabrico, distribuição, cuidados de saúde, retalho, hotéis ou hospitalidade.

3.2.6 Robôs de Entrega no Aeroporto de Cincinnati

O Ottonomy, mostrado na Figura 3.6, faz parte de uma frota de robôs de entrega totalmente autônoma para alimentos e retalho, lançada no Aeroporto Internacional de Cincinnati/Northern Kentucky (CVG). Os passageiros deste aeroporto podem recorrer ao *website* orderatcvg.com ou utilizar a aplicação móvel, para encomendar a entrega dos artigos vendidos nas lojas de retalho dentro do aeroporto.

Uma vez encomendado um artigo, o cliente receberá atualizações de estado no seu telefone e um código *Quick Response* (QR) único, que pode ser digitalizado pela câmara superior do robô para abrir o seu compartimento no ato da entrega e recuperar os seus artigos.

Este projeto faz parte da estratégia de redefinição da experiência de viagem, combinando talento e tecnologia para fornecer soluções inovadoras. Esta forma de inovação permite fazer avançar a tecnologia dos robôs em ambientes vivos e aeroportuários.



Figura 3.6: *Ottonomy*, robô de entregas totalmente autônomo [19].

3.2.7 AGV Arrumador de Carros

O robô Stan, exibido na Figura 3.7, utiliza a mesma tecnologia que o tipo de AGV empilhador, tendo a mesma capacidade de perceção do ambiente envolvente a qualquer momento e reagir a tudo o que possa estar no caminho.



Figura 3.7: AGV a estacionar carros em aeroportos muito movimentados [20].

A empresa Stanley Robotics diz que este sistema utiliza o espaço de forma muito mais eficiente do que os humanos, instalando 50 por cento mais carros na mesma área. Isto deve-se em parte à condução de precisão dos AGV, mas também porque o sistema mantém um registo de quando os clientes regressam. Isto significa que os robôs podem estacionar carros a três ou quatro profundidades, mas depois retirar o veículo certo pronto para o regresso do seu proprietário.

Para este sistema funcionar, os clientes estacionam os seus carros em hangares especiais onde os veículos são digitalizados para confirmar a sua marca e modelo. Depois, um dos AGV Stanley entra, desliza uma plataforma por baixo do veículo, levanta-o, transporta-o e estaciona-o.

A Stanley Robotics já realizou testes do seu sistema nos aeroportos de Dusseldorf, no aeroporto Charles De Gaulle de Paris e em Londres Gatwick. Este AGV pode também ser usado como uma solução de logística no transporte de veículos numa fase de montagem durante a produção [34].

3.3 Conclusão do Capítulo 3

Após ter analisado as principais áreas e algumas aplicações de tarefas automatizadas pelos robôs móveis, é evidente que uma mistura saudável de contribuição humana e tecnológica é uma obrigação em todos os processos. A força da tecnologia aumentada pela inteligência humana, pode ajudar a conceber soluções eficazes para uma melhor automatização de processos libertando assim o foco da intervenção humana para tarefas mais sensíveis ou difíceis de automatizar.

Os robôs guiados autonomamente não correm o risco de cansaço ou de cometerem erros por distração, o que leva a que proporcionem uma vasta gama de benefícios, tais como a melhoria da proteção da força de trabalho e uma diminuição do tempo de produção. A automatização de instalações recorrendo a AGV também ajuda a satisfazer requisitos relacionados com a capacidade de manipu-

lação de materiais, reduz o risco de erro humano, assegura volumes de produção elevados, melhora a precisão e a repetibilidade.

Quando se fala em aplicações em ambientes exteriores, onde existem pessoas ou outros veículos a circular, existem requisitos e regras muito rígidas a ter em conta em termos de segurança. Nestes casos, a prioridade não se trata de implementar os robôs, mas sim se as pessoas podem coexistir no mesmo ambiente que os robôs de forma a evitar grandes constrangimentos.

Capítulo 4

Simulação de Robôs Móveis

Ao longo deste capítulo serão apresentadas e descritas diversas opções de aplicações, disponíveis no mercado, com vista a realizar simulações para robôs móveis. No final, as diferentes aplicações serão comparadas de forma a se verificar qual a que melhor se adequa a este projeto.

4.1 Simulação de Processos

A simulação surge como uma necessidade de ser capaz de prever e estudar o comportamento de um sistema, providenciando uma fácil compreensão do seu funcionamento antes deste ser realmente construído. Testar modelos no sistema real, com diferentes cenários, é muitas vezes uma tarefa difícil ou mesmo impossível, monótona e ineficiente que acaba por ser um desperdício de tempo e dinheiro até obter a melhor solução, o que leva a que muitas implementações sejam descartadas por não serem obtidos resultados úteis ou desejados. Esta é a razão pela qual a simulação se tornou uma ferramenta valiosa no campo da engenharia em termos de desenvolvimento de qualquer tipo de projeto de serviços ou fabrico. A simulação é utilizada para aproximar ao sistema real, no entanto, dificilmente é uma cópia idêntica do processo. O objetivo é testar o sistema aplicando diferentes cenários e *inputs* para analisar o seu comportamento e recolher o máximo de dados possível, de maneira a analisar o possível efeito das alterações num sistema já existente, ou antes de o sistema real ser construído.

Desta forma, a simulação tem uma vasta gama de aplicações para além da conceção e operação de sistemas de transporte; também é comum na análise de sistemas de fabrico, determinação de requisitos de *hardware* e *software*, avaliação de projetos para organizações de serviços como hospitais ou restaurantes de *fast-*

food e redesenho de processos empresariais, estes são apenas alguns exemplos de aplicações [35].

Existe uma vasta gama de *softwares* disponíveis no mercado com a capacidade de simular robôs móveis, muitos deles com uma multiplicidade de funcionalidades e ferramentas que fazem da simulação uma ferramenta muito poderosa para criar quase qualquer modelo. Assim, foi necessário realizar uma investigação para obter o máximo de informação possível de cada *software*, para chegar a uma decisão sobre qual o mais adequado, de acordo com as condições e requisitos do sistema a simular neste trabalho.

4.1.1 FlexSim

O FlexSim é um *software* especializado em sistemas industriais e logísticos para simulações de eventos discretos. Tem a integração de gráficos 3D, como ilustra a Figura 4.1, que permitem ao utilizador trabalhar num ambiente mais realista e simular a aparência real do sistema. Inclui uma vasta gama de distribuições estatísticas de dados de entrada para mostrar a variabilidade do processo real, bem como vários cenários hipotéticos para comparar a evolução do modelo proposto.

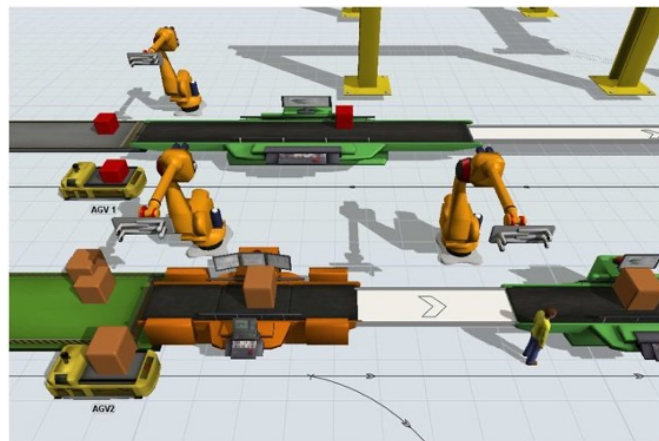


Figura 4.1: Simulação de célula fabril pelo *software* Flexsim [21].

De acordo com o *layout*, o FlexSim torna-se acessível de utilizar, dado que é possível escolher, largar objetos e processos em qualquer lugar a partir da barra de ferramentas, e ainda existe a opção de incluir novos desenhos no projeto, através da funcionalidade de importar ficheiros *Computer Aided Design* (CAD). Além disso, consegue também criar caminhos para os AGV de transporte, selecionando a opção de linha reta ou curva.

No que à construção do modelo diz respeito, o FlexSim tem uma biblioteca de objetos padrão com uma vasta gama que se pode utilizar imediatamente no projeto, acompanhada por uma lista pré-programada de propriedades para os

objetos. Nas versões mais recentes, está incluída a ferramenta *Process Flow* que utiliza esquemas de fluxo para representar lógicas complexas de forma mais eficiente. Além disso, o FlexSim tem a sua linguagem de programação semelhante ao C, FlexScript, onde se pode aumentar a personalização do modelo.

Sobre os dados de saída, este *software* oferece uma vasta gama de gráficos e diagramas de análise detalhados. O *ExpertFit* também está incluído e permite-lhe saber qual a distribuição estatística mais adequada para os dados de saída que obteve.

FlexSim é a opção preferida quando se trata de simulação de AGV, pois inclui um módulo AGV que torna muito fácil e intuitiva a construção de um modelo. Tem também tutoriais passo a passo muito úteis e detalhados, tornando-se uma ferramenta de ajuda com toda a informação necessária para aprender a trabalhar com o simulador.

4.1.2 Anylogic

Anylogic é uma das empresas líderes no campo da simulação. Está equipada com uma plataforma única que permite ao cliente simular todo o tipo de sistemas, independentemente da sua complexidade. Tem um ambiente de modelação multimétodo onde se pode executar sistemas de eventos discretos, baseados em sistemas dinâmicos.

Inclui bibliotecas específicas para vários campos, sendo as principais a modelação de processos e o manuseamento de materiais. Com estas, podem ser criados modelos digitais de fábrica, onde a otimização, transporte, inventário e atrasos no fluxo de materiais podem ser melhorados. Podem ser utilizadas muitas funcionalidades, como a avaliação de alternativas de *layout* para melhorar o desempenho do sistema, testar a capacidade de conceção da linha de produção, incluir recursos de fábrica que ajudam a eliminar estrangulamentos inesperados ou antecipar o comportamento do sistema em caso de avarias. Além disso, os diferentes processos e máquinas do sistema podem ser facilmente ligados entre si, utilizando transportadores ou AGV. A frota AGV interage com outros equipamentos do sistema, podem mover-se sem utilizar um caminho previamente definido, evita colisões e resolve bloqueios.

Relativamente à visualização gráfica, o Anylogic tem ferramentas mais simples. Os fluxogramas podem ser transformados em gráficos 3D ou 2D, tal como demonstra a Figura 4.2. Todos os objetos são representados e é possível incluir desenhos personalizados CAD no projeto, bem como a navegação e controlos intuitivos. Este *software* possui uma vasta gama de distribuições estatísticas para incluir dados de diferentes sistemas de armazenamento de dados, vários diagramas, gráficos e ferramentas de otimização que ajudam o utilizador a aplicar as alterações necessárias no modelo, tornando a solução de simples compreensão. Es-

4.1.4 Tecnomatix Plant Simulation

Este *software* de simulação de eventos discretos desenvolvido pela Siemens, permite ao utilizador construir modelos realistas para simular, visualizar, analisar e otimizar os cenários já existentes ou desenvolver antecipadamente modelos para novas fábricas sem necessidade de investir dinheiro e colocar a empresa em risco.

Através da Figura 4.4 é possível observar algumas das principais características deste *software* com grandes detalhes gráficos para analisar rendimento, deteção de estrangulamentos, utilização de recursos como pessoal, *buffers*, máquinas e assim por diante, a otimização da utilização de energia e minimização do *Work-In-Progress* (WIP), arquitetura de sistema aberto para desenvolver modelos em múltiplas interfaces, uma interface de utilizador intuitiva para aprender rapidamente com múltiplas bibliotecas, podendo ser estendida adicionando novos objetos, e uma vista de modelo 2D altamente eficiente que pode ser facilmente convertida em 3D com gráficos para ver como o fluxo real funcionaria na fábrica.

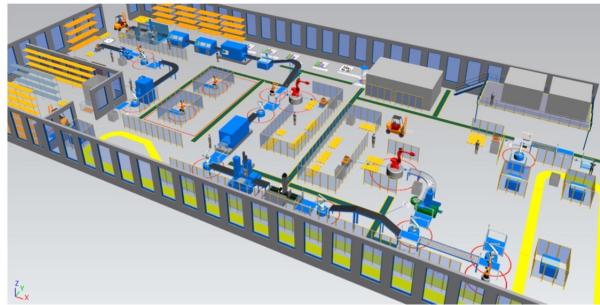


Figura 4.4: Visualização 3D de uma fábrica no *software* de simulação TX Plant Simulation [24].

Possui ainda um módulo AGV onde podem ser criados sistemas de caminhos e os AGV podem interagir com os diferentes processos para lidar com o transporte de material dentro da fábrica. Além disso, o Plant Simulation desenvolveu recentemente o “*AGV Pool*”, onde os AGV podem mover-se de uma estação para outra sem necessidade de um caminho físico. O AGV deteta onde está a estação e seguirá o caminho mais curto, tendo em consideração todos os elementos físicos que possam existir no chão. São fornecidos bons dados de saída, bem como a possibilidade de executar as suas experiências, onde pode programar características como o número ótimo de AGV necessários para atingir o rendimento desejado.

4.1.5 Simio Simulation Software

Ao contrário de outros sistemas orientados para objetos, no Simio Simulation Software não há necessidade de escrever qualquer código de programação, uma vez que o processo da criação de um novo objeto é completamente gráfico. A atividade

de construção de um objeto no Simio é idêntico à atividade de construção de um modelo.

Este facto pode ser muito útil, particularmente durante a apresentação dos resultados para alguém não familiarizado com os conceitos de simulação. No Simio, a lógica do modelo e a animação são construídas num único passo. Esta característica é muito importante, porque torna o processo de modelação intuitivo, além disso, a animação pode também ser útil para refletir a evolução do estado do objeto.

Para além da habitual animação 2D, o Simio também suporta animação 3D como uma parte natural do processo de modelação. Para alternar entre vistas 2D e 3D o utilizador só precisa de premir as teclas “2” e “3” do teclado. Além disso, o Simio fornece uma ligação direta ao Google Warehouse, uma biblioteca de modelos 3D gratuitos disponíveis que podem facilmente adicionar o realismo demonstrado na Figura 4.5 à parte de simulação.



Figura 4.5: Projeto em simulação de um aeroporto no Simio [25].

O Simio oferece dois modos básicos para executar modelos, o interativo e o experimental. No primeiro é possível executar e ver o modelo animado, que é útil para a construção e validação do projeto. No segundo, é possível definir uma ou mais propriedades do modelo que podem ser alteradas, a fim de observar o impacto no desempenho do sistema.

Este *software* possui um vasto campo de aplicação, incluindo indústrias para o fabrico, os setores da saúde, aeroespacial ou engenharia industrial [36].

4.2 Seleção do Software

Foram comparados cinco *softwares* de simulação para modelos industriais, destacando as suas principais características através de categorias relevantes relativas a atributos técnicos, disponibilidade de versões estudantis e módulos AGV. Após

profunda pesquisa no *software* de simulação, os melhores *softwares* que completam corretamente os requisitos para este projeto são Anylogic, Arena, Simio, FlexSim e Plant Simulation. Uma avaliação das principais características relevantes para este projeto, de cada *software* pode ser encontrada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparação do *software* de simulação.

Requisitos	Anylogic	Arena	Simio	FlexSim	Plant Simulation
Intuitivo	3	3	5	5	5
Suporte <i>Online</i>	4	4	4	4	4
Tutoriais de aprendizagem	3	3	5	5	4
Modelo implementação 3D	3	3	4	4	5
Planeamento de AGV	4	3	4	4	5
Tratamento de dados	5	5	4	4	5
Importar objetos CAD	4	2	5	5	5
Versão gratuita	0	0	0	5	0
Total	26	23	31	36	33

Para tomar a decisão final sobre qual o *software* que preenche os requisitos do projeto, foi concebida esta tabela que avalia vários conceitos de design através de diferentes critérios de seleção com uma taxa mais alta ou mais baixa relativamente à sua importância para o projeto. Se um conceito de design satisfizer os critérios, recebe uma pontuação de um a cinco, e o *software* que atingir a pontuação mais alta será considerado como o mais adequado para este projeto. Não faria sentido avaliar este *software* com pontuações negativas, uma vez que todos eles satisfazem os parâmetros que estão a ser avaliados.

Todos eles têm a qualidade necessária para serem utilizados em modelos de simulação de AGV, mas o FlexSim tem a pontuação mais alta da comparação pelo facto do ISEP fornecer a licença para utilizar a versão completa do *software* gratuitamente, o que torna possível fazer uso de todas as vantagens e ferramentas para desenvolver um modelo realista.

Ainda assim, tanto o FlexSim como o Plant Simulation ou Simio são considerados intuitivos e têm tutoriais passo a passo muito detalhados, o que torna mais compreensível a aprendizagem num curto período de tempo. Os três possuem um módulo poderoso incorporado para AGV, onde quase todos os parâmetros podem estar sob controlo. O Plant Simulation possui uma ferramenta específica para calcular o número ótimo de AGV. Embora o FlexSim não inclua tal opção, a ferramenta *Experimenter* auxilia na execução do modelo com números diferentes de AGV de cada vez e a verificar qual o número que fornece os melhores resultados de uma só vez.

4.3 Conclusão do Capítulo 4

Existe uma vasta gama de *softwares* de simulação de eventos discretos disponíveis no mercado, muitos deles com uma multiplicidade de funcionalidades e ferramentas que fazem da simulação uma ferramenta muito poderosa para criar quase qualquer modelo. Neste capítulo foram analisados diferentes soluções de *software* e chegou-se à conclusão de que a melhor para este projeto seria o FlexSim. Apesar do Plant Simulation ser outra ferramenta poderosa, e em alguns aspetos potencialmente melhor que o FlexSim, não foi possível arranjar uma licença educacional para este *software*. Desta forma, o fator decisivo recai sob a disponibilidade de uma licença completamente funcional sem qualquer limitação de tempo ou número de objetos a inserir no modelo.

A construção do modelo exigirá sempre tempo e esforço para a recolha de dados confiáveis e, por vezes, os resultados podem não ser totalmente fidedignos ou representativos para o tipo de modelo que está a ser criado. O facto de não conhecer na realidade o espaço leva a que o estudo seja um pouco abstrato; estes fatores não são considerados como vantagem ou desvantagem, mas tornam-se assim um constrangimento a este projeto.

Capítulo 5

Arquitetura do Sistema

Neste capítulo é explicado como funciona o sistema, assim como os diferentes pressupostos para o desenvolvimento do modelo de forma a ser realizado o estudo esperado para este projeto e os passos para os diferentes diagramas de fluxo.

5.1 Pressupostos do Desenvolvimento

Embora a ideia seja obter um modelo fiel em comparação à realidade, podendo assim ser utilizado também como uma ferramenta gráfica, foram feitas cinco suposições. Seguindo o princípio do *layout* e regras de segurança do aeroporto. É importante evitar uma complexidade desnecessária que tornará o processo de desenvolvimento do modelo demasiado longo, em vez disso fez-se com que se tornasse ao mais adequado para análise que se pretende. Como resultado, a Tabela 5.1 mostra todos os pressupostos considerados no modelo de simulação face ao sistema real.

Tabela 5.1: Pressupostos para o desenvolvimento do modelo.

	Sistema Real	Modelo Simulação
1	O planeamento de voos está dividido em dois tipos, sendo estes voos de carga ou passageiros. A cada avião é atribuído uma secção, e apenas lhe é permitido deslocar-se dentro dela. O tipo <i>Narrowbody</i> são aviões com 1 corredor, por exemplo B737, A319 ou A320, normalmente utilizados em voos <i>lowcost</i>. Os <i>Widebody</i>, são aviões mais largos com 2 corredores, como por exemplo os B777, A330 ou A340, tipicamente usados em voos internacionais de longo curso. Por questões operacionais e de segurança a porta de carregamento de bagagens para o avião fecha 10 minutos antes da partida.	Foram consideradas apenas aeronaves de passageiros. Podem ser <i>Narrowbody</i> ou <i>Widebody</i>. Para o cálculo do número de AGV, importam apenas os tempos e o facto de existir um AGV disponível para executar a tarefa de carga e descarga em diferentes tipos de avião. <u>Aviões <i>Narrowbody</i>:</u> Tempo de descarga: 8 minutos; Tempo de carga: 10 minutos e concluído 5 minutos antes da partida; <u>Aviões <i>Widebody</i>:</u> Tempo de descarga: 15 minutos; Tempo de carga: 20 minutos e concluído 10 minutos antes da partida; Sendo que esta diferença nos tempos é considerável neste tipo de serviço, definiu-se que a <i>source</i> irá originar 90% aviões do tipo <i>Narrowbody</i> e 10% <i>Widebody</i>. Considerou-se esta diferença no planeamento e também que a descarga pode ser iniciada logo após o avião atracar no respetivo <i>stand</i>.

2	Os AGV transportam diferentes tipos de bagagens.	Na simulação os AGV transportam só um tipo de bagagem. Apenas interessam o seu nível de prioridade e o seu destino. Além disso, as bagagens prioritárias representam 5% do número total e são representadas com maior tamanho de modo a serem visualmente distinguidas.
3	Se a bateria estiver abaixo de 20% da sua capacidade total, o AGV vai para uma estação de carga onde permanece durante 20 minutos. Existe também, hoje em dia, o que se chama carregamento de oportunidade. Isto quer dizer que quando os AGV estão parados em qualquer ponto de controlo aproveitam para carregar.	Esta característica é eliminada, uma vez que esta situação mal acontece. Carregar o AGV durante 60 segundos cada vez que este estaciona numa estação de carga é suficiente para manter o nível de bateria entre 20% e 80% da sua capacidade total. É por isso que esta situação é invulgar e pode ser evitada na simulação. Esta condição torna-se mais uma medida de segurança para assegurar que os AGV não ficam sem bateria do que uma característica importante a simular no sistema.
4	Existem duas possibilidades para o transporte das bagagens que podem seguir contentorizadas ou carregadas à unidade para o veículo.	Para organização do serviço, o AGV transportará (para carga e descarga) apenas 1 carro de bagagem. Cada carro de bagagem transporta 36 malas. Estas malas podem estar dentro de um contentor ou colocadas sobre o carrinho. A velocidade do AGV é menor quando está carregado, tal como será especificado nas propriedades da rede dos AGV no Capítulo 6.

5	No cenário real existe a possibilidade de ocorrerem avarias, atrasos, voos cancelados ou manutenções preventivas a serem realizadas no aeroporto. Estas situações podem ser programadas ou espontâneas.	Considerou-se o caso de voos cancelados/simulação de avaria. Onde, por exemplo, uma aeronave aterra, é feito o recolher e carregamento normal das bagagens, mas esta não chega a partir. Como nesta condição, o voo foi cancelado, mas a aeronave já se encontra carregada com bagagens, é realizado o recolher das bagagens, e o envio do avião para um <i>stand</i> remoto de forma a não ocupar espaço no <i>stand</i> de carregamento. Após um tempo de 1 hora nessa posição remota o avião regressa ao <i>stand</i> disponível para voltar a ser carregado com bagagens e fazer a descolagem. Para efeitos de simulação optou-se por considerar que 2% dos aviões terá esta condição de falha.
---	---	---

5.2 Descrição do Fluxo

Os fluxogramas são essenciais para ajudar a compreender e desenvolver a parte funcional do projeto.

Para estudar e desenvolver a solução para o problema, foi criada uma série de passos para alcançar os resultados de forma satisfatória e fornecer a metodologia de simulação necessária para desenvolver este projeto.

Alguns dos conceitos chave mais usados para desenvolver os fluxogramas são:

Schedule Source: esta atividade cria novos objetos no fluxo de acordo com o especificado na sua tabela de entradas. Esta tabela define o instante de tempo (nas unidades do modelo) em que estes objetos devem ser criados, o nome que será atribuído e a quantidade a criar. Estas definições podem ter um valor fixo ou os valores podem ser calculados de forma dinâmica. Para o caso em estudo foram introduzidos os dados nesta tabela manualmente.

Event-Triggered Source: gera objetos de fluxo em resposta a um evento durante uma execução no decorrer da simulação.

List: a Lista é um ativo partilhado que pode representar uma lista de objetos, itens de fluxo, executores de tarefas, sequências de tarefas, números, entre outros. Utilizando as atividades *Push To List* e *Pull From List*, o conteúdo de uma lista pode ser atualizado dinamicamente durante uma execução de simulação.

Wait For Event: como o seu nome indica, esta atividade manterá o fluxo de processo até que um determinado evento seja desencadeado ou exista a conclusão de um acontecimento. Quando uma dessas situações ocorrer o evento no modelo de simulação irá continuar a libertar o fluxo de simulação.

Run Sub Flow: esta atividade pode ser utilizada para iniciar um subfluxo de processo. O objeto de entrada permanecerá neste *Sub Flow* até que todas as suas instruções tenham sido concluídas.

Nas subsecções que se seguem são apresentados os fluxogramas com as etapas principais para compreender o projeto.

5.2.1 Diagrama da Arquitetura em Alto Nível

A arquitetura de alto nível permite analisar o sistema de uma forma mais global e simplificada, fazendo a divisão entre o sistema operacional das bagagens de chegada e as de partida.

A Figura 5.1.a) (diagrama do lado esquerdo) mostra o início do fluxo nos aviões que aterram no aeroporto. Após isso, deslocam-se para o *stand* atribuído, enquanto o AGV vai-se deslocando até esse mesmo local, a fim de realizar a operação de bagagens de chegada. Cada AGV tem a sua etapa seguinte, sendo destinados a realizar operações para bagagens de chegada ou de partida. No caso 5.1.b) (diagrama do lado direito) em que as bagagens surgem no terminal de partida, o fluxo inicia-se com a deslocação do robô até ao terminal para carregar as bagagens e realizar o transporte até ao *stand* onde se encontra o avião para efetuar o carregamento. Finalmente, o avião parte do aeroporto e é removido do sistema.

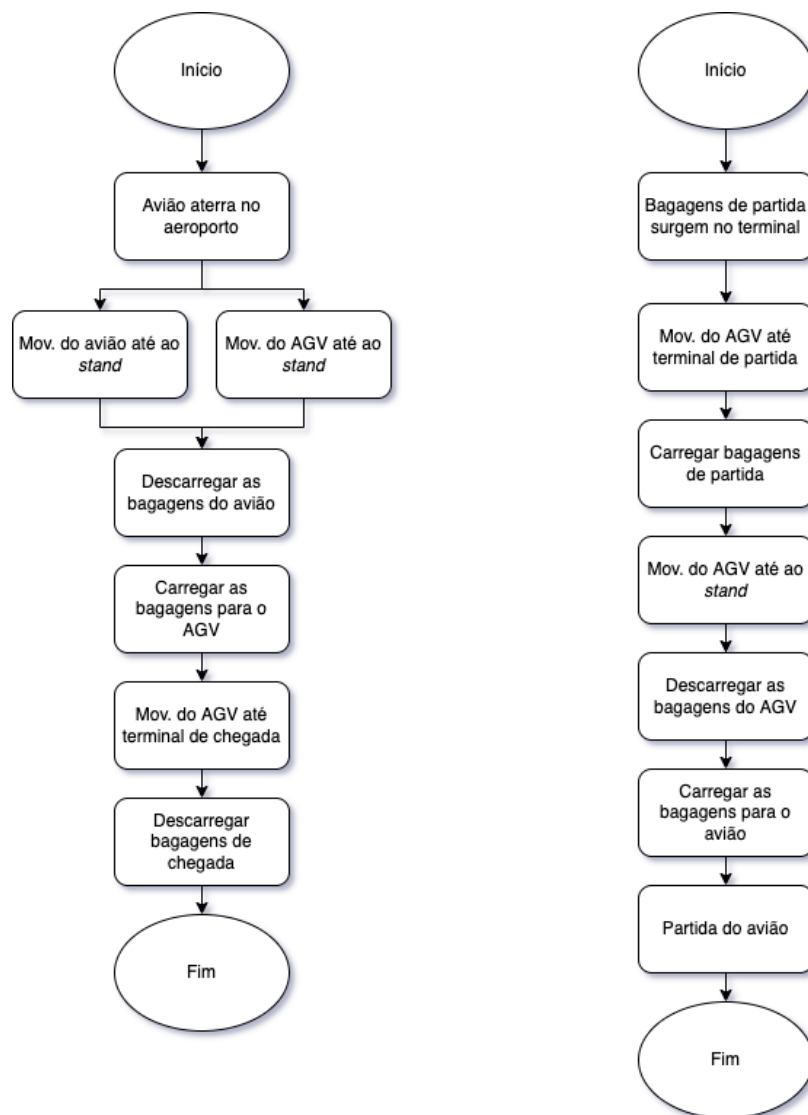


Figura 5.1: Diagrama de blocos geral da arquitetura de alto nível, a) chegadas, b) partidas.

5.2.2 Fluxograma de Bagagens

Na Figura 5.2 está representado o fluxograma da gestão de bagagens, dividido entre bagagens de chegada (lado esquerdo) e de partida (lado direito).

Existem dois níveis de prioridade para as bagagens (0 e 1). O nível 0 representa o conjunto de bagagens “normais” (sem prioridade) e 95% das bagagens transportadas. As bagagens de nível 1 têm prioridade (5% do total).

As bagagens prioritárias têm um tratamento diferente das normais. São as últimas a serem carregadas. No destino serão as primeiras a serem descarregadas.

Foi criada uma função que aumenta o tamanho das bagagens prioritárias, permitindo a distinção entre estas e as bagagens normais no simulador.

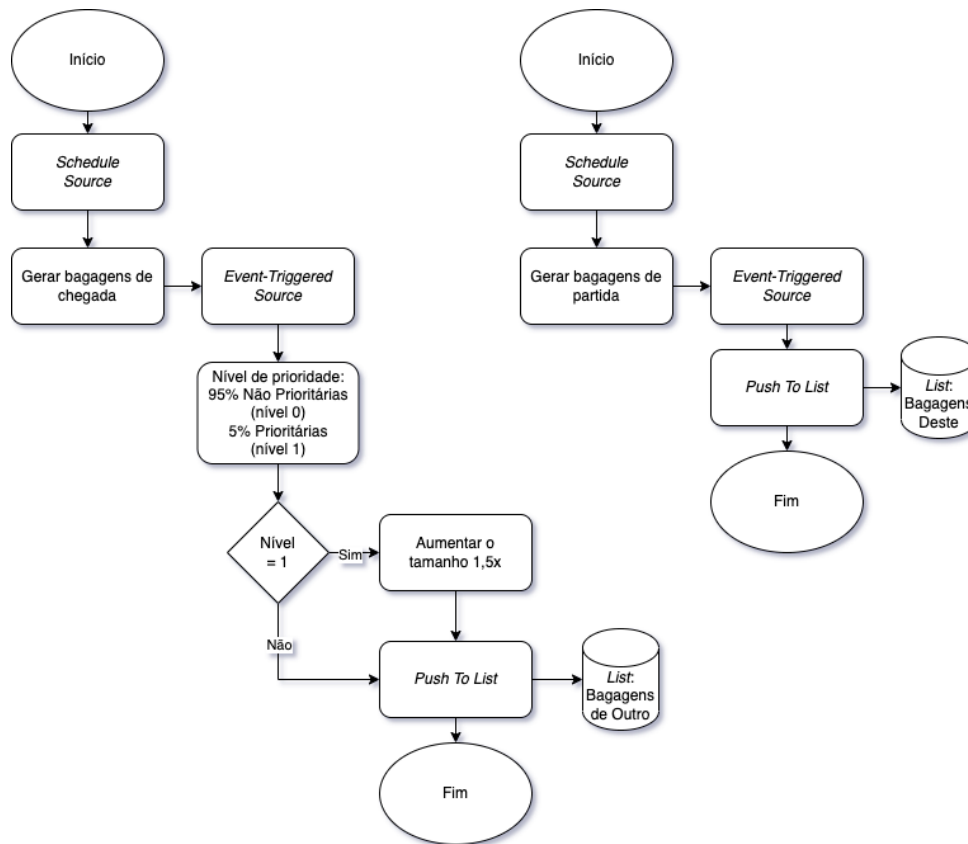


Figura 5.2: Fluxograma das bagagens, a) chegadas, b) partidas.

5.2.3 Fluxograma de Aviões

O fluxo de programação e funcionamento dos aviões é mostrado na Figura 5.3.

É iniciado com o processo de chegadas dos aviões desde a pista de aterragem até ao descarregamento de bagagens no *stand* atribuído, e do lado mais à direita o processo contrário, ou seja, desde o carregamento de bagagens no terminal até à partida dos voos.

Todas as aeronaves são geradas pela função *Schedule Source* de acordo com a lista “*Arrival Plane*” onde são previamente estabelecidos os horários para os voos de chegada. O próximo passo define de forma aleatória a variável do tipo de avião, atribuindo-se 90% para aviões do tipo *Narrowbody* e 10% para aviões do tipo *Widebody*. Esta é uma variável importante dado que, consoante o tipo atribuído, o tempo para a operação de bagagens é distinto, como se verá na secção seguinte referente aos AGV.

Posto isto, são atribuídos os números de bagagens listadas em “Bagagens de outro Aero” antes do avião chegar ao *stand* correspondente. Após a paragem, é iniciada a operação de descarga para a placa onde está associada a lista “*Inbound*” correspondente à informação com o número de itens presentes. No final da operação de descarga é atualizada a lista “*BagsIn*” com o estado das bagagens transferidas para a placa, ficando disponível para carregar nos AGV.

No processo de partidas, as aeronaves já se encontram no *stand* e, como no dia que se está a simular, a carga mínima atribuída é de 66 bagagens, foi usada a condição superior a 65 para iniciar o fluxo. Assim sendo, quando a carga chega ao terminal de partidas é usado um *Wait For Event* para aguardar até que o AGV se desloque ao ponto de recolha. A primeira função *Pull From List* referente à lista “Bagagens Deste Aeroporto” recebe todos os itens que deram entrada até àquele instante e, de seguida, recorre à lista “Aviões no Terminal” que já contém as posições dos aviões que se encontram estacionados nos *stands* e preparados para carregar, assim como a *flag* de falha ou avaria.

O cenário de avaria considera a atribuição aleatória de 2% aos aviões que chegam ao aeroporto. Caso seja atribuído o valor 1 à variável a aeronave desloca-se para uma posição remota onde permanece, recorrendo à função *Wait For Event* para simular o acontecimento de manutenção. A lista “*FailureParks*” permite obter a informação sobre qual dos pontos remotos se encontra livre para que seja possível a aeronave se deslocar até lá. Passado esse tempo, o avião regressa ao *stand* atribuído e a lista “*FailureParks*” volta a ser atualizada com a informação de que o ponto ocupado até agora, já se encontra livre.

De seguida, inicia-se o momento em que o avião começa a receber as bagagens deixadas na placa, recorrendo à lista “*Outbound*” para saber quantas há a transportar.

Após terminados todos os passos e verificadas as condições de descolagem, o último *Sub Flow* faz com que o avião se desloque até ao ponto de origem e, por fim, é atualizada a lista “*ArrivalPlane*” fazendo com que a aeronave retorne à origem onde existe uma *sink* que faz remover os itens do sistema, ou seja, dá a operação como concluída para o voo em causa.

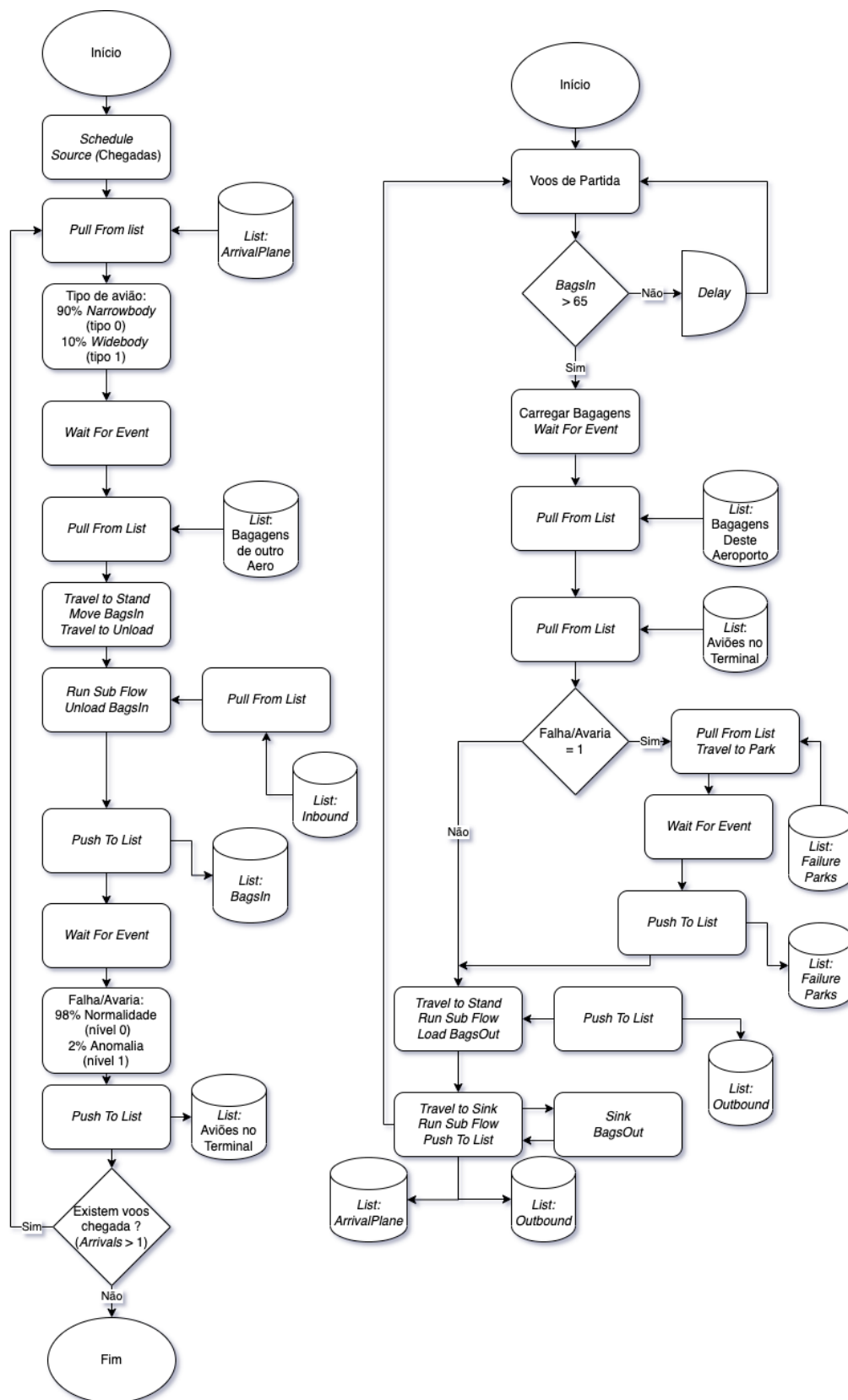


Figura 5.3: Fluxograma especificado para o fluxo de aviões.

5.2.4 Fluxograma de AGV

A condição que faz desencadear a movimentação de um AGV baseia-se no ciclo, representado através do fluxograma da Figura 5.4, com duas variáveis intervenientes no sistema designadas como *BagsIn* e *BagsOut*. Caso não se registre qualquer uma destas condições o ciclo repete-se até que existam itens a transportar.

A primeira condição verifica a existência dos objetos de bagagens que foram descarregados do avião para a placa. Em caso afirmativo, recorre à lista “*BagsIn*” onde encontra a listagem da informação sobre as bagagens em relação à quantidade e ao *stand* em que se encontram.

Após isso, o AGV realiza a viagem até à placa “*Inbound*” onde irá aguardar pelas bagagens de chegada. Dependendo do tipo de avião, e de acordo com os pressupostos anunciados no Capítulo 5, a tarefa de descarga de bagagens tem a duração de 8 ou 15 minutos. De seguida, o robô viaja para o terminal de bagagens de chegada, onde realiza a entrega numa *sink*: a sua função é remover do sistema os itens que foram transportados.

A segunda condição para dar início ao fluxo é verificada se existir algum objeto de bagagens a serem transportados do terminal de partida para carregar os aviões de partida.

O processo lógico é muito semelhante ao primeiro, mas no sentido oposto, ou seja, do Terminal Sul, onde são recolhidas as bagagens de embarque designadas por “*Departure_Luggage*”, para o *stand* que terá a aeronave à espera.

Para tal, foi criada a lista “*BagsOut*” onde foram previamente estabelecidos os horários de partida para que surjam as bagagens no terminal de maneira a que os AGV as possam transportar até à placa “*Outbound*” do respetivo avião.

No caso de uma aeronave de longo curso (*Widebody*) demorará 20 minutos a concluir a operação de carregamento de bagagens do AGV para o avião ou 10 minutos no caso de ser uma aeronave considerada como *Narrowbody*, utilizada para voos de curso mais pequeno.

Embora a última instrução seja “*Travel* até Origem”, de maneira ao AGV regressar à estação de carga, o mesmo pode não chegar a concluir esse trajeto. É possível aproveitar a posição onde se encontra nesse instante para operar a recolha de bagagens que estejam a ser descarregadas numa outra placa situada no *stand* mais próximo da sua posição atual. Para que isto se torne possível, basta que o fluxo avance novamente para o início do fluxograma onde, por omissão, o *software* irá alocar o AGV ao ponto de controlo mais próximo.

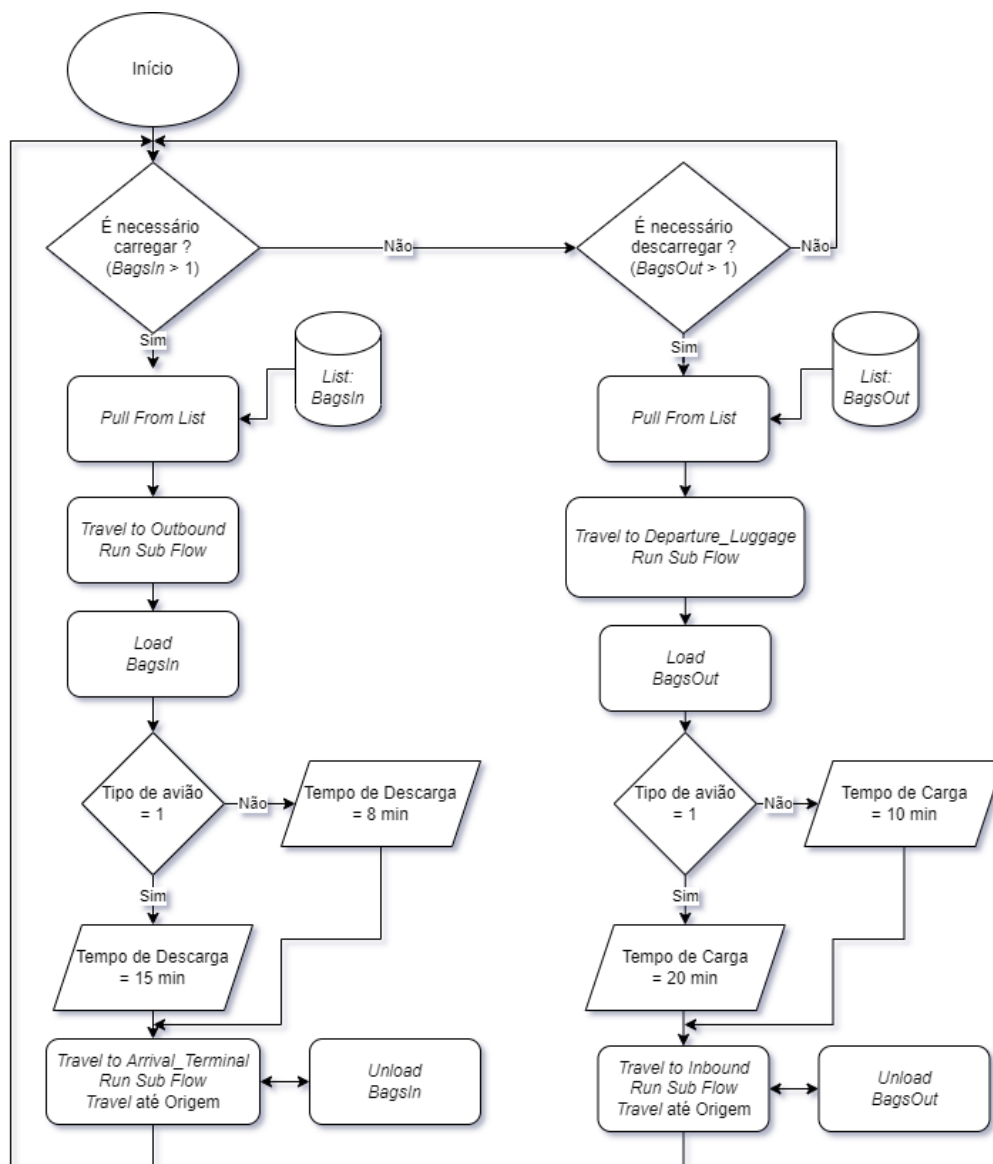


Figura 5.4: Fluxograma especificado para o fluxo de AGV.

5.3 Conclusão do Capítulo 5

Neste capítulo foi possível compreender a estrutura da arquitetura do projeto, em especial, uma visão esquemática sobre a lógica relevante para o modelo funcionar desde o ponto de vista da arquitetura em alto nível, até à explicação lógica tanto do fluxo de bagagens como do fluxo dos aviões e AGV.

Foram assumidos pressupostos para o desenvolvimento, sempre respeitando as regras de segurança e os processos de chegada ou partida de um avião, para que

com estes dados se torne possível construir uma simulação de forma a trabalhar com um modelo muito próximo da realidade.

Foram feitas simplificações para o desenvolvimento da simulação. No entanto, foi garantida uma aproximação aceitável à realidade operacional do aeroporto.

Capítulo 6

Implementação do Modelo

Nesta secção será explicado como funciona a lógica do modelo FlexSim desenvolvido, assim como a funcionalidade dos diferentes processos e as etapas quer do fluxo de aviões, como de AGV, analisando em detalhe as características que permitiram a criação do modelo 3D.

6.1 Layout

O projeto foi desenvolvido seguindo o *layout* do aeroporto Francisco Sá Carneiro no distrito do Porto, disponível no documento da Navegação Aérea de Portugal (NAV) [37]. Foi suposto que seria necessário um sistema de transporte interno para deslocar as bagagens entre os terminais das bagagens e os *stands* onde se encontram as aeronaves, envolvendo os processos de carga e descarga para satisfazer as exigências de um dia de trabalho.

Os pontos importantes de controlo estão em locais diferentes do *layout* apresentado na Figura 6.1, por conseguinte, o fluxo de AGV permite que os robôs façam ultrapassagens entre si de forma a seguir vários trajetos que podem ser categorizados como os seguintes:

- terminal para bagagens de chegada (Terminal Norte);
- terminal para bagagens de partida (Terminal Sul);
- pontos de carga em duas zonas diferentes do percurso;
- zona de recolha/entrega de bagagens, sempre do lado esquerdo do avião;
- *stands* para atracar os aviões.

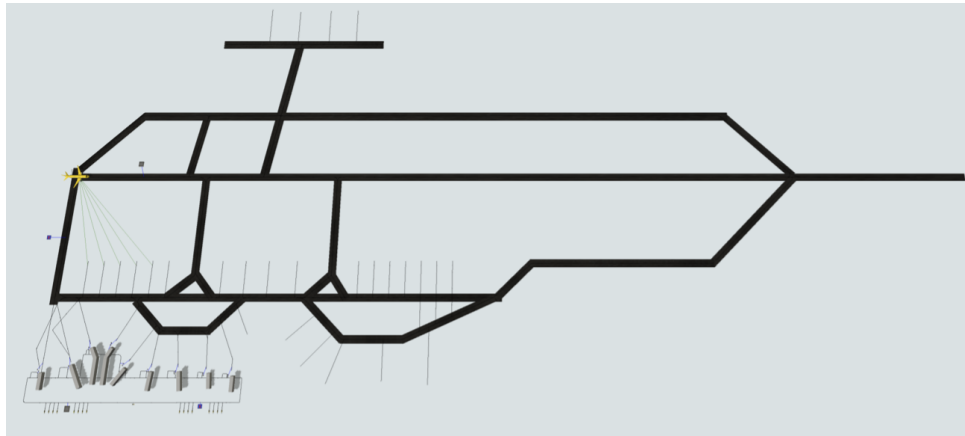


Figura 6.1: *Layout* 3D desenhado no FlexSim.

A Figura 6.2 mostra em detalhe estas zonas do percurso que os AGV realizam. Este trajeto foi pensado de forma a evitar colisões, obter pontos de referência e de modo que os AGV nunca se movimentem por baixo das asas do avião. É possível observar as *Queues* do lado direito do avião para a operação de bagagens e no “Terminal Sul”, este objeto é o que permite armazenar itens, neste caso prático, vão ser as malas dos passageiros.

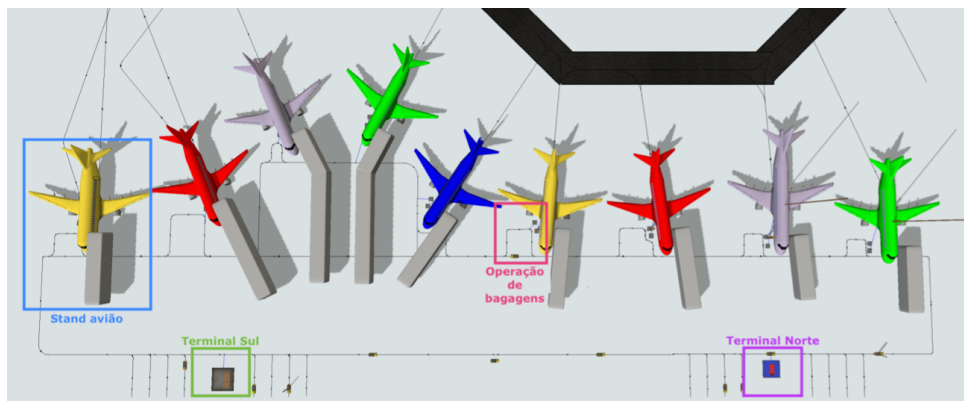


Figura 6.2: *Layout* preparado para o percurso dos AGV.

No percurso sugerido para os AGV existe um percurso principal e os próprios ramais para que os robôs consigam chegar até aos *stands* das aeronaves, caso seja necessário efetuar a carga ou descarga de bagagens nos mesmos.

6.1.1 Estações de Carga da Bateria

Existem estações de carregamento no *layout* para cada AGV em dois pontos distintos, como se pode ver na Figura 6.3. Sempre que o AGV chega ao cruzamento

antes da estação de carga, verifica se a sua correspondente estação de carga está disponível ou não. Se estiver livre, o AGV vai para a estação de carga onde permanece até receber uma ordem. Depois disso, parte para a estação seguinte de acordo com o seu destino final. No entanto, se já houver outro AGV a recarregar, o segundo AGV toma o outro caminho até encontrar a que esteja livre.

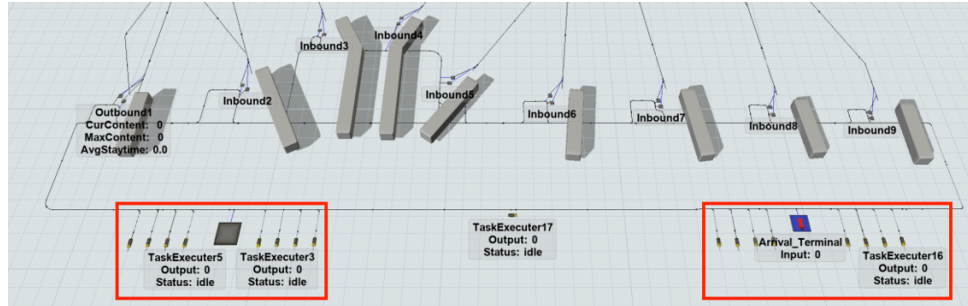


Figura 6.3: Estações de carga.

O sistema também considera um cenário extra em relação à recarga dos AGV. Se a bateria estiver abaixo de 20% da sua capacidade de carga, o AGV vai automaticamente para uma estação de carga onde permanece durante 20 minutos. Este cenário mal acontece, uma vez que os tempos de recarga são concebidos para evitar esta situação. Esta é uma medida de segurança para garantir que os AGV nunca fiquem sem bateria. Além disso, a bateria dos AGV deve estar sempre entre 20% e 80% da sua capacidade de carga.

6.2 Classificação das Bagagens

Para remover do modelo as bagagens de partida foram utilizadas *sinks*, uma função do *software* para recolher as bagagens, removendo todos os itens que tenham sido transportados até lá chegar.

De forma a tornar este ambiente de simulação mais realista, foram escolhidas determinadas estruturas e objetos 3D suportados pelo *software*. Estes objetos importados foram sofrendo alterações de maneira a não sobrecarregar o modelo em demasia, possibilitando assim executar e experimentar o modelo de maneira eficaz.

Durante o desenvolvimento, notou-se alguma limitação em executar o modelo quando os itens 3D importados eram gerados pela *source*. Por essa razão, foi criado um *Flow Item* simples, ilustrado na Figura 6.4, para representar as bagagens.

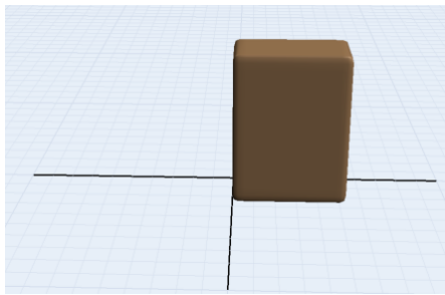


Figura 6.4: Aspeto representativo de uma bagagem.

Na Figura 6.5 estão representadas as duas situações de transporte de bagagens. O AGV *TaskExecuter 9* transporta unicamente as bagagens de prioridade, visualmente perceptíveis pela sua maior dimensão, e o *TaskExecuter 10* está carregado com malas não prioritárias.

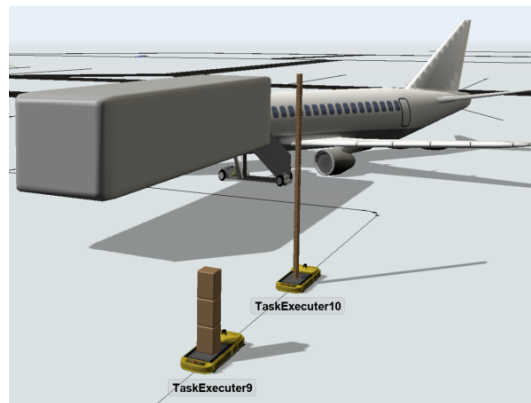


Figura 6.5: Representação do transporte de bagagens prioritárias e não prioritárias.

A carga da bagagem no porão do avião ainda é uma tarefa manual. No modelo de simulação, assim como representado na Figura 6.6, foi considerado que se demora um tempo de 10 segundos por cada peça de bagagem a realizar esta operação tanto para cargas e descargas, assim como a capacidade de 36 malas por cada AGV.

6.3 Criação de Grupos no FlexSim

Para que no FlexSim seja possível controlar vários pontos de controlo em simultâneo, é necessário criar e associar cada item a um dos três grupos criados, seja ele do tipo localização, transporte ou equipamento. Foi criada a Tabela 6.1 correspondente à organização do modelo apresentado com a descrição associada.

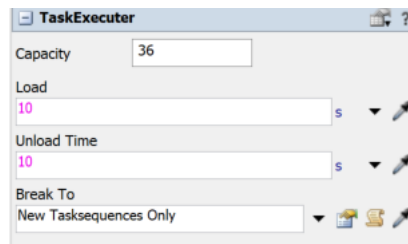


Figura 6.6: Configuração da operação de bagagens para os AGV.

Tabela 6.1: Listagem dos grupos utilizados no FlexSim.

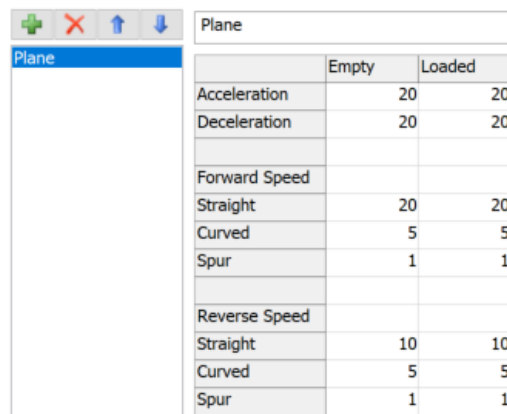
Localização	<i>FailureParks</i>	Locais onde os aviões em avaria podem estacionar
	CargasAviao	Locais onde os aviões podem carregar as bagagens
	DescargasAviao	Locais onde os aviões podem descarregar as bagagens
	CargasAGV	Locais onde os AGV podem carregar as bagagens
	DescargasAGV	Locais onde os AGV podem descarregar as bagagens
Transportes	Aviao	Grupo referente aos aviões
	AGV	Grupo referente aos AGV
Equipamentos	ChegadaBags	Locais onde os aviões deixam as bagagens de chegada (<i>BagsIn</i>)
	PartidaBags	Locais onde os AGV deixam as bagagens de partida (<i>BagsOut</i>)

6.4 Lógica dos Aviões

Uma vez terminado o *layout* e as configurações do sistema, é altura de definir a lógica do fluxo de trabalho. Começando pela programação para a circulação dos aviões no aeroporto simulado, onde se inclui a origem dos diferentes tipos de aeronaves, controlo de voos de chegada e de partida, como ainda o procedimento em caso de falha.

6.4.1 Velocidade de Movimentação dos Aviões

Após a aterragem do avião foi atribuída uma velocidade constante de movimentação até ao *stand* de 20 m/s, ou seja, cerca de 70 km/h. O facto desta propriedade, demonstrada na Figura 6.7, ser constante, permite focar a análise dos resultados apenas nos tempos de transporte de bagagens.

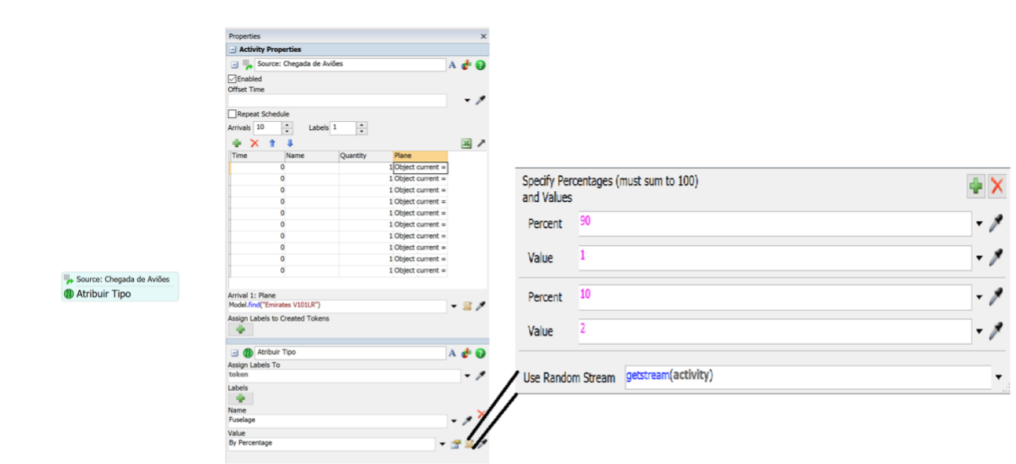


	Empty	Loaded
Acceleration	20	20
Deceleration	20	20
Forward Speed		
Straight	20	20
Curved	5	5
Spur	1	1
Reverse Speed		
Straight	10	10
Curved	5	5
Spur	1	1

Figura 6.7: Propriedades da rede de Aviões.

6.4.2 Atribuição do Tipo de Avião

Para a implementação da variante das aeronaves a considerar no planeamento, foi necessário utilizar uma *Schedule Source* a gerar objetos 3D em formato de aviões. No segundo passo, destacado na Figura 6.8, é possível verificar a distribuição utilizada para a variante *Narrowbody*, designada com valor 1 e atribuída a percentagem de 90%, e para a variante *Widebody* com valor 2 e onde se atribui a percentagem de ocorrência para os restantes 10%.

Figura 6.8: Propriedades da *Source* que gera os aviões e atribuição da respetiva *Label*.

6.4.3 Controlo para Voos de Chegada

Para a implementação da rotina dos voos de chegada foi desenvolvido no FlexSim o fluxo de processo da Figura 6.9.

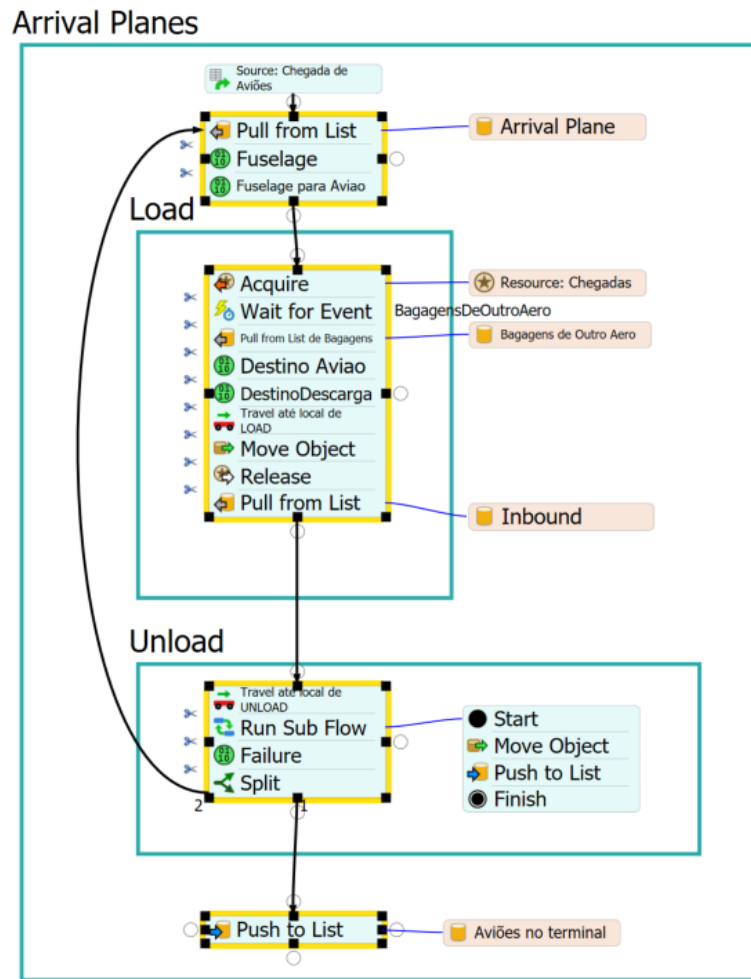


Figura 6.9: Rotina para os aviões de chegada.

É necessário utilizar um *Schedule Source* de maneira a gerar os objetos em formato de aviões. A lista “*Arrival Plane*” contém o *stand* atribuído, e de seguida é feita a atribuição aleatória do tipo de variante (fuselagem) à aeronave.

Quando o objeto é originado - na simulação - é necessário atribuir as bagagens a este voo, simulando a carga vinda de outro aeroporto. Assim, foi utilizado um *Acquire* para a atribuição de itens que surgem na *Queue*: recurso fixo, utilizado para armazenar itens de fluxo enquanto o objeto de recolha ainda não os pode aceitar, e de seguida um *Wait For Event* para que aguarde a transferência de todos os itens presentes nessa *Queue* para o avião. A atribuição das bagagens ao voo que aterra corresponde à informação adicionada previamente na lista “Bagagens de Outro Aero”.

Após isto, é necessário mover o avião até ao *stand* destinado nos primeiros passos. Para tal, é dada a indicação para mover o objeto em formato de avião

com o *Move Object*. Recorreu-se à lista “*Inbound*” para indicar qual o ponto de controlo do destino do avião e ainda qual a placa (*Queue*) para onde as bagagens devem ser descarregadas; em todos os casos, cada *stand* tem uma placa *Inbound* associada para as bagagens de outro aeroporto.

Depois da deslocação até ao *stand*, é então iniciado o sub-fluxo com as atividades de descarga do objeto avião para a placa com o *Move Object*. No fim deste fluxo é feita a atribuição da etiqueta “*Failure*” e atualizada na lista global “Aviões no terminal” para posteriormente ser analisada a variável antes de iniciar o processo de partidas.

6.4.4 Avarias ou Cancelamentos

Os aviões que se encontram no terminal são enviados para a lista “Aviões no terminal”. Para o caso pressuposto de voos cancelados ou situações de avaria, foram escolhidos no *layout* os seis *stands* da Figura 6.10, para onde as aeronaves se irão movimentar de maneira a permanecer durante o tempo previsto até à conclusão do acontecimento.

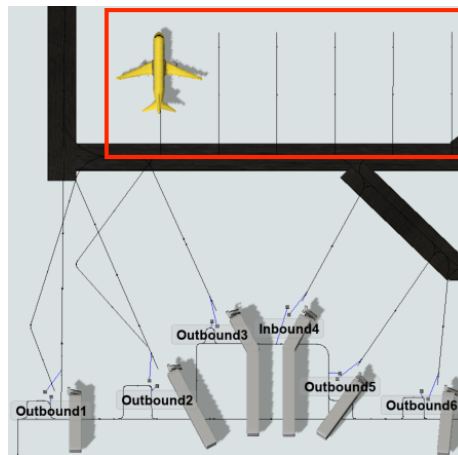


Figura 6.10: Área remota designada para aviões com falha ou avaria.

Foi feita a configuração, representada na Figura 6.11, para atribuir esta condição de falha a 2% dos aviões gerados.

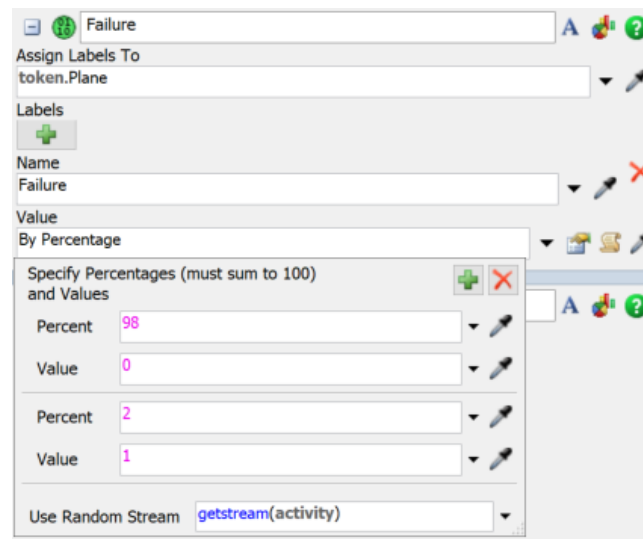


Figura 6.11: Atribuição de situação de falha.

6.4.5 Controlo para Voos de Partida

Para realizar a simulação de voos de partida foi programado o fluxo da Figura 6.12.

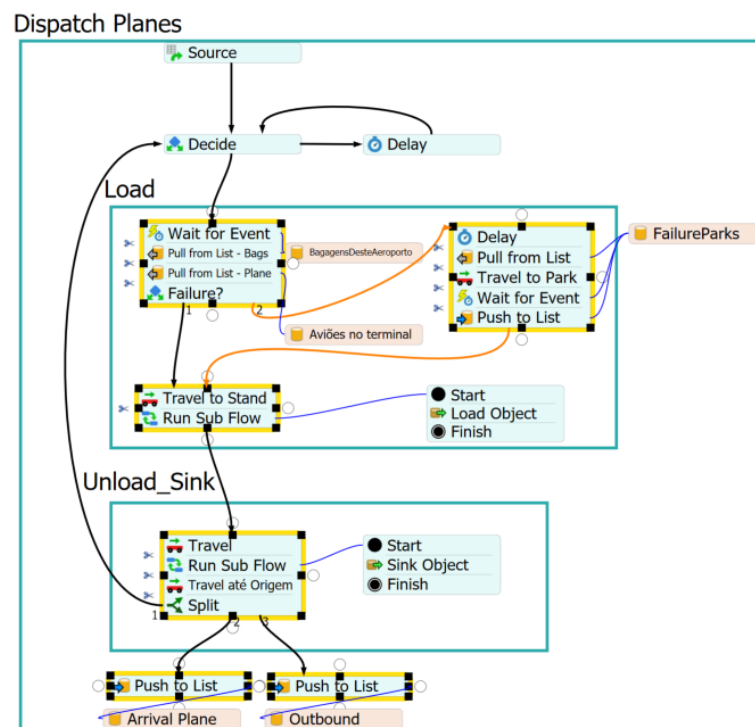


Figura 6.12: Rotina para os aviões de partida.

É utilizado um ciclo *Decide* de maneira a saber se já existem itens em alguma das placas atribuídas para as bagagens de partida. Tal como para as bagagens de chegada, em todos os casos, cada *stand* tem uma placa *Outbound* associada para as bagagens partida.

Após existirem bagagens de partida para seguir no voo, o fluxo segue para a atividade *Wait For Event*, que irá aguardar até que o avião receba todos os itens a transportar. Após a conclusão desta atividade, os dois *Pull From List* que se seguem, correspondem às bagagens que se encontram na *Queue* com todos os itens a ser transportados naquele instante e o outro aos aviões que se encontram no terminal para executar a tarefa de partida.

Anteriormente, foi explicado o procedimento de falha, agora é verificada essa condição que lhes foi aleatoriamente atribuída na variável *Failure*. Caso a aeronave tenha esta *flag* ativa, irá seguir o fluxo da linha representada a laranja. Será atualizado o conteúdo da lista *Failure Parks*, com o avião correspondente que se deslocará para um dos pontos de controlo (*stands*) das posições remotas. Irá permanecer nesse local com a função *Wait For Event*, que aguarda pela conclusão do evento de avaria. Após isso o avião volta novamente para o *stand*, voltando ao processo normal, como se esta *flag* estivesse desativa.

De seguida, inicia-se o momento da transferência de bagagens da placa para o avião. Para isso foi criado o sub-fluxo com a atividade *Load Object* para realizar o carregamento dos objetos.

Para simular a partida do avião, é utilizado um *Travel* até ao local da *sink* usada para remover do modelo os objetos em formato de avião. Dentro da função *Travel* é indicado o ponto de controlo próximo da origem onde se realiza a operação *Sink Object*. Finalmente, uma vez que tanto os aviões como as bagagens foram removidos do sistema, são atualizadas as listas “*Arrival Plane*” e “*Outbound*”.

6.5 Lógica dos AGV

Aos AGV será atribuído o transporte de bagagens entre os aviões e ambos os terminais. Por isso, foram programadas no simulador as configurações referentes à velocidade a que se desloca, capacidade de carga, assim como os diferentes tempos de carregamento e descarregamento.

6.5.1 Velocidade de Movimentação dos AGV

A rede de AGV foi implementada de modo a reunir diferentes velocidades. A sua configuração foi baseada nos modelos reais e pode ser consultada na Figura 6.13, em tudo o que diz respeito à velocidade em reta, velocidade nas curvas, veloci-

dade quando está carregado e velocidade quando está descarregado, com o valor introduzido na unidade em metros por segundo (m/s).

DefaultAGV		
	Empty	Loaded
Acceleration	2	1
Deceleration	2	1
Forward Speed		
Straight	2	1
Curved	1	0.50
Spur	2	2
Reverse Speed		
Straight	2	1
Curved	1	0.50
Spur	2	2

Figura 6.13: Propriedades da rede AGV.

6.5.2 Rotina Principal de Controlo dos AGV

Esta é a rotina principal desenvolvida para a parte onde os AGV aguardam o surgimento de bagagens a transportar.

Para as bagagens foram criadas variáveis distintas: *BagsIn* é referente às bagagens de chegada, ou seja, as bagagens que chegam a este aeroporto. Enquanto que a variável *BagsOut* é referente às bagagens de partida, ou seja, as bagagens que partem deste aeroporto para outro.

Foi implementada a função *Schedule Source* com objetos em formato de AGV. Esta função irá servir para verificar o número de AGV disponíveis no modelo e os pontos de controlo onde serão atribuídas bagagens para transportar. Na Figura 6.14 é possível verificar, nas linhas a azul, o ciclo de decisão, que corre infinitamente, implementado na rotina principal que permite obter uma condição para que os AGV circulem. A função *Zone* existe para efeitos de controlo do fluxo de programação, permitindo alguma ordem no ciclo para que sejam evitados erros críticos ou de *overflow* no decorrer da simulação.

Esta rotina *Decide Cycle* verifica primeiramente a existência de bagagens *BagsIn* (a serem descarregadas); caso se verifique, segue o caminho da linha laranja recorrendo à lista *BagsIn to Unload* onde será possível encontrar a informação acerca das quantidades de bagagens e qual o destino.

A segunda condição é referente ao surgimento de bagagens para transportar do terminal de partida para o *stand*, representado pela linha a vermelho; é necessário recorrer agora à lista *BagsOut to Load* de modo a recolher a informação atualizada da operação a executar.

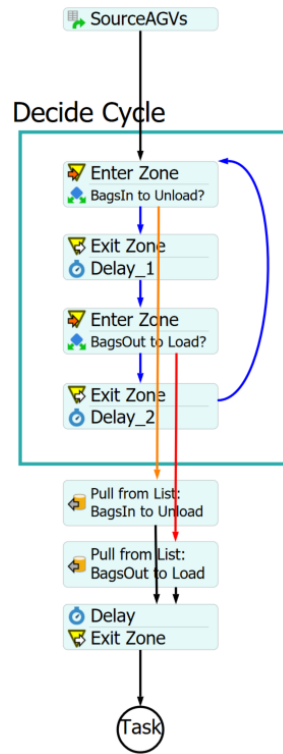


Figura 6.14: Ciclo de decisão na rotina dos AGV.

Após a tomada de decisão desta rotina principal, o fluxo parte para a tarefa a executar, quer seja para realizar o processo de carregamento ou de descarregamento de bagagens, descrito nas secções seguintes.

6.5.3 Processo de Carregamento de Bagagens

O fluxo seguinte inicia o momento em que o avião recebe as bagagens. O comando *Travel* foi implementado para que o AGV se movimente até à placa *Inbound* do *stand* destino fornecido pela lista *BagsIn to Unload*, onde de seguida irá executar a função *Release*, para libertar os recursos (AGV) disponíveis para executar esta operação.

O *Run Sub Flow* executa os passos para o carregamento de bagagens. Dado que existem duas variantes de aeronaves, subsequentemente existem também tempos distintos no que diz respeito ao carregamento de bagagens dos AGV para o avião, tal como abordado na Tabela 5.1. Em destaque as propriedades na Figura 6.15 onde se pode notar a implementação de 10 minutos para o tipo *Narrowbody* e 20 minutos para a variante do tipo *Widebody*.

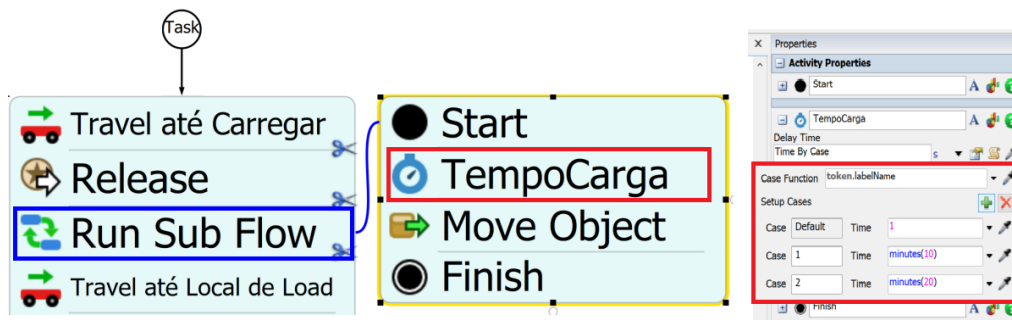


Figura 6.15: Função *Run Sub Flow*, implementada com as propriedades de carga.

6.5.4 Processo de Descarregamento de Bagagens

Quando as bagagens estão para surgir na placa *Outbound* o AGV movimenta-se até ao *stand* para realizar o processo de descarregamento.

O *Run Sub Flow* é muito semelhante ao anterior, onde dependendo do tipo de avião gerado pela *Source*, caso tenha o valor 1 (*Narrowbody*) demora 8 minutos ou valor 2 (*Widebody*) demorará 15 minutos a completar a descarga das bagagens do avião para os AGV, representado na Figura 6.16.

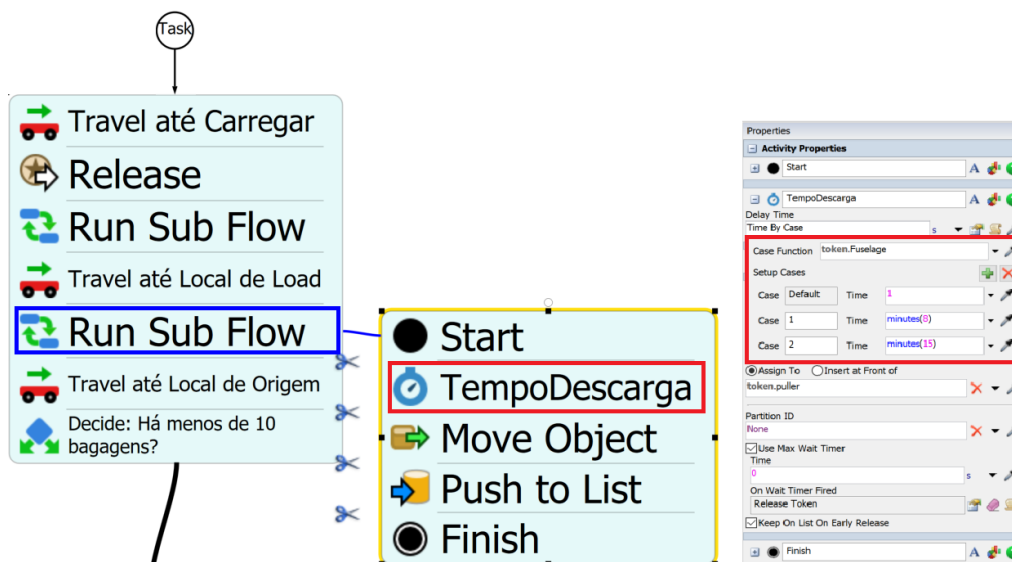


Figura 6.16: Função *Run Sub Flow*, implementada com as propriedades de descarga.

6.6 Process Flow da Simulação

Após a explicação em detalhe de todas as atividades presentes na implementação dos fluxos de bagagens, aviões e AGV, no Anexo A é apresentado o aspeto final do *Process Flow* em FlexSim com todas as funções utilizadas.

6.7 Dificuldades Encontradas Perante o Desenvolvimento

O FlexSim é um *software* poderoso para simulação, fornece um módulo AGV com muitas características que simplifica a criação do modelo. No entanto, não suporta pequenos aspetos importantes que podem resultar num congestionamento para que o sistema atinja o rendimento desejado ou que torne irrealizável detalhes importantes a considerar.

De seguida são apresentadas duas das dificuldades que foram detetadas durante o desenvolvimento deste modelo.

6.7.1 Criação da Lógica de Carregamento de Bateria dos AGV

Esta parte do desenvolvimento foi um desafio. O simulador em si não fornece nenhuma ferramenta que permita aos AGV sintonizar a sua atividade para efetuar o recarregamento da sua bateria durante um certo período de tempo.

A lógica do módulo AGV integrada no FlexSim já atribui automaticamente o trajeto para o qual é designado. Este irá tomar o caminho mais curto para conseguir alcançar esse destino. Como as estações de carregamento não fazem parte do caminho, os robôs nunca irão passar por elas.

A primeira ideia foi implementar o sistema com este pressuposto a ser tido em conta. No entanto, após várias horas passadas a tentar desenvolver um método que atingisse esse objetivo, a conclusão foi de que o grau de complexidade tornava-se cada vez mais elevado com a alternativa arranjada e estaria a dificultar a interpretação do modelo, o que criava cada vez mais problemas ao longo do desenvolvimento, como também muito tempo adicional todas as vezes que fosse necessário efetuar alterações, mesmo que pouco significativas, em que ocorriam erros em volta desta lógica que se tornavam difíceis de distinguir e resolver.

Desta maneira, o modelo ganhará na sua parte visual, onde é possível ver como o sistema se comporta na realidade, e onde os dados obtidos para calcular o número ótimo de AGV ou o tempo de recarga gasto pelos AGV na estação de carga acaba por ser quase o mesmo, uma vez que continuarão a recarregar as suas baterias em outras circunstâncias.

6.7.2 Pontos de Bloqueio dos AGV

Estas situações, também conhecidas como *deadlock*, não ocorrem só nos modelos de simulação, também ocorrem nas implementações reais de AGV. Existe muita investigação em algoritmos para o planeamento de trajetórias de AGV e para gestão de frotas, de forma a evitar estes constrangimentos. A fim de compreender o que é um ponto de bloqueio, a Figura 6.17 mostra um exemplo.

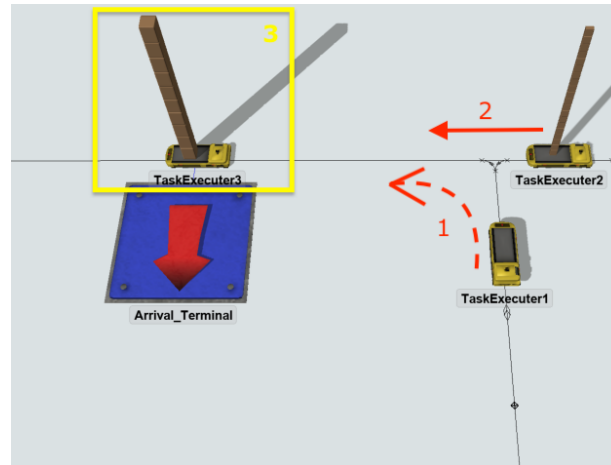


Figura 6.17: Exemplo de ponto de bloqueio para os AGV.

Imagine-se que existem três AGV, um deles colocado no Ponto de Controlo 1, outro sobre o Ponto de Controlo 2 e o outro a efetuar a descarga no Ponto de Controlo 3. O AGV1, assim como o AGV2, querem ir para o Ponto de Controlo 3, mas encontra-se ocupado pelo AGV3. Como resultado, o sistema bloqueia por causa de um impasse circular, onde os AGV não podem avançar.

Esta situação pode ser resolvida adicionando mais pontos de controlo no sistema, criando áreas de controlo para limitar o número de AGV numa zona ou deslocando e substituindo os pontos de controlo já existentes.

6.8 Conclusão do Capítulo 6

Para a programação apresentada do modelo desenvolvido no FlexSim foi necessário recorrer à planta do aeroporto, fazer uma análise detalhada da mesma e implementar o percurso dos AGV conforme as regras operacionais, assim como ter em conta todos os pressupostos apresentados anteriormente. Percebeu-se a necessidade da implementação de diversas atividades de fluxo, face aos erros de execução que foram surgindo, e foram exploradas as suas funcionalidades versáteis para a melhoria contínua do modelo.

Depois de várias otimizações e ensaios gerais, concluiu-se que o modelo se encontrava numa fase em que se pode confiar nos resultados, sem que houvesse qualquer anomalia ou *bugs* na programação que pudesse impactar os resultados no decorrer da simulação.

Capítulo 7

Análise e Discussão de Resultados

Apresentado e detalhado o modelo de simulação proposto pretende-se, ao longo deste capítulo, avaliar o impacto que este teve no funcionamento do sistema. Para o efeito será, em primeiro lugar, apresentado o planeamento dos voos para o dia a simular. Seguidamente, serão analisados alguns indicadores de desempenho com o objetivo de perceber a influência das medidas propostas na eficiência do sistema associado à variação do número de AGV. Por fim, será realizada uma análise comparativa dos resultados obtidos de maneira a encontrar o número ótimo de robôs para o cenário pretendido.

7.1 Planeamento dos Voos

De forma a obter resultados um pouco mais próximos da realidade, foi utilizado o documento, facultado pelo Professor André Siqueira, que permite verificar as horas de chegada e partida dos aviões durante um dia de trabalho. A Figura 7.1 representa o intervalo de tempo que as aeronaves se encontram no aeroporto, desde a sua aterragem até ao momento da partida. Por exemplo, o voo TSC754 /TSC755 (YYZ-OPO-YYZ) chega ao aeroporto às 08:00 da manhã e permanece no mesmo até ao fim do seu sombreado, ou seja, até às 09:45.

Para este estudo foram utilizados apenas voos de passageiros e excluídos do planeamento os voos de carga.

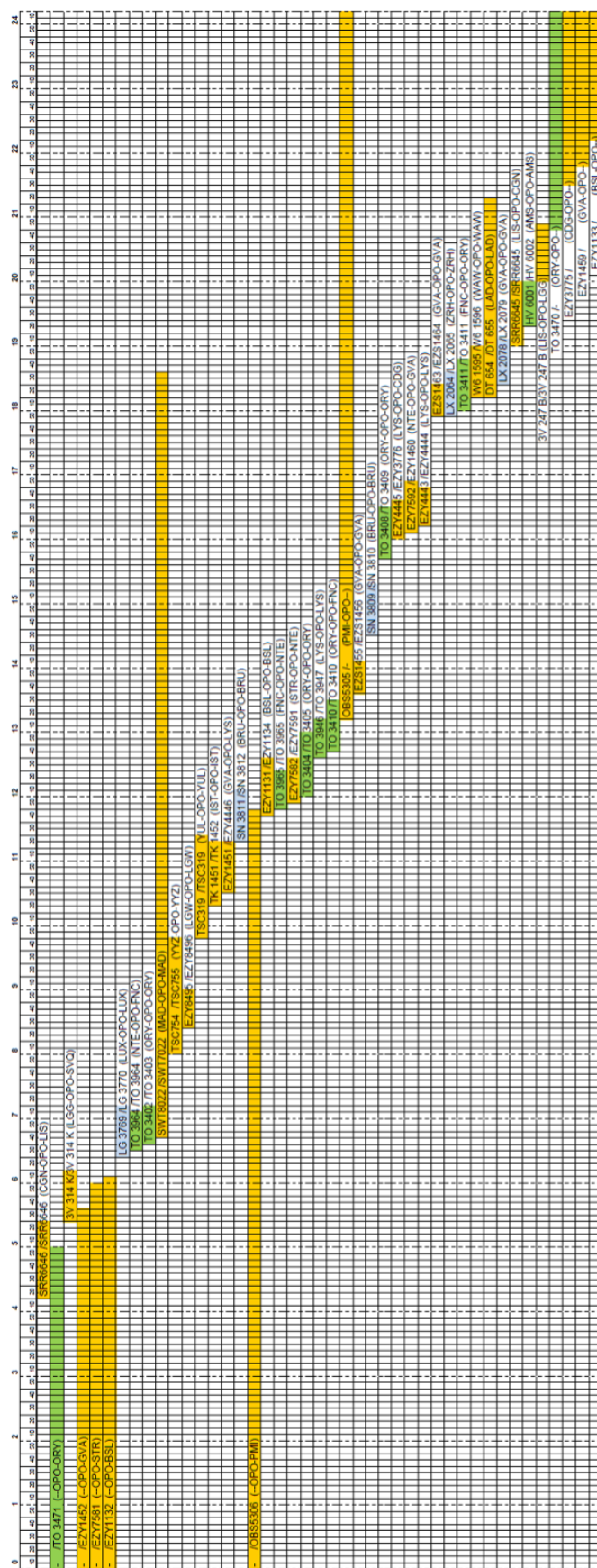


Figura 7.1: Planeamento do Movimento Diário de Aviões (MDA).

Visto que o FlexSim começa sempre a simulação do modelo às 00:00, relacionou-se o planeamento com o primeiro voo a chegar a partir do instante zero até ao fim dos voos. Na totalidade foram 86 voos realizados neste dia, sendo 43 voos de chegada e 43 de partida. De forma a não ficar nenhum avião no aeroporto, no fim da simulação, também se simulou a partida das últimas aeronaves presentes no planeamento.

A quantidade que surge em ambas as tabelas do Anexo B é o número de bagagens correspondente a cada voo de chegada e de partida. A quantidade de bagagens foi atribuída de forma aleatória, mas sempre com um número superior ao número médio de bagagens por cada voo de chegada, tal como verificado no mês em que houve acesso aos dados de planeamento dos voos apresentados, onde em média foi efetuado o transporte de 64 bagagens de porão por voo.

7.2 Cenários e Resultados Obtidos

Recorrendo à ferramenta de simulação, e após várias execuções do modelo, iniciou-se o sistema proposto com a quantidade de 10 AGV em funcionamento para a realização do transporte de bagagens. Optou-se por reduzir este número para verificar o comportamento do sistema e definiu-se 8 AGV como ponto de partida, devido aos resultados obtidos já mostrarem ser relevantes para discussão.

Nos cenários apresentados, a única variável do modelo é o número de AGV. Entre os cenários foi sendo aumentada a quantidade de dois AGV, atribuindo um AGV a cada ponto de carregamento e também de modo a representar uma maior diferença para apresentar na discussão de resultados. A avaliação foi realizada com o auxílio de uma tabela com o tempo de espera que as bagagens de chegada demoram do *stand* até chegar ao terminal, a utilização individual de cada AGV recorrendo ao gráfico de Gantt, um diagrama circular com a percentagem de utilização de cada AGV, um diagrama de setores que permite uma visão geral do sistema composto e ainda um gráfico de variáveis indicando o número de AGV utilizado ao longo do dia, permitindo detetar as horas de maior afluência.

Nenhum dos robôs está associado a um *stand* ou estação de carregamento, deslocando-se assim para o ponto de controlo mais próximo quando inicia ou finaliza a sua operação.

O FlexSim atribui a determinação *Blocked* ao tempo de espera em que o robô fica parado num ponto de controlo para permitir que outros AGV se desloquem em caso de cruzamentos. Enquanto que o termo *Idle* representa o tempo em que o AGV se encontra estacionário, ou seja, na estação de carga. Já a designação *Travel empty* é referente ao tempo em que o robô viaja vazio, por outro lado, o termo *Travel loaded* indica a viagem com a carga de bagagens.

7.2.1 Cenário A: 8 AGV

O gráfico da Figura 7.2 permite uma interpretação global do sistema proposto com 8 AGV. A percentagem indicada ao centro é o valor combinado de uso em viagem, ou seja, o valor do atributo *Travel empty* somado ao *Travel loaded*. É possível obter uma taxa de utilização útil neste sistema de 36,15%.

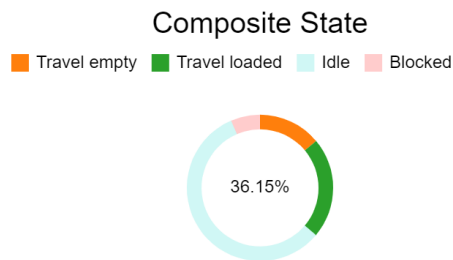


Figura 7.2: Valor combinado de utilização ativa com 8 AGV.

Após isso foi criado o gráfico da Figura 7.3 com o nível de utilização detalhado para cada AGV, denominado pelo *software* como *TaskExecutor*, de maneira a entender o que ocorreu no sistema simulado.

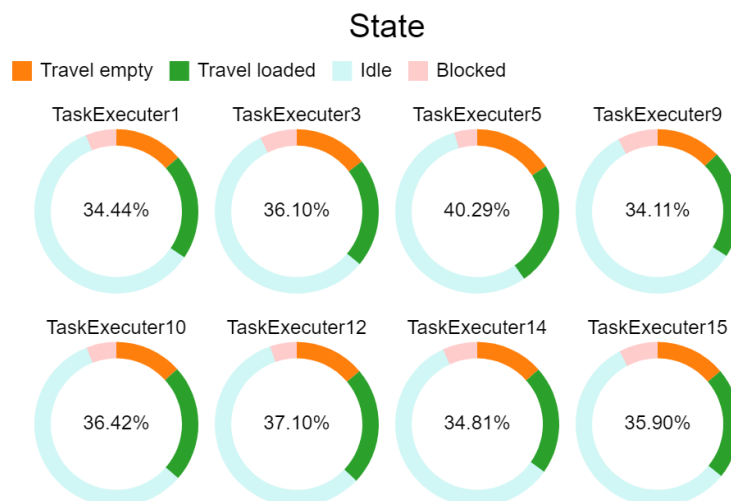


Figura 7.3: Utilização individual dos 8 AGV presentes no sistema.

O gráfico de Gantt da Figura 7.4 permite obter o acompanhamento de tarefas que cada AGV executou durante o dia de trabalho.

Olhando para o gráfico de duas variáveis da Figura 7.5 é possível concluir que a solução apresentada neste cenário despoleta resultados que na prática se podem tornar caóticos.

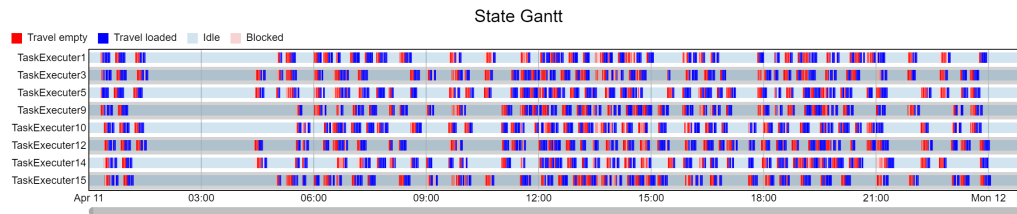


Figura 7.4: Gráfico de Gantt para 8 AGV em funcionamento ao longo do dia.

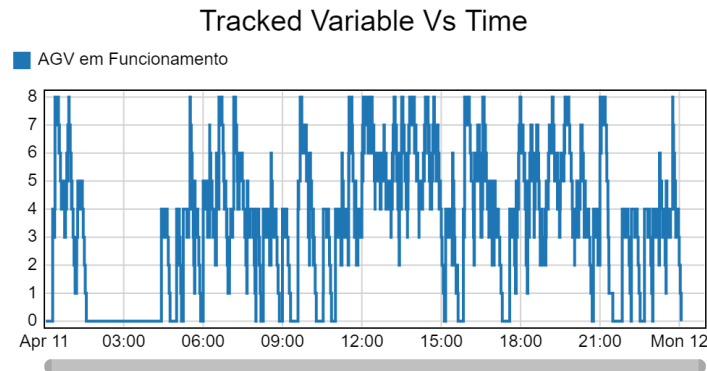


Figura 7.5: Número de AGV ativos em função do tempo.

Foram registados os tempos mínimo, médio e máximo de espera em cada um dos nove *stands* (local onde as bagagens possam estar), os dados foram extraídos e criada a Tabela 7.1.

Tabela 7.1: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 8 AGV.

8 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	43,12	32,99	57,87
Saída 2	41,72	31,25	55,90
Saída 3	40,90	29,33	53,47
Saída 4	38,97	27,48	50,43
Saída 5	37,46	25,86	48,76
Saída 6	35,46	24,85	46,44
Saída 7	34,44	23,63	45,30
Saída 8	32,38	22,27	43,77
Saída 9	31,57	20,20	42,95
Média	37,33	26,42	49,43

Neste cenário, o tempo médio de espera foi de 37,33 minutos. O tempo mínimo é referente às primeiras bagagens a serem transportadas, ou seja as bagagens prioritárias, obteve-se o tempo de espera médio de 26,42 minutos. O tempo

médio máximo que levou à conclusão do transporte de todas as bagagens foi de 49,43 minutos.

É compreensível, face aos resultados apresentados no tempo de espera, que este cenário A não seja aplicado. Este ensaio com 8 AGV foi realizado com o objetivo de conhecer até onde pode ir o nível de eficiência do sistema com base na quantidade de recursos aplicada ao projeto simulado neste documento.

7.2.2 Cenário B: 10 AGV

Este teste foi realizado aumentando o número de AGV para 10 e foi obtida uma taxa de utilização útil de 29,14%, assim mostrada pelo diagrama circular na Figura 7.6.

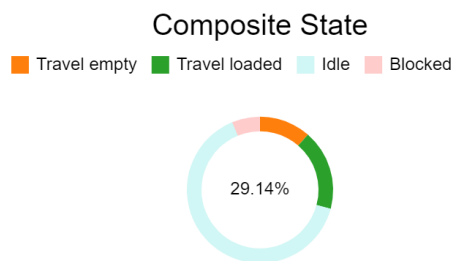


Figura 7.6: Valor combinado de utilização ativa de 10 AGV.

Pelo facto do número de AGV ser apenas 10, os gráficos individuais da Figura 7.7 mostram que foi conseguido um nivelamento na utilização entre os robôs.

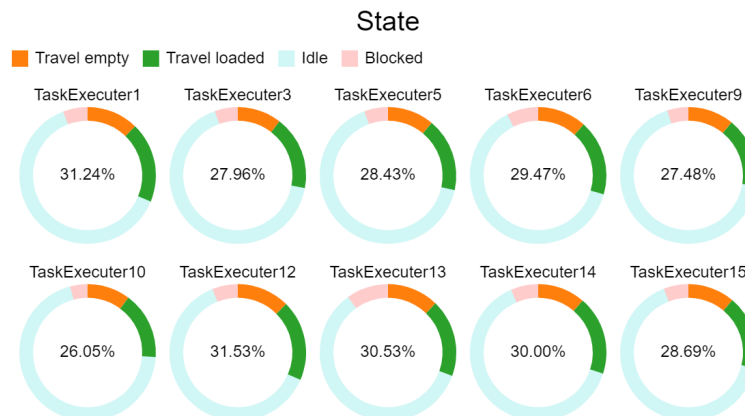


Figura 7.7: Utilização individual dos 10 AGV presentes no sistema.

O gráfico de Gantt da Figura 7.8 tem a principal vantagem de apontar, de modo simples e visual, como se encontra a distribuição dos AGV durante as suas atividades ao longo do dia de trabalho.

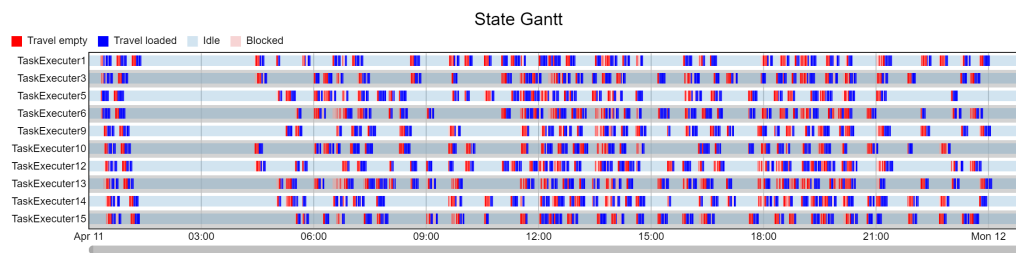


Figura 7.8: Gráfico de Gantt para 10 AGV em funcionamento ao longo do dia.

Através da análise da Figura 7.9 é possível concluir que, com o aumento da quantidade, todos os *Task executor* tornam-se cada vez mais imprescindíveis e são utilizados mais frequentemente.

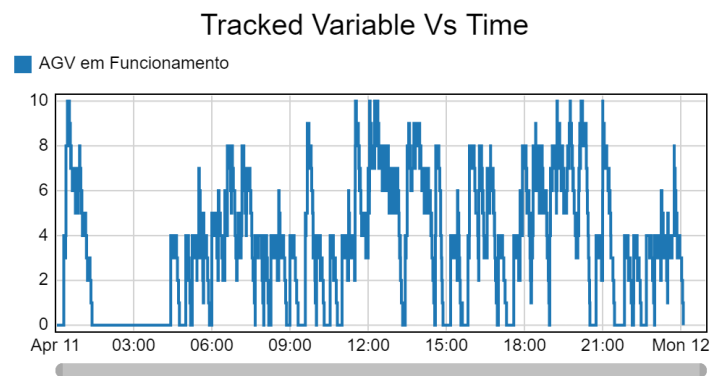


Figura 7.9: Número de AGV ativos em função do tempo.

Obtiveram-se os resultados da simulação, após alteração para 10 AGV, com os tempos apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.2: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 10 AGV.

10 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	38,36	26,99	53,24
Saída 2	37,17	25,18	52,40
Saída 3	36,67	24,31	49,20
Saída 4	34,75	23,49	48,16
Saída 5	35,05	22,05	46,75
Saída 6	33,19	21,86	45,90
Saída 7	31,56	19,66	43,05
Saída 8	30,84	18,00	40,87
Saída 9	29,41	17,14	39,11
Média	34,11	22,07	46,52

Da análise da tabela percebe-se que houve uma melhoria no tempo médio para 34,11 minutos e a média do valor mínimo passou para 22,07 minutos, tal como o médio máximo que diminuiu para 46,52 minutos.

Assim, pode-se concluir que com 10 AGV o tempo mínimo de espera pelas bagagens foi de 17,14 minutos obtido na saída 9 e o tempo máximo foi de 53,24 minutos na saída 1.

Tal como seria expectável, com o aumento do número de AGV, os tempos melhoraram, o que mostra uma boa direção na exploração dos cenários apresentados. Por outro lado, a taxa de utilização do sistema mostra que a estratégia cada vez mais contribui para a diminuição da taxa de utilização dos robôs, ficando estacionários a maior parte do tempo.

7.2.3 Cenário C: 12 AGV

De seguida, realizou-se o teste com 12 AGV. Assim, como se pode observar no diagrama de desempenho geral do sistema, na Figura 7.10, a taxa de utilização simulada foi de 24,16%.

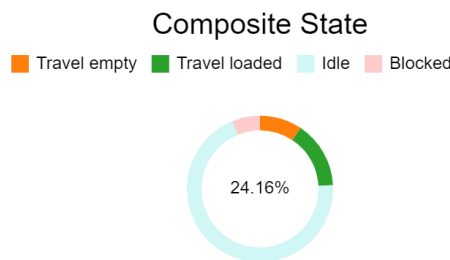


Figura 7.10: Valor combinado de utilização ativa de 12 AGV.

A Figura 7.11 apresenta os dados de utilização individual de cada um dos 12 AGV, com o aumento do atributo *Idle*.

É possível obter a percepção da utilização de cada robô ao longo do dia observando o gráfico de Gantt da Figura 7.12.

Com uma taxa de utilização pouco nivelada entre os AGV, na Figura 7.13 já se nota uma menor ocorrência no uso de todos os AGV presentes no sistema aumentando desta forma a inatividade dos robôs.

Verificou-se um prolongamento no intervalo de maior afluência, em relação ao cenário anterior, que agora se encontra entre as 12:00 e as 21:00. Isto é explicável pelo aumento do número de AGV e consequente redução dos tempos de operação de bagagens, como também se verifica na Tabela 7.3.

Assim, o tempo médio de espera foi 28,98 minutos. Houve um decréscimo na média dos tempos mínimos para 19,01 minutos, em relação ao cenário B, o

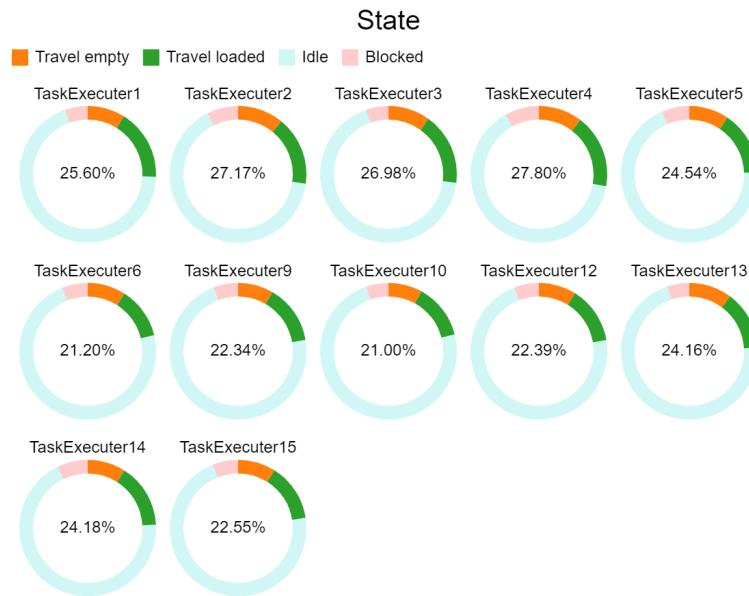


Figura 7.11: Utilização individual dos 12 AGV presentes no sistema.

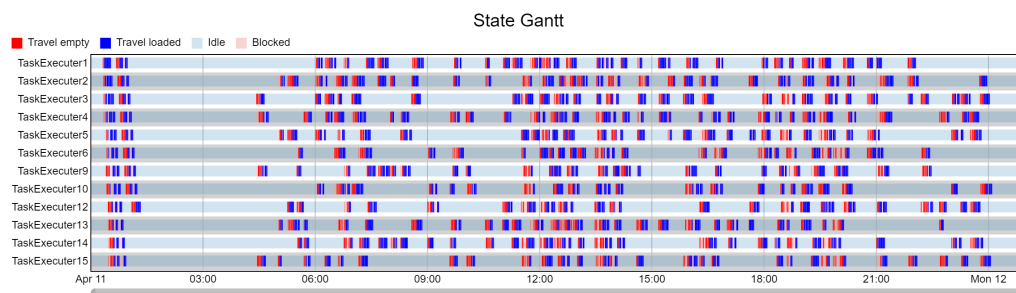


Figura 7.12: Gráfico de Gantt para 12 AGV em funcionamento ao longo do dia.

mesmo aconteceu para o tempo médio máximo onde o valor registado foi de 41,28 minutos.

De forma a poder comparar os dois tempos extremos, as bagagens prioritárias a chegar mais rápido obtiveram o tempo de 14,54 minutos identificado na Saída 9, todavia o tempo máximo de espera pelo último lote de bagagens não prioritárias atingiu os 45,94 minutos na Saída 1. Tendo em conta que os valores registados para a média incluem também os tempos para as aeronaves do tipo *Widebody* é possível que este valor máximo aconteça.

Através deste cenário, foi conseguido um nivelamento de utilização entre os AGV o que é um aspeto positivo. Começa também a ser notória a melhoria dos tempos de espera nas saídas dos *stands* durante a operação de bagagens.

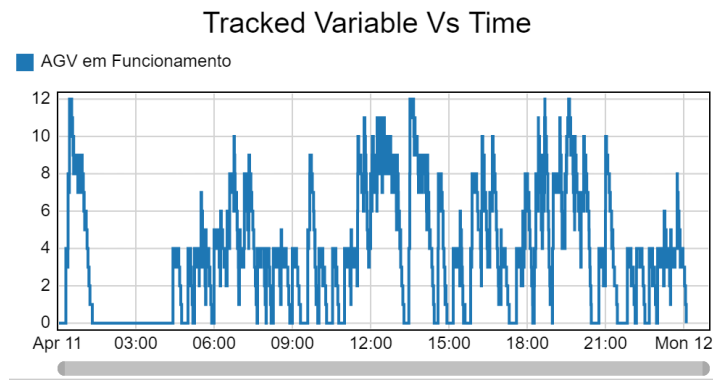


Figura 7.13: Número de AGV ativos em função do tempo.

Tabela 7.3: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 12 AGV.

12 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	33,46	24,53	45,94
Saída 2	31,47	22,23	45,53
Saída 3	29,96	21,31	44,58
Saída 4	30,35	19,94	42,61
Saída 5	27,95	18,80	41,32
Saída 6	28,39	17,46	39,30
Saída 7	27,01	16,65	38,05
Saída 8	26,84	15,62	37,87
Saída 9	25,41	14,54	36,61
Média	28,98	19,01	41,28

7.2.4 Cenário D: 14 AGV

O gráfico gerado da Figura 7.14 representa os resultados obtidos aumentando o número de AGV presentes no sistema para 14, onde é possível alcançar uma taxa de utilização útil de 21,30%.

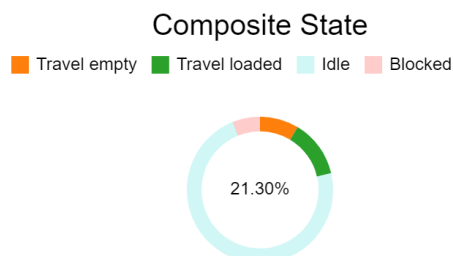


Figura 7.14: Valor combinado de utilização ativa de 14 AGV.

A Figura 7.15 permite analisar os resultados experimentais na utilização de cada robô em operação.

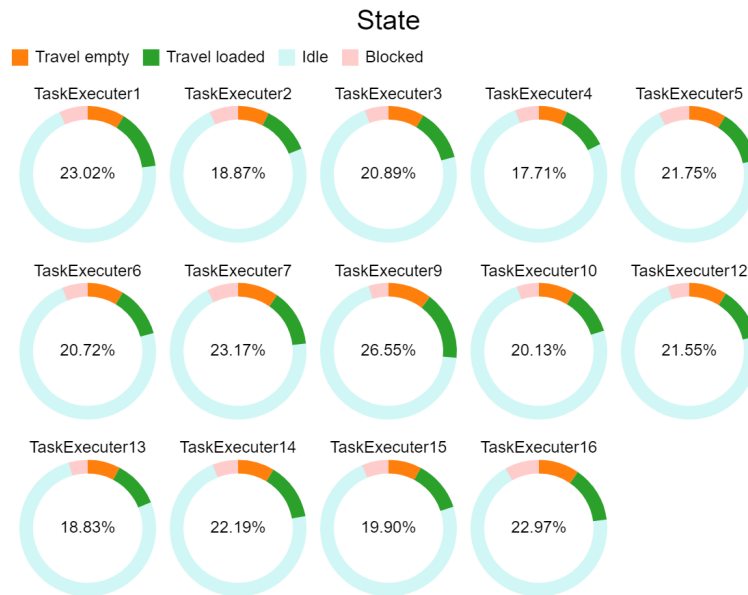


Figura 7.15: Utilização individual dos 14 AGV presentes no sistema.

Uma outra percepção da utilização dos AGV ao longo do dia de trabalho pode ser obtida pela Figura 7.16.

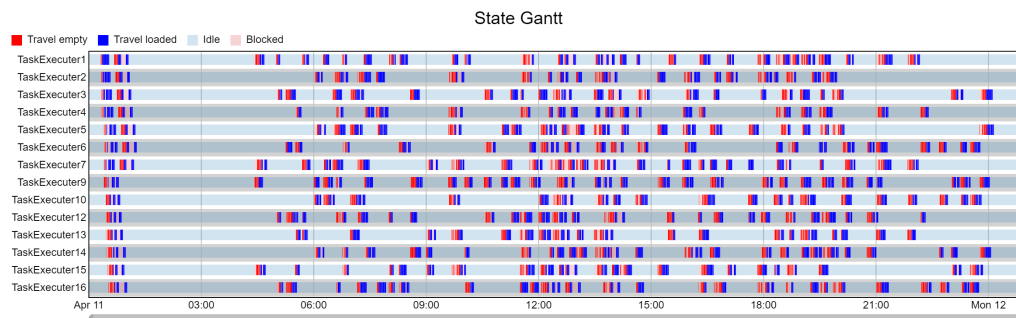


Figura 7.16: Gráfico de Gantt para 14 AGV em funcionamento ao longo do dia.

As horas de maior utilização, de acordo com a Figura 7.17, foi pelas 01:00 e nos períodos de tempo entre as 12:00 e 15:00 e também entre as 18:00 e 20:30.

Os resultados dos tempos para processamento das bagagens foram registrados na Tabela 7.4.

No cenário D, o tempo médio de espera foi de 25,21 minutos, acompanhado

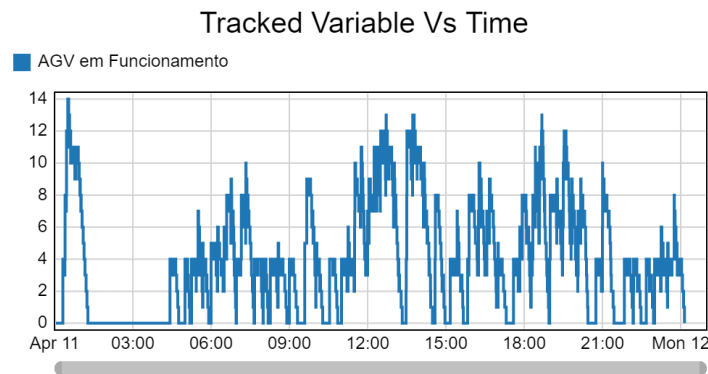


Figura 7.17: Número de AGV ativos em função do tempo.

da média do tempo mínimo de 16,81 minutos e pela média do tempo máximo de 38,31 minutos.

Verificou-se que o menor tempo para as bagagens prioritárias desceu ligeiramente para 13,94 minutos e o tempo máximo para entrega das últimas bagagens foi de 44,24 minutos.

Pode-se assim concluir que os resultados com 14 AGV presentes no sistema mostram uma progressão na qualidade do serviço, embora a taxa de utilização possa ser mais proveitosa nos cenários anteriores.

Tabela 7.4: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 14 AGV.

14 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	27,16	19,53	40,20
Saída 2	26,17	19,18	41,40
Saída 3	26,87	18,49	44,24
Saída 4	25,75	17,31	37,69
Saída 5	26,05	16,37	39,61
Saída 6	24,19	16,26	36,19
Saída 7	23,06	15,66	36,05
Saída 8	24,38	14,60	34,87
Saída 9	23,31	13,94	34,61
Média	25,21	16,81	38,31

7.2.5 Cenário E: 16 AGV

Foi realizado o teste com 16 AGV e verificou-se o comportamento do sistema, alcançando desta forma uma taxa de utilização de 16,24%, como é possível verificar na Figura 7.18.

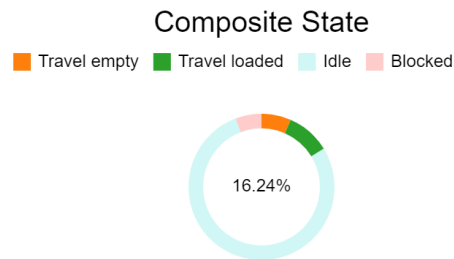


Figura 7.18: Valor combinado de utilização ativa com 16 AGV.

Com o aumento do número de AGV, através da análise da Figura 7.19, a paragem dos robôs de modo a evitar cruzamentos constatada no atributo *Blocked* é quase inexistente, e constata-se que os AGV 11 e 8 apresentaram a menor taxa de utilização.

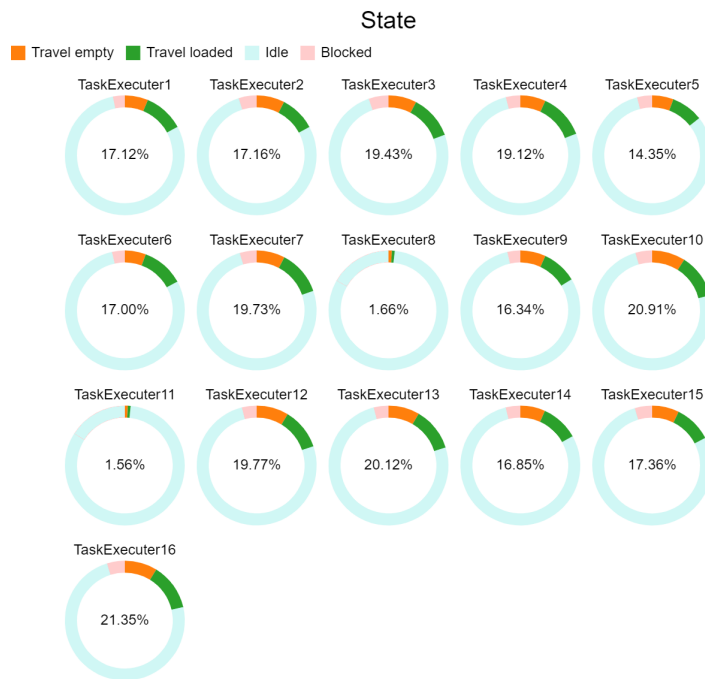


Figura 7.19: Utilização individual dos 16 AGV presentes no sistema.

Existe uma redução significativa da taxa de utilização útil dos AGV. O gráfico da Figura 7.20 deixa mais fácil o entendimento da utilização dos robôs incluídos no sistema. A análise deste gráfico permite também entender a baixa taxa de utilização dos AGV 11 e 8 detetada anteriormente, dado que o AGV 11 só foi utilizado uma vez e o AGV 8 duas.

Com auxílio do gráfico da Figura 7.21, foram analisados quais os picos de



Figura 7.20: Gráfico de Gantt para 16 AGV em funcionamento ao longo do dia.

maior afluência ao longo do dia estudado. Tendo o sistema recorrido ao número máximo de AGV por volta da 01:00, sendo depois necessário o número máximo de 15 e 14.

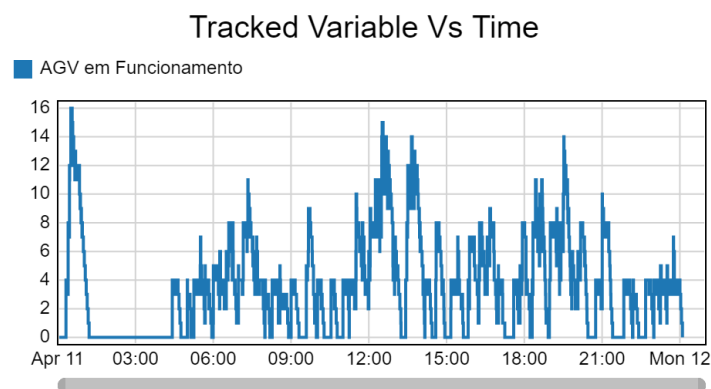


Figura 7.21: Número de AGV ativos em função do tempo.

Como é possível observar através da análise da Tabela 7.5, o tempo médio de espera é de 23,56 minutos, o tempo mínimo médio de 14,63 minutos e o máximo médio de 36,82 minutos.

Após esta análise com 16 AGV, pode-se concluir que o tempo de espera mínimo pelas bagagens de prioridade foi de 12,24 minutos e de 33,81 pelas bagagens não prioritárias, ambas na saída 9. Isto é explicável pelo facto dos AGV viajarem vazios durante a maior parte do percurso, o que significa que se deslocam maioritariamente à máxima velocidade atribuída. Uma vez que este *stand* está situado perto do terminal onde se efetua o descarregamento de bagagens, a viagem carregado (implica uma velocidade menor) acaba por ser mais pequena em relação aos *stands* anteriores.

Embora os tempos sejam bastante favoráveis, procurou-se ainda obter uma

Tabela 7.5: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 16 AGV.

16 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	25,35	16,73	40,03
Saída 2	25,17	16,18	39,69
Saída 3	24,37	15,91	38,12
Saída 4	23,15	15,43	37,60
Saída 5	24,75	14,85	37,19
Saída 6	23,49	14,03	35,58
Saída 7	21,76	13,22	34,80
Saída 8	22,64	13,04	34,57
Saída 9	21,41	12,24	33,81
Média	23,56	14,63	36,82

melhoria nos tempos. Como se viu neste cenário E, o sistema só recorre por uma vez ao número total de 16 AGV e verificou-se que com 17 AGV, tanto os tempos como o desempenho do sistema tornaram-se menos satisfatórios, originando maior entropia entre os AGV e aumentando o tempo de espera *Blocked*, fazendo com que não se consiga colocar as bagagens mais rapidamente no terminal, embora com um maior número de AGV.

7.2.6 Cenário Extra: Considerando a Extensão da Simulação

Para este cenário aumentou-se a duração da simulação para três dias, mantendo o número de AGV constante (igual a 16) e incluída a variação do número de bagagens de forma a garantir um serviço para o plano de voo disponibilizado no Anexo C.

Assumiu-se que no primeiro dia não haverá a chegada dos voos que já estão de véspera. Também no primeiro dia, os voos que chegam ao final do dia irão permanecer para o dia seguinte e foi atribuída a correspondência com os voos que pernoveram no aeroporto para lhes ser atribuída uma hora de partida no segundo dia.

O número de bagagens por voo passa a ser aleatório, de dia para dia, e obedece a uma distribuição normal de média igual ao número de bagagens dos cenários anteriores, mas com desvio padrão igual a 10%. Isto assegura que em diferentes dias os requisitos de transporte sejam diferentes e podem ser maiores ou menores.

Obteve-se assim a percentagem, indicada na Figura 7.22, para a taxa de utilização dos 16 AGV de 16,34%.

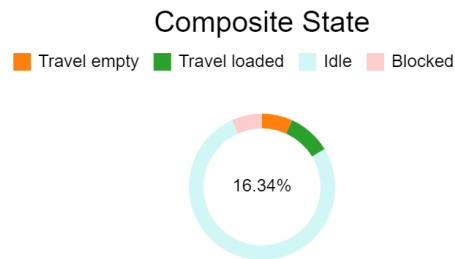


Figura 7.22: Valor combinado de utilização ativa para três dias com 16 AGV.

O gráfico da Figura 7.23 mostra a taxa de utilização detalhada para cada um dos 16 AGV.

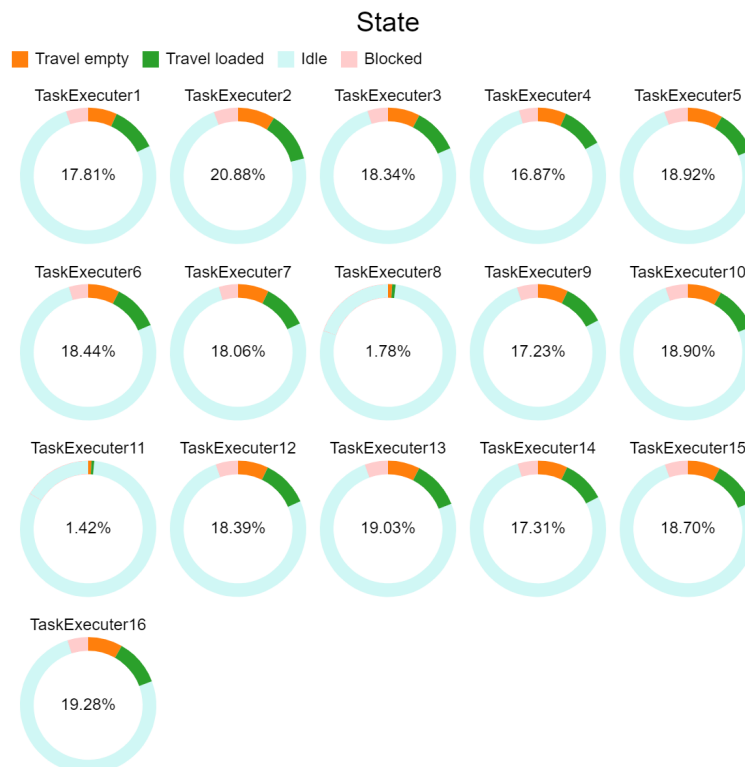


Figura 7.23: Utilização individual para três dias dos 16 AGV presentes no sistema.

Analisado pelos dois gráficos anteriores, existe um aumento da taxa de utilização, comparativamente ao cenário E. Está representado na Figura 7.24 a utilização de cada AGV ao longo do dia.

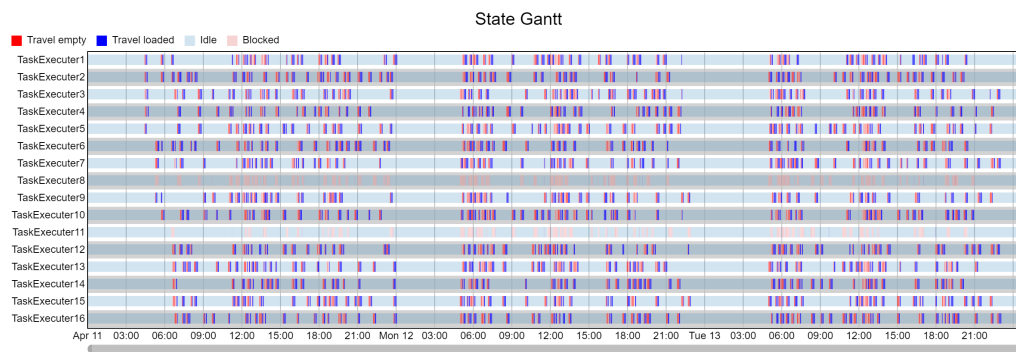


Figura 7.24: Gráfico de Gantt para 16 AGV em funcionamento ao longo dos três dias.

Dado que agora o cenário do planeamento de chegadas e partidas foi alterado, passando a existir voos que pernoitam no aeroporto, foi feita uma nova atribuição dos respetivos *stands* e a correção dos horários tanto nas chegadas como nas partidas.

Observa-se claramente, na Figura 7.25, os picos de movimento dos AGV ao segundo dia, começando no início da manhã (pelas 6:00), depois a seguir ao almoço e ao final da tarde. Também desapareceu o pico no primeiro dia, devido a não haver voos do dia anterior. Por último, deixou de haver repetição exatamente igual dos resultados ao longo dos vários dias, mostrando assim ser um cenário de evolução do sistema, face ao cenário anterior.

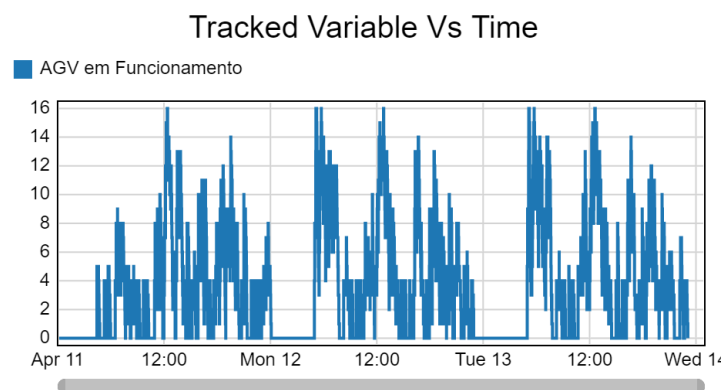


Figura 7.25: Número de AGV ativos em função do tempo durante três dias.

Face ao cenário considerando a extensão da duração da simulação e variação do número de bagagens, foram obtidos os tempos registados na Tabela 7.6.

Tabela 7.6: Resultados em minutos dos tempos obtidos com 16 AGV para três dias.

3 dias 16 AGV			
Saídas	Tempo médio	Tempo mínimo	Tempo máximo
Saída 1	25,78	17,07	40,31
Saída 2	25,39	16,67	39,87
Saída 3	24,98	16,12	38,74
Saída 4	23,75	15,74	37,73
Saída 5	24,75	14,91	37,34
Saída 6	23,53	14,23	35,43
Saída 7	21,69	13,24	34,88
Saída 8	22,96	13,08	34,63
Saída 9	21,64	12,24	33,81
Média	23,83	14,81	36,97

Desta forma, recorrendo a 16 AGV durante três dias, o tempo médio de espera pelas bagagens prioritárias foi de 14,81 minutos, enquanto que para as bagagens não prioritárias foi de 36,97 minutos e obteve-se um valor de tempo médio de 23,83 minutos para entrega das bagagens no terminal.

7.3 Número Ótimo de AGV

Uma vez concluídos os testes nos vários cenários, é tempo de analisar os resultados para obter o número ótimo de AGV. O número ótimo de AGV é aquele que permite ao sistema atingir uma melhoria na qualidade do serviço desejado no tempo exato. Além disso, deve ser acessível do ponto de vista prático e de qualidade de serviço, uma vez que pode ser que um AGV extra possa alcançar melhores resultados, mas não o suficiente para justificar melhoria do serviço. Para verificar isto, foram juntados os 5 cenários testados, onde cada cenário tem um número fixo de AGV.

Em particular, foram testados seis casos, comparando os resultados de oito a dezasseis AGV e acrescentou-se um caso de estudo com voos transitórios durante três dias. De modo a ser possível perceber a dimensão desta variação, foi necessário realizar uma comparação entre os vários cenários propostos. Assim, os resultados desta análise estão detalhados num gráfico de colunas agrupadas.

A Figura 7.26 mostra os resultados comparados da experiência. O modelo foi testado em seis cenários diferentes, onde o único parâmetro que foi alterado é o número de AGV e, por último, o número de dias mantendo a quantidade de AGV mais satisfatória.

Depois de comparar estes resultados, é possível descartar os cenários com 8, 10 e 12 AGV uma vez que os tempos obtidos tornam-se impraticáveis ao longo

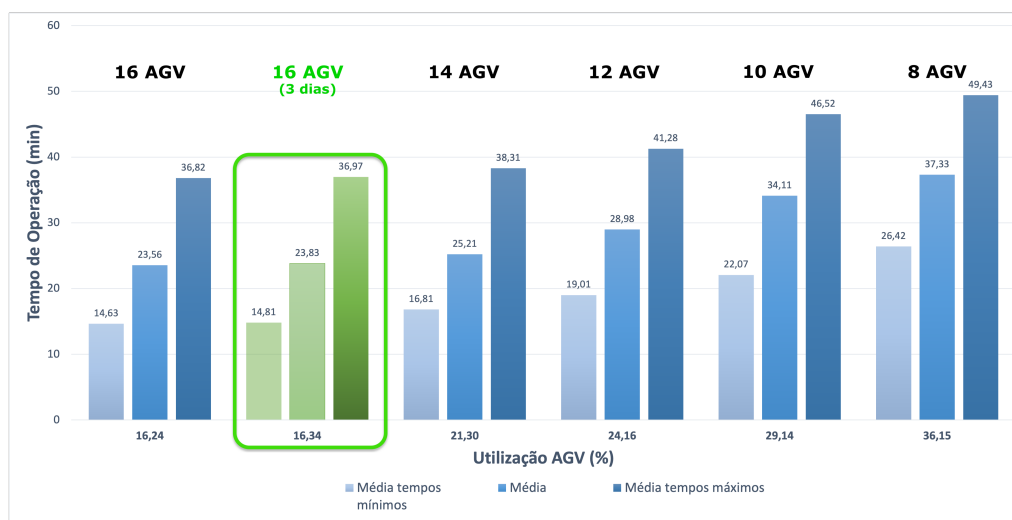


Figura 7.26: Dados de utilização dos AGV consoante o cenário.

da redução de recursos na qualidade do serviço.

O cenário com 16 AGV quando comparado com o cenário de 14 AGV, difere minimamente nos tempos médios. Inicialmente a diferença pode não parecer significativa, no entanto, é de notar que trata-se de um dia de trabalho completo, onde esta discrepância acaba por se tornar mais relevante criando um maior desfasamento na chegada de bagagens aos terminais.

Com a implementação do cenário Extra, assinalado com barras a verde, foi possível ampliar a análise para o caso realista em que as aeronaves pernoitam no aeroporto e ainda fazer variar aleatoriamente o número de bagagens a ser transportadas. Depois de correr o modelo para três dias, este cenário revela tempos muito semelhantes a um dia de trabalho, sendo possível obter bons resultados ainda que tenham sido incluídos voos de partida numa parte do dia com maior sobrecarga para a frota de AGV.

De acordo com os resultados das simulações, para a escolha do melhor cenário considerou-se apenas os tempos médios obtidos na otimização do modelo, tanto para bagagens prioritárias como não prioritárias. Assim sendo, o número ótimo de AGV, que permite acrescentar valor ao sistema fazendo-o atuar ao seu máximo desempenho, é de 16 robôs.

Face aos resultados, verificou-se que não trazia um impacto significativo em aumentar o número um a um, uma vez que o rendimento continuava a ser aproximado com o cenário anterior, por essa razão optou-se em realizar os testes adicionando dois AGV de cada vez para que fosse possível chegar mais rapidamente ao valor desejado.

À medida que foi aumentado o número de AGV, foi sendo reduzida a utilização individual dos *TaskExecuter* no sistema, o que representa uma menor taxa de rendimento e aproveitamento dos AGV. Por outro lado, existe o impacto significativo na redução do tempo de espera pelas bagagens, quer prioritárias, quer não prioritárias.

7.4 Conclusão do Capítulo 7

Após a análise dos resultados da simulação, percebe-se que a taxa de utilização mais recomendável seja a do cenário E com 16 AGV presentes no sistema. Embora seja a que tenha a percentagem mais baixa é a que permite colocar as bagagens mais rapidamente no terminal no menor tempo possível. O cenário Extra veio confirmar que esta quantidade de AGV se torna viável permitindo ser a utilizada na conceção do sistema.

Durante o estudo foi sempre garantido os 20% de utilização necessários para o carregamento do AGV, representado pela designação *Idle* e a maior taxa de utilização útil registada ronda os 40%.

O facto da taxa de utilização aumentar, por si só, não justifica a redução do número de robôs, uma vez que em termos de gestão de bagagens há uma diferença muito grande no que aos tempos diz respeito, o que é completamente impraticável em qualquer aeroporto. Deste modo, é vantajoso ter mais AGV, mesmo que pouco utilizados, de maneira a melhorar os tempos praticados. O mesmo acontece nos aeroportos com os equipamentos de transporte tradicionais, em que o tempo que estes se encontram parados é muito significativo.

Capítulo 8

Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões finais, algumas propostas para desenvolvimentos futuros e, por último, será feita uma reflexão pessoal sobre o trabalho desenvolvido.

8.1 Conclusão do Projeto

A aprendizagem de uma ferramenta de *software* nem sempre é uma tarefa fácil. Na verdade, esta parte foi a que levou mais tempo, pois há centenas de funcionalidades a explorar e a aprender. Mas uma vez que o conhecimento é adquirido, a construção de um modelo é uma tarefa viável a curto prazo. Um modelo realista em 3D com módulos AGV fornece resultados e gráficos que podem ajudar a compreender o funcionamento do modelo, facilitando a transferência de conhecimento e a experiência de visualização em como o sistema se comporta. Além disso, é possível obter informações em tempo real sobre tempos de transporte entre pontos de controlo, permite analisar o fluxo de trabalho e obter todo o tipo de dados relativos à utilização de AGV, o que ajudará a adquirir uma melhor compreensão do sistema.

O *layout* foi considerado como fixo, e a sua otimização está fora do âmbito desta tese, mas esta ferramenta de simulação permitirá ao aeroporto alcançar alternativas ao *layout* e resultados na conceção de um sistema AGV. Diferentes situações podem ser testadas a fim de tentar vários cenários de simulação.

O ambiente aeroportuário utiliza mão-de-obra intensiva, altamente qualificada e de difícil substituição. Toda a formação e certificação do pessoal envolvido (incluindo os novos funcionários) obriga a tempo e custos elevados. À medida que a utilização da tecnologia neste meio aumenta, é necessário entender se o

papel do trabalho humano sofre na coexistência com os tipos de robôs no mesmo espaço.

A proposta deste trabalho objetivamente “acrescenta valor” ao Mercado. Assim sendo, a prioridade do sistema é a eficácia da solução, com as redundâncias necessárias para manutenção da eficiência do mesmo.

8.2 Ideias para Desenvolvimentos Futuros

A melhoria contínua e o aumento da eficiência na qualidade dos serviços deve ser uma preocupação constante no aeroporto.

Propõe-se assim que sejam estudadas e pensadas quatro principais ideias para desenvolvimentos, de forma a mais tarde virem a ser implementadas:

- implementar rotas de dois sentidos no modelo (ida e volta), para reduzir o tempo de viagem com o AGV carregado, uma vez que se desloca com velocidade menor;
- fazer tratamento de dados para o estudo das aeronaves do tipo *Narrowbody* e *Widebody* em separado para análise dos diferentes cenários, de modo a resultados da média não fiquem misturados. Fornecendo assim a opção de escolha em melhorar a qualidade de serviço no que fosse mais prioritário, quer seja utilizar AGV para a recolha de bagagens em ambos os voos ou apenas num deles;
- analisar cenários com diferentes planeamentos diários de voos;
- melhorar a lógica de recarga da bateria dos AGV para que o sistema se comporte ainda mais próximo da realidade.

Finalmente, o facto de não conhecer na realidade o espaço leva a que o estudo se torne um pouco abstrato. A visita ao aeroporto para adquirir o conhecimento do terreno e ter outra perceção da logística que envolve o tratamento de bagagens poderia trazer benefícios ao estudo e desenvolvimento tratado nesta dissertação.

8.3 Reflexão Pessoal

No plano pessoal, a experiência de realizar este projeto de dissertação foi bastante enriquecedora. Apesar de um tema totalmente distinto do ambiente académico, a passagem de conhecimentos adquirido no mundo aeroportuário, revelou-se muito positiva. Com o passar do tempo, foi notória a motivação pelo tópico e facilidade de integração com a equipa de professores orientadores e também o sentido de responsabilidade enquanto profissional foi sendo desenvolvido. Gostei do trabalho

que foi sendo desenvolvido, sentindo-me sempre motivado para mais uma reunião onde mostrava a cada duas semanas o meu progresso até ao fim do projeto.

Foi sem dúvida um desafio e recompensador realizar tanto o mestrado como esta dissertação em modo trabalhador/estudante, o que contribuiu em muito para aumentar a bagagem de conhecimento que me acompanha.

Sinto-me agradecido e feliz por ter concluído esta etapa importante na minha vida académica e, acima de tudo, de forma positiva, tendo sido atingidos os objetivos que me propuseram.

Referências Bibliográficas

- [1] Specter, Sara, “Picking the right AGV for your operation depends on your handling needs.” <http://www.warehouseautomation.org/2019/07/09/picking-the-right-agv-for-your-operation-depends-on-your-handling-needs/>, Last access: February 7, 2022 2019. [cited on p. v, 7, 8, 9]
- [2] Fairchild, Mark, “What Are Mobile Robots, and How Can They Benefit Your Business?.” <https://www.howtorobot.com/expert-insight/autonomous-mobile-robots>, Last access: February 28, 2022 2020. [cited on p. v, 9, 10]
- [3] Oriental Motor U.S.A. Corp, “AGV Brushless DC Motor Benefits.” <https://www.orientalmotor.com/brushless-dc-motors-gear-motors/technology/brushless-dc-motors-agv-designs.html>, Last access: February 28, 2022 2020. [cited on p. v, 10, 11, 12]
- [4] OmniRobots, “Mecanum Wheels Archives: Omni-Robot.” https://omni-robots.com/product_cat/mecanum-wheels/, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. v, 12]
- [5] H. Taheri, B. Qiao, and N. Ghaeminezhad, “Kinematic model of a four mecanum wheeled mobile robot,” *International Journal of Computer Applications*, doi: 10.5120/19804-1586 (2015). [cited on p. v, 13]
- [6] Suzhou Resbot Technology, “What is an AGV System?.” <http://www.resbot.cn/newsinfo/1538980.html>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. v, 13, 14]
- [7] Shenzhen wellwit Robotics, “AGV handling robot mobile robot laser AGV.” <https://www.wellwit.com.cn/en/h-col-103.html>, Last access: February 28, 2022 2020. [cited on p. v, 15, 16]

- [8] Rayner, Rachel, “AGV Navigation Methods 1: Line Following and Tags.” <https://bluebotics.com/agv-navigation-line-following-tags/>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. v, 16, 17]
- [9] Rayner, Rachel, “AGV Navigation Methods 2: Virtual Path Following Technologies.” <https://bluebotics.com/agv-navigation-methods-virtual-path-following/>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. v, 18]
- [10] Tella, Alfredo Pastor, “Understanding AGV Safety Systems (standards, sensors, rules) What’s important to know?.” <https://www.agvnetwork.com/automated-guided-vehicles-safety-systems#measures-devices>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. v, 19, 20]
- [11] R. Norcross, R. Bostelman, and J. Falco, “Automated guided vehicle bumper test method development,” *National Institute of Standards and Technology*, 2015. [cited on p. v, 21]
- [12] OMRON Corporation, “Emergency Stop Switches.” <https://www.ia.omron.com/products/category/safety-components/emergency-stop-switches/index.html>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. v, 22]
- [13] Gridbots Technologies, “Autobot Lifter.” <https://www.gridbots.com/gridbots-autobots.html>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. v, 22]
- [14] ECA Group, “ECA GROUP’s AGV for indoor and outdoor usage.” <https://www.ecagroup.com/en/solutions/automated-guided-vehicle-agv>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. v, 26]
- [15] APM Terminals, “Rotterdam Maasvlakte II - Our Terminal.” <https://www.apmterminals.com/en/maasvlakte/about/our-terminal>, Last access: February 28, 2022 2015. [cited on p. v, 27]
- [16] Park, Kyunghee, “The Airport of the Future Is Here. And It Doesn’t Need Humans.” <https://www.bloomberg.com/news/features/2018-09-16/singapore-s-changi-airport-is-partly-run-by-robots>, Last access: February 28, 2022 2018. [cited on p. v, 28]
- [17] Bostick, Nicholas, “DFW International Airport Is Testing the World’s First Robot Baggage Handlers.” <https://www.dallasobserver.com/news/dfw-international-airport-is-testing-the-worlds-first-robot-baggage-handlers-11703209>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. v, 29]

- [18] Thornton, John, “Robots enhance London Luton Airport cleaning regime.” <https://www.roboticsandinnovation.co.uk/news/cleaning-sanitation/robots-enhance-london-luton-airport-cleaning-regime.html>, Last access: February 28, 2022 2020. [cited on p. vi, 29]
- [19] Deletter, Emily, “CVG airport now has food delivery robots.” <https://eu.cincinnati.com/story/news/2021/12/16/cvg-cincinnati-airport-ottobot-food-delivery-robots/8925637002/>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. vi, 30]
- [20] Stanley Robotics, “The future of smart outdoor robotic storage.” <https://www.stanley-robotics.com/airports/>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. vi, 31]
- [21] FlexSim Software Products, Inc, “FlexSim 3D Simulation Modeling Software.” <https://www.flexsim.com/pt/flexsim/>, Last access: March 01, 2022 2022. [cited on p. vi, 34]
- [22] Zhiliaeva, Anastasiia, “AGVs and transporters – Learning the Material Handling Library (part 2).” <https://www.anylogic.com/blog/transporters-learning-to-use-the-material-handling-library-part-2/>, Last access: March 01, 2022 2018. [cited on p. vi, 36]
- [23] A. Teilans, Y. Merkuriev, and A. Grinbergs, “Simulation of uml models using arena,” *Proc. of the 6th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering*, doi: 10.2817/215726152 (2007). [cited on p. vi, 36]
- [24] M. Pekarcikova, P. Trebuna, M. Kliment, and M. Dic, “Solution of bottlenecks in the logistics flow by applying the kanban module in the tecnomatix plant simulation software,” *Proc. of the 6th WSEAS International Conference on System Science and Simulation in Engineering*, doi:10.3390/su13147989 (2021). [cited on p. vi, 37]
- [25] Simio LLC, “Student Simulation Competition Winners - May 2016.” <https://www.simio.com/academics/student-competition/May2016/index.php>, Last access: May 24, 2022 2016. [cited on p. vi, 38]
- [26] FRED AGV, “The Past, Present and Future of AGV.” <https://www.fredagv.com/news/the-past-present-and-future-of-agvs/>, Last access: February 7, 2022 2020. [cited on p. 5, 6]
- [27] Reconditioned Forklifts Blog, “History of Automated Guided Vehicles.” <http://www.reconditionedforklifts.com/blog/forklift-history-2/>

- history-automated-guided-vehicles, Last access: February 7, 2022 2013. [cited on p. 6]
- [28] Handling Specialty, “What is an Automated Guided Vehicle System?.” <https://www.handling.com/company/blog/automated-guided-vehicles>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. 13]
- [29] 6 River Systems, LLC, “Automated Guided Vehicles (AGV) Meaning and Types.” <https://6river.com/what-are-automated-guided-vehicles/>, Last access: February 28, 2022 2022. [cited on p. 15]
- [30] International Organization for Standardization, “ISO 3691-4:2020.” <https://www.iso.org/standard/70660.html>, Last access: February 28, 2022 2020. [cited on p. 19, 22]
- [31] S. MD and M. Haschak, “Cyber security and its implication on material handling and logistics,” *Solutions Community and the College Industry Council on Material Handling Education (CICMHE)*, doi:10.1016/j.csi.2019.09.006 (2019). [cited on p. 23]
- [32] M. Javed, F. Muram, S. Punnekkat, and H. Hansson, “Safe and secure platooning of automated guided vehicles in industry 4.0,” *Journal of Systems Architecture*, doi:10.1016/j.sysarc.2021.102309 (2021). [cited on p. 23]
- [33] Encyclopedia.com, “Encyclopedia of Small Business.” <https://www.encyclopedia.com/entrepreneurs/encyclopedias-almanacs-transcripts-and-maps/automated-guided-vehicle-agv>, Last access: February 28, 2022 2021. [cited on p. 25]
- [34] Vincent, James, “Robot valets are now parking cars in one of France’s busiest airports.” <https://www.theverge.com/2019/3/15/18200292/robot-valet-parking-airport-stanley-robotics-france-lyon>, Last access: February 28, 2022 2019. [cited on p. 31]
- [35] M. Rossetti, *Simulation Modeling and Arena (3ª Edição)*. Fayetteville, Estados Unidos: University of Arkansas Open Educational Resources, 2021. [cited on p. 34]
- [36] Simio LLC, “Simio Simulation Software.” <https://www.anylogic.com/blog/transporters-learning-to-use-the-material-handling-library-part-2/>, Last access: May 24, 2022 2022. [cited on p. 38]
- [37] NAV Portugal - Navegação Aérea, “Porto LPPR manual VFR 14 - 1 - NAV.” <https://www.nav.pt/docs/AIS/aerodromos/portoAD.pdf>, August, 2021 Last access: July, 2022. [cited on p. 53]

Anexo A

Process Flow da Simulação

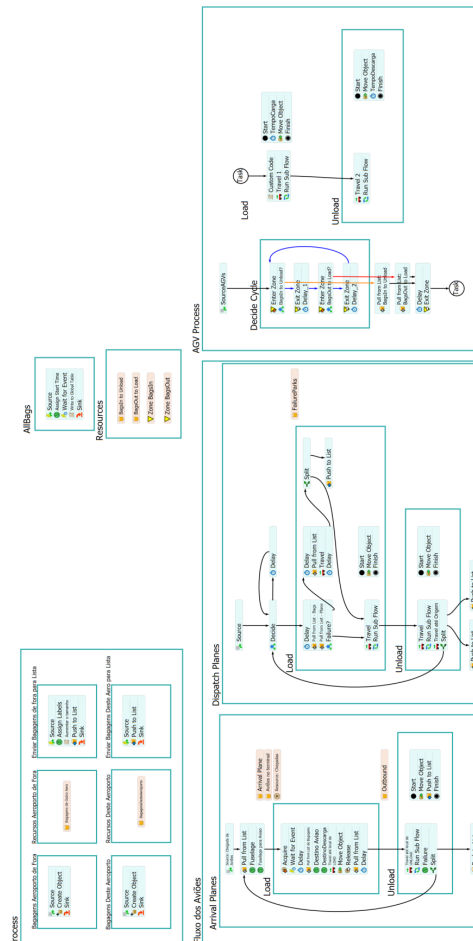


Figura A.1: Aspecto final do *Process Flow* no FlexSim.

Anexo B

FlexSim: Schedule Source

Time	Name	Quantity	DestinoFora
50		78	1
350		76	2
650		75	3
950		68	4
1250		82	5
15000		71	6
19500		68	7
22800		74	8
23400		73	9
24000		73	1
24600		80	2
28800		79	3
30000		77	4
33600		81	6
35100		73	7
37000		75	8
40500		82	9
42300		73	1
42900		66	5
43500		73	3
44100		74	4
45600		76	2
46200		76	5
47400		74	6
48600		73	7
51600		72	8
54600		71	9
56100		76	1
57600		80	3
58800		79	4
62400		78	5
63600		77	6
64800		76	7
65400		70	8
66000		83	9
67200		68	1
68400		72	2
69300		74	3
71400		76	4
74700		77	5
77700		78	6
78900		79	7
80700		76	8

Time	Name	Quantity	Destino
18000		74	1
18900		76	6
19800		68	2
21600		83	3
22500		80	4
23400		71	7
26400		72	8
27600		73	9
28800		75	1
32400		74	4
34800		77	3
39600		78	6
40500		79	7
41400		80	8
42300		80	5
43200		68	9
44100		69	1
45000		72	2
45900		78	5
46800		79	3
48600		80	4
49500		74	5
51000		75	6
52500		72	7
54600		71	8
57000		67	9
58500		75	1
60000		74	3
61200		66	4
64200		79	5
66000		78	6
67200		77	2
68400		78	7
69300		76	8
70200		78	1
71400		78	2
72600		68	3
74700		78	4
75600		67	9
82800		78	5
83700		72	6
84600		76	7
85500		77	8

Figura B.1: *Schedule Source*, a) chegadas, b) partidas.

Anexo C

Planeamento do Cenário Extra

Chegadas				
	Time	Quantity	Destino	Hora
1 dia	15000	67	6	4,17
	19500	75	7	5,42
	22800	76	8	6,33
	23400	74	9	6,50
	24000	79	1	6,67
	24600	69	2	6,83
	28800	71	3	8,00
	30000	77	4	8,33
	35100	69	7	9,75
	37000	78	8	10,28
	37600	82	5	10,44
	40500	68	9	11,25
	42300	78	1	11,75
	42900	70	5	11,92
	43500	80	3	12,08
	44100	71	4	12,25
	45600	77	2	12,67
	46200	79	5	12,83
Pernoitar	47400	68	6	13,17
	48600	69	7	13,50
	52200	70	8	14,50
	55600	74	9	15,44
	57100	76	1	15,86
	57800	68	3	16,06
	59000	73	4	16,39
	62400	83	5	17,33
	63600	68	7	17,67
	64800	71	8	18,00
Última chegada com partida no mesmo dia	65500	79	9	18,19
	66200	69	1	18,39
	67800	73	2	18,83
	69300	73	4	19,25
	71650	66	5	19,90
Pernoitar	74700	79	7	20,75
Pernoitar	77700	83	8	21,58
Pernoitar	78900	81	9	21,92
Pernoitar	80700	74	1	22,42
2 dia	101400	76	4	4,17
	105900	73	7	5,42
	109200	76	8	6,33
	109800	66	9	6,50
	110400	68	1	6,67
	111000	68	2	6,83
	115200	71	3	8,00
	116400	67	4	8,33
	121500	67	7	9,75
	123400	69	8	10,28
	124000	71	5	10,44
	126900	79	9	11,25

Partidas				
	Time	Quantity	Destino	Hora
1 dia	18900	82	6	5,25
	23000	72	7	6,39
	25400	66	9	7,06
	26200	78	1	7,28
	26800	66	8	7,44
	32400	77	4	9,00
	34800	76	3	9,67
	40500	75	7	11,25
	41400	80	8	11,50
	42300	77	5	11,75
	43200	66	9	12,00
	44100	83	5	12,25
	45000	82	1	12,50
	45900	69	3	12,75
	46800	77	4	13,00
	48600	79	2	13,50
	49500	66	5	13,75
	51000	80	7	14,17
	54600	72	8	15,17
	58600	68	9	16,28
	59400	76	1	16,50
	60000	74	4	16,67
	61200	66	3	17,00
	64600	80	5	17,94
	66200	67	7	18,39
	67200	66	2	18,67
	68200	73	8	18,94
	69300	70	1	19,25
	71500	76	2	19,86
	72600	83	4	20,17
	74700	74	5	20,75
Última partida do dia	76300	69	9	21,19
2 dia	104400	74	7	5,00
	105300	68	5	5,25
	106200	71	8	5,50
	108000	67	9	6,00
	108900	73	1	6,25
	109400	76	7	6,39
	111800	70	8	7,06
	112600	69	1	7,28
	113200	75	9	7,44
	118800	83	4	9,00
	121200	69	3	9,67
	126000	73	6	11,00
	126900	82	7	11,25
	127800	75	8	11,50
	128700	78	5	11,75
	129600	68	9	12,00

Figura C.1: *Schedule Source* cenário extra, a) chegadas, b) partidas.

	128700	73	1	11,75		130500	82	1	12,25
	129300	83	5	11,92		131400	74	2	12,50
	129900	69	3	12,08		132300	68	5	12,75
	130500	75	4	12,25		133200	81	3	13,00
	132000	67	2	12,67		135000	71	4	13,50
	132600	77	5	12,83		135900	74	5	13,75
Pernoitar	133800	70	6	13,17		137400	73	6	14,17
	135000	75	7	13,50		141000	70	8	15,17
	138600	69	8	14,50		145000	66	9	16,28
	142000	83	9	15,44		145800	82	1	16,50
	143500	69	1	15,86		146400	74	3	16,67
	144200	67	3	16,06		147600	71	4	17,00
	145400	71	4	16,39		151000	71	5	17,94
	148800	73	5	17,33		152600	76	6	18,39
	150000	82	7	17,67		153600	69	2	18,67
	151200	66	8	18,00		154600	73	7	18,94
Última chegada com partida no mesmo dia	151900	80	9	18,19		155700	73	8	19,25
	152600	68	1	18,39		157900	77	2	19,86
	154200	76	2	18,83		159000	81	3	20,17
	155700	82	4	19,25		161100	70	4	20,75
	158050	66	5	19,90		162700	77	9	21,19
Pernoitar	161100	79	7	20,75	3 dia	190800	79	7	5,00
Pernoitar	164100	81	8	21,58		191700	78	5	5,25
Pernoitar	165300	80	9	21,92		192600	83	8	5,50
Pernoitar	167100	82	1	22,42		194400	83	9	6,00
3 dia	187800	71	4	4,17		195300	78	1	6,25
	192300	73	7	5,42		195800	74	7	6,39
	195600	66	8	6,33		198200	67	8	7,06
	196200	72	9	6,50		199000	75	1	7,28
	196800	68	1	6,67		199600	72	9	7,44
	197400	68	2	6,83		205200	66	4	9,00
	201600	76	3	8,00		207600	81	3	9,67
	202800	71	4	8,33		212400	78	6	11,00
	207900	76	7	9,75		213300	83	7	11,25
	209800	82	8	10,28		214200	81	8	11,50
	210400	72	5	10,44		215100	79	5	11,75
	213300	74	9	11,25		216000	67	9	12,00
	215100	71	1	11,75		216900	67	1	12,25
	215700	81	5	11,92		217800	73	2	12,50
	216300	80	3	12,08		218700	78	5	12,75
	216900	82	4	12,25		219600	83	3	13,00
	218400	76	2	12,67		221400	82	4	13,50
	219000	83	5	12,83		222300	70	5	13,75
	220200	70	6	13,17		223800	71	6	14,17
	221400	68	7	13,50		227400	75	8	15,17
	225000	77	8	14,50		231400	75	9	16,28
	228400	83	9	15,44		232200	79	1	16,50
	229900	75	1	15,86		232800	70	3	16,67
	230600	70	3	16,06		234000	66	4	17,00
	231800	79	4	16,39		237400	66	5	17,94
	235200	71	5	17,33		239000	75	6	18,39
						240000	82	2	18,67

Figura C.2: *Schedule Source* cenário extra, a) chegadas, b) partidas.