



# O problema da criação de ciclos de condução para a simulação de autocarros elétricos e a hidrogénio

**JOÃO MIGUEL MENDES TEIXEIRA PINTO**

Fevereiro de 2024

# O PROBLEMA DA CRIAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE AUTOCARROS ELÉTRICOS E A HIDROGÉNIO

João Miguel Mendes Teixeira Pinto

**2024**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

# O PROBLEMA DA CRIAÇÃO DE CICLOS DE CONDUÇÃO PARA A SIMULAÇÃO DE AUTOCARROS ELÉTRICOS E A HIDROGÉNIO

João Miguel Mendes Teixeira Pinto

Estudante n.º 1180738

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Professor Doutor Manuel Pereira Lopes

**2024**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

isen

P.PORTO

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho apenas foi possível graças à contribuição de algumas pessoas, às quais não posso deixar de prestar o meu reconhecimento.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, o Professor Manuel Pereira Lopes, pela orientação, disponibilidade, sugestões pertinentes e conhecimentos transmitidos ao longo da realização deste trabalho.

À Carla Reinho e ao Tiago Rocha pela orientação, acompanhamento, sugestões e todo o conhecimento transmitido.

À administração da CaetanoBus, pela oportunidade disponibilizada para a realização deste trabalho na empresa.

A todos os colegas da CaetanoBus, que me transmitiram conhecimento prático valioso na realização deste estágio.

À minha família, por todo o apoio, carinho, incentivo e otimismo ao longo desta importante etapa.

À minha namorada, Catarina Silva, pelo apoio incondicional, pela paciência, pela força e contribuição que me deu ao longo desta fase.

Ao Miguel Silva, com quem partilhei grande parte da minha experiência na CaetanoBus, pelo companheirismo, ética e conhecimento transmitidos.

A todos os meus amigos, pelo apoio demonstrado.

Ao ISEP, por ter possibilitado a realização deste estágio.

A todos os que, direta ou indiretamente, me ajudaram a concretizar este trabalho.

página propositadamente em branco

## RESUMO

No âmbito da Unidade Curricular de Projeto/Dissertação/Estágio do segundo ano do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, do Departamento de Engenharia Mecânica, do Instituto Superior de Engenharia do Porto, o presente documento apresenta o estágio curricular desenvolvido pelo autor na empresa CaetanoBus. A comercialização dos seus autocarros em concursos é dependente da apresentação de dados sobre o desempenho destes veículos no ambiente pretendido pela empresa cliente. Até ao momento, este desempenho é medido de acordo com ciclos de condução ditos *standard* que não contabilizam percursos e cenários realistas. O estágio assenta na pretensão da empresa acolhedora em obter uma ferramenta capaz de reproduzir o desempenho dos seus autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio em percursos e cenários de novos clientes, de acordo com os indicadores de desempenho fornecidos. A metodologia utilizada constitui o processamento de dados históricos sobre o desempenho dos autocarros da CaetanoBus atualmente em circulação a partir da plataforma *Knime*, de acordo com as necessidades existentes para a alimentação da ferramenta de criação de ciclos de condução, bem como a conceção de uma ferramenta de criação de ciclos de condução em linguagem *Python*. O código escrito para a ferramenta assenta num princípio de combinações aleatórias de percursos cumpridos pelos autocarros atualmente em circulação, com foco na computação eficiente da convergência dos indicadores de desempenho dos ciclos de condução simulados para com os valores objetivo. Adicionalmente, a ferramenta complementa a opção de adequação da densidade de trânsito durante horários predefinidos. Foram realizadas e analisadas simulações de ciclos de condução baseadas em ciclos de condução reais obtidos a partir dos dados trabalhados em *Knime*. No final do estudo, obteve-se uma ferramenta de criação de ciclos de condução capaz de responder ao problema proposto. Esta afirmação é sustentada pela conformidade dos indicadores de desempenho dos ciclos de condução simulados face às restrições impostas perante a proximidade para com os indicadores de desempenho dos ciclos de condução originais.

## PALAVRAS-CHAVE

Autocarros; Ciclos de Condução; Micro Viagens; Simulações.

página propositadamente em branco

## ABSTRACT

Within the scope of the Curricular Unit of Project/Dissertation/Internship in the second year of the Master's in Industrial Engineering and Management at the Department of Mechanical Engineering, Instituto Superior de Engenharia do Porto, this document presents the internship developed by the author at CaetanoBus. The marketing of their buses in tenders depends on presenting data on the performance of these vehicles in the environment desired by the client company. So far, this performance has been measured according to so-called standard driving cycles that do not take into account realistic routes and scenarios. The internship is based on the hosting company's intention to obtain a tool capable of reproducing their electric and hydrogen hybrid buses performance in new clients' tracks and scenarios, according to the provided performance indicators. The methodology used involves processing historic data about the performance of CaetanoBus buses in the Knime platform, according to the existing needs for feeding the driving cycle creation tool, as well as the design of a driving cycles creation tool in Python. The code written for the tool is based on a principle of random combinations of routes taken by buses currently in circulation, with a focus on efficiently computing the convergence of performance indicators of simulated driving cycles towards the target values. Additionally, the tool allows adjusting traffic density during predefined hours. Simulations of driving cycles based on real driving cycles obtained from data processed in Knime were conducted and analyzed. At the end of the study, it is concluded that the designed driving cycle creation tool constitutes the desired solution to the problem. This statement is supported by the compliance of the performance indicators of the simulated driving cycles with the constraints imposed concerning the proximity to the performance indicators of the original driving cycles.

## KEYWORDS

Buses; Driving Cycles; Micro Journeys; Simulations.

página propositadamente em branco

# ÍNDICE

|   |     |
|---|-----|
| ÍNDICE DE FIGURAS .....   | VII |
| ÍNDICE DE TABELAS .....   | IX  |
| LISTAS DE SIGLAS.....   | XI  |
| 1. INTRODUÇÃO .....   | 13  |
| 1.1. Enquadramento e pertinência .....  | 13  |
| 1.2. Questão e objetivos de investigação.....   | 14  |
| 1.3. Opções metodológicas .....   | 14  |
| 1.4. Apresentação da empresa.....   | 15  |
| 1.5. Estrutura do trabalho .....  | 16  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 17  |
| 2.1. Paradigma ambiental .....  | 17  |
| 2.1.1. Alterações Climáticas .....  | 17  |
| 2.1.2. Políticas ambientais .....   | 18  |
| 2.2. Autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio .....   | 19  |
| 2.2.1. Autocarros elétricos.....  | 20  |
| 2.2.2. Autocarros híbridos a hidrogénio .....   | 21  |
| 2.3. Caracterização da operação de um autocarro .....   | 22  |
| 2.3.1. Influência do tipo de veículo .....  | 22  |
| 2.3.2. Tipos de operação: urbano, intercity e autoestrada .....   | 23  |
| 2.4. Ciclos de condução padronizados .....  | 24  |
| 2.5. Estratégias utilizadas para a criação de ciclos de condução .....  | 25  |
| 2.5.1. Desenvolvimento de um ciclo de condução para Hong Kong.....  | 25  |
| 2.5.2. Desenvolvimento de um ciclo de condução típico para um autocarro híbrido elétrico<br>citadino com uma rota fixa.....                 | 26  |
| 2.5.3. Pesquisa sobre a construção de um ciclo de condução baseado no método híbrido de<br>ordenação de tempo .....                         | 28  |
| 2.5.4. Utilização de bases de dados de ciclos de condução reais para a criação de ciclos de<br>condução com propriedades equivalentes ..... | 28  |
| 2.5.5. Desenvolvimento de ciclos de condução para veículos elétricos no contexto da cidade<br>de Florença .....                             | 29  |
| 2.5.6. Identificação compreensiva de estilos de condução baseada no reconhecimento do<br>ciclo de condução de um veículo .....              | 30  |
| 2.5.7. Desenvolvimento de um ciclo de condução para autocarros em Debrecen com base<br>em dados de trânsito reais.....                      | 31  |
| 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO .....  | 33  |
| 3.1. Estudo do impacto das variáveis independentes sobre o desempenho de autocarros<br>elétricos e híbridos a hidrogénio .....              | 34  |

|   |    |
|---|----|
| 3.2. Processamento e estudo dos dados históricos de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio.....                           | 37 |
| 3.3. Construção da ferramenta de criação de ciclos de condução em <i>Python</i> .....   | 42 |
| 3.3.1. Requisitos .....   | 42 |
| 3.3.2. Metodologia.....   | 43 |
| 3.3.3. Estrutura do código.....   | 43 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 55 |
| 4.1. Apresentação de resultados – Simulações de ciclos de condução sem trânsito definido..                                      | 55 |
| 4.2. Apresentação de resultados – Simulações de ciclos de condução com trânsito definido..                                      | 56 |
| 4.3. Discussão de resultados .....  | 57 |
| 5. CONCLUSÃO .....  | 61 |
| 5.1. Conclusões finais .....  | 61 |
| 5.2. Limitações e investigação futura.....  | 61 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....  | 63 |
| APÊNDICE A – Ciclos de condução de autocarros elétricos .....   | 67 |
| APÊNDICE B – Ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio.....  | 68 |
| APÊNDICE C – Ciclos de condução de autocarro elétricos simulados.....   | 69 |
| APÊNDICE D – Ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio simulados .....   | 70 |
| APÊNDICE E – Ciclos de condução original VS simulado: autocarros elétricos.....   | 71 |
| APÊNDICE F – Ciclos de condução original VS simulado: autocarros híbridos a hidrogénio .....                                    | 72 |
| APÊNDICE G – Tempos das simulações de ciclos de condução Sem Trânsito.....  | 73 |
| APÊNDICE H – Ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio simulados com trânsito definido baseado na simulação 1..... | 74 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – Estrutura acionista da CaetanoBus (CaetanoBus, 2022a) .....   | 16 |
| Figura 2 – Emissões de CO <sub>2</sub> por parte das grandes economias mundiais (Crippa et al., 2022) .....            | 18 |
| Figura 3 – Variação das emissões mundiais de CO <sub>2</sub> entre 1990, 2005, 2020 e 2021 (Crippa et al., 2022) ..... | 18 |
| Figura 4 – Tabela de correlações das variáveis em estudo para autocarros elétricos.....                                | 36 |
| Figura 5 – Tabela de correlações das variáveis em estudo para autocarros híbridos a hidrogénio                         | 36 |
| Figura 6 – Processamento de dados no <i>Knime</i> .....  | 37 |
| Figura 7 – Fluxograma do processamento de dados em Knime .....   | 38 |
| Figura 8 – Fluxo de aglomeração da informação de todas as frotas de autocarros híbridos a hidrogénio .....             | 41 |
| Figura 9 – Fluxograma do código de criação de ciclos de condução .....   | 44 |
| Figura 10 – Fluxograma do subprocesso "construção do ciclo piloto" .....   | 46 |
| Figura 11 – Fluxograma da certificação do nº de paragens de passageiros .....  | 47 |
| Figura 12 – Certificação da velocidade média nos períodos de trânsito .....  | 49 |
| Figura 13 – Certificação da velocidade média no período fora de trânsito.....  | 51 |
| Figura 14 – Certificação da velocidade média do ciclo (sem trânsito).....  | 52 |

página propositadamente em branco

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Caracterização dos autocarros .....  | 22 |
| Tabela 2 – Exemplos de ciclos de condução padronizados.....   | 24 |
| Tabela 3 – Indicadores de comparação de ciclos de condução de autocarros elétricos .....  | 55 |
| Tabela 4 – Indicadores de comparação de ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio .....  | 56 |
| Tabela 5 – Tempos das simulações de ciclos de condução (expressa em segundos).....  | 56 |
| Tabela 6 – Valores de velocidade média em diferentes períodos do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido..... | 57 |
| Tabela 7 – Indicadores do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido.....  | 57 |

página propositadamente em branco

## LISTAS DE SIGLAS

---

|         |  |
|---------|--|
| AHP     | <i>Analytic Hierarchy Process</i>                  |
| API     | <i>Application Programming Interface</i>           |
| COP     | <i>Conference of the Parties</i>                   |
| DEM     | Departamento de Engenharia Mecânica                |
| EPA     | <i>Environmental Protection Agency</i>             |
| ISEP    | Instituto Superior de Engenharia do Porto          |
| LFP     | Fosfato de Ferro-Lítio                             |
| Li-ion  | lão de Lítio                                       |
| Li-Po   | Polímero de lão de Lítio                           |
| MEGI    | Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial         |
| NDC     | <i>Nationally Determined Contribution</i>          |
| NP      | Norma Europeia                                     |
| P.Porto | Instituto Politécnico do Porto                     |
| PCA     | <i>Principal Component Analysis</i>                |
| PP      | Paragens de Passageiros                            |
| PT      | Paragens de Trânsito                               |
| SAPD    | <i>Speed Acceleration Probability Distribution</i> |

---

página propositadamente em branco

# 1. INTRODUÇÃO

No presente capítulo, é realizada uma descrição simples do contexto e pertinência do projeto elaborado, englobando temas como o paradigma ambiental na rede de mobilidade pública, o concurso para a compra de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio e a simulação de ciclos de condução. Adicionalmente, é abordada a questão de investigação e respetivos objetivos, bem como uma breve exposição da metodologia definida, apresentação da empresa na qual se desenvolveu o projeto e estrutura do presente documento.

## 1.1. Enquadramento e pertinência

No âmbito da Unidade Curricular de Projeto/Dissertação/Estágio do 2º ano do Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial (MEGI), do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), o presente documento apresenta o estágio curricular desenvolvido pelo autor na empresa CaetanoBus – Manufacturing Bodies S.A. Este estágio e consequente dissertação reproduzida assentam na pretensão da empresa em desenvolver uma ferramenta de simulação de ciclos de condução de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio.

O tema apresenta um propósito muito importante no que diz respeito à realidade atual da mobilidade pública, que prioriza as componentes ambientais e económicas dos ativos atualmente operacionais e novos ativos possíveis. A redução da emissão de gases poluentes trata-se de um tópico de discussão mundial, no qual são apresentadas medidas de combate à degradação da atmosfera. Um dos principais agentes poluentes são as máquinas de combustão fóssil, nas quais se inserem os veículos a combustão comuns.

Deste modo, existem planos em execução para a redução do número de veículos a combustão em circulação, em prol de veículos que não emitam gases poluentes e que recorram a energias sustentáveis e seguras. Com esta crescente tendência, surgem novas soluções no mercado, que consequentemente implicam a dinamização da concorrência entre as entidades que disponibilizam estes produtos. Entre as mesmas, surge a CaetanoBus com os seus autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio.

Para a compra de um ativo, o cliente procede à organização de um concurso, no qual participam as empresas interessadas em vender os seus produtos. Nestes concursos, são apresentados cadernos de encargos onde constam as especificações do tipo de veículo e da operação a realizar. Estas especificações contemplam indicadores de desempenho do autocarro na situação geográfica e demográfica visada pelo cliente, tais como:

- Distância percorrida diariamente;
- Tempo de operação;
- Velocidade máxima;
- Aceleração máxima;
- Número de paragens efetuadas;
- Distância entre paragens.

A obtenção destes dados é conseguida através da análise de ciclos de condução representativos das condições de condução na área definida pelo cliente. O leque de variáveis disponíveis para

análise é bastante vasto, dada a complexidade das atividades de mobilidade. Ao mesmo tempo, cada cliente apresenta um perfil diferente, o que torna a elaboração de um caderno de encargos preciso para um novo cliente difícil, por falta de dados históricos sobre o desempenho desse autocarro na situação descrita. Por sua vez, a simulação de ciclos de condução é um processo delicado que depende da utilização de uma ferramenta minuciosa o suficiente para a entrega de resultados com o menor erro possível.

## 1.2. Questão e objetivos de investigação

A partir do problema levantado anteriormente, o presente trabalho tem o propósito de responder à seguinte questão: como criar ciclos de condução para a simulação de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio, considerando os diversos fatores que influenciam a operação do veículo?

Assim, o objetivo geral traduz-se pela criação de um ciclo de condução capaz de apresentar a um cliente da CaetanoBus a resposta mais aproximada possível à realidade do desempenho dos autocarros do fabricante, no seio da área de condução definida. Por sua vez, os objetivos específicos são os seguintes:

- Analisar o tipo de operação e rotas dos atuais clientes da CaetanoBus;
- Definir os parâmetros que caracterizam as rotas e os tipos de operação;
- Determinar os dados necessários a processar e extrair para a construção de ciclos de condução;
- Processar e extrair a informação sobre o desempenho dos autocarros da CaetanoBus ativos;
- Desenvolver uma ferramenta capaz de gerar novos ciclos de condução, dadas as características pretendidas.

Com este processo, visa-se a entrega de uma resposta mais próxima da realidade, gerando confiança nos serviços da CaetanoBus e possibilitando a melhoria da mobilidade pública com os mesmos.

## 1.3. Opções metodológicas

A partir da análise de artigos científicos sobre o desenvolvimento de ciclos de condução, pretende-se estudar as várias estratégias abordadas pelos autores, com o objetivo de estabelecer a melhor metodologia a adotar no desenvolvimento do ciclo de condução pretendido. A investigação sobre os artigos científicos desenvolvidos na presente área em estudo foi realizada com recurso a fontes de pesquisa, tais como: *Google Scholar*, *Science Direct*, *B-On*, *IEEE Xplore*. O critério de adoção destes artigos baseou-se na pertinência dos temas e métodos explorados para com o presente estudo, bem como na eloquência e fundamentação da redação. A investigação de outros documentos de apoio à revisão bibliográfica foi efetuada a partir da sua pesquisa na plataforma *Google Chrome*, dando especial atenção à fonte de publicação dos mesmos.

Através da pesquisa e análise dos padrões de condução de autocarros em circulação e das características do meio em que operam, é possível compreender o comportamento de cada variável em estudo, em cada ambiente individual. Esta oportunidade permite extrair este mesmo comportamento e retratá-lo com recurso a modelos matemáticos para, conseqüentemente, gerar simulações que disponibilizem respostas individuais e, portanto, mais eficazes para novos ambientes. Finda a criação da ferramenta, realizam-se simulações baseadas em dados históricos de clientes anteriores para avaliação do seu desempenho.

## 1.4. Apresentação da empresa

A CaetanoBus é uma empresa do Grupo Salvador Caetano e o maior fabricante de carroçarias e autocarros em Portugal, sediado em Vila Nova de Gaia. Fabricam chassis e autocarros com diferentes especificações para serviços de transporte urbano, turismo, aeroporto e miniautocarros (CaetanoBus, 2022d).

Atualmente, produz e comercializa seis categorias diferentes de autocarros, a partir de diferentes unidades motrizes: por motor de combustão interna, elétricos e híbridos a hidrogénio. A empresa tem instalações em Vila Nova de Gaia, Ovar, Marrocos, Reino Unido e Alemanha, contando com 673 colaboradores. A maioria dos seus produtos destinam-se à exportação e estão ao serviço de operadores de transporte um pouco por todo o mundo. Até à data de emissão deste documento, com 170 autocarros elétricos em circulação, em mais de 30 cidades, com mais de 50 unidades elétricas em produção (CaetanoBus, 2022d).

A sua visão enaltece a construção de soluções inovadoras a partir dos seus colaboradores, numa cooperação forte com os seus clientes e parceiros. A sua missão dita o seguinte: “Trabalhamos para proporcionar aos nossos Clientes soluções mais seguras e sustentáveis, através de produtos diferenciadores” (CaetanoBus, 2022b).

A empresa nasceu como construtora de carroçarias para autocarros à base de madeiras, em 1946. Mais tarde introduziu a utilização de aço no fabrico das suas carroçarias (1955). Seguidamente deram-se as primeiras exportações de autocarros para Inglaterra (1967) e a abertura de uma nova fábrica em Vila Nova de Gaia (1966) (CaetanoBus, 2022c).

Em 1989, viu o seu Sistema de Qualidade certificado pela Norma Europeia NP EN 29002:1988 (o seu 5º certificado e o 1º da indústria automotora em Portugal). Em 2002, contando com certificações pelas normas europeias NP EN ISO 9001:1995 e NP EN ISO 14001:1999, é fundada a atual CaetanoBus e implementada a construção de carroçarias em alumínio (CaetanoBus, 2022c).

Desde 2010, a empresa tem investido em projetos de investigação e desenvolvimento relacionados com a mobilidade elétrica. Os resultados destes projeto refletem-se nos autocarros *e.COBUS* (primeiro autocarro 100% elétrico do mundo, exclusivo para aeroportos), *e.City Gold* (autocarro urbano 100% elétrico) e o *H2.City Gold* (autocarro urbano elétrico movido a hidrogénio) (CaetanoBus, 2022c).

Nos anos de 2017 e 2020, é celebrada uma aliança estratégica com a Mitsui & Co., um grupo de investidores, e reforçada a aliança com a Toyota Caetano Portugal que passou a ser acionista direta da CaetanoBus, respetivamente (CaetanoBus, 2022c). Um dos resultados desta aliança foi o *co-branding* dos autocarros *e.City Gold* e *H2.City Gold*, representando o crescimento da empresa e a inovação na mobilidade verde (CaetanoBus, 2022c).

Na Figura 1, apresenta-se a atual estrutura acionista da CaetanoBus:

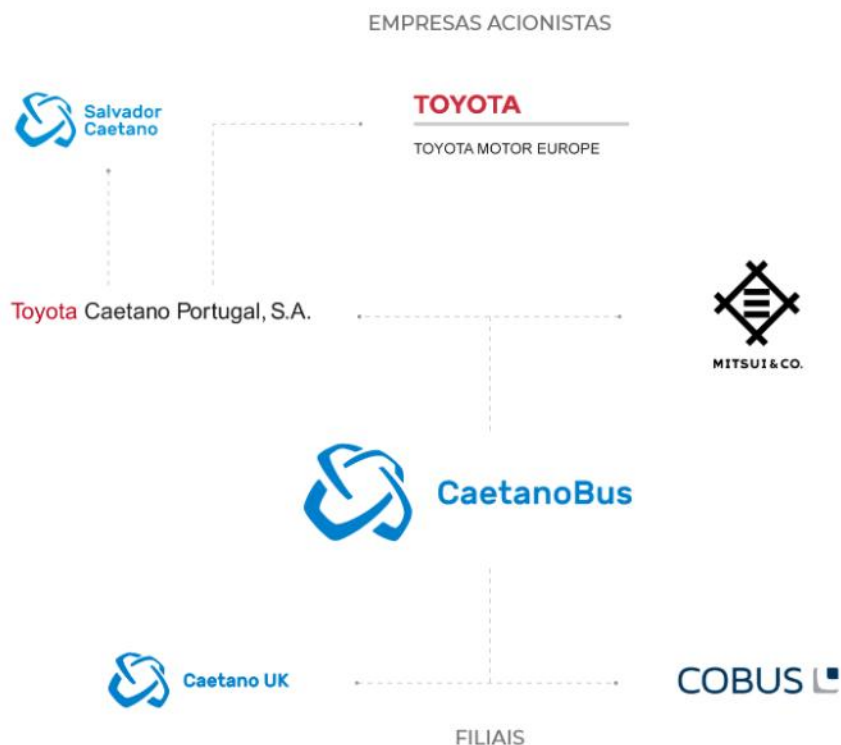


Figura 1 – Estrutura acionista da CaetanoBus (CaetanoBus, 2022a)

### 1.5. Estrutura do trabalho

Este trabalho contempla primeiramente o presente capítulo, no qual são expostos o enquadramento e a pertinência do projeto elaborado, são esclarecidas as questões e objetivos da investigação, são enunciadas as opções metodológicas disponíveis para aplicação neste contexto e é realizada uma breve apresentação sobre a empresa originária do projeto.

O segundo capítulo sobre a revisão bibliográfica, onde são contextualizados os temas: Paradigma ambiental; Autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio; Caracterização da operação de um autocarro; Ciclos de condução padronizados; Estratégias utilizadas para a criação de ciclos de condução.

O terceiro capítulo é dedicado à apresentação do caso de estudo, descrevendo o problema em questão e quais os pormenores do mesmo. É também exibida a estratégia delineada e implementada no projeto, acompanhada pela justificação da metodologia adotada e explicação de como serão visualizados e validados os resultados obtidos.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a ferramenta de criação de ciclos de condução, comprovando a eficácia da mesma por comparação entre ciclos de condução reais obtidos do desempenho dos autocarros da CaetanoBus e ciclos de condução simulados.

Por fim, apresentam-se as conclusões retiradas do projeto, destacando as principais conquistas e obstáculos do próprio. De igual modo, são sugeridos tópicos de investigação futura.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo engloba a revisão bibliográfica utilizada para o enquadramento e consolidação do trabalho desenvolvido, abordando os seguintes temas:

- 1) **Paradigma ambiental:** expor a atual situação ambiental global, as principais fontes de emissão de gases de efeito estufa, as alterações climáticas associadas e as políticas de combate às mesmas;
- 2) **Autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio:** aprofundar o conhecimento sobre estes veículos específicos em que o trabalho se concentra;
- 3) **Caracterização de operação de um autocarro:** estudar os pormenores deste tipo de atividade e a importância da sua análise e compreensão;
- 4) **Ciclos de condução padronizados:** recolher informação sobre ciclos de condução de veículos motores, desenvolvidos e definidos segundo as normas ambientais e legais em vigor na região em que foram elaborados;
- 5) **Estratégias utilizadas para a criação de ciclos de condução:** analisar e compreender os objetivos e metodologias utilizadas por outros autores para a criação de ferramentas de criação de ciclos de condução.

### 2.1. Paradigma ambiental

Durante os últimos 40 anos, a economia mundial cresceu até ao triplo da sua dimensão, levando ao consequente aumento do consumo e redução da disponibilidade de recursos naturais, causada pela desregulação ecológica, exploração ilimitada dos recursos naturais e não-qualidades do crescimento (Mongó et al., 2021). Por sua vez, verificou-se o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> (gás de efeito de estufa), resultante de diversas atividades humanas, tais como a combustão de petróleo, carvão, gás natural, gasolina e a desflorestação (Mardani et al., 2019).

#### 2.1.1. Alterações Climáticas

Os gases de efeito de estufa são compostos gasosos capazes de reter a radiação solar refletida pelo planeta. O aumento das quantidades destes gases presentes na atmosfera promove a obtenção de temperaturas mais elevadas na baixa atmosfera. Este fenómeno permite a elevação da temperatura na baixa atmosfera, dinamizando o aquecimento global (sendo responsáveis por 95% deste fenómeno) (Yoro & Daramola, 2020). O efeito do aquecimento global pode resultar no aumento da temperatura média da superfície da Terra em 2 graus Celsius e, conseqüentemente, em desastres naturais, como cheias, secas, acidificação dos oceanos, degradação dos solos agrícolas, aceleração da fusão de glaciares, subida do nível do mar. Como tal, o planeta pode sofrer danos irreversíveis no seu ecossistema (Mongó et al., 2021).

Desde o início do século XXI, as emissões globais de CO<sub>2</sub> aumentaram de forma rampante, principalmente devido às emissões de economias emergentes como a China e a Índia. No ano de 2021, os Estados Unidos da América, a União Europeia, a Índia, a Rússia e o Japão foram admitidos como os maiores responsáveis pela emissão de CO<sub>2</sub>, contabilizando 67,8% das emissões e 66,4% do consumo global de combustíveis fósseis (Figura 2).

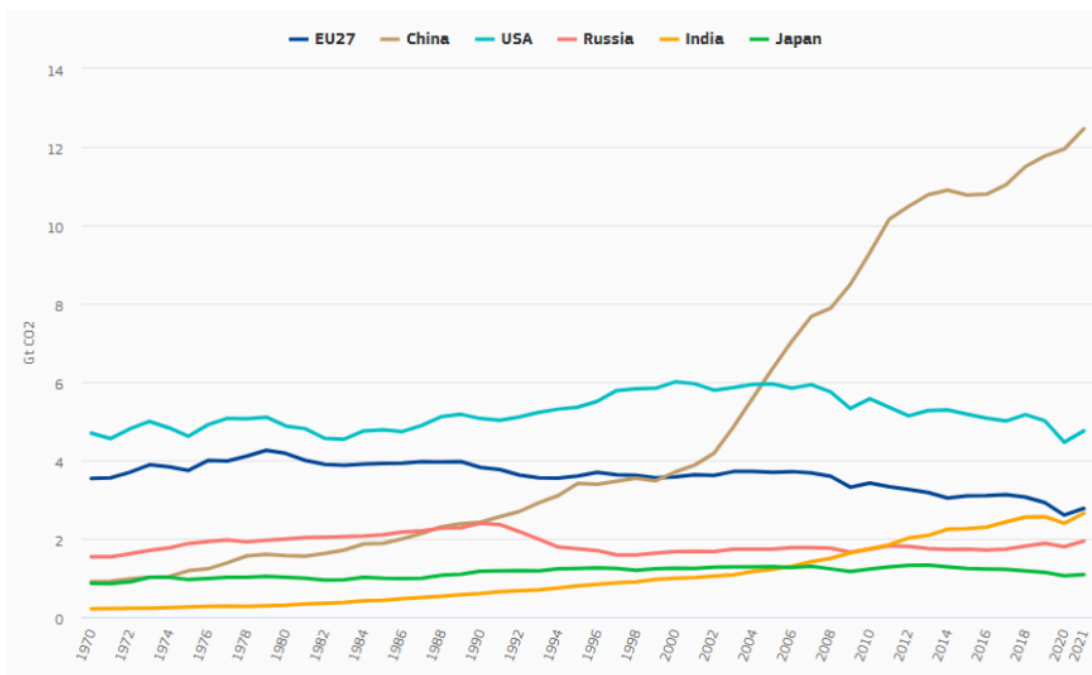


Figura 2 – Emissões de CO<sub>2</sub> por parte das grandes economias mundiais (Crippa et al., 2022)

Na Figura 3, verifica-se a variação das emissões de CO<sub>2</sub> entre os anos de 1990, 2005, 2020 e 2021, sublinhando a variação das emissões globais de CO<sub>2</sub> de todos os setores entre 1990 e 2021, que foi de 67%. De igual modo se pode afirmar que a variação de emissões entre 2005 e 2021 e entre 2020 e 2021 foram de 26% e 5% respetivamente, sequencialmente menor que a variação entre 1990 e 2021 (Crippa et al., 2022).

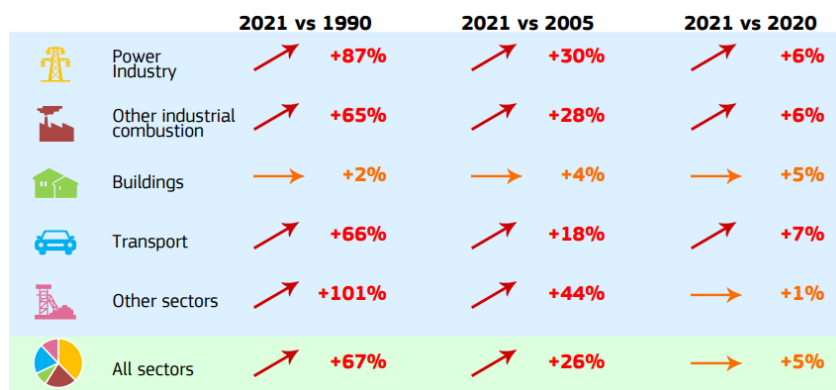


Figura 3 – Variação das emissões mundiais de CO<sub>2</sub> entre 1990, 2005, 2020 e 2021 (Crippa et al., 2022)

## 2.1.2. Políticas ambientais

Com o aumento da visibilidade e agressividade das alterações climáticas resultantes da atividade humana e emissão de gases de efeito estufa, em 2015, os Estados membros das Nações Unidas reuniram-se na capital francesa para a COP 21 (*Conference of the Parties*). Este evento é mais conhecido como o Tratado de Paris, onde se acordou a limitação do aquecimento global entre 1,5 e 2 graus Celsius abaixo dos níveis pré-industriais. O plano delineado pelos 196 partidos para atingir esta meta passa por alcançar o pico das emissões de gases de efeito estufa o quanto antes, de modo a atingir a neutralidade carbónica em meados do século XXI. A estratégia a seguir contempla a aplicação de ações climáticas a cada cinco anos (denominadas de NDC – *Nationally Determined*

*Contribution*), que visam a redução da emissão gases de efeito estufa ou de ações a longo prazo (United Nations, 2015).

Consequentemente, a União Europeia concebeu a *European Green Deal* em 2020 e a *European Climate Law* em 2021. No contexto das mesmas, pretende-se a redução das emissões de gases de efeito de estufa em 55%, em comparação com os valores verificados em 1990, até ao ano de 2030. Igualmente, ambiciona que até ao ano de 2050, se anulem as emissões de gases de efeito de estufa (Crippa et al., 2022).

Mais recentemente, em outubro de 2022, a partir de um acordo formal entre o Parlamento Europeu e os Estados membros, a União Europeia decretou que a partir do ano de 2035 será proibida a comercialização de novos veículos ligeiros com motor de combustão interna. Esta lei tem como objetivo agilizar esforços para atingir a meta de zero emissões por parte do setor de transporte prevista para 2050. O ano de 2035 foi determinado para este efeito, pelo que o ciclo de vida útil médio de um automóvel é de 15 anos (European Parliament, 2022).

Ainda segundo European Parliament (2022), com esta prática, prevê-se o aumento do investimento na conceção, desenvolvimento e produção de veículos com zero emissões (veículos elétricos e veículos híbridos a hidrogénio) e de combustíveis sintéticos. Igualmente, os seus processos de produção não poderão emitir gases de efeito de estufa.

Em novembro de 2022, surge a proposição da norma EURO 7 por parte da Comissão Europeia, com o objetivo de reduzir a poluição atmosférica por parte dos novos veículos comercializados. Adicionalmente, visa-se que os veículos continuem acessíveis para os consumidores e que se promova a competição europeia no setor. Este novo conjunto de regras renova o cenário atual regido pela norma EURO 6, com restrições relativas ao rácio de gases libertados por unidade de distância e à poluição derivada de travões e microplásticos. Adicionalmente, ocorre a homogeneização de regras que antes eram segregadas em veículos ligeiros ou pesados, que podem criar obstáculos na conceção e comercialização dos veículos pesados de motor de combustão interna. De igual modo, os limites impostos serão os mesmos, independentemente da unidade de energia utilizada nos veículos (European Commission, 2022). De acordo com a mesma fonte, a EURO 7 permitirá:

- Melhor controlo da emissão de compostos poluentes da atmosfera em novos veículos;
- Atualização dos limites de emissões poluentes, tornando-se mais rígidos;
- Controlo de emissões por parte de travões e pneus;
- Certificação de que veículos novos se mantêm menos poluentes durante mais tempo;
- Apoio no desenvolvimento de veículos elétricos;
- Capacitação digital completa para o controlo de emissões, por parte das autoridades.

Em análise pelo Parlamento Europeu e Conselho Europeu, caso seja aceite e adotada como lei, a norma poderá ser implementada em julho de 2025 para os veículos ligeiros e em julho de 2027 para veículos pesados.

## **2.2. Autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio**

Face ao panorama ambiental e tecnológico atual, o mercado de veículos de tração elétrica tem crescido substancialmente, levando grandes nomes da indústria a investir no desenvolvimento dos seus produtos elétricos. O mercado de veículos pesados de passageiros não é uma exceção ao caso,

dada a recorrência a esta modalidade. Em jeito de exemplo, 25-30% da população das grandes cidades europeias e 50-60% da população das médias cidades europeias utilizam este meio de transporte (Corazza et al., 2016).

O autocarro é um meio de transporte bastante apropriado para a salvaguarda ambiental, dado o seu volume operacional e, portanto, a sua elevada eficiência na deslocação de passageiros (mesmo quando a quantidade de passageiros é mediana), o que contribui para a redução da emissão de gases de efeito de estufa. Adicionalmente, é bastante seguro comparativamente a outros meios de transporte, em termos do rácio de acidentes ocorridos. As desvantagens deste meio de transporte, tais como o seu conforto, velocidade, regularidade e pontualidade, impedem uma maior adesão por parte da população, comparativamente a outras soluções. De igual modo, as inovações atingidas no desenvolvimento destes veículos, apesar de fascinantes do ponto de vista da engenharia, não são superficiais o suficiente (Corazza et al., 2016).

Além das reduzidas emissões por parte destas máquinas, por comparação com veículos de motor de combustão interna, verifica-se uma eficiência energética e disponibilidade de potência superior e níveis de ruído e vibração menores, o que promove a redução da poluição sonora e o conforto dos seus passageiros. Adicionalmente, segundo Pagliaro & Meneguzzo (2019), são veículos mais económicos pois:

- Os custos de manutenção são menores, devido à reduzida complexidade dos sistemas de tração elétricos;
- Os custos de abastecimento são menores, visto que, para uma mesma unidade, o custo energético elétrico é menor;
- É possível regenerar energia para as baterias a partir da travagem do veículo;
- O imposto de circulação destes veículos é inferior ao tributado sobre veículos com motor a combustão interna, por consequência das atuais políticas ambientais.

Este movimento de renovação tem devolvido resultados bastante positivos. No ano de 2018, dos três milhões de autocarros em circulação no mundo, cerca de 385.000 eram autocarros elétricos, em que 99% destes se encontravam a circular na China. Por sua vez, deu-se a poupança de 177.000 barris de combustível *diesel* por dia (Pagliaro & Meneguzzo, 2019).

Em contrapartida, existem adversidades à compra destes veículos tais como:

- Tempo de abastecimento consideravelmente mais demorado para os autocarros elétricos;
- Autonomia reduzida;
- Preço de compra mais caro;
- Custo elevado das infraestruturas de abastecimento elétrico ou de hidrogénio;
- Ciclo de vida das baterias curto;
- Fiabilidade das células de combustível.

### **2.2.1. Autocarros elétricos**

O autocarro elétrico trata-se de um veículo pesado de passageiros com um sistema de tração elétrico, cuja energia é promovida por um conjunto de baterias ao invés do tradicional motor de combustão interna, cuja eficiência energética é bastante superior (cerca de 200% superior, considerando que um veículo com motor a combustão interna tem geralmente uma eficiência energética de 20%), patrocinado por um custo de abastecimento significativamente menor. Este

tipo de veículo representa a vanguarda da mobilidade urbana, ao passo que as cidades mais avançadas do mundo estão a transitar para esta tecnologia durante os últimos anos, prometendo a redução de custos de suporte e dos níveis de poluição nesses aglomerados demográficos (Ceccon et al., 2020). Ainda segundo Ceccon et al. (2020), esta tecnologia não se encontra maturada o suficiente para eliminar as dúvidas do público mais cínico, por ainda se encontrar num estado de desenvolvimento embrionário.

A área com maior desenvolvimento em prol do sucesso destes tipos de veículos é a produção de baterias que, para garantir uma elevada capacidade energética e maior autonomia, são mais pesadas e mais caras. O foco do investimento colocado nesta área engloba o aumento da capacidade energética das baterias, bem como o desenvolvimento de sistemas de carregamento mais rápidos, de forma a aumentar o fator competitivo entre estas soluções de mobilidade e os veículos de motores de combustão interna.

As baterias são os componentes mais delicados destes veículos. Apesar de atualmente mais competitivas em comparação com há 10 atrás (quando se iniciou um desenvolvimento mais sério de veículos elétricos), a autonomia, o tempo de carregamento, o preço de compra e a manutenção continuam a ser aspetos críticos. Atualmente, a matéria-prima mais utilizada na produção destas baterias é o lítio, que pode ser implementado através das seguintes tecnologias: Li-ion (Ião de Lítio), Li-Po (Polímero de Ião de Lítio) e LFP (Fosfato de Ferro-Lítio).

A escolha do tipo de bateria a implementar num autocarro depende de certos fatores visados para o mesmo, como o tipo de rotas a percorrer, o número de operações por dia e a quantidade de postos de abastecimento disponíveis antes e após o seu percurso. O dimensionamento e a escolha de baterias podem ser reduzidos a duas categorias: leves (entre 1,5 – 3 toneladas), com menor autonomia e necessidade de carregamentos intermédios; pesada (acima de 3 toneladas), com maior autonomia e carregamentos menos frequentes. A LFP é a tecnologia mais utilizada, devido à produção de baterias mais leves, energeticamente mais capacitadas, mais baratas, menos tóxicas e que permitem o “carregamento rápido” (Ceccon et al., 2020). O tempo de carregamento destes veículos depende da potência do carregador utilizado e da capacidade energética da bateria do autocarro, podendo variar entre 1 hora (carregamento rápido) a 13 horas (carregamento lento).

### 2.2.2. Autocarros híbridos a hidrogénio

Os autocarros híbridos a hidrogénio são veículos pesados de passageiros que contemplam um sistema de tração elétrico que recorre a um conjunto de baterias para obter energia, tal como no caso dos autocarros elétricos (a tecnologia de baterias mais utilizadas neste tipo de veículo é a Li-ion). A diferença é que as baterias não obtêm energia elétrica diretamente de um ponto de abastecimento, mas sim do trabalho realizado pelo sistema *fuel cell*, que converte hidrogénio (combustível) em energia elétrica (Pagliaro & Meneguzzo, 2019).

De uma forma simples, ocorre um fenómeno físico-químico entre o hidrogénio retido no depósito do veículo e o ar que é aspirado do exterior, obtendo como produtos finais a eletricidade e a água (limpa e livre de quaisquer substâncias). A eletricidade é depois acumulada na bateria e a água é armazenada num depósito para posteriormente ser extraída. Sublinhe-se que a eficiência energética deste processo é de 90% (Ceccon et al., 2020).

Estes veículos são capazes de percorrer longas distâncias dada a sua elevada autonomia e o seu tempo de abastecimento (entre 7-10 minutos) é muito mais curto que o tempo de abastecimento dos autocarros elétricos. Assim, descarta algumas das adversidades encontradas nos autocarros elétricos, tomando-a como uma solução mais apetecível a nível técnico. No entanto, existem outras adversidades que assombram este tipo de veículos e que não se verificam nos autocarros elétricos, isto porque o custo das infraestruturas de abastecimento de hidrogénio e os custos da sua produção e transporte são bastante elevados. Adicionalmente, na produção do hidrogénio (através da eletrólise de água), são necessárias máquinas de elevada complexidade e a eficiência deste processo é de apenas 37% (Ceccon et al., 2020).

### 2.3. Caracterização da operação de um autocarro



Cada tipo de veículo tem as suas características próprias e diferenciadoras, que redundantemente especificam o próprio “tipo”. Estas características determinam a aptidão de cada veículo para um determinado serviço de transporte e o nível de serviço dos mesmos. Como tal, é natural assumir que veículos de tipos diferentes não terão o mesmo desempenho numa dada rota segundo as mesmas circunstâncias. Os tipos de operação de um autocarro dependem de diversos fatores característicos do meio onde irá operar, tais como a população, a cultura, o ambiente e a economia. Assim, estes são concebidos de acordo com as necessidades do local e a procura pelo tipo de serviço específico, apropriando-os para o público-alvo (Rohani et al., 2013). Os tipos de operação mais comuns são os serviços urbano, intercity e autoestrada.

#### 2.3.1. Influência do tipo de veículo

A seleção do tipo de veículo para um determinado serviço tem em conta fatores como o número de passageiros esperado, a manobrabilidade do próprio, o conforto das acomodações, as suas dimensões tendo em conta a dimensão da estrada, o consumo de combustível esperado e a compatibilidade com passageiros de mobilidade reduzida (Teodorović & Janić, 2022).

De acordo com Teodorović & Janić (2022), numa redução das tipologias de veículos pesados de passageiros consoante as suas capacidades e tipo de carroçaria, obtemos as seguintes classes (Tabela 1):

Tabela 1 – Caracterização dos autocarros

| <b>MINIAUTOCARRO</b>  |   |
|---|---|
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– 6-8 metros de comprimento</li> <li>– Capacidade para 15-40 lugares sentados e lugares em pé</li> <li>– Utilizado para rotas de afluência reduzida, rotas curtas e serviços em regiões suburbanas</li> </ul>  |
| <b>AUTOCARRO COMUM</b>  |   |
|  | <ul style="list-style-type: none"> <li>– 10-12 metros de comprimento e 2,50 metros de largura</li> <li>– Capacidade para 30-50 lugares sentados e 20-60 lugares em pé</li> <li>– Utilizado para rotas urbanas e suburbanas, de distância média, desde reduzida a elevada afluência</li> </ul> |

---

### AUTOCARRO ARTICULADO

---



- Carroçaria construída sobre dois eixos e uma secção articula com o terceiro eixo
- 16-18 metros de comprimento capaz de acomodar cerca de 150% dos passageiros de um comum
- Concebido para rotas de elevada afluência

---

### AUTOCARRO DE 2 ANDARES

---



- Disponibiliza maior capacidade para acomodar passageiros com o mesmo espaço horizontal
- O andar superior acomoda apenas passageiros sentados, com uma vista boa, mas requer subir escadas
- Característico das áreas urbanas

---

### AUTOCARRO DE CHÃO BAIXO

---



- Tornaram-se um standard em vários países industrializados
- Situam-se 35-40 centímetros acima do chão, facilitando a entrada de passageiros e oferecendo maior conforto
- A maior parte do seu equipamento mecânico é armazenado no tejadilho e o motor é montado atrás

## 2.3.2. Tipos de operação: urbano, intercity e autoestrada

O serviço urbano contabiliza rotas de curta distância com velocidade reduzida e um número elevado de passageiros por itinerário. As estradas nacionais e municipais são as mais percorridas pelos autocarros, atravessando ocasionalmente vias rápidas. As suas rotas dinamizam a travessia urbana por diversas paragens, aproximando-se do local exato em que o passageiro deseja estar (Rohani et al., 2013). Um feito que não é integralmente replicado pelo metropolitano e muito menos pelo comboio. Adicionalmente, proporcionam o serviço mais económico do panorama total, especialmente em comparação com o carro privado. No entanto, o serviço não é o mais cómodo para os passageiros, que lidam com uma elevada afluência dos mesmos, situações de congestionamento do trânsito e, por vezes (causadas pelo ponto anterior) atrasos nos itinerários (Teodorović & Janić, 2022).

O serviço intercity contempla trajetos de curta a média distância, com velocidades reduzidas a médias, com um número médio de paragens por itinerário. Os autocarros que operam neste serviço percorrem maioritariamente estradas municipais, nacionais e vias rápidas. São um meio mais rápido para os passageiros se deslocarem entre localidades, com menos paragens intermediárias, com um nível de conforto considerável (Rohani et al., 2013). Os meios de transporte com que competem são o metropolitano, o comboio e o carro privado, sendo este último o mais forte por permitir uma viagem mais rápida e mais confortável. O preço de utilização deste serviço é médio em relação aos restantes serviços (Teodorović & Janić, 2022).

O serviço de autoestrada é caracterizado por viagens de longas distâncias a uma velocidade superior, com menor número de paragens por itinerário e, como tal, maior distanciamento entre paragens. Os autocarros deste tipo de serviço, tal como o nome indica, operam em autoestradas e são dotados de acomodações mais confortáveis e com qualidade de serviço superior (Rohani et al., 2013). Assim, conseguem ser um meio de transporte mais apetecível que o comboio, alcançando

mais locais que o transporte de caminhos-de-ferro, e mais competitivo com o carro privado. Por sua vez, o seu preço é superior em relação aos restantes serviços. Normalmente, estes autocarros disponibilizam linhas de ou para aeroportos ou entre cidades de centros regionais (Teodorović & Janić, 2022).

## 2.4. Ciclos de condução padronizados

Um ciclo de condução é explicado como um programa que compila um perfil de velocidades atingidas por um veículo em função do tempo decorrido (Cleveland & Morris, 2015) no estudo representativo da condução do veículo em diferentes estados: imobilizado, em aceleração, em desaceleração e em velocidade constante (Amirjamshidi, 2015). Este tipo de teste é realizado em laboratórios aprovados com recurso a um dinamómetro chassis, programado para assimilar as condições e padrões de condução pretendidos (Tzirakis et al., 2018). É bastante utilizado na indústria automóvel para a estimativa das emissões dos veículos, do consumo de combustível e avaliação do seu desempenho (Wang et al., 2008).

Um ciclo de condução deve representar a média dos padrões de condução da área que é simulada (Wang et al., 2008). Como tal, existem ciclos de condução desenvolvidos por entidades ou países diferentes com o objetivo de simular o desempenho dos veículos em cada um desses territórios. Devido às características únicas das áreas em estudo nos designados ciclos de condução, tais como comportamentos na condução e topografia da rede de estradas, afirma-se que nem todos os ciclos de condução desenvolvidos num certo país ou região são adaptáveis a países ou regiões terceiras (Gebisa et al., 2021).

Os ciclos de condução podem ser divididos em duas categorias:

- **Legislativos:** os ciclos de condução legislativos são estabelecidos para a certificação da circulação de veículos que cumpram as especificações das emissões impostas pelos respetivos governos. Neste grupo situam-se os ciclos de condução padronizados, eficazes, acreditados e utilizados por entidades competentes na obtenção de dados técnicos dos veículos (Brady & O'Mahony, 2016). Na Tabela 2, verificam-se alguns ciclos de condução padronizados, com informação sobre a sua origem e o tipo de veículo a que estão destinados:

Tabela 2 – Exemplos de ciclos de condução padronizados

| NOME             | ORIGEM                    | TIPO DE VEÍCULO |         |
|------------------|---------------------------|-----------------|---------|
| NEDC             | União Europeia            | Ligeiros        |         |
| WLTP             |                           |                 |         |
| FTP75            | Estados Unidos da América |                 |         |
| HWFET            |                           |                 |         |
| 10-15 mode cycle | Japão                     |                 |         |
| JC08             |                           |                 |         |
| Heavy-Duty FTP   | União Europeia            |                 | Pesados |
| SORT             | Internacional (UITP)      |                 |         |
| WHTC             | Estados Unidos da América |                 |         |

- **Não legislativos:** são ciclos de condução direcionados para a pesquisa científica, como a conservação de energia e a avaliação da poluição (Brady & O'Mahony, 2016).

Apesar de os ciclos de condução serem ferramentas úteis para a comparação de consumos de combustível, emissões e autonomia, a sua correlação com uma condução em tempo real é fraca, pois existem variações nas condições da condução em tempo real. Consequentemente, estas variações levam a valores de consumo de combustível, emissões e autonomia significativamente diferentes dos previstos (Brady & O'Mahony, 2016).

Em contrapartida aos ciclos de condução criados a partir de circunstâncias teoricamente aproximadas à realidade dos veículos, existe o conceito de ciclos de condução reais. Estes ciclos de condução são construídos a partir da recolha de dados sobre a velocidade e tempo, quando o objeto de estudo se encontra em plena atividade de mobilidade. Por sua vez, esta recolha é realizada a partir de instrumentos equipados no veículo em estudo. A construção destes ciclos engloba a especificação do tipo de rota, do tipo de veículo, do tempo de ciclo e do nível de velocidade (Hung et al., 2007), considerando também as condições de trânsito a que o veículo pode ser exposto (Kamble et al., 2009).

Segundo Liu et al. (2016), a eficácia dos ciclos de condução é profundamente dependente das condições criadas para a representação de práticas realistas de condução, pelo que existem ciclos de condução dedicados a diferentes padrões de condução. Exemplifica-se o caso da americana EPA (*Environmental Protection Agency*), que desenvolveu os ciclos FTP, HWFET, SFTP, US06, SC03 e C-FTP.

## **2.5. Estratégias utilizadas para a criação de ciclos de condução**

Segundo Tzirakis et al. (2018), existem dois métodos de criação de um ciclo de condução: o método modal ou poligonal, através da composição de vários modos de condução, em aceleração, desaceleração e velocidade constantes, numa base teórica; a criação de um ciclo de condução real, derivado da análise de dados obtidos de uma situação de condução real, que são mais dinâmicos e refletem padrões de aceleração e desaceleração mais rápidos. Deste modo, existem várias estratégias de criação de ciclos de condução desenvolvidas por autores desta área, discriminadas segundo os dois métodos mencionados.

Os ciclos de condução criados são avaliados segundo as suas métricas de desempenho em relação aos dados que constam numa base de dados empírica. Os ciclos são tão bons quanto menor for o erro relativo em relação aos dados empíricos (Bishop et al., 2012).

Seguidamente, serão analisados diversos casos de estudo referentes ao desenvolvimento de ciclos de condução.

### **2.5.1. Desenvolvimento de um ciclo de condução para Hong Kong**

Tong et al. (1999) optou pelo desenvolvimento de um ciclo de condução real, aproximando-o o mais possível à realidade do trânsito de Hong Kong, pois não existia ainda um ciclo de condução capaz de descrever com eficácia as emissões dos veículos na cidade. Para tal, recolheu os dados velocidade e tempo de um ciclo de condução realizado em duas rotas urbanas, que representam áreas diferentes da cidade. A recolha realizou-se com recurso a um sensor fotoelétrico para a medição da velocidade do motor e da velocidade rotativa do veio de transmissão, bem como um

microcomputador para o armazenamento dos dados. Neste ciclo de condução, foram considerados quatro modos de condução:

- 1) Marcha lenta;
- 2) Em aceleração, cujo valor de aceleração seja superior a  $0,1 \text{ m/s}^2$ ;
- 3) Em velocidade de cruzeiro, cujo módulo do valor de aceleração seja inferior a  $0,1 \text{ m/s}^2$ ;
- 4) Em desaceleração, cujo valor de aceleração seja inferior a  $-0,1 \text{ m/s}^2$ .

Deste conjunto de períodos de condução (segmento de dados velocidade-tempo entre momentos de marcha lenta) observados, foram selecionados os vinte períodos cujos parâmetros de avaliação melhor se aproximam dos parâmetros do conjunto de dados completo, sendo os parâmetros:

- 1) Velocidade média no ciclo de condução;
- 2) Velocidade média de corrida;
- 3) Aceleração média em todas as fases de aceleração;
- 4) Desaceleração média em todas as fases de desaceleração;
- 5) Distância média de um período de condução;
- 6) Proporção de tempo dos modos de condução;
- 7) Média de transições aceleração-desaceleração (e vice-versa) num só período de condução;
- 8) Raiz da média dos quadrados da aceleração;
- 9) Energia cinética positiva da aceleração.

Após a recolha de dados e do cálculo das características de cada período, foram calculados os valores médios de cada característica. Caso os valores das características de cada período individual fossem diferentes dos valores médios em menos de 5%, o ciclo seria aceite para construção do novo ciclo de condução. Caso contrário, o processo de recolha de dados seria repetido. Este método implica que é possível gerar mais do que um ciclo, pelo que a partir dos ciclos obtidos, se deve escolher o melhor. No caso dos autores, foram analisados dez ciclos que cumpriram as regras acima descritas.

Para a escolha do melhor ciclo, foi utilizado um indicador denominado de função erro. Este indicador traduz-se pelo somatório da diferença percentual relativa das características de cada ciclo em relação aos valores médios das mesmas. O melhor ciclo de condução obtido apresentou características díspares em relação aos ciclos de condução padronizados anteriormente criados, mas que melhor descreve o desempenho dos veículos de Hong Kong.

### **2.5.2. Desenvolvimento de um ciclo de condução típico para um autocarro híbrido elétrico citadino com uma rota fixa**

Shen et al. (2018) apresentam a construção de um ciclo de condução real para um autocarro híbrido elétrico com atribuição de uma rota baseada nas suas características de paragens frequentes. Para tal, os autores descartam a hipótese de uma construção comum, resumida pela combinação de micro viagens parciais e recurso aos métodos PCA (*Principal Component Analysis*) e de agrupamento. Isto porque, comparativamente a veículos ligeiros e especiais, os autocarros públicos param e arrancam mais vezes, aumentando o número de micro viagens observadas e a variabilidade da sua duração, o que conduz a um grande esforço computacional. Assim, os autores promovem a construção de um ciclo de condução a partir de segmentos cinemáticos: segmentos de ciclos de condução com duração fixa.

Como primeiro passo, foram recolhidos os dados de velocidade-tempo de um ciclo de condução de Xangai pré-existente, que consiste num percurso com 38 km e 58 estações. Os dados referem-se a dias laborais, fins-de-semana, horas de ponta e trânsito estável. A recolha de dados foi realizada com recurso a um gravador de dados, cujo ciclo de gravação foi definido para 0,2 segundos. A duração da amostragem foi de 200 horas, em que mais de 80 horas se referem ao tempo de amostragem eficaz, para assegurar a capacidade da amostra e a fiabilidade dos dados. No pré-processamento dos dados, foram extraídos os seguintes parâmetros característicos:

- Rácio de tempo de aceleração;
- Rácio de tempo de desaceleração;
- Rácio de tempo em marcha lenta;
- Rácio de tempo em velocidade constante;
- Velocidade máxima;
- Velocidade média;
- Desvio-padrão da velocidade;
- Aceleração máxima;
- Aceleração mínima;
- Desvio-padrão da aceleração;
- Aceleração média;
- Desaceleração média.

No segundo passo, é desenvolvido um ciclo de condução típico a partir do método PCA, para a redução dimensional dos dados, e do método de agrupamento por k-médias, para agrupar os dados segundo as suas similaridades. Para determinar qual o melhor valor de k, baseado nos trabalhos de outros autores, os presentes testaram os valores de k igual a dois, três e quatro. Posteriormente na comparação dos resultados obtidos, verificou-se que o melhor para atribuir a k seria três, pelo que todos os grupos são claros e nitidamente bem divididos.

No terceiro passo, é criado o ciclo de condução típico, com a conexão de segmentos cinemáticos aleatoriamente escolhidos de cada grupo. No entanto, a proporção de segmentos de cada grupo no ciclo de condução deve ser igual à proporção dos grupos na base de dados original. De igual modo, as flutuações de velocidades elevadas foram evitadas através do ajustamento dos segmentos e a tolerância dos valores de aceleração e desaceleração baseou-se nos parâmetros máximo e mínimo desta componente na base de dados original. Após calculados os parâmetros do novo ciclo de condução e comparados com os parâmetros do ciclo original, verificou-se que o erro máximo entre parâmetros foi de 14,85% e que a maior parte dos erros são inferiores a 10%. Esta informação significa que o novo ciclo de condução reflete bem as características do ciclo de condução original. No entanto, este método não reproduz todas as características do ciclo de condução, principalmente devido às flutuações de velocidade.

Assim, no quarto passo, é exposto um método melhorado de construção de ciclos de condução. Para a resolução do problema descrito, a segmentação da base de dados original certifica-se que a velocidade no final de cada segmento é nula, evitando as flutuações de velocidade e conservando as características do ciclo original. O método contempla também a nomenclatura de cada paragem de autocarro e o cálculo da distância entre paragens. O número de amostras retirado da base de dados original foi 14, o suficiente para atingir um erro referente às distâncias entre paragens de 0,5%. Após calculados os parâmetros característicos dos segmentos, segundo o método típico, seria

utilizado o PCA para a redução dimensional dos dados, significando a perda de algumas características do ciclo original. No entanto, por este caso contemplar menos segmentos e, portanto, significar um peso computacional menor, não foi necessário recorrer ao PCA. Assim, recorreu-se ao cálculo das correlações entre os segmentos e o ciclo de condução original, de modo a obter os segmentos mais significativos.

O ciclo de condução melhorado é finalmente obtido através da conexão destes segmentos, cujos parâmetros característicos foram previamente normalizados para evitar o impacto das dimensões das diferentes unidades de cada parâmetro. Após calculados os parâmetros do ciclo de condução melhorado, e comparados com os parâmetros do ciclo original, verificou-se que o erro máximo entre parâmetros foi de 8,95% e que a maior parte dos erros são inferiores a 5%. Assim, o novo ciclo de condução reflete bastante bem as características do ciclo de condução original. Em suma, o ciclo de condução melhorado, comparativamente ao ciclo de condução típico, é mais eficaz e requer menos necessidades computacionais.

### **2.5.3. Pesquisa sobre a construção de um ciclo de condução baseado no método híbrido de ordenação de tempo**

Li et al. (2020) explicam a construção de um ciclo de condução para a classificação do nível de congestão das estradas. Este ciclo foi desenvolvido a partir do pré-processamento dos dados de condução do veículo em estudo, sendo depois divididos em 591 segmentos cinemáticos, delimitados por momentos em que o veículo se encontrava em marcha lenta. Seguidamente, foram extraídos os valores de 15 parâmetros característicos, em cada segmento. Para a análise dos dados, recorreu-se à ferramenta PCA para redução da dimensão dos parâmetros, integrando-os no menor número possível de parâmetros característicos representativos. De seguida, realizou-se o agrupamento por k-médias, de modo a dividir os dados em diferentes categorias de acordo com as suas características.

Para a síntese do ciclo de condução, são selecionados os segmentos cinemáticos representativos de acordo com o método do coeficiente da correlação. Assim, foram obtidos quatro ciclos de condução: condições de congestionamento severas, condições de congestionamento médias, condições de congestionamento reduzidas e condições normais. Destes quatro ciclos, foi elaborado o ciclo de condução final, a partir da conexão de segmentos desses ciclos. Quando comparados os ciclos de condução original e elaborado, verifica-se um erro relativo entre parâmetros característicos de 10%.

### **2.5.4. Utilização de bases de dados de ciclos de condução reais para a criação de ciclos de condução com propriedades equivalentes**

Nyberg et al. (2016) apresentam uma metodologia sistemática que permite desenvolver vários ciclos de condução representativos, a partir de uma base de dados obtida em condições reais de condução. Esta metodologia contempla a combinação entre uma abordagem da cadeia de Markov e o conceito de ciclos de condução equivalentes, ou seja, ciclos de condução com características bastante idênticas. A abordagem da cadeia de Markov visa a utilização de uma base de dados de velocidade-aceleração para a construção de uma matriz de probabilidade de transição de uma

cadeia de Markov, de modo que os ciclos de condução criados tenham as mesmas propriedades estatísticas.

Os indicadores de desempenho escolhidos para a análise do ciclo de condução criado foram a força de tração média (também denominada de energia específica ou intensidade da força), descrita como a energia de tração efetuada sobre as rodas, e os seus componentes individuais. Isto porque os autores consideraram como fatores chave o sistema de tração do veículo em estudo e as exigências físicas realizadas sobre as rodas do mesmo.

Os dados de velocidade-aceleração utilizados para a criação do ciclo de condução foram obtidos a partir de veículos operados em condições de trânsito reais, resultando num conjunto de 466 períodos de condução na zona oeste da Suécia. A categorização dos ciclos de condução observados foi realizada segundo a velocidade positiva média ou segundo a distância percorrida.

Para extrair a informação necessária e utilizá-la de forma compacta, recorreu-se à formulação de uma cadeia de Markov com uma matriz de probabilidade de transição. O processo de criação do ciclo de condução consiste no início do mesmo com valores de velocidade e aceleração nulos. De seguida, escolhe-se aleatoriamente o próximo estado de acordo com as probabilidades geradas pela matriz de probabilidade de transição representativa da cadeia de Markov. Neste processo foram estipuladas restrições de aceleração, de modo que o ciclo de condução fosse abrangente o suficiente à maioria dos veículos em circulação. A criação do ciclo termina quando é atingida uma determinada duração (estipulada pelos criadores do ciclo) e quando a velocidade atinge novamente o valor zero.

Para verificar a representatividade dos ciclos criados, os seus parâmetros característicos são avaliados. Para este efeito, recorre-se à regressão linear para compreender quais os parâmetros mais significativos na descrição da força de tração média, ou ao PCA, para reduzir o número de parâmetros correlacionados. Caso os parâmetros não respeitem as condições determinadas, terá de ser criado um novo ciclo de condução.

Finalmente, o ciclo de condução criado é transformado num ciclo de condução equivalente. Os autores afirmam que o método de criação de ciclos de condução concebido é um sucesso, dada a capacidade de controlar a duração da computação e a sua aplicabilidade no desenvolvimento e teste de motores de combustão interna.

### **2.5.5. Desenvolvimento de ciclos de condução para veículos elétricos no contexto da cidade de Florença**

Berzi et al. (2016) seguiu uma metodologia de criação de ciclos de condução para veículos elétricos em Florença, com base na recolha de dados de ciclos de condução reais. A aquisição dos dados velocidade-tempo e do desempenho do sistema propulsor foi realizada a partir de instrumentos de medição, instalados em veículos utilizados tanto em serviço privado como laboral. Estes instrumentos recolheram os dados segundo uma frequência de 4 Hz. A duração desta recolha foi de nove meses, contabilizando um total de 2.500 km. O processamento dos dados iniciou-se com a filtração dos mesmos, de modo a eliminar *outliers* e outros dados irregulares. Esta filtração realizou-se com recurso a um filtro de Kernel, considerando um intervalo de um segundo.

Seguidamente, visando o agrupamento dos dados em diferentes categorias, converteram-se os dados em micro viagens (trajetos delimitados por dois momentos de marcha lenta) e calcularam-se dois conjuntos de parâmetros para cada micro viagem: um vetor de parâmetros característicos dos ciclos de condução realizados; uma matriz densidade sobre a velocidade-aceleração (SAPD - *Speed Acceleration Probability Distribution*).

Antes da aplicação do algoritmo de agrupamento dos dados, realizou-se uma limpeza manual dos mesmos, excluindo micro viagens de distância curta. Estas micro viagens podiam incluir dados não compatíveis com a criação de ciclos de condução gerais, tais como micro viagens incompletas ou deslocamentos de marcha-atrás. O algoritmo utilizado para o agrupamento dos dados foi o agrupamento por k-médias. As condições delineadas para a partição dos dados foram:

- Cada amostra é descrita pelos elementos da SAPD e pelos indicadores raiz da média dos quadrados, aceleração positiva relativa e energia cinética positiva, que contêm informação sobre a velocidade e aceleração das micro viagens;
- A distância das k-médias é calculada como a correlação entre pontos;
- O valor de k é nove.

Após o agrupamento dos dados, o processo de criação do ciclo de condução propriamente dito inicia-se com as seguintes etapas:

- 1) Seleção das micro viagens a serem consideradas, dependendo da profundidade do ciclo;
- 2) Seleção da distância do ciclo;
- 3) Seleção aleatória de micro viagens até alcançar a distância de ciclo definida;
- 4) Repetição da etapa três até conceber o número predeterminado de ciclos.

Seguidamente, o ciclo de condução final é selecionado dentro do grupo de ciclos criados num processo de três passos:

- 1) Considerando os parâmetros característicos de cada ciclo, as diferenças entre os valores dos mesmos e os valores dos parâmetros característicos da base de dados original devem ser inferiores a 5%, em 11 dos 12 parâmetros;
- 2) Para o conjunto de ciclos obtido no passo anterior, aprovar apenas os ciclos com valores de desempenho similares;
- 3) Para o conjunto de ciclos obtido no passo anterior, escolher aquele cuja diferença da soma dos quadrados da velocidade-aceleração seja menor na matriz SAPD.

Caso o ciclo de condução selecionado não satisfaça as condições definidas, o processo inteiro de criação de ciclos deve ser repetido.

### **2.5.6. Identificação compreensiva de estilos de condução baseada no reconhecimento do ciclo de condução de um veículo**

Liang et al. (2022) apresenta a uma ferramenta de reconhecimento do ciclo de condução, que toma em consideração as características da ação de conduzir e pretende reproduzir estilos de condução mais longos, ao contrário da maior parte dos estilos de condução curtos analisados. Os autores defendem esta ideia para descrever o desempenho de veículos, considerando assim períodos de condução mais longos e variáveis, em detrimento da análise de ciclos de condução curtos. Isto porque estes não são capazes de traduzir o desempenho global de um condutor, ignorando

situações que levam a estilos de condução diferentes, “tais como engarrafamentos e condução a alta velocidade”.

Num primeiro passo, são calculadas as características de condução visadas e reduzida a dimensão dos dados utilizados através do método PCA. Seguidamente, recorreu-se a um algoritmo de agrupamento de duas fases baseado na otimização de k-médias por enxame de partículas, por sua vez otimizado pelo algoritmo genético. Com este passo, obtiveram-se três estilos de condução: conservador, convencional e agressivo. No terceiro passo, os autores construíram e compararam dois modelos de reconhecimento instantâneo dos estilos de condução: o primeiro a partir do algoritmo de k-médias e o segundo a partir de redes neurais artificiais, prevalecendo este último com uma eficácia de 97,5%, contra uma eficácia de 92,8% do primeiro. Deste modelo, surgiu um outro modelo de identificação de estilos de condução com a utilização do processo AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Com a realização de testes práticos a veículos, conclui-se que o modelo desenvolvido foi capaz de identificar corretamente os estilos de condução observados.

### **2.5.7. Desenvolvimento de um ciclo de condução para autocarros em Debrecen com base em dados de trânsito reais**

Vamosi et al. (2022) apresentam o desenvolvimento de um ciclo de condução de autocarros a partir de dados práticos. Para tal, planeou-se a extração de características de condução, a construção de ciclos de condução candidatos a partir dessas mesmas características e a determinação da representatividade estatística de cada ciclo. No fim, selecionou-se o ciclo com maior representatividade.

O método utilizado pelos autores denomina-se método de micro viagem, caracterizado como uma viagem entre duas paragens. Estas paragens podem ser derivadas de semáforos vermelhos, entrada e saída de passageiros, entre outras situações. Primeiramente deu-se o pré-processamento dos dados, com a filtração destes para eliminar objetos imprecisos, e a divisão dos perfis de condução originais em micro viagens. Seguidamente, de forma a realizar o agrupamento dos dados, selecionaram-se três características de condução, escolhidas pelo seu efeito nas emissões dos veículos: velocidade média, aceleração média e tempo em repouso. Este agrupamento foi realizado segundo o algoritmo de agrupamento de k-médias, tendo-se estudado o número ótimo de grupos recorrendo aos métodos: *Elbow Method*, *Silhouette Method* e *Gap Static Method*.

Neste estudo, reduziram-se os dados em dois modos bidimensionais: o primeiro conjugando as características velocidade média e percentagem de tempo em repouso; o segundo conjugando as características velocidade média e aceleração média. Todos os métodos justificaram o número ótimo de 2 grupos para o primeiro modo e 3 grupos para o segundo modo. Após realizado o agrupamento dos dados, verificaram-se as proporções de cada grupo relativamente à base de dados completa. Isto porque, para a construção do ciclo de condução, selecionaram-se micro viagens de cada grupo de acordo as respetivas proporções. Adicionalmente, seguiram-se três métodos de construção:

- 1) A micro viagem mais perto do centro de cada grupo é selecionada e pesada segundo a respetiva proporção;

- 2) As micro viagens são aleatoriamente selecionadas de cada grupo, retirando o número de micro viagens de acordo com a proporção do grupo;
- 3) As micro viagens mais perto do centro do grupo são retiradas, numa quantidade baseada na proporção do grupo.

Assim, obtiveram-se seis ciclos de condução diferentes, derivados da conjugação entre cada modo e método de construção. Para a comparação entre os diferentes ciclos, utilizaram-se dois métodos:

- a comparação segundo a velocidade média, velocidade de cruzeiro média, aceleração média, desaceleração média, raiz da média da aceleração ao quadrado, percentagem de tempo de repouso e o indicador da raiz da média dos quadrados, que conjuga todos os parâmetros;
- a comparação com base na SAPD, uma ferramenta de classificação da velocidade e aceleração, regida pelo indicador qualidade de ajuste.

O melhor modelo foi o DC23, obtido a partir do modo 2 segundo o método de construção 3, com um indicador da raiz da média dos quadrados de 0,0823 e uma qualidade de ajuste de 0,0278 (quanto menores estes valores, melhor o modelo).

### 3. MÉTODOS E APLICAÇÃO

A ideia de uma ferramenta de criação de ciclos de condução nasce da situação atual do programa de simulações de consumos energéticos dos autocarros da CaetanoBus, os principais valores que representam os produtos da empresa a novos clientes. Para simular estes consumos, importam-se os ciclos de condução visados segundo os requisitos dos novos clientes para o programa, de modo que este reproduza uma aproximação do desempenho energético dos autocarros a comercializar. Os ciclos de condução utilizados atualmente para este efeito reduzem-se a perfis de velocidade-tempo *standard* com valores de aceleração e desaceleração constantes em cada momento de variação da velocidade. A duração destes ciclos é de aproximadamente 1 hora, sendo que, para reproduzir ciclos de condução com duração superior, é realizada a repetição do mesmo ciclo. Estes factos atribuem um carácter de sazonalidade ao método atual de reprodução do desempenho energético destes autocarros, não contabilizando assim o fator de aleatoriedade associado a uma condução realista. De igual modo, estes ciclos de condução não contabilizam outras variáveis com possível impacto no consumo energético dos autocarros, tais como a inclinação da estrada e o número de paragens dedicadas à entrada e saída de passageiros. Com a nova ferramenta de criação de ciclos de condução, a simulação do consumo energético dos autocarros tornar-se-ia mais robusta e aproximada à realidade retratada pelo cliente.

Esta ferramenta de criação de ciclos de condução idealiza a construção de um perfil de velocidades que se aproxime à realidade operacional do cliente. Ou seja, um perfil que retrate as características de condução de um autocarro na localidade onde o mesmo circulará. Como tal, a utilização de dados teóricos sobre o desempenho do autocarro, nestas condições pretendidas pelo cliente, foi uma hipótese descartada à partida, devido ao erro associado.

Após uma reflexão sobre os recursos disponíveis e as soluções possíveis para a resolução deste problema, concluiu-se que o melhor processo de criação de ciclos de condução aproximados à realidade de novos clientes é a construção de perfis de velocidade a partir de dados históricos de autocarros em circulação. Deste modo, a informação utilizada é válida por ser composta por dados reais.

Para obter o ciclo de condução final, a ferramenta procede à união de micro viagens que respeitam as características de condução pretendidas, até garantir um perfil de velocidades que cumpra as condições impostas. Para tornar esta opção possível, é necessária a criação de uma base de dados que contenha uma amostra das micro viagens efetuadas pelos autocarros construídos pela CaetanoBus e as características de condução das mesmas, bem como das localidades onde circulam. Os ciclos de condução obtidos a partir da ferramenta foram avaliados em comparação com os valores do consumo energético observado nos ciclos de condução recolhidos, que constituem a base de dados.

Este capítulo é inicialmente composto pela apresentação da metodologia utilizada para o processamento dos dados extraídos da base de dados dos autocarros comercializados pela CaetanoBus, onde é explorado o procedimento tomado e o *output* obtido, bem como a exposição e compreensão da ferramenta concebida para a criação do ciclo de condução.

Para efeitos de compreensão do conhecimento exposto, admita-se que: uma “micro viagem” é definida como o trajeto de um autocarro entre dois momentos consecutivos em que se encontra

imobilizado; uma “viagem” traduz-se pelo trajeto entre dois momentos em que ocorreu a entrada e/ou a saída de passageiros; um “ciclo” é definido com um período contínuo em que o autocarro esteve em operação.

Os autocarros elétricos em estudo tratam-se de exemplares do modelo *e.CityGold*, contando com baterias de capacidade de carga até 422 kWh. Os autocarros híbridos a hidrogénio estudados são produtos do modelo *H2.CityGold*, contando com um motor de 180 kW e baterias de capacidade de carga desde 44 kWh até 80 kWh.

### 3.1. Estudo do impacto das variáveis independentes sobre o desempenho de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio

Os autocarros produzidos e comercializados pela CaetanoBus são dotados de equipamentos que monitorizam a atividade dos mesmos, armazenando os dados recolhidos numa plataforma virtual telemática. A partir da mesma, foram recolhidos os dados históricos dos autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio em circulação, referentes ao período compreendido entre março de 2022 e março de 2023. Para obter uma maior precisão sobre as variáveis em estudo, realizou-se a extração destes dados com um passo de 1 segundo entre valores devolvidos. No entanto, devido a leituras incorretas, estes contemplam extratos ocasionais com passo superior a 1 segundo.

Dos autocarros disponíveis de ambas as monitorizações, apenas foram estudados os exemplos que cumpriram pelo menos 10.000 km neste período. O motivo para tal deve-se ao facto de que, nas primeiras extrações destes dados, reparou-se que alguns autocarros não apresentavam um comportamento comum, observando trajetos bastante curtos e não representativos da realidade de qualquer tipo de autocarro. Estes trajetos podem estar relacionados com avarias, manutenções ou fases de testes. Assim, de modo a evitar o processamento de dados não fidedignos, o filtro utilizado para eliminar este problema foi o cumprimento de pelo menos 10.000 km, validado a partir de conhecimento técnico da empresa.

Tal como as restantes análises apresentadas mais adiante, esta análise foi realizada a partir do *Knime Analytics Platform*, um programa de análise de dados a partir da programação por blocos, para a limpeza, preparação e construção dos dados necessários. O objetivo visado para este subcapítulo expressa-se pela conjugação das variáveis retiradas da plataforma da CaetanoBus e verificação do seu impacto no desempenho dos autocarros. Este impacto será medido a partir do cálculo dos valores de correlação entre as variáveis concebidas. Os dados foram agrupados pelos ciclos verificados na análise dos dados, de modo a avaliar o impacto a um nível macro.

As correlações obtidas para os autocarros elétricos e para os autocarros híbridos a hidrogénio estão expostas na Figura 4 e na Figura 5, respetivamente, sob o formato de cores. Ou seja, quanto mais densa for a cor alocada a um determinado par de variáveis, mais próximo é o seu valor de correlação de 1 ou -1. Caso a cor seja azul, é mais próximo de 1. Caso a cor seja vermelha, é mais próxima de -1.

Para os autocarros elétricos, visualizamos as correlações entre os seguintes fatores:

- *Sum(Time)*: soma do tempo decorrido, expresso em segundos;
- *Mean(Accel)*: o valor médio de aceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Mean(Desaccel)*: o valor médio de desaceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Sum(Dist)*: a soma da distância percorrida, expressa em km;

- *Max\*(Accel)*: o valor máximo de aceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Min\*(Desaccel)*: o valor mínimo de desaceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Max\*(Inclinacao)*: valor máximo de inclinação da estrada, expresso em %;
- *Min\*(Inclinacao)*: valor mínimo de inclinação da estrada, expresso em %.
- *Mean(Speed)*: média dos valores de velocidade verificados, expresso em km/h;
- *PP/Km*: rácio da quantidade de paragens de passageiros por quilómetro;
- *Consumo HVAC*: consumo energético dedicado à atividade HVAC (expresso em kWh/km);
- *Consumo Elétrico*: consumo energético da motorização (expresso em kWh/km);
- *PT/Km*: rácio da quantidade de paragens de trânsito por quilómetro.

Dentro do panorama observado, destacam-se as correlações associadas ao consumo elétrico e ao consumo HVAC, sendo que entre ambas existe uma correlação positiva forte. Ao consumo elétrico estão associadas correlações positivas com os fatores PT/Km e PP/Km, indicando que quanto maior o número de imobilizações dos autocarros, maior é o consumo.

Entre o consumo elétrico e a velocidade média, existe uma correlação negativa, pelo que para valores de velocidade média do ciclo superiores, obter-se-ão valores de consumo elétrico inferiores. Por sua vez, estarão relacionadas as correlações da velocidade média com a aceleração média (correlação negativa) e com a desaceleração média. Ou seja, para valores de velocidade média de ciclo superiores, a variação da velocidade é inferior, o que por sua vez significam necessidades de potência inferior ao motor elétrico, resultando em menores consumos. Em corroboração, verificam-se as correlações de aceleração média e PP/Km, aceleração média e PT/Km, desaceleração média e PP/Km e desaceleração média e PT/Km. Uma quantidade de paragens superior, quer de passageiros quer de trânsito, está relacionada com uma aceleração média e desaceleração média superiores em valor absoluto.

No caso dos autocarros híbridos a hidrogénio, existem 3 fatores adicionais para análise:

- *Mean(SetPoint)*: valor médio de temperatura objetivo associada ao sistema HVAC;
- *Consumo H2*: consumo da *fuel cell* (expresso em kg/km).

Observando as correlações associadas ao fator de consumo da *fuel cell*, encontramos associações positivas fortes com os fatores de aceleração média, aceleração máxima e rácio de paragens de passageiros por quilómetro. Por outro lado, verificam-se correlações negativas fortes com os fatores de desaceleração média, desaceleração máxima, velocidade média do ciclo e rácio de paragens de trânsito por quilómetro. Destas associações, apenas uma não corrobora a exposição realizada no parágrafo anterior, sendo esta a correlação entre o consumo da *fuel cell* e o rácio de paragens de trânsito por quilómetro, cuja justificação reside nas relações do sistema de gestão energética (*fuel cell* e motor elétrico). Adicionalmente, existe uma correlação negativa relativamente baixa entre o consumo da *fuel cell* e o consumo energético relacionado com a atividade HVAC. Em semelhança ao conteúdo exposto acima, a resposta a este comportamento reside nas interações do sistema de gestão energética.

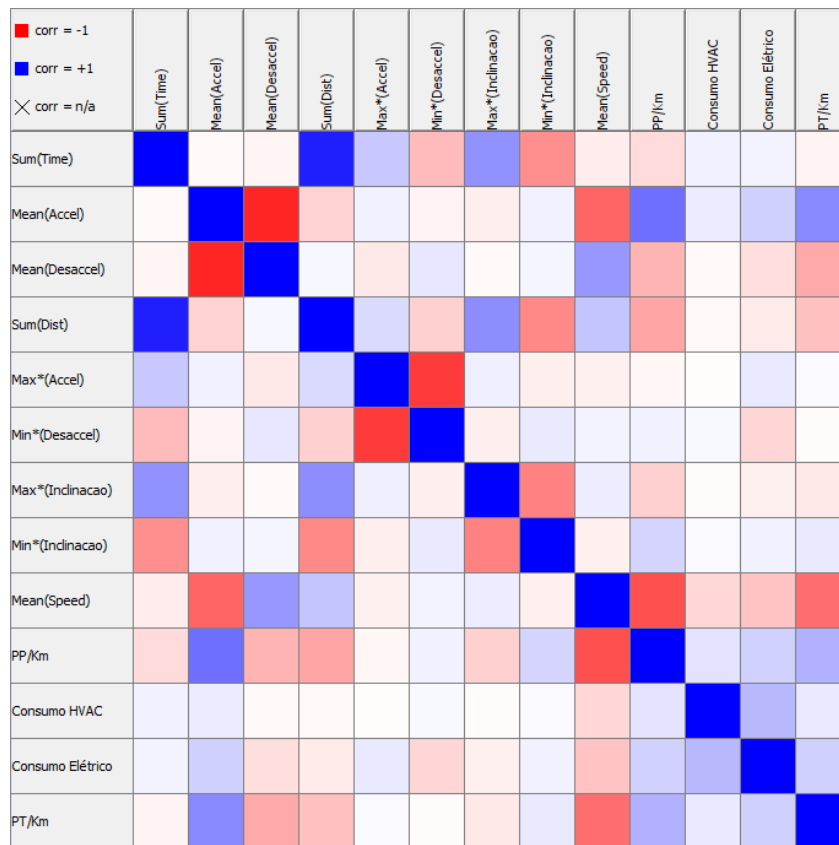


Figura 4 – Tabela de correlações das variáveis em estudo para autocarros elétricos

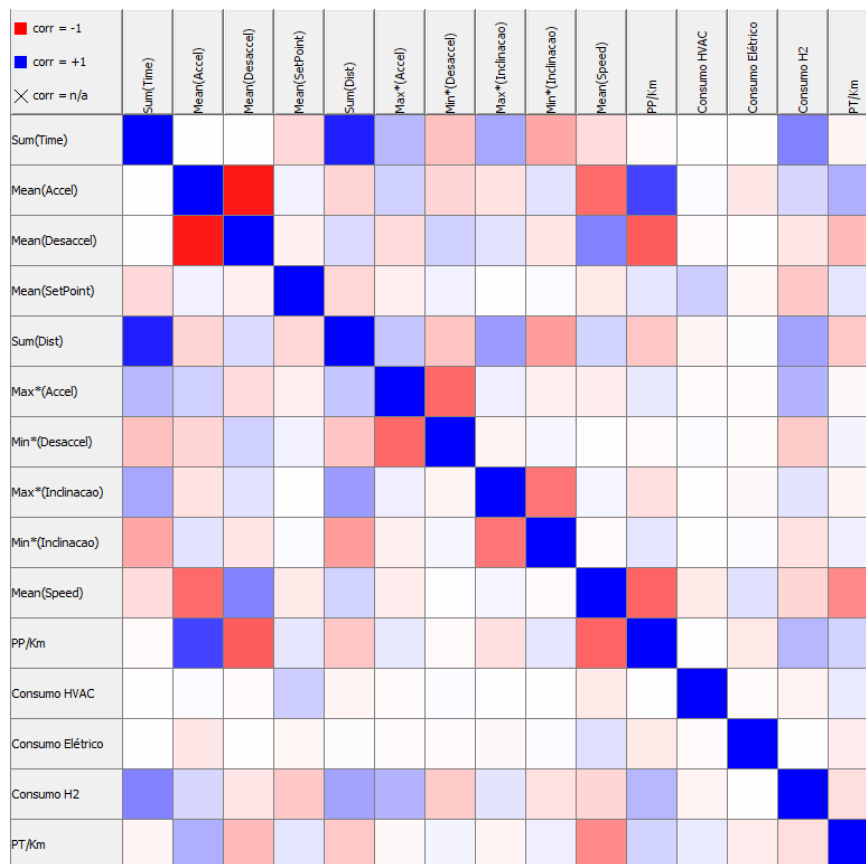


Figura 5 – Tabela de correlações das variáveis em estudo para autocarros híbridos a hidrogénio

### 3.2. Processamento e estudo dos dados históricos de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio

O início desta etapa traduz-se pela extração dos dados dos autocarros disponíveis, segundo a frota à qual pertencem, para ficheiros de formato CSV, contendo as seguintes colunas:

- *Name*: o nome do autocarro;
- *ISO Time*: a data e hora em que a informação foi registada;
- *Altitude*: a altitude a que o autocarro circulava em relação ao nível do mar;
- *Portas*: um valor binário que indica se as portas de entrada de passageiros estão abertas ou fechadas;
- *Speed*: a velocidade a que o autocarro circulava no momento da leitura, expressa em km/h;
- *Running*: um valor binário que indica se o autocarro está em operação, incluindo momentos de mobilidade ou imobilidade (devido ao trânsito e à entrada e saída de passageiros);

Recorrendo à API (*Application Programming Interface*) *Historical Weather* da *Open Meteo*, recolheram-se os dados meteorológicos históricos relativos às localidades onde estes autocarros circularam, contendo as seguintes informações:

- Temperatura máxima, expressa em graus Celsius;
- Temperatura média, expressa em graus Celsius;
- Temperatura mínima, expressa em graus Celsius.

Numa primeira análise, observou-se que poucas das variáveis disponíveis recolhidas representavam os parâmetros pretendidos para a caracterização do comportamento dos autocarros. No entanto, a sua conjugação permitia alcançar esses parâmetros. Assim, recorreu-se ao *Knime Analytics Platform*, um programa de análise de dados a partir da programação por blocos, para a limpeza, preparação e construção dos dados necessários. Com o *Knime*, procedeu-se à criação do fluxo observado. A Figura 6 representa o fluxo de manipulação de dados criado para este propósito:

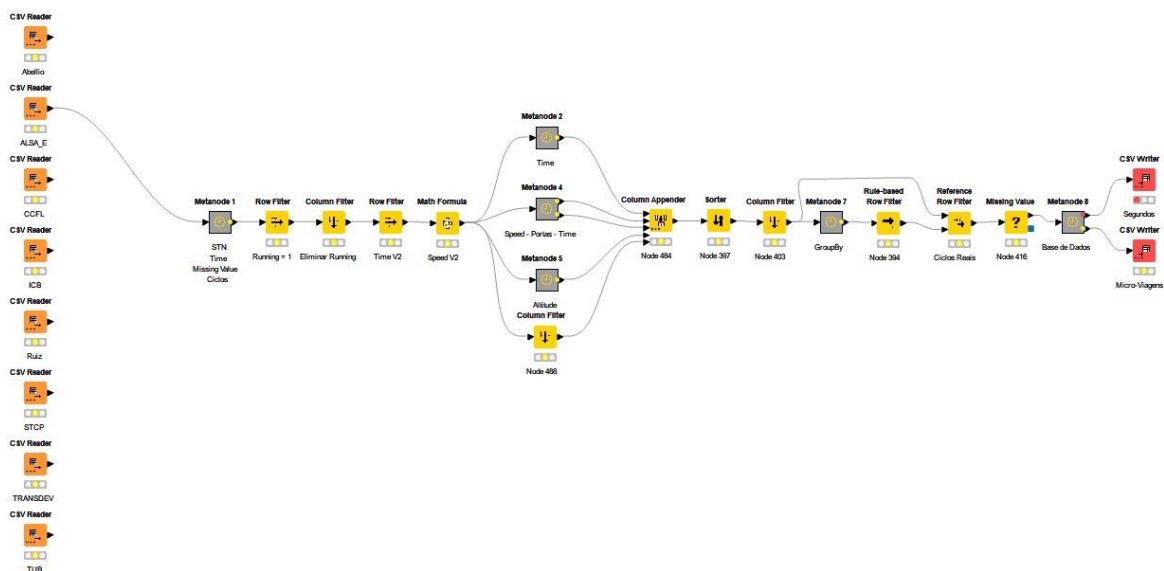


Figura 6 – Processamento de dados no *Knime*

Após a importação do ficheiro de dados CSV extraídos da plataforma de dados da CaetanoBus, é realizado um processo de preparação e manipulação dos mesmos, de modo a obter o *output*

desejado, que por sua vez servirá de *input* para a ferramenta de criação de ciclos de condução. Este processo pode ser visualizado na Figura 7.

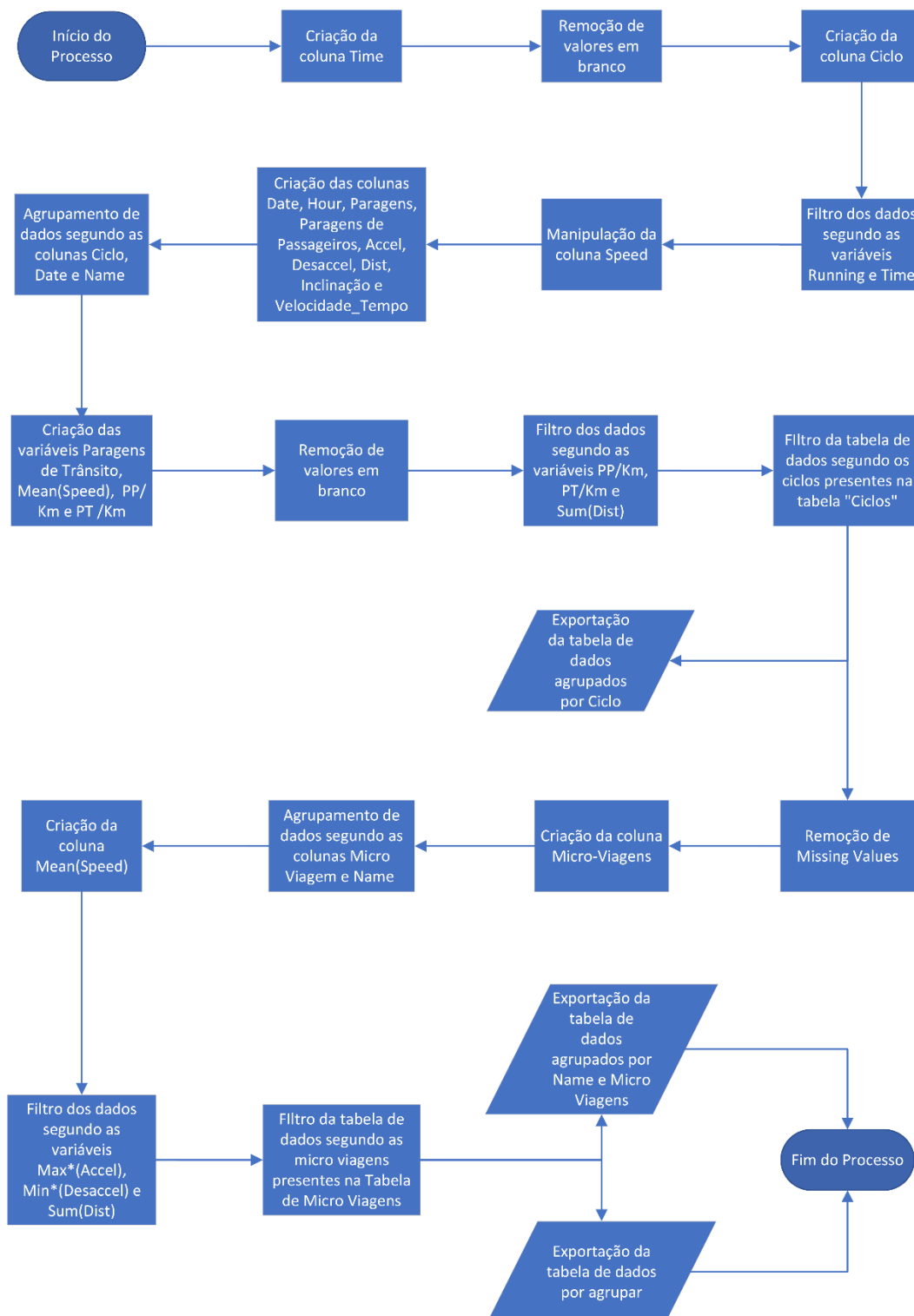


Figura 7 – Fluxograma do processamento de dados em Knime

Após a importação de dados, o primeiro passo dá-se pela criação da coluna *Time*, que representa a diferença, em segundos, entre os dados registados de cada linha da tabela. Seguidamente, são removidos os valores nulos presentes na tabela, de modo a obter uma tabela apenas com linhas completas.

A coluna “Ciclo” é criada para categorizar numericamente cada ciclo realizado pelos autocarros. Esta coluna baseia-se nos valores da coluna *Running* para determinar a existência de um novo ciclo. Isto é, sempre que existir uma linha cujo valor da variável *Running* seja 1 e que o valor da linha antecessora seja 0, significa que o autocarro foi ligado e assim preparado para iniciar um novo ciclo de condução.

Seguidamente, são aplicados dois filtros à tabela de dados atual:

- Filtro segundo a variável *Running*, removendo todas as linhas cujo valor da variável seja 0 e obtendo apenas os dados referentes aos períodos em que os autocarros realizam um ciclo;
- Filtro segundo a variável *Time*, removendo todas as linhas cujo valor da variável seja superior a 60.

O último filtro é necessário pois, apesar de na ordem de extração dos dados da plataforma telemática explicitar-se que os mesmos devem representar a duração de 1 segundo, os ficheiros CSV exportados contêm leituras de duração superior, representando erros de leitura comprovados pela empresa.

Posteriormente, a coluna *Speed* é manipulada de modo que todos os valores de velocidade inferiores a 3,6 km/h sejam convertidos a zero, uma vez que o erro associado à leitura da velocidade do autocarro é de 3,6, assegurando assim os momentos em que o autocarro se encontra realmente em movimento ou imóvel.

No passo seguinte, criam-se as seguintes colunas:

- *Date*: que contém a data correspondente à leitura das informações;
- *Hour*: que contém a hora correspondente à leitura das informações;
- *Paragens*: imobilizações do autocarro durante o percurso;
- *Paragens de Passageiros*: imobilizações que contemplam a entrada ou saída de passageiros;
- *Accel*: que contém os valores de aceleração do autocarro, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Desaccel*: que contém os valores de desaceleração do autocarro, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Dist*: que contém a distância percorrida pelo autocarro, expresso em km;
- *Inclinacao*: que contém os valores de inclinação do percurso que o autocarro cumpriu, expresso em %;
- *Velocidade\_Tempo*: obtida a partir da multiplicação entre as colunas *Speed* e *Time*.

A criação da coluna *Velocidade\_Tempo* tem origem no facto de a duração de algumas leituras ser superior a 1 segundo, pelo que para efeitos de cálculo da velocidade média atingida pelo autocarro (que serão expostas posteriormente), não é válido realizar uma média aritmética dos valores de velocidade. Assim, para calcular a velocidade média do autocarro num dado período, procede-se à divisão entre os valores de *Velocidade\_Tempo* desse período pelos respetivos valores da coluna *Time*.

Sublinhe-se que os valores de inclinação presentes na plataforma telemática virtual da empresa não são fidedignos, pelo que os valores utilizados para este estudo foram gerados a partir de uma distribuição gaussiana de média igual a 0, com um desvio-padrão de valor 15. Esta ação foi validada pela experiência dos colaboradores da empresa que auxiliaram nesta temática.

Com a criação destas colunas, garante-se informação suficiente para proceder à criação de uma nova tabela denominada de “Ciclos”, resultante do agrupamento de todas as colunas da tabela atual segundo as colunas *Ciclo*, *Date* e *Name*. Nesta tabela, pretende-se resumir a informação de

todos os ciclos da tabela atual em estudo. As colunas são assim agrupadas de forma a obter as seguintes colunas:

- *Sum(ParagensPassageiros)*: soma do nº de paragens de passageiros realizadas;
- *Sum(Time)*: soma do tempo decorrido, expresso em segundos;
- *Sum(Paragens)*: soma do nº de paragens realizadas;
- *Sum(Velocidade\_Tempo)*: soma dos valores da coluna *Velocidade\_Tempo*;
- *First(Hour)*: o primeiro valor da coluna *Hour* registado no ciclo, ou seja, a sua hora de início;
- *Last(Hour)*: o último valor da coluna *Hour* registado no ciclo, ou seja, a sua hora de fim;
- *Sum(Dist)*: a soma da distância percorrida, expressa em km;
- *Max\*(Accel)*: o valor máximo de aceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Min\*(Desaccel)*: o valor mínimo de desaceleração verificado, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Max\*(Inclinacao)*: o valor máximo de inclinação verificado, expresso em %;
- *Min\*(Inclinacao)*: o valor mínimo de inclinação verificado, expresso em %.

De seguida são criadas as colunas “PP/Km” e “PT/Km”, que contêm valores sobre a quantidade de paragens de passageiros por quilómetro percorrido e a quantidade de paragens de trânsito por quilómetro percorrido, respetivamente. Adicionalmente é criada a coluna *Mean(Speed)*, resultante da divisão entre as colunas *Sum(Velocidade\_Tempo)* e *Sum(Time)*, que contém os valores da velocidade média observada em cada ciclo (expressa em km/h).

Após uma remoção de valores em branco (necessária devido à criação das colunas anteriormente expostas) da tabela “Ciclos”, a mesma é filtrada segundo as variáveis *PP/Km*, *PT/Km* e *Sum(Dist)*, sendo que todas as linhas cujo valor de pelo menos uma das três colunas anteriores seja zero são eliminadas. O propósito deste filtro é a remoção de ciclos que representem erros de leitura. Por consequente, a tabela de dados original é filtrada de acordo com o valor da coluna *Ciclo* da tabela *Ciclos*, de modo que a primeira apenas contenha dados sobre ciclos de condução válidos. Por sua vez, a tabela *Ciclos* é exportada em formato de ficheiro Excel.

Após uma nova remoção de valores em branco, é criada uma coluna denominada “Micro-Viagens”, que categoriza os dados numericamente de acordo com a micro viagem em que se inserem. Esta divisão ocorre consoante os valores da coluna *Speed*. Isto é, sempre que o autocarro realiza uma paragem e depois retoma a marcha, é considerada uma nova micro viagem.

A partir da tabela atual, realiza-se novamente um agrupamento de dados, sendo este regido pelas colunas *Name* e *Micro-Viagem*. O nome da nova tabela será “Tabela de Micro-Viagens”. Assim, dá-se origem às seguintes colunas:

- *Sum(ParagensPassageiros)*: soma do nº de paragens passageiros realizadas;
- *Sum(Time)*: soma do tempo decorrido, expresso em segundos;
- *Sum(Velocidade\_Tempo)*: soma dos valores de *velocidade\_tempo*;
- *Mode(Hour)*: a hora em que ocorreu a maior parte da micro viagem;
- *Mode(Date)*: a data em que ocorreu a maior parte da micro viagem;
- *Max\*(Accel)*: valor máximo de aceleração, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Min\*(Desaccel)*: valor mínimo de desaceleração, expresso em  $m/s^2$ ;
- *Sum(Dist)*: distância percorrida durante a viagem, expressa em km;
- *Mean(Speed)*: média dos valores de velocidade verificados, expresso em km/h;
- *Sum(Time)*: duração da viagem, expressa em segundos;

- $Sum(ParagensPassageiros)$ : número de paragens para entrada e saída de passageiros contabilizado;
- $Max*(Speed)$ : velocidade máxima atingida, expressa em m/s;
- $Max*(Inclinacao)$ : valor máximo de inclinação da estrada, expresso em %;
- $Min*(Inclinacao)$ : valor mínimo de inclinação da estrada, expresso em %.

Posteriormente, na tabela de micro viagens, é criada a coluna  $Mean(Speed)$ , que, de modo análogo à tabela de Ciclos, é obtida a partir da divisão entre a coluna  $Speed$  e a coluna  $Time$ , igualmente expressa em km/h.

Seguidamente, esta mesma tabela é filtrada de acordo com os valores das colunas  $Max*(Accel)$ ,  $Min*(Desaccel)$  e  $Sum(Dist)$ , de modo a que:

- Sejam removidas as linhas cujo valor da coluna  $Sum(Dist)$  seja igual a zero;
- Sejam removidas as linhas cujo valor das colunas  $Max*(Accel)$  e  $Min*(Desaccel)$  sejam superiores a 4 e inferiores a -4, respetivamente. Este filtro tem origem nos valores de referência da CaetanoBus.

Para finalizar, a tabela de dados é filtrada segundo as colunas  $Name$  e  $Micro-Viagens$  de acordo com os valores das mesmas colunas da tabela de micro viagens. As duas tabelas são depois exportadas em formato Excel, sendo a primeira denominada de tabela “Segundos” e a segunda de “Micro-Viagens”. Estas tabelas servirão de *input* para a ferramenta de criação de ciclos de condução.

Este procedimento foi realizado para todos os ficheiros de dados de autocarros em estudo, agregando os dados segundo o tipo de autocarro. Ou seja, obtiveram-se os ficheiros “Segundos” e “Micro-Viagens” para cada tipo de autocarro. Na Figura 8, é possível observar o fluxo *Knime* de aglomeração da informação sobre os autocarros híbridos a hidrogénio:

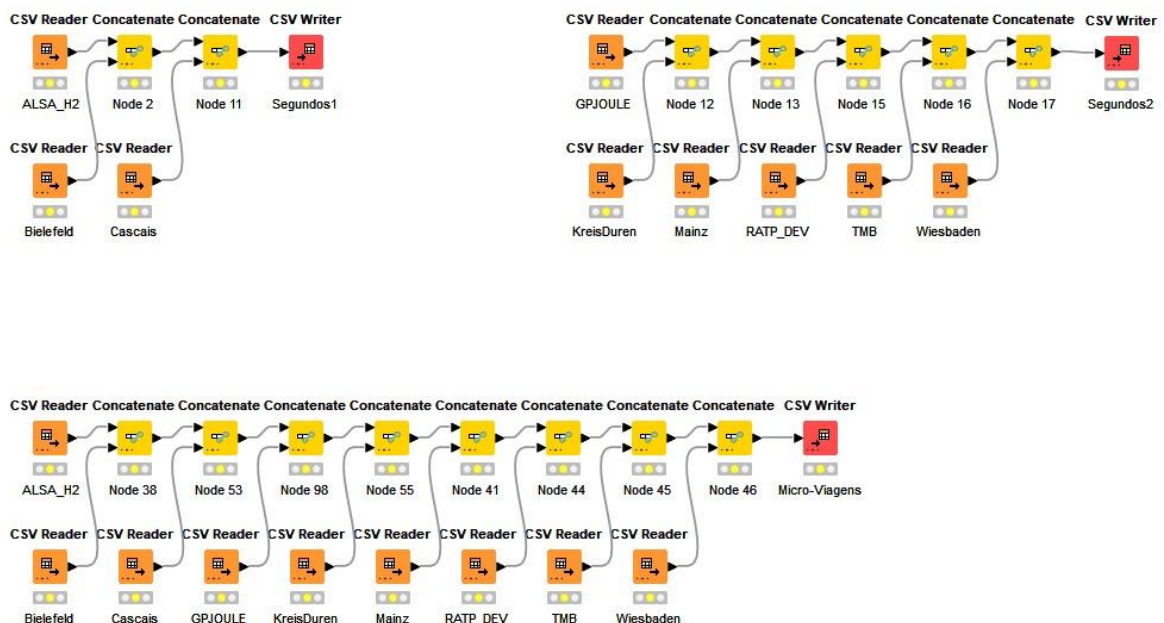


Figura 8 – Fluxo de aglomeração da informação de todas as frotas de autocarros híbridos a hidrogénio

### 3.3. Construção da ferramenta de criação de ciclos de condução em *Python*

A ferramenta de construção de ciclos de condução teria de ser concebida num ambiente de programação flexível e simples, capaz de materializar a lógica da sua estrutura de forma nítida e eficiente, visto que as bases de dados concebidas contêm imensa informação. Um ambiente que por sua vez teria de proporcionar a capacidade de ler, manipular e reproduzir dados de forma relativamente simples. Perante as opções alcançáveis no momento da elaboração deste projeto, optou-se por criar a ferramenta com recurso à linguagem de programação *Python*, que satisfaz todas as necessidades enunciadas.

Os objetivos a concretizar na elaboração da ferramenta de criação de ciclos de condução resumem-se ao seguinte:

- Criar uma ferramenta capaz de ler as bases de dados criadas anteriormente;
- Conjugar estocasticamente combinações de micro viagens para perfazer um ciclo de condução;
- Reproduzir o ciclo de condução criado numa tabela que contém as informações sobre as micro viagens selecionadas numa escala de tempo menor (em segundos);
- Descarregar um ficheiro Excel com a informação enunciada no ponto anterior, organizada de acordo com o *template* da ferramenta de simulação de ciclos de condução da CaetanoBus.

As restrições presentes neste exercício resultam da incorporação das características pretendidas para o ciclo de condução a criar, de modo a obter uma aproximação ao cenário de condução pretendido pelo utilizador da ferramenta. As restrições são as seguintes:

- O ciclo de condução deve ter início e término nas horas de início e término desejadas;
- Cada grupo de dados referentes ao período de uma hora deve respeitar esta duração. Ou seja, a soma da variável temporal (expressa em segundos) de um grupo de dados referente a uma mesma hora deve perfazer um total de 3.600 segundos;
- O valor da velocidade máxima do ciclo de condução deve ser inferior ou igual ao valor da velocidade máxima exigida;
- O valor da velocidade média verificada no ciclo de condução deve tomar o valor da velocidade média exigida, admitindo um erro de mais ou menos 1 km/h;
- Os valores da inclinação verificados no ciclo de condução devem respeitar os valores máximo e mínimo de inclinação exigidos;
- O número de paragens de passageiros do ciclo de condução deve ser igual ao número de paragens de passageiros exigido;
- As temperaturas ambiente verificadas no ciclo de condução teriam de respeitar os valores de temperatura máxima e mínima exigidos;
- A variação da temperatura no ciclo de condução deve ocorrer de acordo com o decorrer do ciclo e da hora indicada.

#### 3.3.1. Requisitos

Para a concretização desta ferramenta, tomaram-se os seguintes recursos: ao nível de *hardware*, foi utilizado o computador ASUS VivoBook Pro 15 N580GD, que conta com:

- Processador Intel Core i7 de 7ª geração;
- Memória RAM de 4 GB;
- Armazenamento SSD de 8 GB.

Ao nível de *software*, foram utilizados os seguintes instrumentos:

- *Miniconda*: utilizado como interpretador de *Python* e como ponto de recolha de todos os módulos utilizados;
- *Spyder*: programa emulador de *Python* onde foi desenvolvido todo o código. Este foi escolhido dada a sua capacidade gráfica para visualização dos dados;
- *Módulo Pandas*: utilizado para a leitura, manipulação e escrita dos dados sobre as micro viagens dos autocarros;
- *Módulo Random*: utilizado para gerar valores aleatórios;
- *Módulo Time*: utilizado para calcular a duração de cada simulação;
- *Módulo Math*: utilizado para realizar operações matemáticas específicas;
- *Módulo SciPy*: para realizar operações de otimização, a partir do seu componente “*Optimize*”.

### 3.3.2. Metodologia

A abordagem utilizada para enfrentar o problema exposto não resultou da aplicação direta de uma ferramenta ou metodologia científica específica. Isto porque, perante a pesquisa realizada sobre as possíveis metodologias aplicáveis para este caso, nenhuma se enquadrava de forma eficiente no panorama do problema. Estas metodologias foram concebidas para a sua aplicação sobre o estudo de um ciclo de condução característico de apenas um cenário específico, baseado em dados históricos sobre a atividade rodoviária desse mesmo cenário. Para este efeito, é necessária uma metodologia capaz de desenvolver ciclos de condução para diferentes cenários, baseada em dados históricos sobre a atividade rodoviária de outros cenários distintos. Assim sendo, optou-se por desenvolver uma metodologia própria para a ferramenta de criação de ciclos de condução.

Esta metodologia idealiza primeiramente a construção de um ciclo de condução a partir da combinação aleatória de várias micro viagens. As características deste ciclo são então calculadas. Comparando-as com as características pretendidas, serão removidas e/ou adicionadas micro viagens a este ciclo, até obter uma combinação de micro viagens que apresente as características desejadas. Para uma melhor compreensão desta atividade, existem três regras:

- 1) Na remoção de micro viagens do ciclo, apenas podem ser removidas as micro viagens que afetam negativamente o cumprimento das características objetivo do ciclo;
- 2) Na adição de micro viagens ao ciclo, apenas podem ser adicionadas as micro viagens que afetam positivamente o cumprimento características objetivo do ciclo;
- 3) Apenas é possível remover ou adicionar uma única micro viagem por cada iteração. Caso existam mais do que uma micro viagem a remover ou a adicionar, é selecionada aleatoriamente uma para o efeito.

Esta última regra tem como fundamento atribuir uma equidade probabilística a todas as possíveis soluções.

### 3.3.3. Estrutura do código

O código desenvolvido é apresentado através do fluxograma da Figura 9.

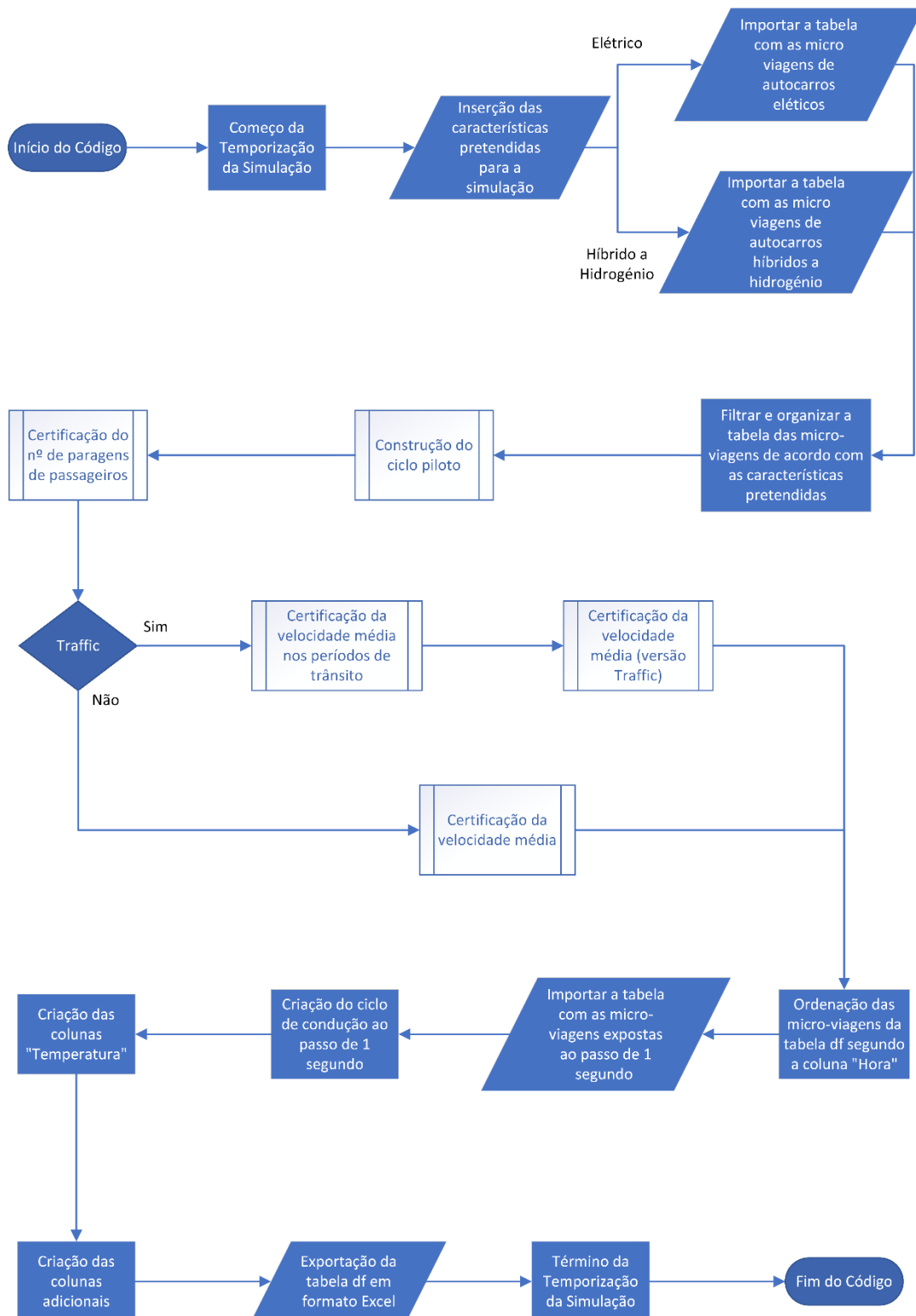


Figura 9 – Fluxograma do código de criação de ciclos de condução

O código inicia-se com a temporização da simulação. Este passo permitirá obter a duração da simulação.

Seguidamente, o utilizador do programa insere as características do ciclo de condução que pretende simular, sendo estas:

- o tipo de autocarro a simular com o ciclo de condução (elétrico ou híbrido a hidrogénio);

- a hora de início do ciclo;
- a hora de término do ciclo;
- a aceleração máxima pretendida para o ciclo;
- a aceleração mínima pretendida para o ciclo;
- o valor máximo de inclinação da estrada no ciclo;
- o valor mínimo de inclinação da estrada no ciclo;
- a velocidade máxima pretendida para o ciclo;
- a velocidade média pretendida para o ciclo;
- o número de paragens de passageiros pretendido para o ciclo;
- a adequação da densidade de trânsito de acordo com o horário escolhido (TomTom, 2023);
- o valor da densidade de trânsito pretendido;
- a temperatura ambiente máxima pretendida para o ciclo;
- a temperatura ambiente mínima pretendida para o ciclo;
- a média dos valores de temperatura máxima e mínima anteriormente enunciados;
- a hora prevista para o nascer do sol no cenário em que ocorre o ciclo;
- a hora prevista para o momento em que se atingirá a temperatura máxima do dia, obtidos a partir da hora média entre o nascer do sol e o pôr do sol.

A adequação da densidade de trânsito de acordo com o horário escolhido é realizada com base numa escala de densidade de trânsito concebida pela *TomTom*, denominada de *TomTom Traffic Index* (TomTom, 2023). Esta escala contém a informação de trânsito de várias cidades do mundo organizada de acordo com um indicador de desempenho, que representa o tempo médio que um automóvel demora a percorrer um percurso de 10 km. Visto que neste projeto se pretende a adequação da densidade de trânsito apenas a autocarros e que a escala da *TomTom* está direcionada para automóveis, são utilizados para este efeito os valores da escala original da *TomTom* multiplicados por 3. Esta ação está apoiada em estudos previamente realizados pela empresa.

Posteriormente, ocorre a importação da tabela de resumo de micro viagens do tipo de autocarro a simular. Com base no horário, valores de aceleração, valores de inclinação e valor máximo de velocidade inseridos, bem como na duração das próprias micro viagens, esta tabela é filtrada de modo a obter apenas as micro viagens que cumprem estas condições. Será esta a tabela que constituirá o *input* para a criação do ciclo de condução pretendido.

O próximo passo trata-se do subprocesso “construção do ciclo piloto”, ilustrado na Figura 10.

Neste subprocesso, pretende-se criar uma primeira versão do ciclo de condução, resumido a uma tabela de micro viagens selecionadas a partir da tabela de micro viagens inicial filtrada. Toda a ação baseia-se na organização do ciclo piloto por horas diárias. Ordenadamente, por cada hora presente no espaço horário pretendido para o ciclo, são adicionadas micro viagens da tabela inicial ao ciclo piloto, de forma aleatória. As micro viagens adicionadas ao ciclo piloto são retiradas da tabela inicial, de modo a não utilizar a mesma micro viagem mais do que uma vez. Esta adição termina quando a soma da duração das micro viagens selecionadas para a determinada hora seja igual ou superior a 3.600 segundos, que equivale a 1 hora. Caso esta duração total seja superior a 3.600 segundos, são retiradas aleatoriamente micro viagens do ciclo piloto cuja duração seja a mais próxima da diferença entre a duração total e 3.600 segundos. Esta ação termina quando não exista mais nenhuma micro viagem dentro do ciclo piloto que possa ser retirada de acordo com as

restrições impostas. Este subprocesso termina após reproduzir a seleção e exclusão de micro viagens para todas as horas do período temporal.

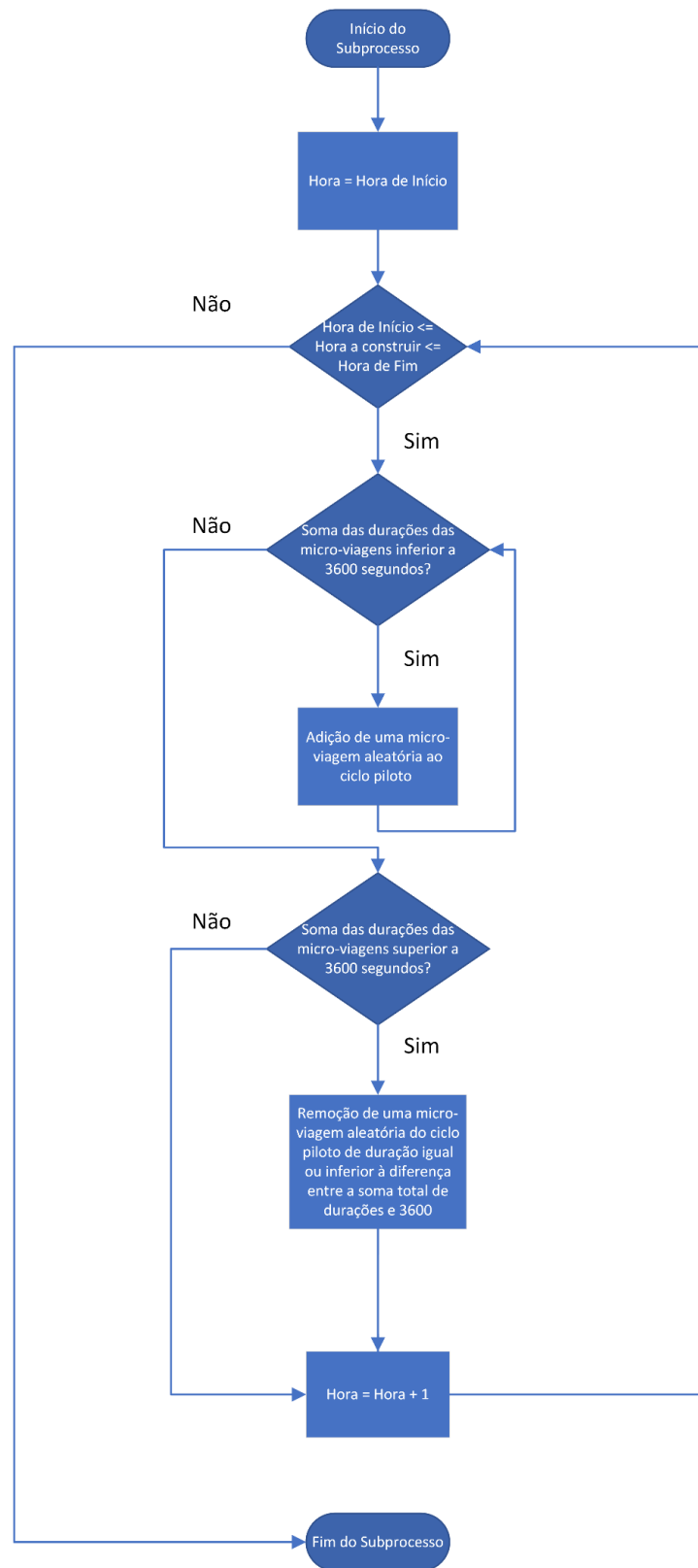


Figura 10 – Fluxograma do subprocesso "construção do ciclo piloto"

Seguidamente, ocorre o subprocesso “certificação do nº de paragens de passageiros”, ilustrado na Figura 11. Tal como o nome indica, pretende-se garantir que a quantidade de paragens de passageiros do ciclo é a quantidade indicada nos parâmetros acima. O subprocesso inicia-se com a averiguação da quantidade de paragens de passageiros do ciclo de condução e validação da mesma.

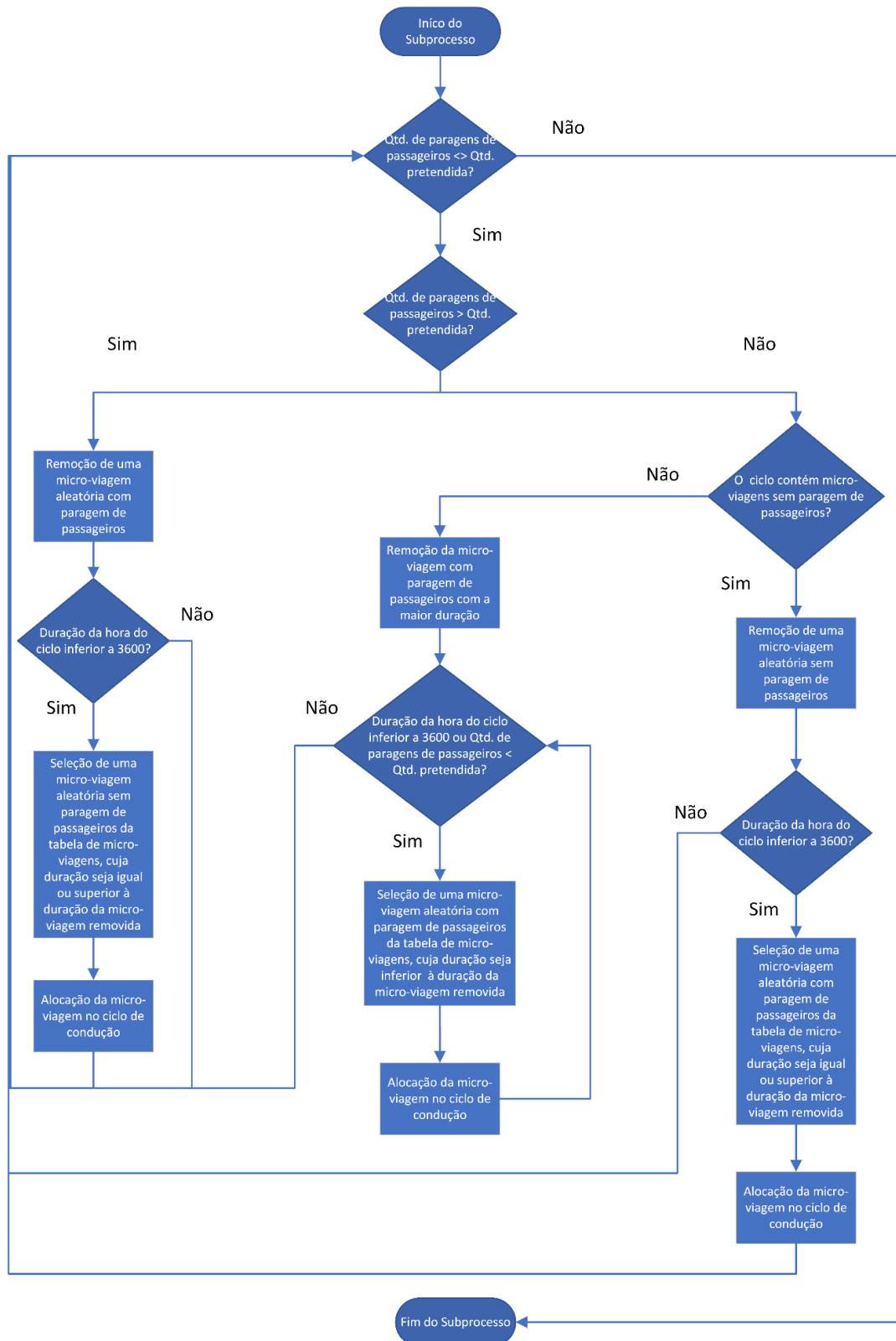


Figura 11 – Fluxograma da certificação do nº de paragens de passageiros

Caso esta quantidade seja superior ao valor desejado, é primeiramente removida do ciclo de condução, de forma aleatória, uma micro viagem do conjunto de micro viagens que contêm paragem de passageiros. Depois, é calculada a duração do espaço horário do ciclo do qual a micro viagem foi retirada. Caso a duração deste espaço horário seja inferior a 3.600 segundos, é selecionada aleatoriamente uma micro viagem sem paragem de passageiros da tabela de micro viagens e alocada ao ciclo de condução.

Caso a quantidade de paragens de passageiros do ciclo seja inferior ao valor desejado, dependendo da situação em concreto, podem ocorrer 2 procedimentos diferentes:

- 1) Caso o ciclo de condução contenha micro viagens com paragens de passageiros, é removida aleatoriamente uma destas micro viagens. Caso a duração do espaço horário do qual foi retirada a micro viagem seja inferior a 3.600 segundos, é selecionada aleatoriamente uma micro viagem com paragem de passageiros da tabela de micro viagens e alocada ao ciclo de condução;
- 2) Caso o ciclo de condução não contenha micro viagens com paragens de passageiros, é removida a micro viagem de maior duração do ciclo de condução. Enquanto a duração do espaço horário de onde foi removida a micro viagem for inferior a 3.600 segundos, são selecionadas aleatoriamente micro viagens com paragem de passageiros da tabela de micro viagens e alocadas ao ciclo de condução.

Este subprocesso termina quando a quantidade de paragens de passageiros desejada é atingida.

Finda esta etapa do processo de criação de ciclos de condução, ocorre uma bifurcação definida pela variável de trânsito.

Quando a variável de trânsito é igual a 1, o procedimento a tomar visa a concentração de micro viagens de menor velocidade média nos horários de trânsito mais comuns. De acordo com o conhecimento técnico da empresa, os horários de trânsito definidos para este efeito são o período entre as 7 e as 9 horas e o período entre as 17 e as 19 horas. Este procedimento é visível na Figura 12.

Após a seleção da hora do período de trânsito a trabalhar, é definida a velocidade média para este período, obtida a partir do valor da variável de trânsito inserida e com base na estrutura de categorização de trânsito da *TomTom*.

Para validar este espaço horário no procedimento, têm de ser respeitadas 2 condições:

- 1) O valor de velocidade média do espaço horário deve pertencer ao intervalo compreendido entre o valor de velocidade média desejado menos 1 km/h e o valor da velocidade média desejado mais 1 km/h. Este intervalo foi definido pela empresa;
- 2) A duração do ciclo deve tomar um valor situado dentro do intervalo definido entre 100% e 105% da duração pretendida para o ciclo. Esta restrição foi imposta devido ao facto de não existirem dados suficientes para retratar ao pormenor cenários raros. Assim, dando uma margem de 5% ao valor de duração pretendida, é possível simular estes cenários. Caso contrário, a ferramenta entra em sobrefluxo e não consegue devolver um ciclo de condução final.

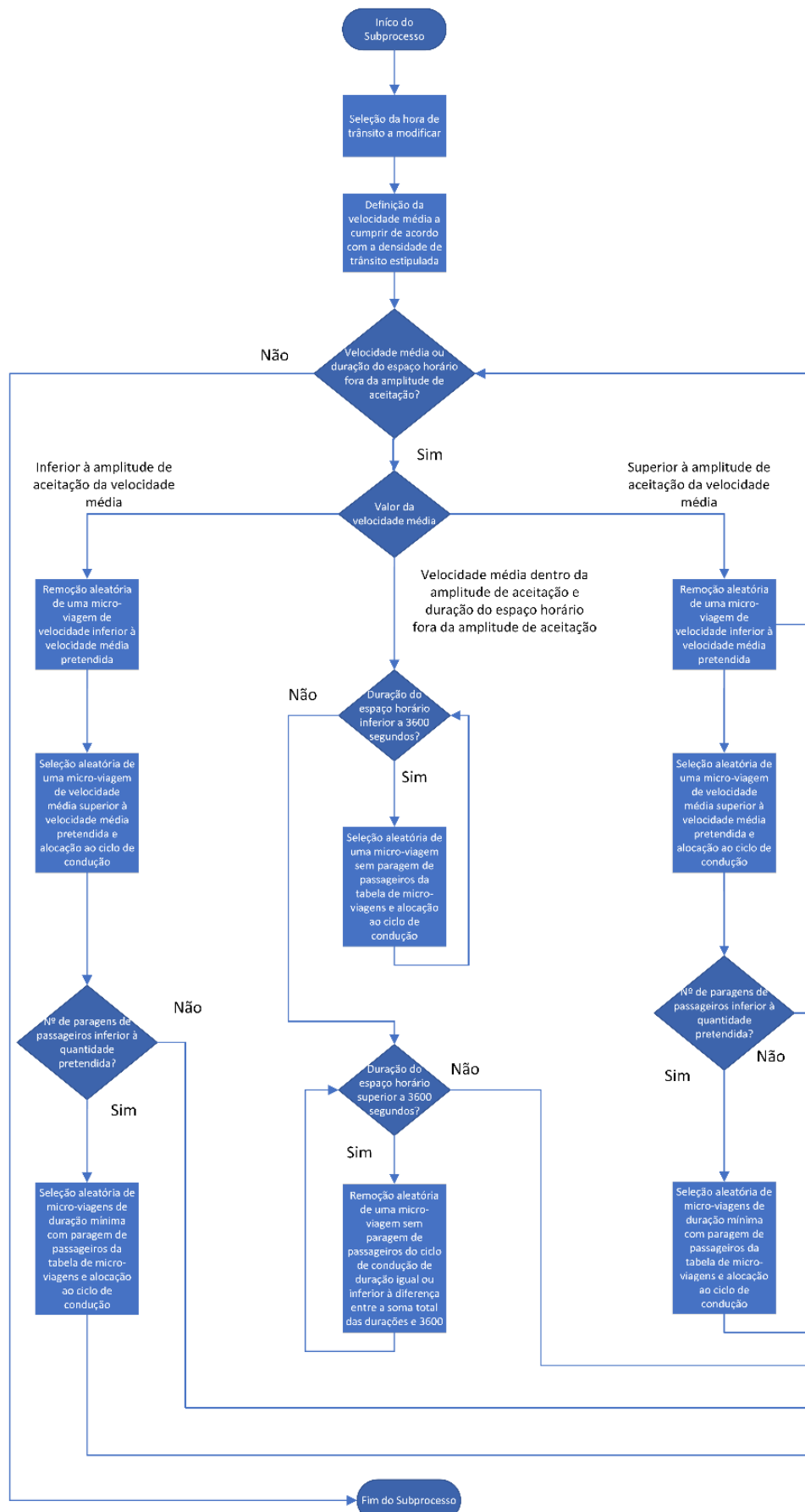


Figura 12 – Certificação da velocidade média nos períodos de trânsito

Perante a não conformidade destas duas restrições se confirme, poderão ocorrer três procedimentos:

- 1) No caso de a velocidade média do espaço horário ser inferior à velocidade média pretendida, é removida aleatoriamente uma micro viagem com velocidade média inferior à desejada desse espaço horário e adicionada aleatoriamente da tabela de micro viagens uma micro viagem com velocidade média superior à desejada, igual quantidade de paragens de passageiros à da micro viagem removida e duração preferencialmente igual ou superior à mesma;
- 2) No caso de a velocidade média do espaço horário ser superior à velocidade média pretendida, é removida aleatoriamente uma micro viagem com velocidade média superior à desejada desse espaço horário e adicionada aleatoriamente da tabela de micro viagens uma micro viagem com velocidade média inferior à desejada, igual quantidade de paragens de passageiros à da micro viagem removida e duração preferencialmente igual ou superior à mesma;
- 3) Caso a restrição da velocidade média seja cumprida, mas a restrição relativa à duração do ciclo não, é realizado um procedimento similar ao subprocesso “construção do ciclo piloto”. Neste procedimento, são adicionadas micro viagens aleatórias da tabela de micro viagens sem paragens de passageiros até que o espaço horário tenha pelo menos 3.600 segundos de duração. Se após este passo o espaço horário tiver uma duração superior a 3.600 segundos, são retiradas micro viagens aleatórias sem paragens de passageiros do ciclo de condução cuja duração seja compreendida entre a duração do espaço horário e os 3.600 segundos pretendidos, até se conseguir uma duração do espaço horário com esse valor. Caso não seja possível atingir esse objetivo, o procedimento termina se se garantir uma duração não superior a 105% dos 3.600 segundos.

O subprocesso termina quando as duas condições são cumpridas em todos os espaços horários com trânsito do ciclo.

No seguimento do processo anterior, existe um subprocesso bastante similar, apresentado na Figura 13. Este subprocesso certifica a velocidade média pretendida para todo o ciclo de condução, ajustando a velocidade média nos espaços horários que não contabilizam maior trânsito. Isto é, nos espaços horário fora dos períodos entre as 7 e as 9 horas e entre as 17 e as 19 horas.

Neste caso o período fora do horário de trânsito é trabalhado em conjunto, não ocorrendo a seleção de um espaço horário em específico a modificar.

A validação do ciclo de condução dá-se, igualmente, pelo cumprimento das 2 condições enunciadas no subprocesso anterior: tanto o valor da velocidade média do ciclo de condução como a duração do mesmo devem ficar dentro dos intervalos designados.

Perante a não conformidade das mesmas, incorre-se no mesmo procedimento de remoção e adição de micro viagens exposto anteriormente, sendo que a única diferença reside na população de micro viagens do ciclo de condução que podem ser removidas. Ao contrário do subprocesso anterior, poderão ser removidas micro viagens aleatoriamente de qualquer espaço horário que não pertença ao período de trânsito.

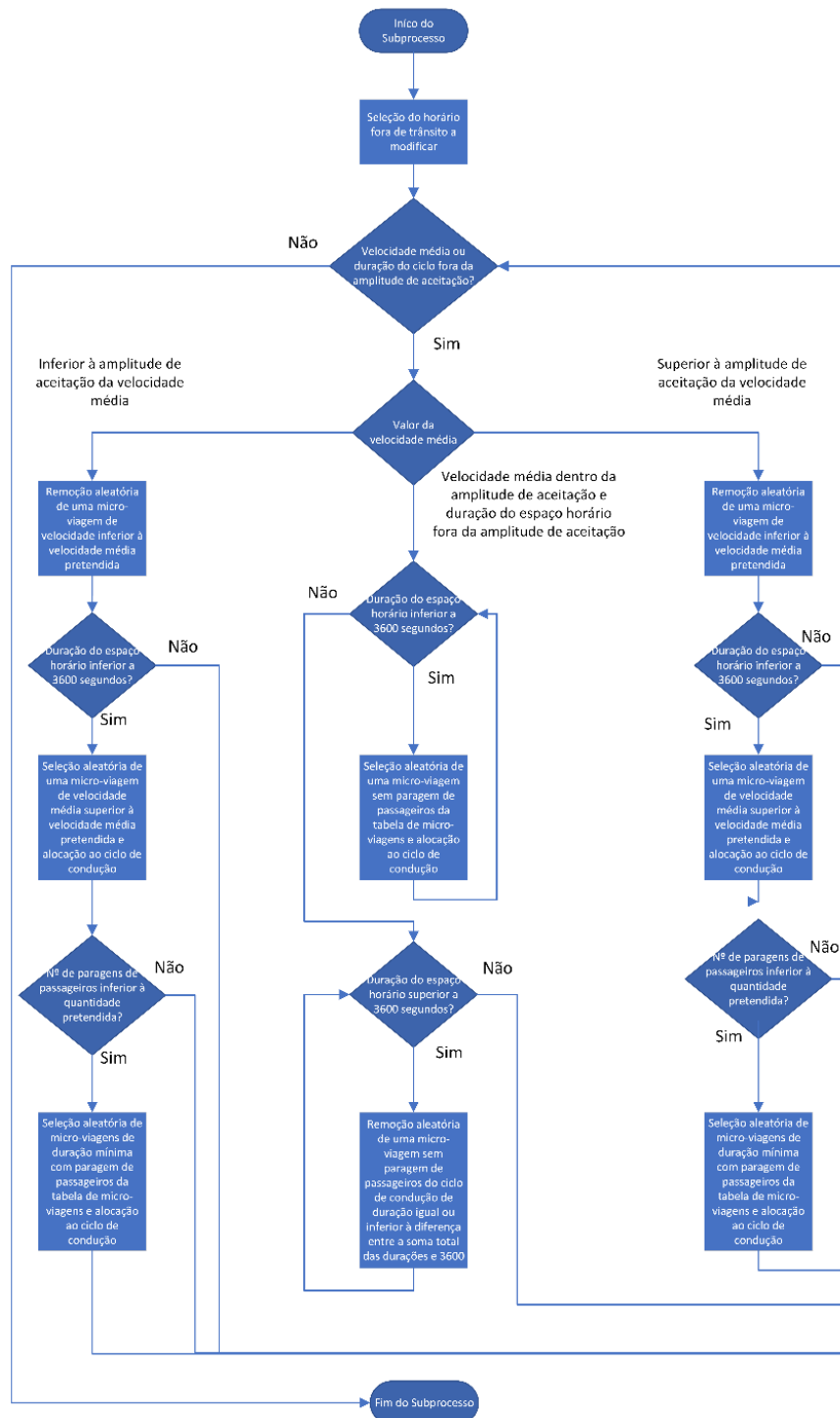


Figura 13 – Certificação da velocidade média no período fora de trânsito

Se o utilizador não pretender aplicar um cenário de trânsito intensificado no horário designado, a variável de trânsito deve ser 0, acionando o procedimento “certificação da velocidade média do ciclo (sem trânsito)”, exposto na Figura 14. Este subprocesso é quase idêntico ao subprocesso anterior, sendo que objetivo do atual é certificar o ciclo de condução com uma velocidade média igual (ou bastante próxima) ao valor desejado. Seguindo a linha de raciocínio, este subprocesso resume-se à remoção e adição aleatória de micro viagens de todo o ciclo de condução, de forma a atingir o objetivo pretendido. Este subprocesso termina quando tanto o valor de velocidade média como a duração total do ciclo se encontrem dentro dos intervalos designados.

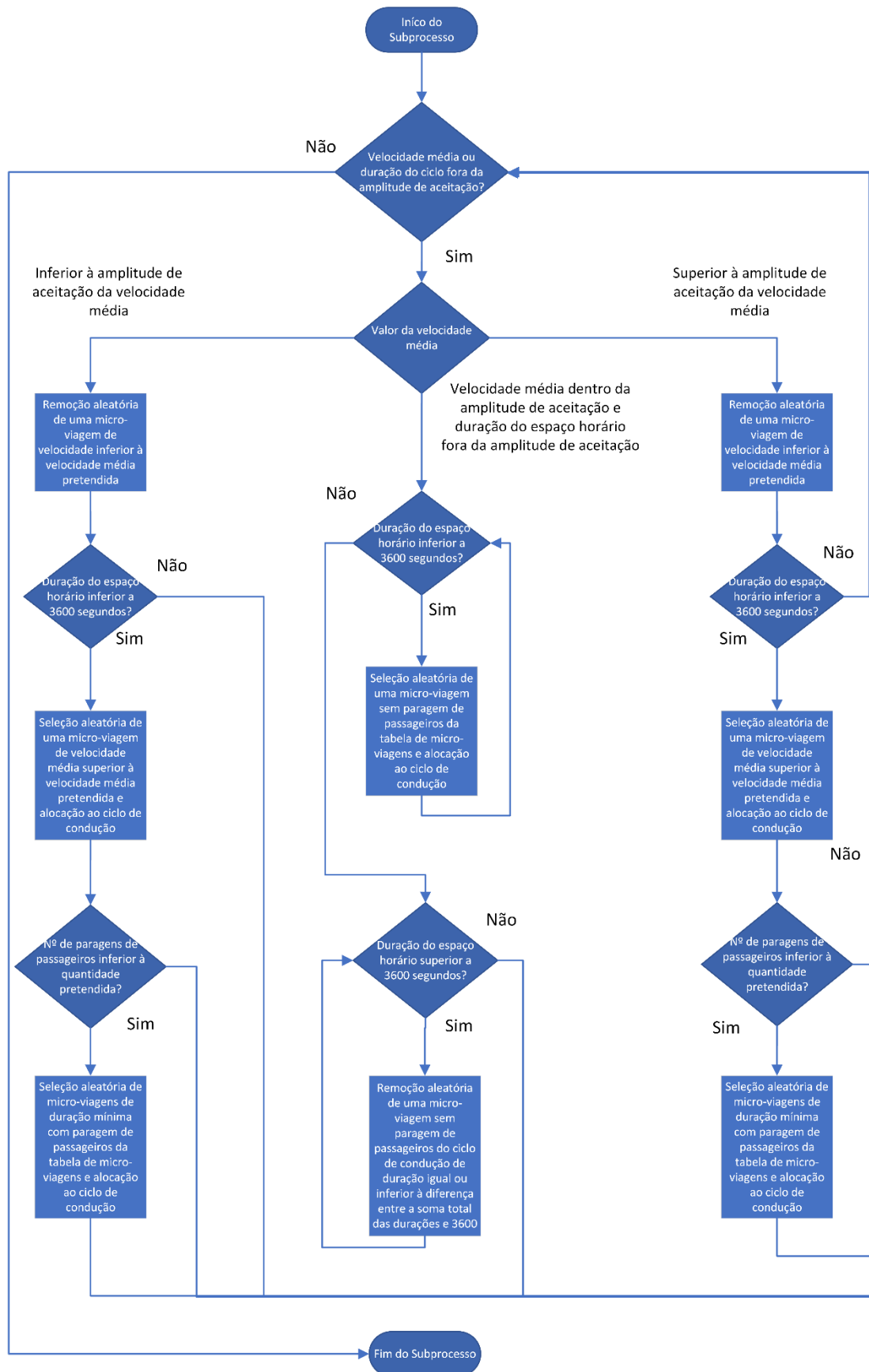


Figura 14 – Certificação da velocidade média do ciclo (sem trânsito)

No final do subprocesso anterior, o ciclo de condução encontra-se finalizado, assegurando todos os parâmetros inseridos pelo utilizador. No entanto, para redigir o perfil de velocidades necessário, deve-se realizar a conversão da informação reunida no ciclo de condução para intervalos de 1 segundo. Para tal, primeiramente, importa-se a tabela que contém todas as micro viagens do tipo de autocarro a simular, cuja informação já se encontra com um passo de 1 segundo. Seguidamente, percorrendo todas as micro viagens do ciclo de condução criado, é consolidado uma nova versão (tabela de micro viagens) do ciclo de condução, com todas as micro viagens selecionadas para o efeito ao passo de 1 segundo.

Posteriormente, é criada a informação “Temperatura”, que será associada a cada micro viagem do ciclo de condução como o valor da temperatura ambiente do local geográfico previsto para a simulação em cada momento da micro viagem, de acordo com o espaço horário em que as mesmas estão alocadas. Para determinar estes valores de temperatura, foi utilizado o método exposto em artigo por Chow & Levermore (2007), no qual se propõe um conjunto de equações matemáticas que possibilitam uma melhor aproximação ao valor de temperatura horária durante um ciclo de 24 horas. Como valores de *input*, são utilizadas a hora de início (que representa a hora anterior à hora do nascer do sol no local estudado) e a hora do momento de maior calor (que representa o ponto médio entre a hora do nascer-do-sol e a hora do pôr-do-sol).

Por necessidade da ferramenta de simulação de consumos da CaetanoBus, são criadas mais duas informações: o somatório do tempo decorrido no ciclo de condução em segundos e o somatório do tempo decorrido no ciclo de condução em horas.

Após a conclusão deste último passo, o ciclo de condução é finalizado, com a sua escrita num ficheiro Excel onde constam todas as informações sobre as micro viagens que o compõem.



## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos de simulações realizadas com base em ciclos de condução reais protagonizados pelos autocarros da CaetanoBus e discutida a eficácia da ferramenta construída de acordo com a semelhança entre os ciclos de condução criados e os ciclos de condução originais. Estes resultados dividem-se em simulações com e sem trânsito definido.

### 4.1. Apresentação de resultados – Simulações de ciclos de condução sem trânsito definido

Para comprovar a eficácia e a eficiência da ferramenta elaborada, projetou-se a simulação de ciclos de condução obtidos a partir do processamento de dados realizado no *Knime*. Esta estratégia assenta em duas premissas: a simulação de ciclos de condução com parâmetros de ciclos reais, aproximando estas simulações a situações reais; a recriação de ciclos de condução característicos de um autocarro específico sob um ambiente e condições específicas a partir de micro viagens diversas de qualquer outro autocarro sob quaisquer outras condições e ambiente.

Como objetos de estudo foram selecionados ciclos de condução aleatórios de cada tipo de autocarro e tipo de ciclo de condução, segundo a sua proporção mediante a população disponível. Deste modo, para cada tipo de autocarro (elétricos e híbridos a hidrogénio), selecionaram-se 28 ciclos de condução. Destes 28 ciclos, 16 ciclos têm características de viagens urbanas, 8 ciclos têm características de viagens interidades e 8 ciclos têm características de viagens em autoestradas. No total, realizaram-se 56 simulações de ciclos de condução.

Após a realização das simulações, os seus parâmetros característicos foram armazenados e comparados com os parâmetros dos ciclos originais. Nos Apêndices A e B apresentam-se os parâmetros dos ciclos de condução originais escolhidos para esta etapa de verificação. Nos Apêndices C e D é possível observar os parâmetros obtidos nos ciclos de condução criados. Os tempos de simulação de cada ciclo de condução obtido podem ser visualizados no Apêndice G.

Na Tabela 3 e Tabela 4 são apresentados os indicadores utilizados para comparar os ciclos de condução originais com os ciclos de condução simulados. Na Tabela 5 são apresentados os valores característicos sobre os tempos das simulações de ciclos de condução de autocarros elétricos e híbridos a hidrogénio.

Tabela 3 – Indicadores de comparação de ciclos de condução de autocarros elétricos

| Indicadores                                       | Valor Mínimo | Valor Médio | Desvio-Padrão | Valor Máximo |
|---|--------------|-------------|---------------|--------------|
| $\Delta$ Velocidade Média (km/h)                  | -0,50        | -0,09       | 0,41          | 0,50         |
| $\Delta$ Nº de Paragens de Passageiros            | 0            | 0           | 0             | 0            |
| $\Delta$ Duração (%)                              | -2,30        | -0,26       | 0,58          | 0            |
| $\Delta$ Velocidade Máxima (km/h)                 | 0,01         | 1,03        | 1,24          | 5,02         |
| $\Delta$ Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> )    | 0,01         | 0,20        | 0,14          | 0,47         |
| $\Delta$ Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | -0,59        | -0,12       | 0,14          | 0            |
| $\Delta$ Inclinação Máxima (%)                    | 0,22         | 2,32        | 1,45          | 5,94         |
| $\Delta$ Inclinação Mínima (%)                    | -5,52        | -2,51       | 1,26          | -0,69        |

Tabela 4 – Indicadores de comparação de ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio

| Indicadores                                       | Valor Mínimo | Valor Médio | Desvio-Padrão | Valor Máximo |
|---|--------------|-------------|---------------|--------------|
| $\Delta$ Velocidade Média (km/h)                  | -0,49        | -0,03       | 0,34          | 0,48         |
| $\Delta$ Nº de Paragens de Passageiros            | 0            | 0           | 0             | 0            |
| $\Delta$ Duração (%)                              | 0            | 0           | 0             | 0            |
| $\Delta$ Velocidade Máxima (km/h)                 | -0,01        | 1,68        | 1,79          | 8,29         |
| $\Delta$ Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> )    | 0            | 0,27        | 0,14          | 0,51         |
| $\Delta$ Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | -1,58        | -0,18       | 0,32          | 0            |
| $\Delta$ Inclinação Máxima (%)                    | 0,02         | 2,43        | 1,47          | 5,23         |
| $\Delta$ Inclinação Mínima (%)                    | -8,87        | -2,20       | 1,88          | -0,09        |

Tabela 5 – Tempos das simulações de ciclos de condução (expressa em segundos)

| Tipo de Autocarro     | Valor Mínimo | Valor Médio | Desvio-Padrão | Valor Máximo |
|-----------------------|--------------|-------------|---------------|--------------|
| Elétricos             | 57,98        | 83,90       | 21,46         | 170,73       |
| Híbridos a Hidrogénio | 59,27        | 82,98       | 15,39         | 114,75       |

## 4.2. Apresentação de resultados – Simulações de ciclos de condução com trânsito definido

No caso das simulações de ciclos de condução com trânsito definido, tomou-se uma abordagem diferente. Isto porque a definição do trânsito em alguns ciclos de condução, com especial evidência dos ciclos de condução de viagens de autoestrada, pode tornar-se uma tarefa bastante árdua ao nível de programação. A origem desta dificuldade passa pela pobreza dos dados das micro viagens obtidas, que não proporcionam soluções suficientes para recriar os cenários mais difíceis de concretizar. Contudo, esta desvantagem é justificada pelos seguintes factos: simular ciclos de condução com trânsito definido em regime de autoestrada a uma velocidade média elevada é um cenário bastante invulgar; os autocarros da CaetanoBus realizam na sua maioria percursos urbanos, sendo ocasional a sua passagem por autoestradas.

Assim sendo, neste subcapítulo, não se pretende demonstrar a realização de várias simulações para os mesmos ciclos com trânsito definido, mas sim a eficácia da definição de trânsito. Para este efeito, as simulações foram concebidas a partir do ciclo de condução que baseou a simulação nº 1 de autocarros híbridos a hidrogénio, segundo os diferentes níveis de trânsito da *TomTom*. Realizaram-se 3 simulações de ciclos de condução com trânsito definido, aumentando gradualmente o nível de trânsito imposto, de modo a compreender o impacto deste suplemento.

No Apêndice H, verificam-se os parâmetros obtidos em cada ciclo de condução simulado e os parâmetros do ciclo de condução original.

Na Tabela 6 encontram-se os valores de velocidade média de diferentes períodos do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido.

Na Tabela 7, podem visualizar-se indicadores de velocidade média e tempo de simulação do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido, bem como a variação destes indicadores em relação ao ciclo de condução simulado sem trânsito definido.

Tabela 6 – Valores de velocidade média em diferentes períodos do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido

| Nível de Trânsito | 1ª hora de trânsito (km/h) | 2ª hora de trânsito (km/h) | 3ª hora de trânsito (km/h) | Período de trânsito (km/h) | Período fora de trânsito (km/h) |
|-------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Sem trânsito      | 17,09                      | 11,04                      | 20,27                      | 16,13                      | 12,59                           |
| 51                | 12,18                      | 12,07                      | 12,73                      | 12,33                      | 15,92                           |
| 69                | 14,44                      | 8,30                       | 14,22                      | 12,32                      | 15,91                           |
| 80                | 8,05                       | 7,04                       | 8,31                       | 7,80                       | 17,32                           |

Tabela 7 – Indicadores do ciclo de condução simulado sem trânsito definido e dos ciclos de condução simulados com trânsito definido

| Nível de Trânsito | Velocidade Média (km/h) | $\Delta$ Velocidade Média em relação ao ciclo sem trânsito (km/h) | Tempos das simulações (segundos) | $\Delta$ Tempos das simulações em relação ao ciclo sem trânsito (%) |
|-------------------|-------------------------|---|----------------------------------|---|
| Sem trânsito      | 14,22                   | -   | 81,07                            | -   |
| 51                | 14,72                   | 0,50  | 86,26                            | 6,40  |
| 69                | 14,71                   | 0,49  | 87,01                            | 7,33  |
| 80                | 14,14                   | -0,8  | 100,83                           | 24,37   |

### 4.3. Discussão de resultados

Analisando a Tabela 3 e a Tabela 4, verifica-se que os parâmetros característicos dos ciclos de condução simulados respeitam as restrições impostas pelo modelo elaborado, implicando que estes ciclos se aproximam dos ciclos de condução originais, de acordo com o pretendido.

Em relação à velocidade média dos ciclos simulados, nenhum ciclo de condução simulado tomou um valor de velocidade média superior ou inferior ao valor pretendido com uma diferença de 0,5 km/h. Para os autocarros elétricos, a média da diferença entre os valores de velocidade média original e simulado é de -0,09 km/h. Para os autocarros híbridos a hidrogénio, este valor é de -0,03 km/h.

No caso do número de paragens de passageiros associado a cada ciclo de condução simulado, todos os ciclos de condução simulados apresentam o valor exato de paragens de passageiros dos ciclos de condução originais. Quanto à variável da duração de ciclo, apenas os ciclos de condução simulados dos autocarros híbridos apresentam a mesma duração que os ciclos de condução originais correspondentes. No que toca aos ciclos de condução simulados dos autocarros elétricos, verificou-se uma diferença média entre a duração dos ciclos originais e ciclos simulados de -0,26%. Sublinhe-se que nenhuma destas diferenças é superior a 5% da duração do ciclo de condução original correspondente, reforçando assim o cumprimento da restrição imposta.

Para o parâmetro de velocidade máxima, nenhum ciclo de condução simulado tomou um valor superior aos correspondentes valores dos ciclos de condução originais. Para os autocarros elétricos,

a média da diferença entre os valores de velocidade máxima original e simulado é de 1,03 km/h. Para os autocarros híbridos a hidrogénio, este valor é de 1,68 km/h.

Quanto aos valores de aceleração máxima e mínima, de igual modo, nenhum dos ciclos de condução simulados tomaram valores de aceleração máxima superiores ou valores de desaceleração mínima inferiores aos valores descritos nos correspondentes ciclos de condução originais. No caso dos autocarros elétricos, o valor médio das diferenças entre os valores de aceleração máxima dos ciclos de condução originais e simulados é de 0,20 m/s<sup>2</sup>. Já o valor médio das diferenças entre os valores de desaceleração mínima é de -0,12 m/s<sup>2</sup>. Para os autocarros híbridos a hidrogénio, o valor médio das diferenças entre os valores de aceleração máxima dos ciclos de condução originais e simulados é de 0,27 m/s<sup>2</sup>. Já o valor médio das diferenças entre os valores de desaceleração mínima é de -0,18 m/s<sup>2</sup>.

De acordo com os valores de inclinação máxima e mínima, de igual modo, nenhum dos ciclos de condução simulados apresentam valores de inclinação máxima superiores ou valores de inclinação mínima inferiores aos valores dos correspondentes ciclos de condução originais. Em referência aos autocarros elétricos, o valor médio das diferenças entre os valores de inclinação máxima dos ciclos de condução originais e simulados é de 2,32%. O valor médio das diferenças entre os valores de inclinação mínima é de -2,51%. Para os autocarros híbridos a hidrogénio, o valor médio das diferenças entre os valores de inclinação máxima dos ciclos de condução originais e simulados é de 2,43%. Já o valor médio das diferenças entre os valores de inclinação mínima é de -2,20%.

Relativamente ao conteúdo apresentado na Tabela 5, para os ciclos de autocarros elétricos, verifica-se um valor médio de 83,90 segundos. Os valores máximos e mínimos obtidos foram 170,73 segundos e 57,98 segundos, respetivamente. Este valor máximo representa uma situação esporádica, visto que o segundo valor mais elevado é de 112,56 segundos. Quanto aos ciclos de condução de autocarros híbridos a hidrogénio, observa-se um tempo de simulação médio de 82,98 segundos, sendo os valores máximo e mínimo de 114,75 segundos e 59,27 segundos. Estes valores são próximos dos valores expostos para os autocarros elétricos, excluindo assim a hipótese de a complexidade de processamento da ferramenta variar consoante o tipo de autocarro. Os tempos de simulação computacional são adequados ao utilizador, o que é vantajoso aquando da necessidade de obter rapidamente um ciclo de condução específico ou um conjunto destes.

Numa outra análise, encontram-se os ciclos de condução simulados com trânsito definido, nos quais os parâmetros de maior importância para discussão são os valores de velocidade média. No entanto, reforça-se o cumprimento das restrições impostas aos restantes parâmetros de validação, conforme se pode verificar por consulta à Tabela 6 e Tabela 7.

O primeiro ciclo de condução simulado com trânsito definido apresenta um nível de trânsito de valor 51. Este valor implica uma velocidade média de 12,07 km/h na 2ª hora do período de trânsito. Os valores de trânsito gerados para a 1ª e 3ª hora de trânsito garantem uma velocidade média de 12,18 km/h e 12,73 km/h, respetivamente. Assim, o valor de velocidade média em período de trânsito obtido foi de 12,33 km/h, enquanto o valor da velocidade média em período de trânsito verificado foi 15,92 km/h. Este exemplo demonstra que o nível 51 de trânsito representa uma velocidade média em período de trânsito inferior à velocidade média do ciclo original, pelo que a ferramenta adaptou as micro viagens dos períodos com e sem trânsito de modo a respeitar a condição imposta. A velocidade média final deste ciclo simulado é de 14,72 km/h, que se situa 0,5 km/h acima do valor objetivo, garantindo igualmente a aproximação pretendida.

O segundo ciclo de condução tem por definição um nível de trânsito de valor 69, pelo que o valor de velocidade média em período de trânsito garantido foi de 12,32 km/h. Este nível de trânsito implica uma velocidade média de 8,30 km/h na 2ª hora do período de trânsito. Os valores de trânsito gerados para a 1ª e 3ª hora de trânsito concedem uma velocidade média de 14,44 km/h e 14,22 km/h, respetivamente. Já no período fora de trânsito, foi obtido um valor de velocidade média de 15,91 km/h. Neste caso, o nível de trânsito inserido corresponde a uma velocidade média inferior à velocidade média do ciclo de condução original, pelo que o valor de velocidade média do período de trânsito é inferior ao valor de velocidade média do período sem trânsito. A velocidade média final deste ciclo simulado é de 14,71 km/h, um valor de 0,49 km/h acima do valor objetivo, cumprindo assim a restrição de velocidade média global.

O terceiro ciclo de condução contempla um nível de trânsito de valor 80, o maior valor de todos os ciclos de condução simulados. Este caso contempla uma velocidade média de 7,04 km/h na 2ª hora do período de trânsito. Os valores de trânsito gerados para a 1ª e 3ª hora de trânsito significam uma velocidade média de 8,05 km/h e 8,31 km/h, respetivamente. Neste caso, o valor de velocidade média em período de trânsito garantido foi de 7,80 km/h. No período fora de trânsito, foi conseguido um valor de velocidade média de 17,32 km/h. De modo análogo ao exemplo anterior, o nível de trânsito inserido corresponde a uma velocidade média inferior à velocidade média do ciclo de condução original, sendo o valor de velocidade média do período de trânsito inferior ao valor de velocidade média do período sem trânsito. A velocidade média final deste ciclo simulado é de 14,14 km/h, que representa um valor de 0,08 km/h abaixo do valor objetivo, inserindo-se dentro da amplitude de valores válidos de velocidade média.

Os tempos de simulação de cada ciclo de condução simulado, segundo a ordem crescente do nível de trânsito, foram 86,26 segundos, 87,01 segundos e 100,83 segundos. O valor médio destes tempos é de 91,36 segundos. Em comparação com o tempo de simulação do ciclo de condução sem trânsito definido (81,07 segundos), os tempos de simulação dos ciclos de condução com trânsito definido são superiores, verificando uma diferença entre 6,40% a 24,37%. A similaridade destes valores em relação aos valores verificados nos ciclos de condução simulados sem trânsito definido reforça a rapidez com que a ferramenta devolve uma simulação, mesmo com a definição de trânsito.

Assim, de acordo com a informação exposta, admite-se que os resultados analisados neste capítulo validam a eficácia da ferramenta, nos cenários com e sem trânsito definido.



## 5. CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as conclusões retiradas do projeto, bem como sugestões de investigação futura.

### 5.1. Conclusões finais

Neste projeto, foram analisados os tipos de operação e rotas dos atuais clientes da CaetanoBus, através do estudo de dados históricos sobre a atividade rodoviária dos mesmos. A partir desta análise e do conhecimento reunido com o desenvolvimento do projeto, foram definidos os parâmetros que caracterizam os ciclos de condução e os tipos de operação identificados. A partir desta etapa, foi delineada uma metodologia de construção de ciclos de condução que resultou em duas etapas. Primeiramente, a seleção, extração e o processamento de dados históricos necessários para alimentar uma ferramenta de criação de ciclos de condução. Consequentemente, a construção da própria ferramenta. Após completar estes passos, foram reproduzidos ciclos de condução baseados em ciclos históricos e analisados os resultados obtidos.

Perante estes resultados e a análise elaborada sobre os mesmos, a ferramenta de criação de ciclos de condução concebida oferece uma solução para o problema apresentado. Todos os ciclos de condução criados cumprem as restrições impostas pelo utilizador, conseguindo uma aproximação credível e eficaz aos ciclos de condução originais.

No caso dos ciclos de condução simulados sem trânsito definido, apesar de se verificarem alguns valores de velocidade média e duração de ciclos diferentes dos valores exatos presentes nos ciclos de condução originais, estes não contemplam uma variação muito vincada. Quanto aos ciclos de condução simulados com trânsito definido, a velocidade média obtida tanto no período com trânsito como no período sem trânsito refletem com precisão as condições pretendidas, sem deixar de cumprir as restantes restrições sobre os demais indicadores. Deste modo, assume-se que esta funcionalidade adequa a criação do ciclo de condução conforme o pretendido.

Por conseguinte, é validada a possibilidade de a estrutura de processamento de dados e ferramenta de criação de ciclos de condução concebidas serem utilizadas pela CaetanoBus no seio da sua atividade como objetos de vantagem tecnológica competitiva.

### 5.2. Limitações e investigação futura

No que toca às limitações presentes neste projeto, destacam-se a quantidade e a qualidade dos dados disponibilizados pela plataforma da CaetanoBus.

Durante a conceção da ferramenta de ciclos de condução, visaram-se situações esporádicas de simulação de ciclos de condução com características bastante peculiares que podem significar o aumento da dificuldade de processamento da ferramenta. Sejam estas características ocasionais os valores de velocidade média bastante elevados, número de paragens de passageiros desadequados ao tipo de viagem ou os valores de inclinação máxima e mínima irrealistas, a ferramenta de criação de ciclos de condução fornecerá uma resposta tão eficiente quanto a viabilidade do ciclo de condução a simular e, sobretudo, quanto mais ricos forem os dados utilizados como *input*.

Relativamente à qualidade dos dados, este facto é apoiado pela complexidade do processo de tratamento de dados realizado através do *Knime*, incorporando etapas repetidas (por exemplo, a eliminação de valores nulos) e a criação de variáveis que, num cenário satisfatório, seriam desnecessárias. Devido às etapas de eliminação de valores nulos enunciadas acima, os dados não contêm todo o desempenho original dos autocarros estudados, pelo que a adição desta informação significaria um aumento da riqueza e robustez do *input* utilizado para a ferramenta de criação de ciclos de condução. A incerteza técnica associada a algumas variáveis da plataforma proporcionou a criação destas mesmas variáveis em *Knime*, a partir de outras variáveis, pois a sua inclusão no estudo era imperativa. Por sua vez, esta etapa representa trabalho acrescido que poderia ser evitável.

Como tema de investigação futura, sugere-se o estudo da implementação de *Machine Learning* como cerne do funcionamento da ferramenta de criação de ciclos de condução, cuja concretização neste projeto foi descartada devido à complexidade associada (em parte pela existência da opção de adequação da densidade de trânsito). Igualmente, propõe-se a comparação dos valores de desempenho obtidos dos ciclos de condução simulados com os valores de desempenho verificados com a circulação dos autocarros da CaetanoBus num novo cliente, de modo a aprimorar o funcionamento da ferramenta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Amirjamshidi, G. (2015). Assessment of Commercial Vehicle Emissions and Vehicle Routing of Fleets using Simulated Driving Cycles. *ProQuest Dissertations and Theses*, 193.
- Berzi, L., Delogu, M., & Pierini, M. (2016). Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of Florence. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 299–322. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.010>
- Bishop, J. D. K., Axon, C. J., & McCulloch, M. D. (2012). A robust, data-driven methodology for real-world driving cycle development. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(5), 389–397. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.03.003>
- Brady, J., & O'Mahony, M. (2016). Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. *Applied Energy*, 177, 165–178. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.094>
- CaetanoBus. (2022a). *CaetanoBus - Shareholders Structure*. <https://caetanobus.pt/en/shareholders-structure/>
- CaetanoBus. (2022b). *Mission, Vision and Values*. <https://caetanobus.pt/en/company/our-history/>
- CaetanoBus. (2022c). *Our History*. <https://caetanobus.pt/en/company/our-history/>
- CaetanoBus. (2022d). *Presentation*. <https://caetanobus.pt/en/company/who-we-are/>
- Ceccon, S., Longo, M., Mazzoncini, R., & Panarese, A. (2020). Analysis of the Implementation of Full Electric and Hydrogen Hybrid Buses in Two Lines of the City of Milan. *2020 15th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2020*. <https://doi.org/10.1109/EVER48776.2020.9243074>
- Chow, D. H. C., & Levermore, G. J. (2007). New algorithm for generating hourly temperature values using daily maximum, minimum and average values from climate models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 28(3), 237–248. <https://doi.org/10.1177/0143624407078642>
- Cleveland, C. J., & Morris, C. (2015). D. *Dictionary of Energy (Second Edition)*, 146–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096811-7.50004-4>
- Corazza, M. V., Guida, U., Musso, A., & Tozzi, M. (2016). A European vision for more environmentally friendly buses. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 45, 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.001>
- Crippa, M., Guizzardi, D., Banja, M., Solazzo, E., Muntean, M., Schaaf, E., Pagani, F., & Monforti-Ferrario, F. (2022). *CO2 emissions of all world countries*. <https://doi.org/10.2760/07904>
- European Commission. (2022). *Commission proposes new Euro 7 standards to reduce pollutant emissions from vehicles and improve air quality The new requirements based on the Euro 7 standards : For More Information. November, 10–12.*

- European Parliament. (2022). EU ban on sale of new petrol and diesel cars from 2035 explained. *News European Parliament*, 1–4.
- Gebisa, A., Gebresenbet, G., Gopal, R., & Nallamotheu, R. B. (2021). Driving Cycles for Estimating Vehicle Emission Levels and Energy Consumption. *Future Transportation*, 1(3), 615–638. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1030033>
- Hung, W. T., Tong, H. Y., Lee, C. P., Ha, K., & Pao, L. Y. (2007). Development of a practical driving cycle construction methodology: A case study in Hong Kong. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 12(2), 115–128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.01.002>
- Kamble, S. H., Mathew, T. V., & Sharma, G. K. (2009). Development of real-world driving cycle: Case study of Pune, India. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(2), 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.008>
- Li, X., Li, C., Jiang, B., Li, H., & Yu, H. (2020). Research on Driving Cycle Construction Based on Sorting-Time Hybrid Method. *Proceedings - 2020 Chinese Automation Congress, CAC 2020*, 2884–2887. <https://doi.org/10.1109/CAC51589.2020.9327143>
- Liang, K., Zhao, Z., Li, W., Zhou, J., & Yan, D. (2022). Comprehensive Identification of Driving Style Based on Vehicle's Driving Cycle Recognition. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 72(1), 312–326. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3206951>
- Liu, J., Wang, X., & Khattak, A. (2016). Customizing driving cycles to support vehicle purchase and use decisions: Fuel economy estimation for alternative fuel vehicle users. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 67, 280–298. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.02.016>
- Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., & Khoshnoudi, M. (2019). Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. *Science of the Total Environment*, 649, 31–49. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229>
- Mongo, M., Belaïd, F., & Ramdani, B. (2021). The effects of environmental innovations on CO<sub>2</sub> emissions: Empirical evidence from Europe. *Environmental Science and Policy*, 118(December 2020), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2020.12.004>
- Nyberg, P., Frisk, E., & Nielsen, L. (2016). Using Real-World Driving Databases to Generate Driving Cycles with Equivalence Properties. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4095–4105. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2502069>
- Pagliaro, M., & Meneguzzo, F. (2019). Electric Bus: A Critical Overview on the Dawn of Its Widespread Uptake. *Advanced Sustainable Systems*, 3(6), 1–9. <https://doi.org/10.1002/adsu.201800151>
- Rohani, M. M., Wijeyesekera, D. C., & Karim, A. T. A. (2013). Bus operation, quality service and the role of bus provider and driver. *Procedia Engineering*, 53, 167–178. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.02.022>

- Shen, P., Zhao, Z., Li, J., & Zhan, X. (2018). Development of a typical driving cycle for an intra-city hybrid electric bus with a fixed route. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 346–360. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.01.032>
- Teodorović, D., & Janić, M. (2022). Public Transportation Systems. *Transportation Engineering*, 405–522. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-90813-9.00007-2>
- TomTom. (2023). *TomTom Traffic Index*. <https://www.tomtom.com/traffic-index/ranking/>
- Tong, H. Y., Hung, W. T., & Cheung, C. S. (1999). Development of a driving cycle for Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 33(15), 2323–2335. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00074-6)
- Tzirakis, E. G., Pitsas, K., Zannikos, F., & Stournas, S. (2018). Vehicle emissions and driving cycles: comparison of the Athens driving cycle (ADC) with ECE-15 and European driving cycle (EDC). *Global NEST Journal*, 8(3), 282–290. <https://doi.org/10.30955/gnj.000376>
- United Nations. (2015). *The Paris Agreement*. <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>
- Vamosi, A., Czege, L., & Kocsis, I. (2022). Development of Bus Driving Cycle for Debrecen on the Basis of Real-traffic Data. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 50(2), 184–190. <https://doi.org/10.3311/PPtr.16109>
- Wang, Q., Huo, H., He, K., Yao, Z., & Zhang, Q. (2008). Characterization of vehicle driving patterns and development of driving cycles in Chinese cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 13(5), 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.03.003>
- Yoro, K. O., & Daramola, M. O. (2020). CO2 emission sources, greenhouse gases, and the global warming effect. In *Advances in Carbon Capture: Methods, Technologies and Applications*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819657-1.00001-3>



## APÊNDICE A – CICLOS DE CONDUÇÃO DE AUTOCARROS ELÉTRICOS

| ID da Simulação | Velocidade Média (km/h) | Nº de Paragens de Passageiros | Duração (segundos) | Velocidade Máxima (km/h) | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | Inclinação Máxima (%) | Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| 1               | 19,34                   | 104                           | 25200              | 72,84                    | 2,34                                  | -2,32                                    | 12,65                 | -12,04                |
| 2               | 19,39                   | 227                           | 39600              | 74,89                    | 2,47                                  | -2,29                                    | 12,76                 | -12,77                |
| 3               | 17,56                   | 49                            | 25200              | 74,41                    | 2,27                                  | -2,11                                    | 11,07                 | -10,5                 |
| 4               | 11,57                   | 123                           | 21600              | 52,56                    | 2,36                                  | -2,39                                    | 10,26                 | -10,95                |
| 5               | 15,89                   | 81                            | 18000              | 67,9                     | 2,19                                  | -2,14                                    | 13,13                 | -12,82                |
| 6               | 16,93                   | 35                            | 21600              | 74,51                    | 2,36                                  | -2,15                                    | 11,47                 | -12,2                 |
| 7               | 16,27                   | 32                            | 14400              | 67,19                    | 2,32                                  | -2,9                                     | 11,02                 | -12,09                |
| 8               | 12,79                   | 182                           | 21600              | 57,35                    | 2,25                                  | -2,39                                    | 11,65                 | -12,91                |
| 9               | 13,97                   | 144                           | 21600              | 61,8                     | 2,31                                  | -2,2                                     | 12,31                 | -12,44                |
| 10              | 11,91                   | 141                           | 18000              | 61,66                    | 2,17                                  | -2,89                                    | 11,56                 | -11,53                |
| 11              | 19,9                    | 50                            | 25200              | 75,88                    | 2,14                                  | -2,55                                    | 13                    | -10,02                |
| 12              | 18,43                   | 47                            | 28800              | 75,66                    | 2,1                                   | -2,84                                    | 11,52                 | -13,2                 |
| 13              | 13,16                   | 124                           | 14400              | 56,8                     | 2,33                                  | -2,86                                    | 11,7                  | -13,52                |
| 14              | 15,07                   | 58                            | 25200              | 74,56                    | 2,38                                  | -2,04                                    | 13,18                 | -14,51                |
| 15              | 19,24                   | 27                            | 21600              | 75,44                    | 2,27                                  | -1,95                                    | 13,44                 | -10,89                |
| 16              | 21,52                   | 36                            | 18000              | 76,28                    | 2,08                                  | -2,55                                    | 12,14                 | -12,13                |
| 17              | 30,22                   | 128                           | 32400              | 81,51                    | 2,29                                  | -2,91                                    | 13,46                 | -11,69                |
| 18              | 28,33                   | 78                            | 28800              | 75,42                    | 2,44                                  | -3,18                                    | 13,5                  | -12,41                |
| 19              | 33,74                   | 41                            | 18000              | 74,94                    | 2,28                                  | -2,47                                    | 11,11                 | -12,46                |
| 20              | 30,63                   | 125                           | 32400              | 84,73                    | 2,15                                  | -2,34                                    | 16,94                 | -11,74                |
| 21              | 34,16                   | 26                            | 14400              | 77,81                    | 2,31                                  | -2,73                                    | 12,78                 | -12,09                |
| 22              | 34,2                    | 26                            | 18000              | 82,18                    | 2,21                                  | -2,66                                    | 11,33                 | -13,09                |
| 23              | 64,66                   | 1                             | 7200               | 76,4                     | 1,61                                  | -2,11                                    | 10,42                 | -10,65                |
| 24              | 62,15                   | 1                             | 7200               | 75,71                    | 1,62                                  | -1,72                                    | 9,24                  | -9,65                 |
| 25              | 58,06                   | 2                             | 7200               | 75,31                    | 1,52                                  | -1,7                                     | 11,07                 | -9,21                 |
| 26              | 52,71                   | 2                             | 7200               | 78,09                    | 1,61                                  | -2,46                                    | 6,22                  | -7,76                 |
| 27              | 63,23                   | 2                             | 7200               | 82,42                    | 1,64                                  | -1,7                                     | 12,08                 | -11,5                 |
| 28              | 67,56                   | 1                             | 7200               | 76,01                    | 1,66                                  | -1,89                                    | 10,86                 | -11,39                |

## APÊNDICE B – CICLOS DE CONDUÇÃO DE AUTOCARROS HÍBRIDOS A HIDROGÉNIO

| ID da Simulação | Velocidade Média (km/h) | Nº de Paragens de Passageiros | Duração (segundos) | Velocidade Máxima (km/h) | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | Inclinação Máxima (%) | Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| 1               | 14,22                   | 243                           | 32400              | 76,27                    | 2,25                                  | -2,17                                    | 12,2                  | -12,17                |
| 2               | 11,29                   | 76                            | 25200              | 75,48                    | 2,18                                  | -1,93                                    | 11,65                 | -11,84                |
| 3               | 14,55                   | 34                            | 14400              | 78,13                    | 2,2                                   | -2,18                                    | 12,06                 | -11,04                |
| 4               | 13,88                   | 62                            | 14400              | 72,77                    | 2,2                                   | -2,31                                    | 10,56                 | -9,62                 |
| 5               | 17,25                   | 123                           | 18000              | 69,7                     | 2,36                                  | -2,58                                    | 10,02                 | -12,32                |
| 6               | 11,62                   | 101                           | 28800              | 71,38                    | 2,3                                   | -2,95                                    | 12,33                 | -11,07                |
| 7               | 14,95                   | 124                           | 18000              | 75,4                     | 2,25                                  | -2                                       | 13,18                 | -14,25                |
| 8               | 18,03                   | 183                           | 21600              | 77,7                     | 2,42                                  | -2,34                                    | 11,87                 | -13,11                |
| 9               | 14,94                   | 190                           | 25200              | 79                       | 2,39                                  | -2,84                                    | 14,23                 | -11,59                |
| 10              | 22,18                   | 29                            | 28800              | 80,03                    | 2,36                                  | -2,45                                    | 12,81                 | -10,17                |
| 11              | 18,71                   | 182                           | 25200              | 77,7                     | 2,39                                  | -3,5                                     | 11,96                 | -12,28                |
| 12              | 20,61                   | 32                            | 28800              | 81,44                    | 2,49                                  | -3,01                                    | 11,83                 | -11,9                 |
| 13              | 18,44                   | 80                            | 18000              | 68,78                    | 2,26                                  | -2,19                                    | 13,24                 | -14,79                |
| 14              | 11,32                   | 112                           | 32400              | 77,14                    | 2,35                                  | -2,12                                    | 11,33                 | -10,74                |
| 15              | 10,74                   | 116                           | 28800              | 77,78                    | 2,5                                   | -2,22                                    | 10,72                 | -10,96                |
| 16              | 18,42                   | 16                            | 18000              | 79                       | 2,24                                  | -2,89                                    | 11,63                 | -12,29                |
| 17              | 30,09                   | 4                             | 18000              | 83,68                    | 2,22                                  | -2,48                                    | 14,24                 | -12,81                |
| 18              | 35,22                   | 3                             | 3600               | 57,44                    | 1,75                                  | -2,08                                    | 10,41                 | -13,57                |
| 19              | 34,91                   | 55                            | 18000              | 83,36                    | 2,33                                  | -2,33                                    | 12,19                 | -11,63                |
| 20              | 30,29                   | 60                            | 28800              | 83,32                    | 2,31                                  | -3,03                                    | 11,21                 | -11,09                |
| 21              | 35,95                   | 19                            | 10800              | 81,13                    | 2,37                                  | -2,31                                    | 11,17                 | -12,64                |
| 22              | 32,83                   | 5                             | 3600               | 72,92                    | 1,96                                  | -2,11                                    | 9,57                  | -10,7                 |
| 23              | 59,49                   | 1                             | 14400              | 83,43                    | 2,27                                  | -1,62                                    | 12,15                 | -12,79                |
| 24              | 56,04                   | 1                             | 7200               | 87,66                    | 1,96                                  | -1,81                                    | 10,53                 | -12,51                |
| 25              | 52,68                   | 4                             | 7200               | 82,87                    | 1,74                                  | -2,12                                    | 8,73                  | -13,77                |
| 26              | 62,75                   | 11                            | 14400              | 83,09                    | 2,25                                  | -2,29                                    | 11,9                  | -11,34                |
| 27              | 49,91                   | 17                            | 10800              | 83,91                    | 2,26                                  | -4,27                                    | 11,16                 | -16,87                |
| 28              | 62,96                   | 6                             | 18000              | 83,42                    | 1,61                                  | -1,8                                     | 13,03                 | -11,69                |

## APÊNDICE C – CICLOS DE CONDUÇÃO DE AUTOCARRO ELÉTRICOS SIMULADOS

| ID da Simulação | Velocidade Média (km/h) | Nº de Paragens de Passageiros | Duração (segundos) | Velocidade Máxima (km/h) | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | Inclinação Máxima (%) | Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| 1               | 18,86                   | 104                           | 25200              | 70,4                     | 2                                     | -2,3                                     | 12                    | -8                    |
| 2               | 18,92                   | 227                           | 39600              | 74,79                    | 2                                     | -2,2                                     | 11                    | -9                    |
| 3               | 18,04                   | 49                            | 25200              | 74,3                     | 2                                     | -2,1                                     | 10                    | -8                    |
| 4               | 12,05                   | 123                           | 21600              | 52,1                     | 2                                     | -2,3                                     | 9                     | -10                   |
| 5               | 16,38                   | 81                            | 18000              | 67,4                     | 2,1                                   | -2,1                                     | 11                    | -12                   |
| 6               | 17,37                   | 35                            | 21600              | 72,2                     | 2                                     | -2,1                                     | 8                     | -8                    |
| 7               | 16,72                   | 32                            | 14400              | 65,9                     | 2                                     | -2,5                                     | 10                    | -9                    |
| 8               | 13,29                   | 182                           | 21600              | 57,1                     | 2                                     | -2,3                                     | 9                     | -12                   |
| 9               | 14,46                   | 144                           | 21600              | 61,7                     | 2                                     | -2,1                                     | 9                     | -9                    |
| 10              | 12,39                   | 141                           | 18000              | 61                       | 2                                     | -2,3                                     | 9                     | -8                    |
| 11              | 20,38                   | 50                            | 25200              | 75,7                     | 2                                     | -2,5                                     | 9                     | -9                    |
| 12              | 18,91                   | 47                            | 28800              | 73,6                     | 2                                     | -2,7                                     | 11                    | -10                   |
| 13              | 13,65                   | 124                           | 14400              | 55,1                     | 2,3                                   | -2,4                                     | 10                    | -8                    |
| 14              | 15,11                   | 58                            | 25292              | 72,5                     | 2                                     | -2                                       | 8                     | -12                   |
| 15              | 19,7                    | 27                            | 21600              | 75,4                     | 2                                     | -1,9                                     | 12                    | -8                    |
| 16              | 21,98                   | 36                            | 18000              | 75,5                     | 2                                     | -2,4                                     | 11                    | -9                    |
| 17              | 29,76                   | 128                           | 32400              | 78,6                     | 2                                     | -2,8                                     | 8                     | -11                   |
| 18              | 27,83                   | 78                            | 28800              | 75,4                     | 2                                     | -3,1                                     | 10                    | -10                   |
| 19              | 33,31                   | 41                            | 18000              | 74,9                     | 2                                     | -2,4                                     | 9                     | -8                    |
| 20              | 30,57                   | 125                           | 32400              | 82,2                     | 2                                     | -2,3                                     | 11                    | -8                    |
| 21              | 33,67                   | 26                            | 14400              | 75,3                     | 2,21                                  | -2,7                                     | 12                    | -10                   |
| 22              | 33,78                   | 26                            | 18000              | 82                       | 2                                     | -2,6                                     | 9                     | -11                   |
| 23              | 64,42                   | 1                             | 7268               | 76,1                     | 1,6                                   | -2,1                                     | 9                     | -9                    |
| 24              | 62,08                   | 1                             | 7200               | 75,6                     | 1,6                                   | -1,6                                     | 7                     | -8                    |
| 25              | 58,35                   | 2                             | 7325               | 75,2                     | 1,5                                   | -1,7                                     | 9                     | -8                    |
| 26              | 52,82                   | 2                             | 7259               | 78                       | 1,6                                   | -2,4                                     | 6                     | -6                    |
| 27              | 63,14                   | 2                             | 7362               | 77,4                     | 1,6                                   | -1,7                                     | 10                    | -10                   |
| 28              | 67,12                   | 1                             | 7290               | 76                       | 1,6                                   | -1,6                                     | 8                     | -10                   |

## APÊNDICE D – CICLOS DE CONDUÇÃO DE AUTOCARROS HÍBRIDOS A HIDROGÉNIO SIMULADOS

| ID da Simulação | Velocidade Média (km/h) | Nº de Paragens de Passageiros | Duração (segundos) | Velocidade Máxima (km/h) | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | Inclinação Máxima (%) | Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| 1               | 13,75                   | 243                           | 32400              | 73                       | 2                                     | -2,15                                    | 9                     | -9                    |
| 2               | 11,25                   | 76                            | 25200              | 75,1                     | 2                                     | -1,92                                    | 8                     | -10                   |
| 3               | 15                      | 34                            | 14400              | 73,99                    | 2                                     | -2,17                                    | 11                    | -8                    |
| 4               | 14,21                   | 62                            | 14400              | 72,37                    | 1,97                                  | -2,06                                    | 9                     | -9                    |
| 5               | 16,81                   | 123                           | 18000              | 69,27                    | 2                                     | -2,35                                    | 10                    | -11                   |
| 6               | 11,95                   | 101                           | 28800              | 70,52                    | 2                                     | -2,82                                    | 10                    | -9                    |
| 7               | 15,02                   | 124                           | 18000              | 72,28                    | 2                                     | -2                                       | 12                    | -12                   |
| 8               | 18,19                   | 183                           | 21600              | 69,41                    | 2                                     | -2,25                                    | 9                     | -8                    |
| 9               | 15,33                   | 190                           | 25200              | 77,39                    | 2                                     | -2,36                                    | 9                     | -11                   |
| 10              | 22,38                   | 29                            | 28800              | 79,03                    | 2                                     | -2,14                                    | 8                     | -10                   |
| 11              | 18,23                   | 182                           | 25200              | 75,84                    | 2                                     | -2,78                                    | 8                     | -12                   |
| 12              | 21,07                   | 32                            | 28800              | 78,5                     | 1,98                                  | -2,53                                    | 9                     | -8                    |
| 13              | 18,57                   | 80                            | 18000              | 66                       | 1,97                                  | -2,17                                    | 9                     | -11                   |
| 14              | 11,71                   | 112                           | 32400              | 74,49                    | 2                                     | -2,08                                    | 8                     | -8                    |
| 15              | 11,23                   | 116                           | 28800              | 75,34                    | 2                                     | -2,19                                    | 10                    | -10                   |
| 16              | 18,78                   | 16                            | 18000              | 77,3                     | 2                                     | -2,81                                    | 10                    | -12                   |
| 17              | 30,53                   | 4                             | 18000              | 83,37                    | 2,14                                  | -2,37                                    | 10                    | -11                   |
| 18              | 34,76                   | 3                             | 3600               | 57,38                    | 1,72                                  | -2,03                                    | 9                     | -12                   |
| 19              | 34,66                   | 55                            | 18000              | 82,71                    | 2                                     | -2,31                                    | 8                     | -11                   |
| 20              | 29,81                   | 60                            | 28800              | 82,9                     | 2                                     | -2,94                                    | 11                    | -11                   |
| 21              | 35,8                    | 19                            | 10800              | 80,05                    | 2                                     | -2,3                                     | 9                     | -9                    |
| 22              | 32,71                   | 5                             | 3600               | 71,2                     | 1,94                                  | -2,08                                    | 9                     | -10                   |
| 23              | 59,38                   | 1                             | 14400              | 83,44                    | 2                                     | -1,61                                    | 10                    | -9                    |
| 24              | 56,4                    | 1                             | 7200               | 83,58                    | 1,95                                  | -1,81                                    | 10                    | -10                   |
| 25              | 52,63                   | 4                             | 7200               | 82,8                     | 1,44                                  | -2,06                                    | 7                     | -10                   |
| 26              | 62,34                   | 11                            | 14400              | 83,08                    | 1,97                                  | -2,25                                    | 8                     | -10                   |
| 27              | 49,95                   | 17                            | 10800              | 83,1                     | 2                                     | -2,69                                    | 8                     | -8                    |
| 28              | 62,58                   | 6                             | 18000              | 83,41                    | 1,61                                  | -1,77                                    | 12                    | -11                   |

## APÊNDICE E – CICLOS DE CONDUÇÃO ORIGINAL VS SIMULADO: AUTOCARROS ELÉTRICOS

| ID da Simulação | $\Delta$ Velocidade Média (km/h) | $\Delta$ Nº de Paragens de Passageiros | $\Delta$ Duração (%) | $\Delta$ Velocidade Máxima (km/h) | $\Delta$ Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | $\Delta$ Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | $\Delta$ Inclinação Máxima (%) | $\Delta$ Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|----------------------------------|--|----------------------|-----------------------------------|--|---|--------------------------------|--------------------------------|
| 1               | 0,48                             | 0                                      | 0                    | 2,44                              | 0,34   | -0,02   | 0,65                           | -4,04                          |
| 2               | 0,47                             | 0                                      | 0                    | 0,1                               | 0,47   | -0,09   | 1,76                           | -3,77                          |
| 3               | -0,48                            | 0                                      | 0                    | 0,11                              | 0,27   | -0,01   | 1,07                           | -2,5                           |
| 4               | -0,48                            | 0                                      | 0                    | 0,46                              | 0,36   | -0,09   | 1,26                           | -0,95                          |
| 5               | -0,49                            | 0                                      | 0                    | 0,5                               | 0,09   | -0,04   | 2,13                           | -0,82                          |
| 6               | -0,44                            | 0                                      | 0                    | 2,31                              | 0,36   | -0,05   | 3,47                           | -4,2                           |
| 7               | -0,45                            | 0                                      | 0                    | 1,29                              | 0,32   | -0,4  | 1,02                           | -3,09                          |
| 8               | -0,5                             | 0                                      | 0                    | 0,25                              | 0,25   | -0,09   | 2,65                           | -0,91                          |
| 9               | -0,49                            | 0                                      | 0                    | 0,1                               | 0,31   | -0,1  | 3,31                           | -3,44                          |
| 10              | -0,48                            | 0                                      | 0                    | 0,66                              | 0,17   | -0,59   | 2,56                           | -3,53                          |
| 11              | -0,48                            | 0                                      | 0                    | 0,18                              | 0,14   | -0,05   | 4                              | -1,02                          |
| 12              | -0,48                            | 0                                      | 0                    | 2,06                              | 0,1  | -0,14   | 0,52                           | -3,2                           |
| 13              | -0,49                            | 0                                      | 0                    | 1,7                               | 0,03   | -0,46   | 1,7                            | -5,52                          |
| 14              | -0,04                            | 0                                      | -0,4                 | 2,06                              | 0,38   | -0,04   | 5,18                           | -2,51                          |
| 15              | -0,46                            | 0                                      | 0                    | 0,04                              | 0,27   | -0,05   | 1,44                           | -2,89                          |
| 16              | -0,46                            | 0                                      | 0                    | 0,78                              | 0,08   | -0,15   | 1,14                           | -3,13                          |
| 17              | 0,46                             | 0                                      | 0                    | 2,91                              | 0,29   | -0,11   | 5,46                           | -0,69                          |
| 18              | 0,5                              | 0                                      | 0                    | 0,02                              | 0,44   | -0,08   | 3,5                            | -2,41                          |
| 19              | 0,43                             | 0                                      | 0                    | 0,04                              | 0,28   | -0,07   | 2,11                           | -4,46                          |
| 20              | 0,06                             | 0                                      | 0                    | 2,53                              | 0,15   | -0,04   | 5,94                           | -3,74                          |
| 21              | 0,49                             | 0                                      | 0                    | 2,51                              | 0,1  | -0,03   | 0,78                           | -2,09                          |
| 22              | 0,42                             | 0                                      | 0                    | 0,18                              | 0,21   | -0,06   | 2,33                           | -2,09                          |
| 23              | 0,24                             | 0                                      | -0,9                 | 0,3                               | 0,01   | -0,01   | 1,42                           | -1,65                          |
| 24              | 0,07                             | 0                                      | 0                    | 0,11                              | 0,02   | -0,12   | 2,24                           | -1,65                          |
| 25              | -0,29                            | 0                                      | -1,7                 | 0,11                              | 0,02   | 0   | 2,07                           | -1,21                          |
| 26              | -0,11                            | 0                                      | -0,8                 | 0,09                              | 0,01   | -0,06   | 0,22                           | -1,76                          |
| 27              | 0,09                             | 0                                      | -2,3                 | 5,02                              | 0,04   | 0   | 2,08                           | -1,5                           |
| 28              | 0,44                             | 0                                      | -1,3                 | 0,01                              | 0,06   | -0,29   | 2,86                           | -1,39                          |

## APÊNDICE F – CICLOS DE CONDUÇÃO ORIGINAL VS SIMULADO: AUTOCARROS HÍBRIDOS A HIDROGÉNIO

| ID da Simulação | $\Delta$ Velocidade Média (km/h) | $\Delta$ Nº de Paragens de Passageiros | $\Delta$ Duração (%) | $\Delta$ Velocidade Máxima (km/h) | $\Delta$ Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | $\Delta$ Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | $\Delta$ Inclinação Máxima (%) | $\Delta$ Inclinação Mínima (%) |
|-----------------|----------------------------------|--|----------------------|-----------------------------------|--|---|--------------------------------|--------------------------------|
| 1               | 0,47                             | 0                                      | 0                    | 3,27                              | 0,25   | -0,02   | 3,2                            | -3,17                          |
| 2               | 0,04                             | 0                                      | 0                    | 0,38                              | 0,18   | -0,01   | 3,65                           | -1,84                          |
| 3               | -0,45                            | 0                                      | 0                    | 4,14                              | 0,2  | -0,01   | 1,06                           | -3,04                          |
| 4               | -0,33                            | 0                                      | 0                    | 0,4                               | 0,23   | -0,25   | 1,56                           | -0,62                          |
| 5               | 0,44                             | 0                                      | 0                    | 0,43                              | 0,36   | -0,23   | 0,02                           | -1,32                          |
| 6               | -0,33                            | 0                                      | 0                    | 0,86                              | 0,3  | -0,13   | 2,33                           | -2,07                          |
| 7               | -0,07                            | 0                                      | 0                    | 3,12                              | 0,25   | 0   | 1,18                           | -2,25                          |
| 8               | -0,16                            | 0                                      | 0                    | 8,29                              | 0,42   | -0,09   | 2,87                           | -5,11                          |
| 9               | -0,39                            | 0                                      | 0                    | 1,61                              | 0,39   | -0,48   | 5,23                           | -0,59                          |
| 10              | -0,2                             | 0                                      | 0                    | 1                                 | 0,36   | -0,31   | 4,81                           | -0,17                          |
| 11              | 0,48                             | 0                                      | 0                    | 1,86                              | 0,39   | -0,72   | 3,96                           | -0,28                          |
| 12              | -0,46                            | 0                                      | 0                    | 2,94                              | 0,51   | -0,48   | 2,83                           | -3,9                           |
| 13              | -0,13                            | 0                                      | 0                    | 2,78                              | 0,29   | -0,02   | 4,24                           | -3,79                          |
| 14              | -0,39                            | 0                                      | 0                    | 2,65                              | 0,35   | -0,04   | 3,33                           | -2,74                          |
| 15              | -0,49                            | 0                                      | 0                    | 2,44                              | 0,5  | -0,03   | 0,72                           | -0,96                          |
| 16              | -0,36                            | 0                                      | 0                    | 1,7                               | 0,24   | -0,08   | 1,63                           | -0,29                          |
| 17              | -0,44                            | 0                                      | 0                    | 0,31                              | 0,08   | -0,11   | 4,24                           | -1,81                          |
| 18              | 0,46                             | 0                                      | 0                    | 0,06                              | 0,03   | -0,05   | 1,41                           | -1,57                          |
| 19              | 0,25                             | 0                                      | 0                    | 0,65                              | 0,33   | -0,02   | 4,19                           | -0,63                          |
| 20              | 0,48                             | 0                                      | 0                    | 0,42                              | 0,31   | -0,09   | 0,21                           | -0,09                          |
| 21              | 0,15                             | 0                                      | 0                    | 1,08                              | 0,37   | -0,01   | 2,17                           | -3,64                          |
| 22              | 0,12                             | 0                                      | 0                    | 1,72                              | 0,02   | -0,03   | 0,57                           | -0,7                           |
| 23              | 0,11                             | 0                                      | 0                    | -0,01                             | 0,27   | -0,01   | 2,15                           | -3,79                          |
| 24              | -0,36                            | 0                                      | 0                    | 4,08                              | 0,01   | 0   | 0,53                           | -2,51                          |
| 25              | 0,05                             | 0                                      | 0                    | 0,07                              | 0,3  | -0,06   | 1,73                           | -3,77                          |
| 26              | 0,41                             | 0                                      | 0                    | 0,01                              | 0,28   | -0,04   | 3,9                            | -1,34                          |
| 27              | -0,04                            | 0                                      | 0                    | 0,81                              | 0,26   | -1,58   | 3,16                           | -8,87                          |
| 28              | 0,38                             | 0                                      | 0                    | 0,01                              | 0  | -0,03   | 1,03                           | -0,69                          |

**APÊNDICE G – TEMPOS DAS SIMULAÇÕES DE CICLOS DE CONDUÇÃO SEM TRÂNSITO**

| ID da Simulação | Tempos das simulações de autocarros elétricos (segundos) | Tempos das simulações de autocarros híbridos a hidrogénio (segundos) |
|-----------------|--|--|
| 1               | 63,37  | 81,07  |
| 2               | 91,60  | 86,62  |
| 3               | 79,42  | 69,61  |
| 4               | 77,13  | 60,59  |
| 5               | 65,30  | 70,58  |
| 6               | 78,54  | 89,35  |
| 7               | 64,34  | 81,38  |
| 8               | 81,91  | 77,32  |
| 9               | 72,49  | 91,98  |
| 10              | 75,19  | 90,80  |
| 11              | 85,57  | 84,60  |
| 12              | 97,43  | 86,97  |
| 13              | 70,22  | 73,69  |
| 14              | 87,01  | 109,78   |
| 15              | 94,56  | 98,05  |
| 16              | 83,92  | 77,38  |
| 17              | 112,56   | 86,08  |
| 18              | 91,14  | 59,27  |
| 19              | 96,70  | 84,06  |
| 20              | 102,65   | 112,69   |
| 21              | 85,02  | 73,28  |
| 22              | 92,59  | 62,40  |
| 23              | 65,81  | 108,07   |
| 24              | 71,27  | 66,99  |
| 25              | 76,73  | 68,09  |
| 26              | 58,02  | 114,75   |
| 27              | 57,98  | 65,46  |
| 28              | 170,73   | 92,41  |

## APÊNDICE H – CICLOS DE CONDUÇÃO DE AUTOCARROS HÍBRIDOS A HIDROGÉNIO SIMULADOS COM TRÂNSITO DEFINIDO BASEADO NA SIMULAÇÃO 1

| Nível de Trânsito   | Velocidade Média (km/h) | Nº de Paragens de Passageiros | Duração (segundos) | Velocidade Máxima (km/h) | Aceleração Máxima (m/s <sup>2</sup> ) | Desaceleração Mínima (m/s <sup>2</sup> ) | Inclinação Máxima (%) | Inclinação Mínima (%) |
|---------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| <b>Sem trânsito</b> | 14,22                   | 243                           | 32400              | 76,27                    | 2,25                                  | -2,17                                    | 12,2                  | -12,17                |
| <b>51</b>           | 14,72                   | 243                           | 32400              | 76,20                    | 2,15                                  | -2,1                                     | 12                    | -8                    |
| <b>69</b>           | 14,71                   | 243                           | 32400              | 75,98                    | 2                                     | -1,9                                     | 11                    | 9                     |
| <b>80</b>           | 14,14                   | 243                           | 32400              | 71,60                    | 1,7                                   | -1,4                                     | 7                     | 5                     |