

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



**Análise técnico-económica no uso de *Fuel Cells* em
autocarros urbanos**

João Luís Madureira Pires

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientadora: Professora Doutora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão
Coorientador: Professor Doutor Hélder Filipe Duarte Leite

21 de fevereiro de 2019

© João Luís Madureira Pires 2019

*Em memória da minha querida tia,
Maria Orquídea Madureira*

Um beijinho do teu “Engenheiro da NASA”

Resumo

As preocupações ambientais e o cumprimento das metas impostas pelo de Acordo de Paris levaram a repensar a abordagem quanto às emissões de CO₂ por parte dos transportes públicos e urbanos.

O interesse pelo H₂ como uma nova fonte limpa e sustentável em alternativa aos combustíveis fósseis, e pelas células de combustível (FC) como um conversor de hidrogénio (H₂) de emissões zero, torna possível considerar, atualmente, autocarros elétricos a FC como sistema de propulsão para transportes urbanos. Desta maneira é possível contribuir para a sustentabilidade, principalmente no que diz respeito à redução de emissões de poluentes.

Para avaliar os potenciais benefícios da implementação de uma solução de transporte público baseada em autocarros elétricos a FC, é necessário avaliar o seu desempenho em operação.

Este estudo apresenta uma análise técnico-económica de vários modelos de autocarros com tecnologia FC. O caso de estudo desenvolvido analisa os consumos de combustível e autonomia de um autocarro de referência do projeto CUTE para uma rota específica, comparando-os com os resultados de dois autocarros simulados para a mesma rota. São usadas estratégias de controlo diferentes para os dois autocarros, BUS1 e BUS2. Estes autocarros são simulados em condições diversas de lotação do veículo, potência de auxiliares e inclinação do percurso. No final, compararam-se com autocarros 100% elétricos e a diesel e fez-se uma análise de custo total de aquisição e emissões para uma frota de 20 autocarros dos diferentes tipos de tecnologia.

De uma forma geral, os resultados do estudo mostraram que o controlo de fornecimento de potência constante (BUS2) por parte da FC é melhor em termos de autonomia e consumo e que os autocarros híbridos a FC têm um bom potencial para reduzir o consumo de energia e as emissões. No entanto, atualmente, os custos de capital dos autocarros, a falta de infraestruturas e necessidade de maturação da tecnologia são ainda fatores críticos para o investimento numa frota de autocarros com esta topologia. Contudo, segundo as previsões apresentadas, esse custo de investimento tende a igualar o custo de investimento de tecnologias já existentes.

Palavras-chave: Alterações Climáticas, Autocarros, Consumos e Fuel Cell.

Abstract

The environmental and compliance targets set by the Paris Agreement have led to rethink the approach about the CO₂ emissions by public and urban means of transport.

The interest in, hydrogen, as a new clean and sustainable source in alternative to the fossil fuels, and fuel cells (FC), as a zero-emission hydrogen converter, becomes possible, nowadays, FC in electric buses as a propulsion system for urban transport. In this way it is possible to contribute to sustainability, especially in what regard to the reduction of the emissions.

To evaluate the potential beneficiaries of a public transportation base on FC electric buses implementation, is necessary to evaluate its operation performance. This study presents a technical-economic analysis of several bus models with FC technology. The case study analyses fuel consumption and the autonomy of a reference bus, from CUTE project, for a specific route, comparing it with the results of two simulated hybrid electric buses for the same route. Two different control strategies for the simulated buses, BUS1 and BUS2, are used. These buses are simulated in various modes of vehicle cargo, auxiliary power and elevation of the route. At the end they are compared with 100% electric buses and diesel and a total cost of acquisition and emissions analysis is made for a fleet of 20 vehicles of the different types of technology.

In general, the results of study show that the control of constant power supply (BUS2) by the FC is better in terms of autonomy and consumption and the FC hybrids have a good potential to reduce the consumption and emissions. However, nowadays, the capital costs of buses, the lack of infrastructure and the maturity needs of the technology are still critical factors for the investment in a fleet of buses with this topology. Nevertheless, according to the presented provisions, the investment cost tends to become the same as the already existing technologies.

Key Words: *Climate Change, Buses, Consumption and Fuel Cell.*

Agradecimentos

Deixo a minha palavra de agradecimento à minha orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Costa Pereira da Silva Ponce de Leão, por me ter dado a oportunidade de trabalhar ao seu lado durante o todo período de realização da minha dissertação. O meu obrigado pelo seu incondicional apoio e dedicação em todas as fases deste trabalho, pelos seus conselhos e orientações metodológicas, pelas suas críticas e partilha de conhecimento que muito contribuíram para levar a bom porto este projeto.

Quero deixar o meu apreço e agradecimento ao meu coorientador, Professor Doutor Hélder Filipe Duarte Leite, pelos conselhos e sugestões que contribuíram para o resultado final deste trabalho.

Aos Engenheiros Tiago Ramos, Tiago Rocha e toda a equipa do Departamento de Mobilidade Elétrica da CaetanoBus gostaria de deixar uma palavra de agradecimento pela orientação, crítica e incentivo durante estes últimos meses. A partilha do vosso conhecimento e experiência foram fundamentais para a execução deste desafio. A vossa ajuda foi imprescindível para que conseguisse chegar ao fim desta etapa, orgulhoso do trabalho apresentado.

Aos amigos e companheiros de “guerra” que fiz ao longo desta caminhada académica, quero deixar o meu maior agradecimento por me mostrarem sempre o seu apoio e contribuírem para o meu enriquecimento pessoal e profissional. Um obrigado especial ao João Barrocas e ao Manuel Fernandes por terem caminhado comigo de braço dado, desde o dia em que tive o ilustre prazer de conhecer tais personagens, nesta jornada de cinco anos e por estarem sempre presentes nos mais agradáveis e nem sempre tão agradáveis momentos.

Quero também, agradecer-te Patrícia, por toda a força, pela gigantesca paciência e pelo teu eterno apoio, sem ti teria sido muito mais complicado.

Às minhas queridas Madureiras, Avó Maria e Tia Bitá, o meu mais profundo e carinhoso agradecimento, por tudo o que significam na minha vida. Obrigado por terem depositado toda a vossa confiança nas minhas capacidades desde que me lembro como pessoa e por me tratarem sempre com tão grande carinho que, todos os dias, me enche o coração.

Por fim, seria impossível esquecer-me dos meus pais e querida irmã, por estarem sempre ao meu lado, por acreditarem sempre em mim, mesmo quando eu não acreditei e por todas as oportunidades que me proporcionaram. Não há palavras suficientes que demonstrem a minha gratidão. A vocês, deixo um obrigado quantificado em todo o amor e admiração que vos tenho.

“Until you start focusing on what needs to be done rather than what is politically possible, there is no hope. You are never too small to make a difference”

Greta Thunberg ,15 anos, COP24

Conteúdos

| | |
|--|--------------|
| Resumo | v |
| Abstract | vii |
| Agradecimentos | ix |
| Conteúdos | xiii |
| Lista de figuras | xvi |
| Lista de tabelas | xviii |
| Abreviaturas | xx |
| Capítulo 1 | 1 |
| Introdução | 1 |
| 1.1.- Contexto | 1 |
| 1.2.- Motivação e Objetivos | 2 |
| 1.3.- Estrutura da Dissertação | 3 |
| Capítulo 2 | 5 |
| Enquadramento | 5 |
| 2.1.- Alterações Climáticas | 5 |
| 2.2.- Políticas de Redução de Emissões a nível Mundial | 7 |
| 2.3.- Políticas de Redução de Emissões em Portugal | 8 |
| 2.4.- H2, Políticas e Portugal | 9 |
| 2.5.- Projetos piloto de Veículos a FC nos transportes Urbanos | 9 |
| 2.6.- Veículos Elétricos | 14 |
| 2.7.- FC Proton Exchange Membrane (FC PEM) | 17 |
| 2.8.- Mercado de autocarros a FC e Evolução | 20 |
| Capítulo 3 | 25 |
| Caso de estudo | 25 |
| 3.1 - Introdução | 25 |
| 3.2 - Aquisição de dados | 27 |
| 3.3 - Ferramenta de simulação -ADVISOR | 27 |
| 3.3.1.- Equação Base do ADVISOR | 30 |
| 3.3.2.- Potência requerida pelo veículo | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 3.4 - Arquitetura | 31 |
| 3.5 - Características físicas dos autocarros | 32 |
| 3.5.1.- Sistema FC..... | 33 |
| 3.5.2.- Bateria | 35 |
| 3.5.3.- Motor | 38 |
| 3.5.4.- Armazenamento..... | 38 |
| 3.6 - Ciclo de Condução..... | 39 |
| 3.7 - Estratégia de controlo de energia | 41 |
| 3.8 - Parâmetros a frio do simulador | 44 |
| 3.9 - Equivalente de combustível | 45 |
| 3.10 - Veículo de referência projeto CUTE..... | 45 |
| 3.11 - Testes de influência..... | 46 |
| Capítulo 4..... | 49 |
| Análise de Resultados | 49 |
| 4.1 - Validação das baterias..... | 49 |
| 4.2 - Controlo BUS1 | 51 |
| 4.2.1.- Variação da inclinação BUS1 | 53 |
| 4.2.2.- Variação da AVAC BUS1 | 54 |
| 4.2.3.- Variação da carga BUS1..... | 55 |
| 4.3 - Controlo BUS 2 | 55 |
| 4.3.1.- Variação da inclinação BUS2..... | 58 |
| 4.3.2.- Variação da AVAC BUS2 | 58 |
| 4.3.3.- Variação da carga BUS2..... | 59 |
| 4.4 - Relação de consumo com o CUTE | 60 |
| Capítulo 5..... | 63 |
| Custo de Investimento e Emissões para uma frota de autocarros..... | 63 |
| 5.1.- Equações e pressupostos | 63 |
| 5.2.- Análise de Resultados | 67 |
| Capítulo 6..... | 71 |
| Conclusões e Trabalhos futuros | 71 |
| 6.1.- Satisfação dos Objetivos | 71 |
| 6.2.- Trabalhos Futuros | 73 |
| ANEXO A..... | 75 |
| Gráficos do ADVISOR do BUS1 e BUS2 | 75 |
| ANEXO B..... | 77 |
| Tipos de FC diferentes | 77 |
| ANEXO C..... | 78 |

| | |
|--|-----------|
| Resultados do BUS1 para diferentes Baterias..... | 78 |
| ANEXO D | 80 |
| Resultados do BUS2 para diferentes Baterias..... | 80 |
| ANEXO E..... | 85 |
| FAQ's do projeto CUTE..... | 85 |
| Referências..... | 86 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2.1.- Gases de efeito de estufa por atividade económica e poluente, Eurostat 2015 [14] | 6 |
| Figura 2.2.-Componentes principais do autocarro do projeto CUTE[10] | 11 |
| Figura 2.3.-Horas de operação de autocarros nas diferentes cidades que participaram no projeto CUTE[10]..... | 12 |
| Figura 2.4.- Autocarro utilizado para o projeto HighVLOcity, com respetivos operadores, infraestruturas e Associações [34]. | 13 |
| Figura 2.5.- Configuração série e configuração Paralelo [Fonte:Advisor Glossary]..... | 15 |
| Figura 2.6. - Configuração série FC [Fonte:Advisor Glossary]. | 16 |
| Figura 2.7. -Estado de Carga da Bateria ao longo do tempo, imagem com representação numérica puramente exemplificativa..... | 16 |
| Figura 2.8.-Desenho esquemático de uma FC de H2 e as respetivas reações [42]..... | 18 |
| Figura 2.9.-(a)-Custo da Stack (b) Custo do sistema FC [46]. | 23 |
| Figura 2.10.-Componentes da Stack [48]. | 24 |
| Figura.2.11.-Porcentagem de custo de uma bateria de Lítio de 6.5Ah por módulo [45]..... | 24 |
| Figura 3.1.-Rota de circulação do autocarro do projeto CUTE [49]. | 26 |
| Figura 3.2.-Interação do ADVISOR entre janela, ficheiros de dados (MATLAB) e diagrama de bloco (Simulink). | 28 |
| Figura 3.3.-Diagrama de funcionamento lógico do ADVISOR. | 29 |
| Figura 3.4.-Primeira janela do software ADVISOR | 29 |
| Figura 3.5.- Segunda janela à esquerda e terceira janela à direita [Fonte: Autor]..... | 30 |
| Figura 3.6 Arquitetura dos autocarros simulados [63] | 31 |
| Figura 3.7.-Topologia base de armazenamento [Fonte: Autor]..... | 32 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.8.- Autocarro utilizado para simulação [Fonte: Autor]..... | 32 |
| Figura 3.9.- Modelo utilizado pelo ADVISOR para a modelação da bateria [64]...... | 36 |
| Figura 3.10.-Esquema em bloco da bateria presente no Simulink [60]. | 37 |
| Figura 3.11.-Ilustração em SolidWorks do sistema de armazenamento de 5 cilindros com a capacidade de 37,5Kg [Fonte: Autor]..... | 38 |
| Figura 3.12.- Fotografia da Rota 303, retirada pelo modelo GPS do Viriciti conjugado com o Google Maps e respetivo consumo de um autocarro elétrico..... | 39 |
| Figura 3.13.- Rota 303 STCP adotada. | 40 |
| Figura 3.14.- Gráfico da distância percorrida pelo autocarro com 1 módulo de 23Ah, capacidade 14.6kWh..... | 41 |
| Figura 3.15- Valores utilizados para as condições iniciais usadas no ADVISOR são equivalentes a “arranque a frio” [Fonte: Autor]. | 44 |
| Figura 3.16. -Inclinação da estrada entre dois pontos, A e B, para uma inclinação de 0.5% [Fonte: Autor]..... | 47 |
| Figura A.1.-Gráficos do ciclo, SOC, potência da uma bateria e potência da FC para o caso de uma bateria 3 módulos de 43,8kWh para o BUS1. | 75 |
| Figura A.2.-Gráficos do ciclo, SOC, potência da uma bateria e potência da FC para o caso de uma bateria 3 módulos de 43,8kWh, para o BUS2. | 76 |
| Figura B.3.-Outros tipos de Células de combustível, por temperatura de operação, reação no ânodo, reação no cátodo, aplicação, potência e transportador de eletrões [42] | 77 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1.-Características Autocarro Sora da Toyota[31], [44] | 21 |
| Tabela 2.2.-Características do Autocarro da Solaris [26]..... | 21 |
| Tabela 2.3.- Características Autocarro a FC da Van Hool [38], [45]..... | 21 |
| Tabela 2.4.- Características Autocarro de dois pisos da Wrightbus[38] | 22 |
| Tabela 2.5.-Características do autocarro da El Dorado National [30], [38]..... | 22 |
| Tabela 2.6.-Características do Autcarro Xelsior da New Flyer[38]..... | 22 |
| Tabela 3.1-Desempenho desejada para os dois autocarros escolhidos..... | 31 |
| Tabela 3.2.- . Parâmetros, Valores e Unidades das características físicas dos autocarros. (1) - peso para o autocarro da bateria de 2 módulos 29.3Ah | 33 |
| Tabela 3.3.- -Características da FC, Corrente por célula, Corrente total do sistema, Potência dos auxiliares e Tensão por célula. | 33 |
| Tabela 3.4.- . Resultados dos cálculos das tensões da FC, potência Total, potência útil, potência de calor, eficiência fluxo molar e caudal..... | 34 |
| Tabela 3.5.- -Número de Módulos, na bateria com a respetiva corrente, capacidade de Potência Máxima..... | 35 |
| Tabela 3.6.- Características da Rota 303 adotada..... | 40 |
| Tabela 3.7.- Valores de K utilizados na simulação do BUS2..... | 44 |
| Tabela 3.8.- Características do Autocarro projeto CUTE[10] [66] | 46 |
| Tabela 3.9.- Consumos de autocarro do Projeto CUTE[10] [66] (1)-Densidade do diesel 830 g/L..... | 46 |
| Tabela 3.10.-Inclinações simuladas para 1 ciclo | 47 |
| Tabela 3.11.- Percentagem de potência do sistema AVAC utilizada. | 47 |
| Tabela 3.12.-Valores de carga referentes ao autocarro a FC com 2 módulos de baterias | 48 |

| | |
|--|----|
| Tabela 5.1.-Consumos e emissões de CO ₂ para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada, de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para o autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e um autocarro 100% elétrico de 250kWh. (1) -Cálculo através da equação equivalente de litro de diesel para autocarros elétricos do ADVISOR. | 64 |
| Tabela 5.2.- Consumos e emissões anuais de CO ₂ para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para o autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e um autocarro 100% elétrico de 250kWh. (1) -Cálculo através da equação equivalente de litro de diesel para autocarros elétricos do ADVISOR. | 65 |
| Tabela C.1.- Resultados da influência do sistema AVAC para as várias baterias do BUS1 | 78 |
| Tabela C.2.- Resultados da influência da inclinação, para as várias baterias do BUS1 | 79 |
| Tabela C.3.- Resultados da influência do peso ou carga, para as várias baterias do BUS1 | 79 |
| Tabela D.4.-Resultados para os a bateria de dois módulos, capacidade de 29,3kWh, para os diferentes valores de K. | 80 |
| Tabela D.5.-Resultados para os a bateria de dois módulos, capacidade de 43,8kWh, para os diferentes valores de K. | 81 |
| Tabela D.6.-Resultados da influência do sistema AVAC para as várias baterias do BUS2 | 83 |
| Tabela D.7.- Resultados da influência da inclinação, para as várias baterias do BUS2 | 83 |
| Tabela D.8.- Resultados da influência do peso ou carga, para as várias baterias do BUS2..... | 84 |

Abreviaturas

| | |
|---------|---|
| ADVISOR | ADvance VehIcle SimulatOR |
| AG | Algoritmo Genérico |
| AP2H2 | Associação Portuguesa para a Promoção de H ₂ |
| AVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado |
| BEV | Battery Electric Vehicle |
| BP | British Petroleum |
| C40 | Cities Climate Leadership Group |
| CHIC | Clean Hydrogen in European Cities |
| CIEC | Código dos Impostos Especiais de Consumo |
| COP | Conferência dos Partidos ou Conference of the Parties |
| CUTE | Clean Urban Transport for Europe |
| DGEG | Direção-Geral de Energia e Geologia |
| DOE | Departamento de Energia dos Estados Unidos da América |
| EV | Veículos elétricos ou Eletric Vehicles |
| FEM | Força eletromotriz |
| GEE | Gases com efeito de estufa |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change |
| JIVE | Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe |
| LNEG | Laboratório Nacional de Energia e Geologia |
| NDC | Nationally Determined Contributions |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| OTP | Operadores de Transporte Público |
| PC | Poder calorífico |
| PCI | Poder calorífico inferior |
| PCS | Poder calorífico superior |
| PEM | Proton Exchange Membrane |
| PEMFC | Proton Exchange Membrane Fuel Cell |
| PFCHEV | Plug-In Fuel Cell Hybrid Eletric Vehicle |
| PNAEE | Plano Nacional de Ação para Eficiência Energética |
| PNAER | Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis |
| SAE | Sociedade Internacional de Engenharia Automóvel |
| SOC | State of Charge |
| STCP | Sociedade de Transportes Coletivos do Porto |
| STEP | Sustainable Transport Energy for Perth |
| UE | União Europeia |
| UN | Nações Unidas |
| UNFCCC | Convenção dos Quadros das Alterações do Clima da União Europeia |
| VE | Veículos elétricos |

WMO World Meteorological Organization
FC Fuel Cell ou Células de Combustível
FCEV Fuel Cell Electric Vehicles

Capítulo 1

Introdução

1.1.- Contexto

O consumo de energia no século XXI tende a crescer a um ritmo acelerado devido ao aumento populacional e ao desenvolvimento das tecnologias. Apesar do consumo ter crescido mais devagar comparativamente ao passado, irá ainda expandir cerca de 30% entre o presente e 2040, o equivalente a adicionar novamente a energia requerida pela China e pela Índia à energia requerida global atual [1]. Esta necessidade de energia cria problemas na utilização e fornecimento da mesma, tendo tudo isto implicações nefastas em termos ambientais, sociais e humanos.

Segundo a WMO (World Meteorological Organization), a temperatura global de 2017 foi aproximadamente de 1,1°C acima da Era pré-industrial, mais de metade do limite máximo imposto de 2°C pelo Acordo de Paris [2]. O relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) de 2018, prevê que este valor tende a alcançar os 1,5°C entre 2030 e 2052 se continuar a crescer ao mesmo ritmo [3]. Este problema está relacionado com o efeito dos gases de estufa (GEE) na atmosfera, provocados pela atividade do Homem, sendo que o setor dos transportes e eletricidade é responsável por cerca de 30% da emissão [4].

Outro problema, retrata a finitude dos combustíveis fósseis, dados da OurWorldData [5] demonstram que em 2015 o consumo mundial de energia foi de 146.000 TWh mais de 25 vezes do que em 1800, onde apenas 1% é renovável [6]. Como a economia mundial depende do consumo de energia, esta pressão de possível falta de recursos, aliada às alterações climáticas, convoca a ação da investigação e inovação tecnológica na procura de novas fontes de energia.

O interesse pelo H₂ como uma nova fonte limpa e sustentável em alternativa aos combustíveis fósseis e pelas FC como um conversor de energia de emissões zero, tem vindo a aumentar cada vez mais, em especial no setor dos transportes, tornando possível que seja o H₂ o próximo portador de energia [7]. Este interesse provém do elevado conteúdo energético do H₂, da eficiência das FC e das emissões deste sistema serem apenas água.

Sendo esta uma das formas para combater os problemas mencionados, políticas de investimento em veículos a FC a nível mundial e projetos de incentivo à integração das FC no setor dos transportes são peças fundamentais [8][9], tendo como objetivo diminuir a poluição no setor e, ao mesmo tempo, atuar como alternativa aos veículos de combustão interna.

Por isso é que, encontrar o balanço entre a competitividade económica, custo de operação e benefícios ambientais para os veículos elétricos de células de combustível (FCVE), é um dos desafios mais investigados nos últimos anos.

1.2.- Motivação e Objetivos

Nos últimos anos, o investimento na disseminação de veículos de emissão zero tem vindo a crescer devido, fundamentalmente, às restrições governamentais de emissões de gases e cumprimento das metas para a neutralidade carbónica impostas pelo Acordo de Paris.

As FC têm sofrido grandes inovações a nível de eficiência e durabilidade [10], sendo um dos fortes candidatos à mobilidade elétrica urbana com emissões zero.

Ao abrigo de um estágio extracurricular, surge a oportunidade de acompanhar o projeto do primeiro autocarro a FC a ser produzido em Portugal. Neste âmbito e completando com a informação recolhida pelo projeto Clean Urban Transport for Europe (CUTE) [11] com término em 2006, que consistiu em implementar 27 autocarros a FC em nove cidades Europeias entre as quais, a cidade do Porto, surgiu a ideia de analisar técnico-economicamente a introdução das FC nos transportes urbanos.

As questões que esta dissertação pretende responder são:

- *“Terá a tecnologia FC evoluído o suficiente para competir com as tecnologias já existentes nos transportes urbanos?”*
- *“Quais os consumos, para a mesma rota do autocarro do projeto CUTE, de um autocarro Plug-In Híbrido a FC (PFCHEV)”?*
- *“Qual será a melhor estratégia de controlo de energia para a topologia híbrida do autocarro a PFCHEV?”*
- *“Quanto seria o investimento de uma frota de 20 autocarros a PFCHEV?”*
- *“Será um autocarro a FC mais viável que um autocarro a bateria?”*
- *“Será a aposta nas FC um bom caminho para a redução de emissões de gases para a atmosfera?”*

Para responder a estas questões pretende-se, especificamente, analisar o autocarro que circulou na cidade do Porto ao abrigo do projeto CUTE, simular, modelar e, para as mesmas situações, analisar o desempenho de dois autocarros, com estratégias de controlo de energia diferentes, PFCHEV, com tecnologias mais atuais e compará-los com autocarros já inseridos numa frota de transporte da cidade do Porto, a diesel e 100% elétricos. Importa, também, verificar a sua viabilidade económica de aquisição e o impacto ambiental para a mesma frota de transporte.

1.3.- Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se dividida em 6 capítulos. No primeiro capítulo, é efetuada uma breve introdução ao tema e é apresentada, de forma geral, a motivação, os objetivos propostos e estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica e enquadramento sobre toda a envolvente relativa à neutralidade carbónica e mitigação das alterações climáticas, assim como da evolução das tecnologias de emissão zero que serviram como base a todo o trabalho desenvolvido. Partindo do geral para o específico, aborda-se o tema das alterações climáticas e dos esforços realizados para combater as mesmas. Uma introdução é feita aos veículos elétricos, aprofundando a tecnologia das FC, o funcionamento da mesma, o funcionamento de um veículo elétrico a FC e diferentes arquiteturas de hibridação. Ainda neste capítulo, são expostos alguns dos veículos elétricos a FC, pesados, e a competitividade de mercado desta tecnologia com as baterias.

No terceiro capítulo, descreve-se o caso de estudo e a forma como foram obtidos os dados, é apresentada a metodologia e o software utilizado como simulador desta dissertação, especificando o seu funcionamento. São apresentados também, os modelos utilizados no simulador para modelar o sistema da FC, a bateria, o motor, o ciclo de condução e a estratégia de controlo, utilizados para cada autocarro simulado, acompanhados com a devida formulação matemática.

No quarto capítulo, são apresentados os resultados finais das influências de carga, sistema AVAC e inclinação. É realizada a comparação dos resultados obtidos com os resultados do projeto CUTE e diferentes tecnologias como 100% elétrico e a diesel.

No quinto capítulo é realizada uma análise ao custo no primeiro ano de aquisição de uma frota de 20 autocarros e calculadas as respetivas emissões para cada tecnologia.

Por fim, no sexto e último capítulo, encontram-se as conclusões, satisfação de resultados e ainda possíveis trabalhos a realizar no futuro.

Capítulo 2

Enquadramento

Este capítulo consiste num enquadramento teórico de conceitos que serviram como base a esta dissertação e que guiaram à estruturação do pensamento lógico para a metodologia de análise.

Inicia com o tema das alterações climáticas e o impacto ambiental grave, gerado pelo Homem. Apresentam-se os esforços das políticas de redução de emissões a nível Mundial e Nacional. Realiza-se uma introdução aos veículos elétricos (VE), aprofundando no subcapítulo seguinte a tecnologia das FC, o funcionamento da mesma, o funcionamento de um veículo elétrico a FC e diferentes arquiteturas de hibridação. No fim apresentam-se alguns dos veículos elétricos a FC pesados e a competitividade de mercado desta tecnologia com as baterias.

2.1.- Alterações Climáticas

A atual dependência de combustíveis fósseis e recursos não renováveis para satisfazer a energia requisitada para as atividades económicas mundiais levou a um paradigma perigoso com inúmeras consequências ambientais e sociais.

Em 2015, na conferência do Clima em Paris, quase todos os países da União Europeia (UE) assinaram o Acordo de Paris para manter o aumento da temperatura global, comparativamente ao da Era pré-industrial abaixo do um limite de 2°C, sendo que o objetivo a longo prazo seria manter esse aumento abaixo do 1,5°C até 2050 [12].

Em 2017, um valor recorde de 410 ppm de concentração de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera foi alcançado, o que reforça o efeito de estufa e acelera as alterações climáticas e, com isto, o aumento da temperatura [13]. De acordo com o relatório do IPCC, de 2018 [3], estima-se que a atividade humana tenha causado um aumento de 1,1°C à temperatura global acima dos níveis da Era pré industrial, e que um aquecimento global de 1,5°C é provável acontecer entre 2030 e 2052, caso esta atividade continue a aumentar à velocidade atual.

“Uma das mensagens chave que é transmitida por este Relatório é que já estamos a ver as consequências do aumento de 1°C à temperatura global através de tempestades extremas, aumento do nível do mar, diminuição dos Glaciares do Ártico, entre outras” Panmao Zhai, Vice-presidente do Grupo de Trabalho 1 do IPCC, 2018 [14].

Limitar e reduzir a temperatura global abaixo dos 1,5°C exige uma redução acentuada nas emissões de gases de efeitos de estufa (GEE) em todos os setores. O principal GEE a eliminar é o CO₂, responsável por cerca de 84% das emissões, de acordo com o gráfico da figura 2.1, fonte da Eurostat, 2015 [15].

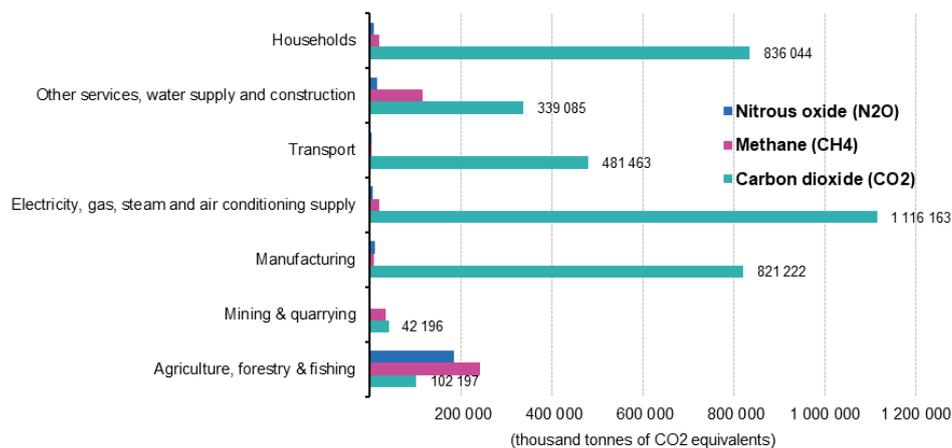


Figura 2.1.- GEE por atividade económica e poluente, Eurostat 2015 [15].

Como os sectores de atividade são dependentes entre si, modificar um dos sectores implica modificar outro. É exemplo disso o consumo de energia nas habitações pois, caso este aumente progressivamente, refletir-se-á numa menor flexibilidade na escolha de opções para mitigar o problema do aquecimento global. No caso de acontecer o oposto, o número de opções aumenta consideravelmente.

Para se estabilizar o aumento da temperatura ao nível atual, é necessário que as emissões de CO₂ se reduzam para zero, o que significa que a quantidade de CO₂ que entra na atmosfera tem que ser igual à que é removida. Atingir a neutralidade de emissões de CO₂ implica fazer com que a concentração de CO₂ na atmosfera decresça progressivamente ao longo do tempo até se atingir um novo equilíbrio. Uma vez que as emissões de CO₂ provenientes da atividade humana são absorvidas pelos oceanos e biosfera terrestre, caso fossem reduzidas rapidamente em todos os setores principais da sociedade – como os setores doméstico, indústria, transportes, energia e agricultura e pesca - levaria a que a temperatura global fosse aproximadamente constante ao longo dos séculos. As ações que podem reduzir as emissões são por exemplo, no setor da energia: limitar o carvão, aumentar a quantidade de energia produzida por fontes renováveis, eletrificar os transportes, entre outras [16]. O setor dos transportes e da indústria são responsáveis por cerca de 34%, figura 1, das emissões de CO₂ a nível europeu e 30% a nível mundial [4].

Numa economia mundial dependente de combustível fóssil, onde apenas 1% da energia é proveniente de energias renováveis, são de louvar ideias como a implementação da mobilidade de emissões reduzidas [4].

O potencial no setor dos transportes para a redução de emissões é gigantesco. Este espelha-se na progressiva introdução dos veículos 100% elétricos, que têm provocado um impacto significativo na qualidade do ar e na redução de emissões. No entanto, levantam-se questões quanto a esta mesma introdução, caso se generalize, no que diz respeito à sua capacidade renovável pois, caso a energia requisitada continue a aumentar, perpetuar-se-á a dependência dos combustíveis fósseis no sector gerador de energia. Surge, então, a questão - *Haverá mais tecnologias que consigam combater esta dependência?* A aposta no desenvolvimento da tecnologia FC e a produção de H₂ por eletrólise recorrendo a painéis solares (apesar de possuírem um rendimento relativamente baixo ,produz 120kg de H₂ por dia) pode, futuramente, limitar essa dependência mantendo todos os prós dos veículos 100% elétricos, qualidade de ar e emissões zero [17][18].

2.2.- Políticas de Redução de Emissões a nível Mundial

Após duas Conferências de Mudança Climática organizada pela convenção dos Quadros das Alterações do Clima da União Europeia (UNFCCC) para a consciencialização do aquecimento global causado pelas emissões de GEE [19] a 11 de Dezembro de 1997 no Japão em Quioto, na Conferência de Partidos sobre Mudança Climática número 3 (COP3), os Estados Membros das Nações Unidas (UN), assinaram um tratado que ficou historicamente conhecido como Protocolo de Quioto. Este tratado comprometeu os Estados Membros (com base na conformidade democrática da comunidade científica de que o aquecimento global é real e causado pelas emissões de CO₂ produzidos pela atividade do Homem) a reduzir as suas emissões em prol de um objetivo em comum, o mundo das próximas gerações [20].

O Protocolo de Quioto foi, então, o *trigger* para a criação de comités, conferências e associações para a consciencialização ambiental e promoção de mecanismos económicos de maneira a atingir os objetivos climáticos e o impacto na economia ser mínimo [21].

O Acordo de Paris, negociado e assinado durante o COP21, com o objetivo de reforçar a resposta às alterações climáticas, tornou-se o evento mais decisivo para a transição global para energias limpas. Os principais pontos deste acordo são:

- Manter o aumento da temperatura média abaixo do 2°C relativamente aos níveis pré Revolução Industrial e, posteriormente, no relatório do IPCC, baixar 2°C até 2030, reduzindo o impacto das alterações climáticas;
- Promover financeiramente o desenvolvimento de baixas emissões e de elevada recuperação face as alterações climáticas;
- Os países participantes comprometeram-se a aumentar o investimento no desenvolvimento e investigação de energias limpas e, com isto, acelerar a disponibilidade de tecnologias limpas seguras, eficientes e avançadas.

A implementação deste Acordo é feita de modo a conduzir a um novo e maior sentido de responsabilidade comum, nunca esquecendo as diferentes condicionantes de cada país, com o fim de ampliar a qualidade de vida das próximas gerações ao reduzir o impacto das alterações climáticas.

Em dezembro de 2018, ocorreu o COP24 do qual o resultado final foi histórico relativamente ao Acordo do Paris, criando-se o livro de regras do Acordo de Paris (*Paris Agreement Rule Book*) no fim de duas semanas de intensas negociações. Este livro elabora regras que governam

os relatórios de emissões, análise regular do processo de mitigação, adaptação, fluxo financeiro, resolução de perdas ou danos e um compromisso de aumentar a ambição das *Nationally Determined Contributions* (NDCs). Nesta COP24, também foi reconhecido formalmente o relatório do IPCC e concluiu-se o diálogo de Talanoa, um processo de partilha de histórias e experiências que foi desenhado para construir credibilidade e confiança entre países, na ambição de melhorar as suas contribuições. Neste sentido, foi feita uma proposta pelo Secretário Geral da ONU, António Guterres, para convocar uma Cimeira do Clima para setembro de 2019.

Esta Conferência ficou marcada pelas discórdias quanto ao Artigo 6 do Acordo de Paris. Este artigo trata dos chamados “mecanismos de mercado”, que permitem que os países cumpram uma parte das suas metas domésticas de mitigação. Um exemplo destes mecanismos são os “mercados de carbono” que possibilitam aos países negociar as suas emissões. É necessário reconhecer a carência de regras globais sobre este assunto para salvaguardar a integridade dos esforços de todos os países e garantir que cada tonelada de emissões libertadas para a atmosfera seja devidamente contabilizada [22].

"Apesar de assistirmos aos impactos climáticos devastadores que espalham o caos no mundo, continuamos sem fazer o suficiente para prevenir perturbações no clima irreversíveis e catastróficas" Secretário Geral da ONU, António Guterres, COP24.

2.3.- Políticas de Redução de Emissões em Portugal

O Plano Nacional de Ação para a Eficiência Energética (PNAEE) e o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAER) fazem a revisão da estratégia nacional para as energias renováveis e eficiência energética, tendo em consideração os consumos de energia primária e a contribuição do setor energético para a redução das emissões de GEE [23].

A implementação destes planos estratégicos na área da energia tem como objetivo assegurar os compromissos assumidos por Portugal a nível nacional e a nível da União Europeia (UE), relativos à eficiência energética, nomeadamente:

- Promoção de energias renováveis, através da incorporação de 31 % de energia proveniente de fontes renováveis;
- Contribuir para o cumprimento do objetivo de redução de 25 % do consumo global de energia primária;
- Reduzir a dependência energética do país e garantir a segurança do abastecimento;
- Reduzir as emissões de GEE.

No que respeita à meta global de incorporação de energia de fontes renováveis no consumo final bruto de energia, Portugal tem a quinta meta mais ambiciosa do conjunto de países da UE, sendo que este objetivo compreende os setores de produção de eletricidade, aquecimento e arrefecimento e transportes. Portugal tem vindo, assim, a demonstrar resultados positivos no âmbito das energias renováveis, o que tem permitido, por um lado, reduzir a dependência energética do exterior e, por outro, contribuir para a redução das emissões de GEE [23].

A Diretiva n.º 2009/28/CE do Parlamento Europeu, veio ainda definir um objetivo específico, comum a todos os Estados Membros, de incorporação de 10 % de energia de origem renovável nos transportes, até 2020, sendo expectável que o contributo de combustíveis alternativos para o cumprimento desta meta seja significativo face à presente realidade tecnológica.

2.4.- Hidrogénio, Políticas e Portugal

“O H₂ é uma forma de energia muito promissora, para os próximos anos, e seguramente vai ser a forma de energia adequada para as viagens e o transporte de longo-médio curso”
-Secretário de Estado Adjunto e da Mobilidade, José Mendes, 2018 [24].

Como reação ao Acordo de Paris, é formado, pelos principais líderes da energia e dos transportes, o consórcio do H₂ servindo como alavanca para o papel do H₂ como transportador de energia [25].

De acordo com o consórcio, o H₂ poderá a vir a ser o combustível para a descarbonização nos transportes e na indústria e pode ser utilizado como armazenamento e transporte de energia através de fontes renováveis, um reforço na relevância do papel do H₂ como transportador energético. Os membros deste consórcio disponibilizam-se a aumentar o investimento em tecnologias de H₂ e convidam os governos a reconhecer a importância deste transportador de energia através de reforços nas políticas de investimento.

O C40 (Cities Climate Leadership Group) estabeleceu metas para que, nas cidades, o setor de transportes fosse de emissão zero e a energia proveniente de fontes totalmente renováveis até 2050 [26]. Para alcançar estes objetivos na Europa é necessário continuar a apostar na ciência e inovação do setor dos transportes, progredir com os erros de estudos em projetos já realizados (detalhados no capítulo seguinte) e aumentar o investimentos e aprovação de mais projetos. É o caso do grupo *Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking under the European Union's Horizon 2020* que visa acelerar a entrada de mercado do H₂ e das FC com um investimento de 1,33 mil milhões de euros em projetos [27].

É também exemplo, o projeto europeu H2ME com o objetivo de expandir a frota Europeia de veículos a H₂ através da validação técnica e comercial dos veículos, postos de abastecimento e técnicas de produção de H₂ [17].

Em Portugal, a Associação Portuguesa Para a Promoção do H₂ (AP2H2) e o Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG) pretendem implementar um conjunto de iniciativas que promovem Portugal tecnologicamente e que irá beneficiar todo o sector do H₂ com os objetivos de [28]:

- Divulgar e promover o sector do H₂, tanto em Portugal como nos mercados internacionais;
- Promover projetos de demonstração relacionados com a utilização do H₂, nos vários domínios de aplicação;
- Promover iniciativas de criação de competências científicas e tecnológicas a nível nacional relacionadas com a “economia do H₂” e que contribuam para a competitividade da economia nacional no mercado global;
- Aumentar a visibilidade e a exposição internacional do sector H₂.

2.5.- Projetos piloto de Veículos a FC nos transportes Urbanos

Segundo o projeto Zero Emission Urban Bus System (ZeEUS) [29], os autocarros a FC têm uma possibilidade de entrar no mercado e serão 10% das compras de autocarros em 2030 na Europa. Uma pequena percentagem comparada com os elétricos de 52%, mas que abre portas e cenários diferentes para depois de 2030. Em 2019, uma nova gama de autocarros movidos a H₂

sairá ,como o Solaris Urbino 12 [30] da Solaris Bus & Coach, o Axes Fuel Cell Electric Bus da El Dorado National's [31] adaptado pela BallardFCvelocity e Sora [32] da Toyota, que já foi aprovado e lançado para o mercado asiático [29]. As suas características serão aprofundadas no subcapítulo 2.8 Mercado e Competitividade.

Centrando-se esta dissertação em fazer notar a tecnologia de FC a H₂ como opção válida rumo às metas de zero emissões no setor dos transportes para 2050 nas cidades, com foco no transporte público urbano, é necessário averiguar estudos e projetos já realizados neste contexto.

Este capítulo será dividido em subcapítulos cada um com um projeto que contribui para o desenvolvimento da tecnologia FC, tanto a nível técnico de desenvolvimento da FC, diferentes topologias e evolução de estratégias de controlo, como a nível comercial de expansão de mercado e desenvolvimento de infraestruturas.

Começa pelo projeto mais relevante para esta dissertação, o projeto CUTE (Clean Urban Transportation for Europe), de onde serão utilizados os resultados obtidos a nível de consumo e desempenho para a posterior comparação na análise de resultados.

2.5.1.- Clean Urban Transportation for Europe (CUTE)

O projeto histórico CUTE, terminado em Maio de 2006, foi o primeiro ensaio no terreno de uma frota substancialmente grande, 27 autocarros a FC do mesmo tipo Mercedes-Benz Citaro a operar ao mesmo tempo em diferentes países na Europa, sendo o único em que Portugal esteve envolvido [11].

O projeto CUTE foi coordenado pela Daimler Chrysler, e fundado pela Comissão Europeia. O objetivo do projeto era avaliar e demonstrar a nova tecnologia FC em autocarros urbanos, incluindo também no projeto a infraestrutura para produção e abastecimento de H₂.

O número de autocarros, a diversidade das condições, o número de horas de operação assim como o número de quilómetros percorridos, apresentaram uma possibilidade única para o estudo da viabilidade de veículos movidos a H₂.

As nove cidades que participaram no projeto CUTE foram, Amsterdão, Barcelona, Hamburgo, Londres, Luxemburgo, Madrid, Porto, Estocolmo e Estugarda. Os modos de operação dos autocarros variaram de cidade para cidade, como o número de rotas em circulação, a inclinação do terreno de circulação e a meteorologia, o que permitiu captar resultados sujeitando os autocarros a todo o tipo de adversidades.

No Porto, no projeto CUTE, o coordenador e operador de autocarros foi a Sociedade de Transportes Coletivos do Porto (STCP), enquanto a British Petroleum (BP) ficou responsável pela infraestrutura de abastecimento de H₂.

Neste projeto foi desenvolvido e demonstrado um sistema de transportes de emissões zero que alcançou os principais objetivos [11]:

1. Melhorar a qualidade da atmosfera;
2. Diversificar as fontes de energia como alternativa aos combustíveis fósseis;
3. Identificar uma potencial redução de GEE que iria de encontro ao Protocolo de Quioto.
4. Desenvolver o conhecimento necessário para certificar os autocarros a H₂ para uma operação segura nos países participantes;
5. Construir um conhecimento base do desempenho ambiental do novo sistema de transporte;

6. Aumentar o conhecimento do público quanto às FC e a tecnologia a H₂.

A estrutura do veículo usado neste projeto foi baseada no autocarro de 12 metros, movido a diesel, Mercedes Benz Citaro comercializado pela EvoBus, subsidiária da Daimler Group. O protótipo foi desenhado e desenvolvido pela Ballard Power Systems e incorporado com a última tecnologia de FC da altura. O motor e a transmissão estão situados no mesmo local que o modelo do veículo convencional a diesel. O teto foi reforçado de maneira a satisfazer os requisitos de 3 toneladas extra de peso do sistema FC. Os componentes principais podem ser vistos na figura 2.2.

O design e a arquitetura do sistema FC tiveram como foco a máxima fiabilidade e disponibilidade do veículo usando o máximo possível de componentes de série. Duas FC *stacks* (conjunto de células FC em série) foram montadas no teto do autocarro, figura 2.2, que proporcionam uma potência total de 250kW ao motor elétrico e auxiliares, obtendo-se o mesmo conforto e desempenho que um autocarro convencional a diesel. O armazenamento foi feito a 350bar com a capacidade de 44kg H₂, o que dá um alcance de aproximadamente entre 200 a 250 km, dependendo da condução realizada. O H₂ foi fornecido de várias maneiras diferentes: produzido no local por eletrólise e reformulação do petróleo ou entregue por camiões.

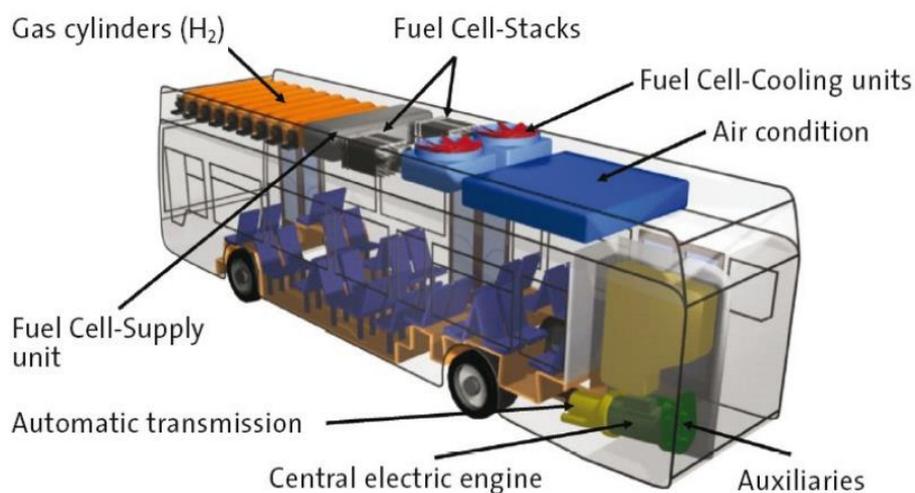


Figura 2.2.-Componentes principais do autocarro do projeto CUTE[11]

Os resultados do projeto CUTE foram surpreendentes e um sucesso. Tanto os autocarros a FC como a infraestrutura de H₂ obtiveram grandes valores de fiabilidade. Demonstrou-se que uma visão de uma frota de transportes a FC e H₂ pode vir a ser implementada quando todo o potencial de otimização identificado no projeto for implementado e transferido para a produção em série.

As horas de operação nas diferentes cidades rondaram entre as 3300h e as 10000h e o tempo máximo de vida de uma FC foi de mais de 3200h, figura 2.3.

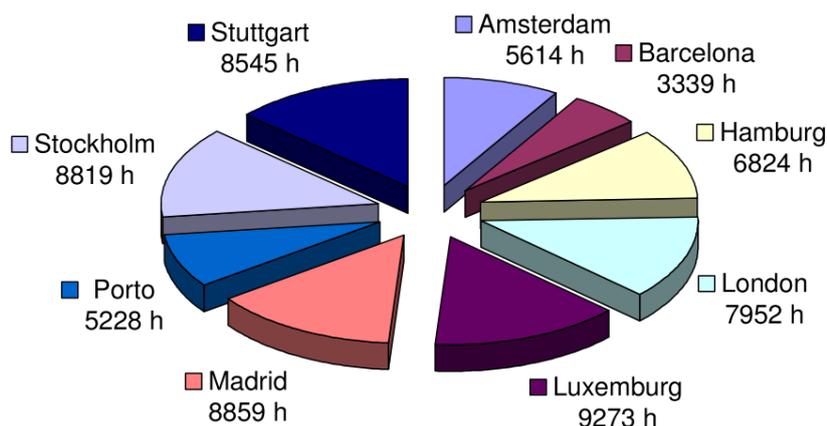


Figura 2.3.-Horas de operação de autocarros nas diferentes cidades que participaram no projeto CUTE[11]

Os dados obtidos mostraram o potencial de otimização deste protótipo em termos de consumo de combustível. As previsões do projeto apontam que o consumo de combustível pode ser reduzido até 50% usando hibridação com baterias de lítio. A tecnologia não apresentou qualquer ponto fraco, apesar de o seu ciclo de vida conseguir ser aumentado através da hibridação também. Alguns componentes como o inversor mostram-se como ponto fraco e de necessidade de melhoria. É mais tarde, no projeto HyFeet CUTE, que essas melhorias são estabelecidas. O consumo e desempenho do projeto CUTE só serão abordados no capítulo 3, Caso de Estudo.

2.5.2.- Clean Hydrogen in European Cities (CHIC)

O passo seguinte para a completa comercialização dos autocarros a FC de H₂ foi o projeto CHIC (Clean Hydrogen in European Cities). O projeto financiado pelo Fuel Cell & Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) teve início em 2010, tendo um total de 54 autocarros a H₂ em 9 cidades da Europa e Canadá [33]. O projeto proporcionou provas de funcionalidade dos autocarros a FC de H₂, infraestrutura e a prática da sua comercialização. Neste projeto testou-se a arquitetura de armazenamento híbrida resultando numa eficiência de consumo muito maior que nos projetos anteriores. A média de consumos do projeto rondou os 12kg/100km. Com uma condução económica foi possível atingir os 8kg/100km. O reabastecimento continua a ser em curto espaço de tempo e de confiança a nível de segurança [33].

A maior conquista deste projeto foi o conhecimento da energia diária requerida para a operação dos transportes públicos para as diversas cidades da Europa e Canadá, isto aliado à melhoria da desempenho e consumo de combustível [33].

2.5.3.- Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe (JIVE)

Outros projetos que apoiam e apoiaram a evolução de autocarros a FC já presentes nos projetos anteriores são o JIVE e JIVE 2 (Joint Initiative for hydrogen Vehicles across Europe), sendo a evolução para um mercado comercial de autocarros a FC a H₂. Com estas iniciativas, 400 autocarros a FC serão introduzidos até 2020. O JIVE 2 destaca-se como o projeto criador de um mercado significativo para tecnologias de emissão zero e aceleração do processo de comercialização de autocarros de célula de combustível na Europa. O JIVE 2 também se apoia nos objetivos do projeto JIVE, com um foco adicional na preparação do mercado para uma

implantação em larga escala a partir de 2020. Isso envolverá diversos desafios para o setor, como reduzir os custos dos veículos e impulsionar a escolha de H₂ como transportador de energia, garantindo a fiabilidade das grandes frotas a FC [34].

2.5.4.- HighVLOcity

No seguimento da substituição de autocarros convencionais em frotas de transporte público, surge o projeto HighVLOcity através da implementação de autocarros a FC a H₂. As validações por parte dos Operadores de Transporte Público (OTP) dos países de demonstração do HighVLOcity, Itália, Bélgica, Holanda e Escócia e de anteriores locais de demonstração de autocarros a FC a H₂, levaram ao início da substituição das suas frotas convencionais por autocarros FC.

Este projeto venceu ainda, a viabilidade económica e técnica desta frota e de soluções de infraestrutura inteligente, necessárias para uma ampla introdução no mercado. Tinha como objetivos implementar uma frota de 14 autocarros, significativamente melhorada, estabelecer e melhorar instalações de produção e reabastecimento de H₂, económicas e sustentáveis (reduzindo os custos do ciclo de vida de fornecimento e transporte do H₂), avaliar a totalidade dos custos do ciclo de vida dos autocarros desde a sua produção até ao aspeto final da operação e, por último, mas igualmente importante, contribuir para a comercialização de autocarros FC a H₂ na Europa [35]. A figura 2.4 apresenta o autocarro utilizado no projeto HighVLOcity, com respetivos operadores, infraestruturas e associações.

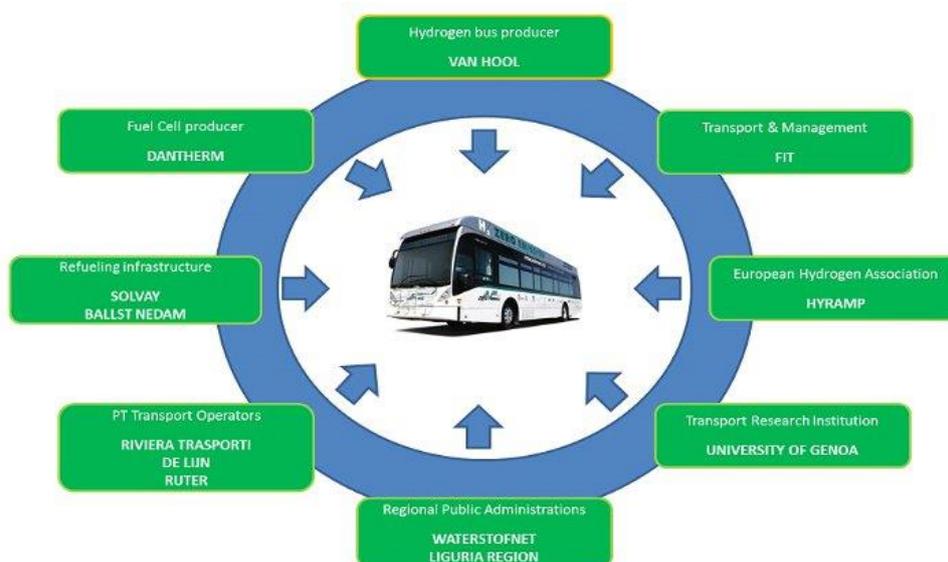


Figura 2.4.- Autocarro utilizado para o projeto HighVLOcity, com respetivos operadores, infraestruturas e associações [35].

2.5.5.- HyTransit

Para finalizar, um dos projetos que se destaca nas viagens de longo curso é o HyTransit que testa uma frota de seis autocarros híbridos a FC nos serviços diários de uma transportadora e uma estação de reabastecimento de H₂ de última geração em Aberdeen na Escócia [36].

O HyTransit foi projetado para contribuir com a comercialização de autocarros movidos a H₂ na Europa ao reunir um consórcio industrial de toda a Europa para entregar o projeto, incluindo os autocarros da Van Hool (Bélgica) e tecnologia de abastecimento. Desenvolveram-se seis FC especificamente modificadas para longas rotas suburbanas, sendo que foi através deste desenvolvimento que surgiu um novo conceito de arquitetura para os autocarros híbrido de FC para viagens de longo curso [36].

A exposição destes autocarros à operação no mundo é feita com os mesmos requisitos de serviço que um autocarro a diesel que opera 14h e 270 km diários com um consumo de 10,1kg/100km. Para o reabastecimento, foi construída uma estação de última geração de produção no local através de eletrólise via painéis solares, que se fundamenta tecnologicamente em compressores configurados para permitir uma velocidade de reabastecimento de 120g/s [36].

O objetivo geral do projeto foi provar que um híbrido de FC é capaz de atender o desempenho operacional de um diesel equivalente nas exigentes rotas do Reino Unido (incluindo a condução urbana e interurbana), já a nível ambiental a alternativa a H₂ era superior. O projeto também abordou a principal barreira comercial para a tecnologia, o custo, através da implantação de componentes de última geração, o que reduziu o custo unitário para abaixo de 1,1 milhão de euros pela primeira vez.

2.6.- Veículos Elétricos

Em meados do século XIX, a invenção do motor elétrico de Faraday, em 1821, permitiu a Robert Anderson, entre 1832 e 1839, construir o primeiro carro elétrico a funcionar a baterias não recarregáveis [37].

A nível comercial a primeira aplicação de carros elétricos deu-se em 1897, nos Estados Unidos, com a construção de uma frota de 60 táxis elétricos para a cidade de Nova Iorque. Os veículos elétricos começaram então a liderar o mercado automóvel, mas, em 1930, essa liderança foi tomada pelos veículos de combustão interna, pela sua produção em massa e custo reduzido. Além disso, o desempenho e autonomia dos veículos de combustão interna tornou-se muito superior aos veículos elétricos levando ao esquecimento e quase extinção dos veículos elétricos. Só mais tarde, na década de 90, é que se redescobriram os veículos elétricos e as suas potencialidades na redução de emissões [37].

Como referido no subcapítulo 2.1 Alterações Climáticas, inúmeros são os esforços que ainda se encontram a ser realizados para abrandar as alterações climáticas de onde também surgem políticas de apoio à investigação e desenvolvimento dos VE. Na sequência desses esforços, novos modelos de veículos elétricos com tração de monitorização, totalmente ou parcialmente elétrica [38], podem ser classificados de acordo com os diversos tipos abaixo enumerados.

- BEV (*Battery Electric Vehicle*) – Veículo elétrico a baterias, quando toda a energia utilizada para a propulsão é proveniente da bateria, a bateria descarrega à medida que a energia é requerida, no caso de carregáveis o utilizador poderá carregá-la quando tiver oportunidade, através de uma ligação a uma fonte externa de energia, a rede, denominando-se veículo elétrico Plug-in (PEV) [29];
- FCEV (*Fuel Cell Electric Vehicle*) – Veículo elétrico a FC, quando toda a energia necessária para fazer mover o veículo é produzida pela célula eletroquímica que converte a energia química proveniente de um gás em energia elétrica, um exemplo de um gás é o H₂;

- HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) – Veículo elétrico híbrido, quando para além de baterias existe outro sistema de fornecimento de energia, motor de combustão ou FC, que alimenta a bateria impedindo a sua descarga. Para o sistema de propulsão deste tipo de veículo existem duas configurações possíveis, a em série em que, a tração do veículo é acionada pela combinação de duas fontes de energia separadas, ligadas ao mesmo barramento e em paralelo a tração do veículo é acionada pela combinação de duas fontes de energia separadas, ligadas a barramentos diferentes [29].

Estes três principais sistemas podem ser combinados de inúmeras maneiras surgindo conceitos como:

- REEV- (*Range Extender Electric Vehicle*), com configuração em série ou em paralelo de armazenamento de energia em que o fornecedor principal de energia é a bateria e a FC, ou outro conversor de energia, funciona como gerador auxiliar, diminuindo, assim, o consumo da bateria em alguns momentos, aumentando a capacidade e a autonomia [39].
- PFCHEV- (*Fuel cell plug-in hybrid electric vehicle*), utiliza uma configuração em série ou em paralelo das baterias e da FC em que o barramento DC, composto pelo motor e auxiliares, é alimentado tanto pela bateria como pela FC. Dependendo da taxa de hibridação, o fornecedor de energia tanto pode ser a FC como a bateria. Esta pode ser recarregada pois possui a propriedade Plug-in [40].

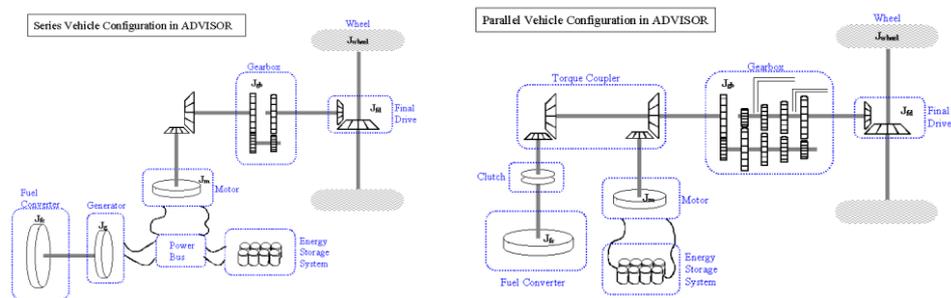


Figura 2.5.- Configuração série e configuração Paralelo [Fonte: *Advisor Glossary*].

Para o caso do simulador utilizado nesta dissertação, o ADVance VehIcle SimulatOR (ADVISOR), a figura 2.5 representa os componentes que constituem a configuração em paralelo (lado direito). Entre os quais, o conversor de combustível, o motor e a bateria. O conversor de combustível pode ser um motor de combustão, uma FC ou um sistema a gás natural. No ADVISOR o sistema em paralelo apenas funciona com motor de combustão. Quanto à topologia em série, também presente na figura 2.5 (lado esquerdo), inclui um conversor de combustível, um gerador, a bateria e um motor. Todo o binário utilizado para mover o veículo é do motor.

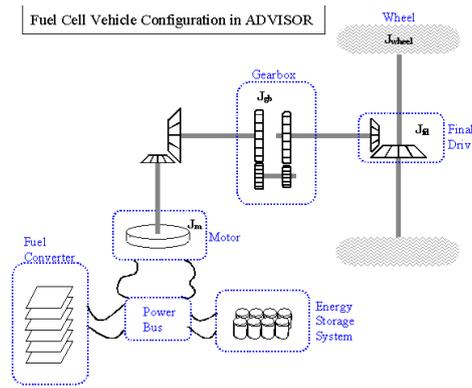


Figura 2.6. - Configuração série FC [Fonte: *Advisor Glossary*].

A figura 2.6 representa a configuração em série do sistema com FC do ADVISOR. A configuração do sistema de PFCHEV utilizada nesta dissertação é constituída por um conversor de combustível (FC), que converte energia química em energia elétrica, a bateria e o motor. É bastante semelhante à topologia normal em série, mas a FC substitui o gerador e o motor de combustão. O controlo da energia fornecida pela FC, é feito pelo SOC (estado de carga) da bateria que pode variar de acordo com a metodologia de controlo de energia utilizada. As metodologias utilizadas serão referenciadas para cada autocarro no capítulo 3, Caso de Estudo.

O veículo PFCHEV tem a possibilidade de carregar a sua bateria na rede elétrica. Quando em viagem, toda a energia para a propulsão é originada pela bateria, esta descarrega (SOC diminui) encontrando-se num estado denominado pela literatura inglesa de *Charge Depleting*. No funcionamento de controlo normalmente usado para este tipo de veículos, ao chegar a um certo nível de descarga, (SOC entre os 20% e os 60%), a FC inicia o seu funcionamento o que impede que a bateria descarregue continuamente, estado de *Charging Sustaining*. Em caso de necessidade a FC poderá fornecer potência adicional ao sistema. Na figura 2.7, o nível de SOC definido para a ativação para *Charging Sustaining* é de 40%. Quando o H₂ se esgota, já não existe uma fonte de energia a alimentar a bateria; esta entra em *Charge Depleting* até o SOC chegar aos 0% ou até novo carregamento, como representado na figura 2.7. [41].

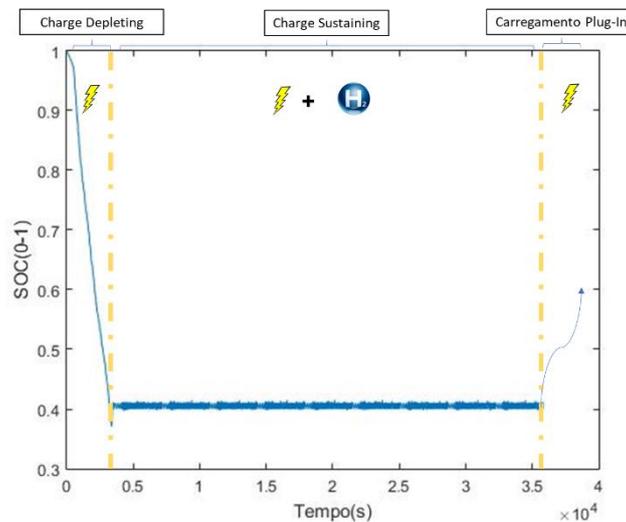


Figura 2.7. -Estado de Carga da Bateria ao longo do tempo, imagem com representação numérica puramente exemplificativa [Fonte: autor].

Num artigo da Ballard, um dos principais fabricantes de FC, mostra como a hibridização com baterias e FC, melhora o desempenho do autocarro. Os resultados mostram que um autocarro FCHEV consegue exceder os requisitos diários de um autocarro elétrico mesmo em situações extremas como inclinação e temperaturas. Sendo possível ter os seguintes benefícios [42]:

- Maior autonomia;
- Melhor desempenho em clima frio ou quente;
- Carga de passageiros maior devido ao peso do veículo ser mais reduzido resultado de menor peso de baterias;
- Tempo de carregamento menor (8 min);
- Máxima eficiência através do reaproveitamento do calor disponível pelo sistema FC.

O H₂ oferece também uma maior densidade de energia (cerca de 33kWh/kg) comparado com os sistemas elétricos de armazenamento como as baterias (bateria de lítio 0,3kWh/kg) [43].

2.7.- FC Proton Exchange Membrane (FC PEM)

A invenção da FC como um sistema elétrico de conversão, data de meados do século XIX, por Sir William Grove. No entanto, o princípio foi descoberto por Christian Fredrich Schönbein, um professor na Universidade de Basileia, no noroeste da Suíça [44], fazendo da FC a tecnologia de conversão de energia eletroquímica mais antiga conhecida pelo Homem.

A FC é uma célula galvânica que transforma energia de um combustível, o redutor, em energia elétrica, quando reage com um comburente, o oxidante, na presença de um catalisador originando uma catálise, produzindo o resultado da reação química, calor e energia elétrica [45]. Esta célula é composta por um ânodo (eléctrodo negativo) onde ocorre a oxidação do redutor e um cátodo (eléctrodo positivo) onde acontece a reação redução do oxidante.

Uma vez que a FC PEM é a mais utilizada nos veículos elétricos, este subcapítulo será dedicado a essa FC, que inclui a transição das reações químicas até ao potencial eléctrico resultante do H₂. No anexo B, estão apresentados outros tipos de FC com a respetiva temperatura de operação, reação no ânodo e no cátodo, aplicação, potência e elemento transportador de electrões.

O processo eletroquímico baseia-se em três etapas. Na primeira etapa, a reação eletroquímica ocorre quando o ânodo de cada célula é exposto ao H₂. Junto ao ânodo ocorre a oxidação do H₂ com formação de dois prótons (2H⁺) que vão atravessar o eletrólito e dois electrões que se vão deslocar no circuito exterior [46].



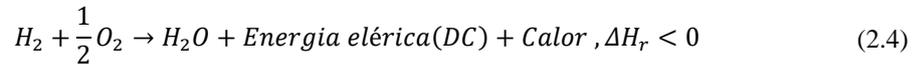
Posteriormente, junto ao cátodo, o oxigénio que é absorvido do ar, sofre uma redução ao receber electrões por parte do eléctrodo, vindos do circuito externo. Este movimento de cargas vai gerar a produção de corrente eléctrica [46].



Por fim, a nível do eletrólito existem protões (H^+) e iões negativos (O_2^-) provenientes das reações que ocorrem na interface dos eléctrodos. Estes iões ligam-se entre si, através de um processo químico, para formar a água [46].



A reação química global do processo é a seguinte [46]:



A figura 2.8, representa as três etapas do processo eletroquímico das FC PEM anteriormente descritas em que o eletrólito é a PEM. Nas FC o eletrólito é quem dá o nome à célula.

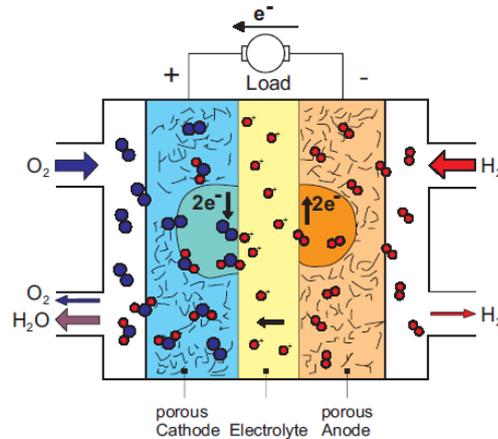
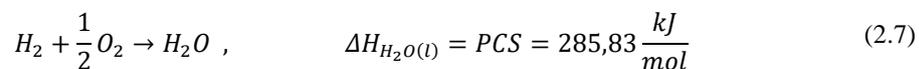
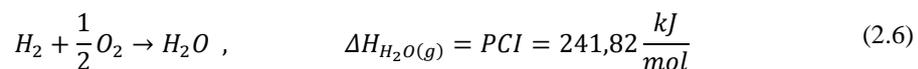


Figura 2.8.-Desenho esquemático de uma FC de H_2 e as respetivas reações [47].

ΔH_r é a entalpia da reação que é igual à entalpia da formação de água ΔH_{H_2O} . O conteúdo energético de qualquer combustível é chamado poder calorífico (PC). O PC do H_2 é igual ao valor absoluto da reação de entalpia. Como o produto da reação é água no estado gasoso (g) e líquido (l), distingue-se entre poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS) do H_2 [48].



Todo o potencial termodinâmico depende da temperatura e da pressão. Nesta dissertação definiram-se as condições standard para os valores anteriores de entalpia, em $25^\circ C$ e 1 bar. A força eletromotriz (FEM) ou tensão de circuito aberto (V_0) de cada célula é dada pela equação 2.8, [48]:

$$V_0 = \frac{\Delta G}{nF} \quad (2.8)$$

Onde n é o número de elétrons que estão envolvidos na reação e F é a constante de Faraday. A energia livre de Gibbs (ΔG) é quantidade máxima de trabalho sem expansão que pode ser extraído de um sistema fechado termodinamicamente, representada pela equação 2.9, [48]:

$$\Delta G_{H_2O(g)} = 228,57 \frac{kJ}{mol} \quad \text{ou} \quad \Delta G_{H_2O(l)} = 237,13 \frac{kJ}{mol} \quad (2.9)$$

Rescrevendo a equação 2.8 obtêm-se as V_0 correspondentes ao produto da reação (H_2O) no estado líquido e no estado gasoso na equação 2.10, [48]:

$$V_{0(g)} = \frac{\Delta G_{H_2O(g)}}{nF} = 1,184V \quad \text{ou} \quad V_{0(l)} = \frac{\Delta G_{H_2O(l)}}{nF} = 1,229V \quad (2.10)$$

Sendo estas as tensões máximas teóricas, que podem ser obtidas através da reação do H_2 com o oxigénio. Com base nas leis de Faraday o fluxo molar é definido como, [48]:

$$\dot{q}_{H_2} = \frac{IN}{2F} \quad \text{em} \quad \left(\frac{mol}{sec}\right) \quad (2.11)$$

$$\dot{q}_{O_2} = \frac{IN}{4F} = \frac{1}{2} \dot{q}_{H_2} \quad \text{em} \quad \left(\frac{mol}{sec}\right) \quad (2.12)$$

Onde I é igual à corrente e N o número de células, 2 é o número de eletrões por mole de H_2 na oxidação e 4 o número de eletrões por mole de oxigénio na redução. A razão entre o fluxo molar do H_2 presente na reação na FC e o que é consumido é definido por λ , devido ao design e problemas no controlo de quantidade de água na FC esta razão é definida pela equação 2.13, [48]:

$$\lambda = \frac{\dot{q}_{entra}}{\dot{q}_{consumido}} > 1, \quad (2.13)$$

Isto faz com que o fluxo molar de H_2 que entra no ânodo e o fluxo molar de ar que entra no cátodo sejam definidos pelas equações 2.14 e 2.15, [48]:

$$\dot{q}_{H_2(entra)} = \frac{IN}{2F} \lambda_{anodo} \left(\frac{mol}{sec}\right) \quad (2.14)$$

$$\dot{q}_{Ar(entra)} = \frac{IN}{4F x_{O_2}} \lambda_{cátodo} \left(\frac{mol}{sec}\right) \quad (2.15)$$

Onde x_{O_2} é a quantidade de oxigénio presente no ar. Nesta dissertação é assumido que λ é igual a 1. O caudal mássico de H_2 e oxigénio fica definido pelas equações 2.16 e 2.17, [48]:

$$\dot{m}_{H_2(entra)} = \frac{IN}{2F} \lambda_{anodo} \times M_{H_2} \left(\frac{g}{sec}\right) \quad (2.16)$$

$$\dot{m}_{ar(entra)} = \frac{IN}{4F x_{O_2}} \lambda_{cátodo} \times M_{ar} \left(\frac{g}{sec}\right) \quad (2.17)$$

O H_2 é um transportador de energia e tem uma energia específica ou densidade energética específica (W) que é definida pelo PCI e o PCS, equações 2.18 e 2.19, [48]:

$$W_{H_2,PCS} = \frac{PCS}{M_{H_2}} = \frac{-285,83}{2,02} = 141,79 \left(\frac{kJ}{g}\right) = 39,9 \left(\frac{kWh}{kg}\right) \quad (2.18)$$

$$W_{H_2,PCI} = \frac{PCI}{M_{H_2}} = \frac{-241,82}{2,02} = 120 \left(\frac{kJ}{g}\right) = 33,3 \left(\frac{kWh}{kg}\right) \quad (2.19)$$

A potência química disponível do hidrogénio, P_{H_2} , é definida pela equação 2.20, [48]:

$$P_{H_2} = PCS \times q_{H_2} (W) \text{ ou } P_{H_2} = PCI \times q_{H_2} (W) \quad (2.20)$$

A potência elétrica da FC é dada pela equação 2.21, [48]:

$$P_{FC,el} = V_{stack} \times I = V_{célula} \times I \times N (W) \quad (2.21)$$

Onde V_{stack} é a tensão da *stack* que corresponde ao conjunto de células individuais em série da FC, $V_{célula}$ é a tensão de cada célula, e N o número de células. A potência sobre a forma de calor da FC ($P_{FC_{calor}}$) é calculada pela equação 2.22, [48]:

$$P_{FC_{calor}} = (1,481 - V_{célula}) \times I \times N = P_{FC} \times \left(\frac{1,481}{V_{célula}} - 1 \right) (W) \quad (2.22)$$

De notar que foi considerado o valor 1,481 resultado da tensão em circuito aberto se toda a energia química fosse convertida em energia elétrica (caso ideal), o que permite obter a potência da FC para o melhor caso possível. A potência consumida é obtida através da equação 2.23, [48]:

$$P_{H_2,consumida} = P_{FC_{calor}} + P_{FC,el} (W) \quad (2.23)$$

A eficiência do sistema FC utilizada nesta dissertação, considera também a potência utilizada para os auxiliares necessários para o funcionamento do sistema da FC como, bomba de água, bomba de H₂ e compressor denominado como $P_{AIR_PUMP_WATER_H_2}$. Onde a eficiência é calculada a partir da equação 2.25, considerando que a água se encontra no pior estado, neste caso, em estado líquido. Na equação 2.25, η_{stack} é a eficiência da *stack* e $\eta_{elétrica}$ eficiência associadas às perdas pelos componentes anteriormente referidos.

$$\eta_{FC} = \left(\frac{V_{célula}}{1,229} \right) \times \left(1 - \frac{P_{AIR_PUMP_WATER_H_2}}{P_{FC,el}} \right) = \eta_{stack} \times \eta_{elétrica} (\%) \quad (2.25)$$

2.8.- Mercado de autocarros a FC e Evolução

O número de autocarros a FC a nível mundial é muito inferior ao número de autocarros puramente elétricos, mas, como já referido nesta dissertação, os autocarros a FC têm possibilidade de entrar no mercado e serão 10% das compras de autocarros em 2030 na Europa. A tendência inicial do mercado dos autocarros a FC passou pela completa negação da hibridação. Tendo a hibridação inúmeras vantagens referidas no subcapítulo 2.6, Veículos Elétricos, é de momento, a tendência atual do mercado. Existindo raras exceções em que estas vantagens não são necessárias, como é o caso do exemplo da tabela 2.1, do autocarro Sora da Toyota. Uma identificação das características principais de autocarros a FC mais atuais é feita no início deste subcapítulo e no final é realizada uma análise geral. As tabelas seguintes representam as características dos autocarros a FC como peso, capacidade da bateria, caso exista, potência instalada do sistema FC, armazenamento, autonomia e número de passageiros.

Tabela 2.1.-Características Autocarro Sora da Toyota[32], [49]

| | | |
|---|---|------|
|  | Tamanho (m) | 10,5 |
| | Peso (ton) | 15,7 |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 0 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 250 |
| | Armazenamento de H₂ (L) | 600 |
| | Autonomia (km) | 350 |
| | Passageiros | 79 |

Tabela 2.2.-Características do Autocarro da Solaris [26]

| | | |
|--|--|------|
|  | Tamanho (m) | 12 |
| | Peso (ton) | - |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 29,2 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 2x60 |
| | Armazenamento de H₂ (kg) | 37,5 |
| | Autonomia (km) | 350 |
| | Passageiros | 80 |

Tabela 2.3.- Características Autocarro a FC da Van Hool [42], [50]

| | | |
|---|--|----------------|
|  | Tamanho(m) | 12, 13 e 18 |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 24 to 36 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 85- 100 |
| | Armazenamento de H₂ (kg) | 30 até 35 |
| | Autonomia (km) | >350 |

Tabela 2.4.- Características Autocarro de dois pisos da Wrightbus[42]

| | | |
|---|--|----------------|
|  | Tamanho(m) | 12, 13 e 18 |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 48 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 85 |
| | Armazenamento de H₂ (kg) | 27 até 37 |
| | Autonomia (km) | >300 |

Tabela 2.5.-Características do autocarro da El Dorado National [31], [42]

| | | |
|--|--|------|
|  | Tamanho (m) | 12 |
| | Peso (ton) | 15,7 |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 11.2 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 150 |
| | Armazenamento de H₂ (kg) | 50 |
| | Autonomia (km) | 500 |
| Passageiros | 56 | |

Tabela 2.6.-Características do Autcarro Xelsior da New Flyer[42]

| | | |
|---|--|------|
|  | Tamanho (m) | 12 |
| | Peso (ton) | 14,5 |
| | Capacidade da Bateria (kWh) | 80 |
| | Potência Máxima da FC (kW) | 85 |
| | Armazenamento de H₂ (kg) | 37,5 |
| | Autonomia (km) | 500 |
| Passageiros | 80 | |

O gráfico 2.1, representa os armazenamentos de H₂ a potência máxima, a autonomia e a capacidade da bateria, caso utilize, dos veículos anteriormente referenciados. Verifica-se que o armazenamento de H₂ é aproximadamente o mesmo, destaca-se o autocarro da El Dorado com mais 13.8 kg que a média de armazenamento dos autocarros. A capacidade da bateria quanto menor, mais exige potência à FC para alcançar mais km, apesar do peso ser um fator chave no que toca à autonomia do veículo. Um bom balanço entre potência máxima da FC e energia da bateria como é o caso do autocarro da NewFlyer, permite um alcance maior com uma bateria de

80kWh e uma potência máxima de 85kW. De notar que para a mesma autonomia que o VanHool de 350km e aproximadamente a mesma capacidade de baterias, o autocarro Solaris que irá sair em 2019 promete uma redução de 29,4% de potência máxima da FC. Também é importante referir que necessitará de duas FC o que pressuporá um aumento do preço do veículo.

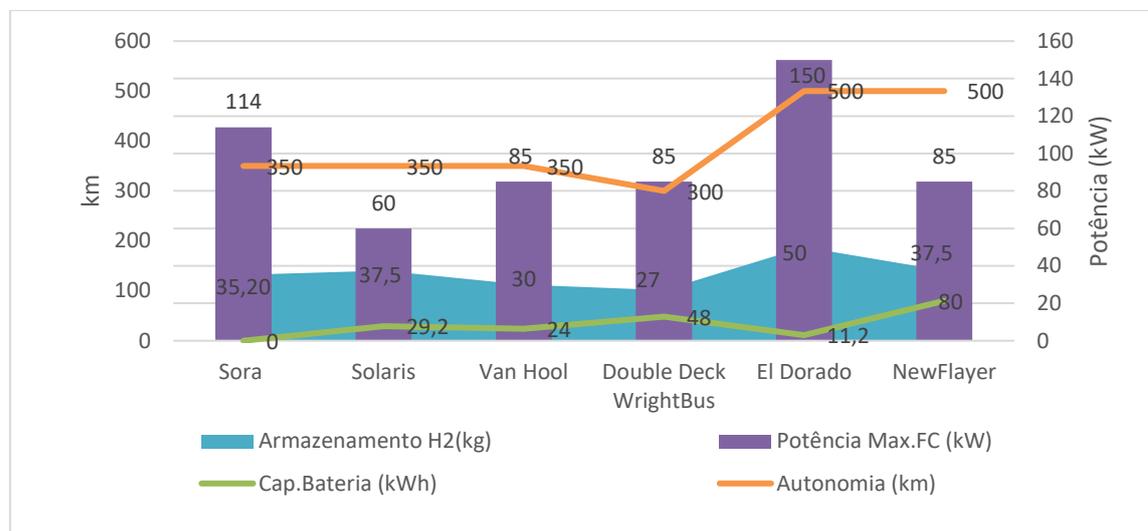


Gráfico 2.1-Características dos diferentes autocarros em mercado

O preço de um autocarro PFCHEV é influenciado pelo custo da própria FC e do sistema a si associado (que varia de acordo com a matéria de que são feitos os componentes do sistema) e pelo custo da bateria. Os gráficos da figura 2.9 são a representação, em percentagem, do custo total da FC e do custo do sistema necessário para o funcionamento das várias células [51].

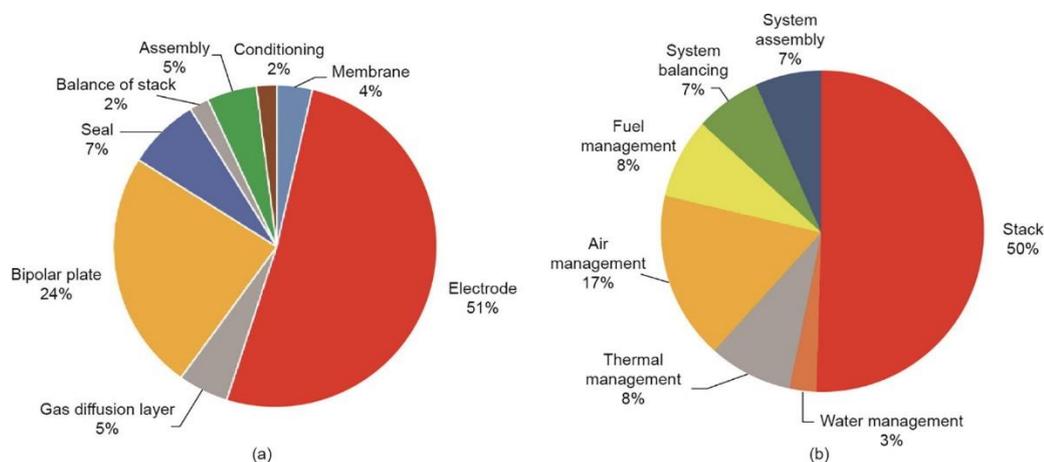


Figura 2.9.-(a)-Custo da Stack (b) Custo do sistema FC [51].

Do custo da stack, 51% é dos eléctodos e 50% do custo do sistema da FC é da stack. Considerando uma produção em massa, o preço é de 51.33€ por kW de potência instalada. Para um total de sistema de 92kW, o preço total do sistema ronda os 4723€ [52].

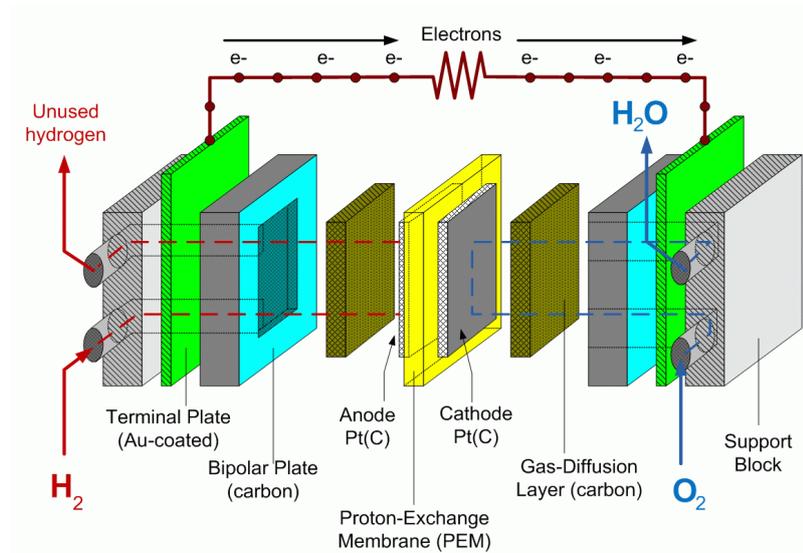


Figura 2.10.-Componentes da Stack [53].

Tal custo, comparado ao custo do sistema total da bateria de cerca de 87,42 € por kW de potência instalada, figura 10, é menor, referindo-se que se trata do custo de produção em massa, produção de mais de 50 mil unidades anuais. Para uma potência instalada total de 92kW, o custo seria de 8042.64€ [52]. O sistema de FC é 58% mais barato que o sistema de baterias, fator a ser considerado na construção dos veículos elétricos atuais. Ao adicionar o custo do sistema de armazenamento de H₂ as conclusões já são diferentes, o preço do sistema completo de FC é mais caro que o preço do sistema completo de baterias cerca de 12,5%.

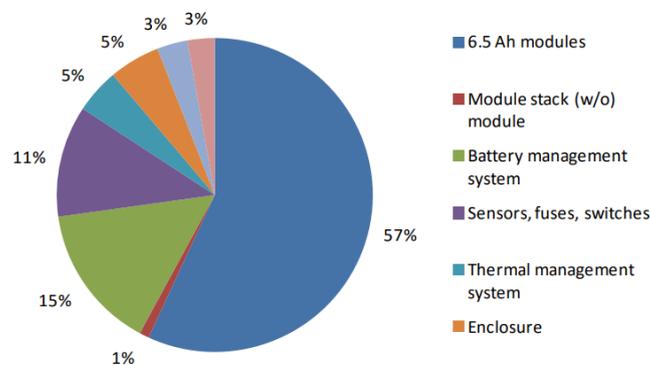


Figura.2.11.-Percentagem de custo de uma bateria de 6.5Ah por módulo [45]

Capítulo 3

Caso de estudo

Neste capítulo apresenta-se o caso de estudo abordado nesta dissertação. Descreve-se a proveniência dos dados assim como premissas assumidas para este caso. Explica-se a metodologia adotada para a análise técnico-económica. Apresentam-se os resultados e sua discussão. O seguinte caso de estudo tem como objetivo responder as questões do subcapítulo 1.2.- Motivação e Objetivos.

3.1 - Introdução

Este caso de estudo retrata uma análise evolutiva da tecnologia FC a nível de consumo de combustível e desempenho tendo como referência o projeto CUTE, que proporcionou a circulação no centro da cidade do Porto de um autocarro a FC.

O coordenador e operador de autocarros na cidade do Porto do projeto CUTE foi a Sociedade de Transportes Coletivos do Porto (STCP). A British Petroleum (BP) ficou responsável pela infraestrutura de abastecimento de H₂ [11]. A rota de circulação dos autocarros foi a da figura 3.1.

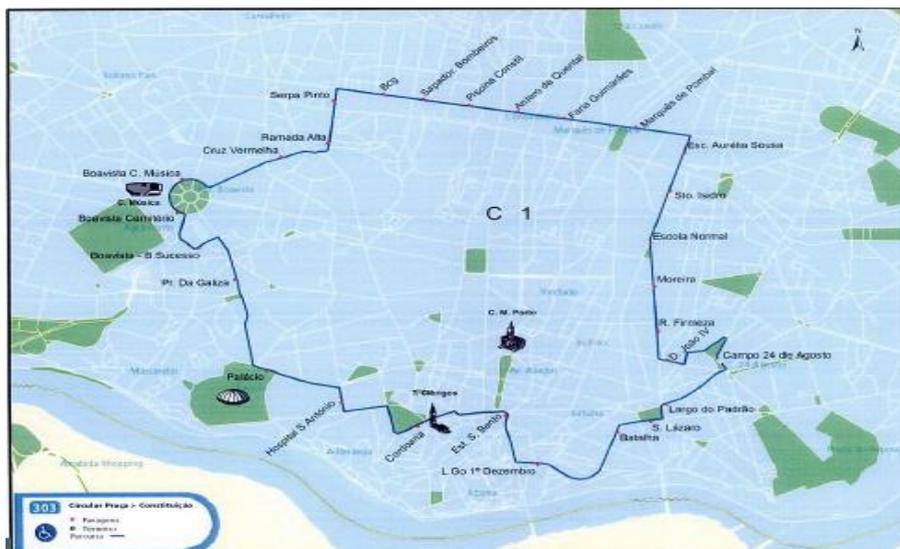


Figura 3.1.-Rota de circulação do autocarro do projeto CUTE, zona da Baixa do Porto [Fonte:STCP][54].

Várias são as análises de consumo de combustível de autocarros a diesel em transportes urbanos na Europa [55][56] e, após o projeto CUTE, começaram a aparecer análises de consumo de combustível para veículos a FC nos transportes urbanos, caso de Saxe (2008) [57] que utiliza os 27 autocarros a FC do projeto CUTE que circularam na Europa e caso de Cockroft (2014) [58] que utiliza os autocarros a FC do projeto The Sustainable Transport Energy for Perth (STEP) para uma análise económica e pegada de emissões dos autocarros na Austrália, comparando-os com diesel e gás natural.

O presente caso de estudo assemelha-se ao de Saxe (2008), de Melo (2014) [59], de Gonçalves (2009) [60], Ribau (2009) [61] e de Dinis (2014) [62], uma vez que usa os dados do projeto CUTE como referência de consumo de combustível, caracteriza tecnicamente os autocarros em estudo, apresenta os consumos e desempenho e faz a respetiva comparação com dados recolhidos através de um software de simulação. O que se destaca neste caso de estudo é o uso e modelação de componentes já em comercialização, que permite uma aproximação mais realista da simulação dos autocarros e a influência nos consumos de diferentes abordagens de controlo de energia.

Neste ponto descreve-se a metodologia utilizada, (1) - é efetuada a análise dos consumos de combustível e desempenho de um autocarro FC de referência para uma rota específica, rota 303 da STCP da cidade do Porto e, (2) - faz-se a comparação com o resultado de dois autocarros simulados para a mesma rota, através do software de simulação, criado pelo Laboratório Nacional de Energia dos Estados Unidos da América (NREL), o ADvance VehIcle SimulatOR (ADVISOR) [20][63]. Para as simulações, são modeladas as características físicas de um autocarro assim como dimensionadas e modeladas as baterias e o sistema FC, numa abordagem arquitetónica especificada. A arquitetura dos dois autocarros será PFCHEV, variando-se a estratégia de controlo de energia fornecida pela FC, entre fornecimento de auxílio *on/off* (BUS1) e fornecimento constante (BUS2). Estes autocarros são simulados em condições diversas de lotação do veículo, potência de auxiliares e inclinação do percurso. No final são também comparados com autocarros 100% elétricos e a diesel.

3.2 - Aquisição de dados para simulação

A aquisição de dados para a simulação dos autocarros BUS1 e BUS2 foi uma etapa fundamental e indispensável para uma análise o mais aproximada possível do contexto real de consumos e desempenho dos transportes urbanos com tecnologia FC. Para o presente caso de estudo, foram necessários quatro tipos de dados indispensáveis:

- Características físicas dos autocarros a analisar;
- Ciclo da condução de um autocarro para uma rota específica;
- Características técnicas do sistema de armazenamento de energia;
- Características técnicas do sistema de conversão de energia.

As características do autocarro a FC de referência, Mercedes Benz Citaro, foram recolhidas do relatório do projeto CUTE [9]. A empresa CaetanoBus disponibilizou, quanto aos autocarros utilizados para a simulação, as características físicas dos autocarros E-CITYGOLD e o FC-CITYGOLD assim como as características dos seus respetivos componentes de armazenamento e conversão. O ciclo de condução de um dos autocarros da STCP de uma rota específica também foi disponibilizado. De salientar que, sem este ciclo, esta dissertação não era possível, sendo este a chave fundamental do simulador.

3.3 - Ferramenta de simulação -ADVISOR

O ADVISOR é a ferramenta de simulação de veículos que se usa neste caso estudo pelo que se justifica fazermos uma breve introdução à suas funcionalidades e características.

O ADVISOR, foi desenvolvido inicialmente pelo NREL, criado em ambiente MATLAB/Simulink, tornando-se este simulador uma ferramenta prática, de fácil compreensão e moldável às preferências de cada utilizador. Foi utilizado por investigadores e é agora bastante utilizado por estudantes universitários visto ter sido disponibilizado gratuitamente, desde de abril de 2014, para download [64]. Tornou-se, assim, um software aperfeiçoado pela comunidade que o utiliza, sendo Michael O'Keefe um dos principais impulsionadores dessa comunidade (*Advisor Community*).

A principal função do ADVISOR é destacar as interações a nível de sistemas de componentes dos EV e os impactos a nível de desempenho e economia de combustível do veículo que estas interações têm. Também permite verificar como é feita a gestão de energia, o desempenho e a eficiência do veículo [20].

O ADVISOR usa três janelas de interface gráficas. Com estas janelas o utilizador pode avaliar o impacto dos parâmetros do veículo, avaliar também o impacto do ciclo de condução no desempenho do veículo, o consumo de combustível e as emissões.[65].

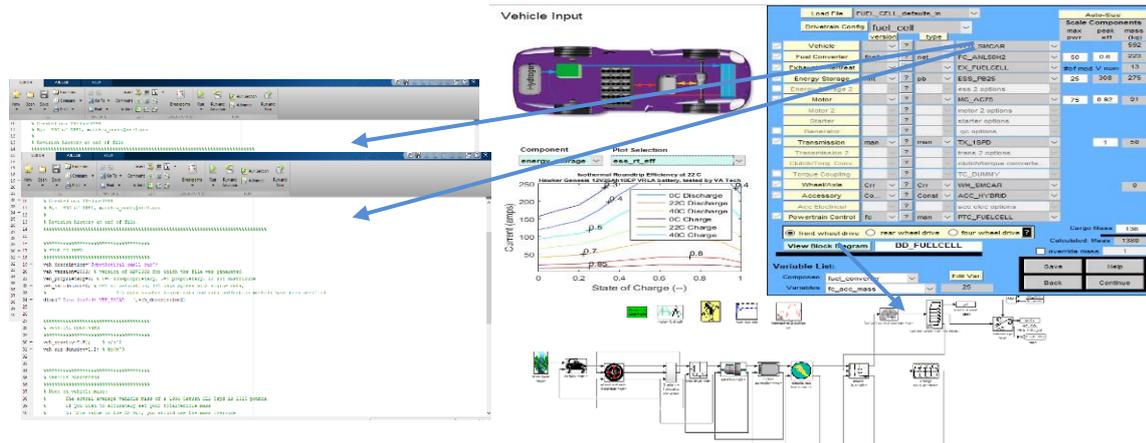


Figura 3.2.-Interação do ADVISOR entre janela, ficheiros de dados (MATLAB) e diagrama de bloco (Simulink).

Como é visível na figura 3.2, está representada a primeira janela, onde as características do veículo e cada componente estão associadas a um ficheiro de dados que incluem configuração do veículo, limites, capacidades e mapas de comportamento que são lidos para a simulação [61][66].

A simulação do ADVISOR usa uma abordagem híbrida “de trás para a frente /de frente para trás” (*backward/forward*). Na simulação *backward*, os componentes medem as variáveis de entrada, mas o seu output só fica disponível se as condições de funcionamento do componente anterior estiverem dentro dos limites de funcionamento. A simulação *forward* inclui os comandos de aceleração e travagem durante o percurso. Com esta abordagem:

- Nenhum componente vai requerer mais binário ou potência do componente imediatamente a seguir do que usa.
- Um componente é tão eficiente no sentido *forward* da simulação como foi dimensionado para ser no sentido de *backward*.

Pode-se verificar esta abordagem híbrida de simulação na figura 3.2 (diagrama Simulink), em que, na simulação *backward*, a informação flui no sentido das rodas para o sistema de propulsão e, na simulação *forward*, a informação flui no sentido do controlo para as rodas. O funcionamento do ADVISOR, figura 3.3, começa pelo ciclo de condução que inclui a velocidade requerida ao longo do percurso. Depois introduzem-se as variáveis físicas do autocarro de maneira a satisfazer todos os parâmetros da fórmula da força de tração, equação 3.1, que com o intervalo tempo e velocidade requerida para esse intervalo se modifica para potência requerida, equação 3.2. O motor tem que garantir que a sua potência máxima seja maior ou igual à potência solicitada. Dependendo da estratégia de controlo de distribuição de potência, é solicitada potência à bateria e FC. E dependendo da potência gerada é disponibilizada potência para o motor. Esta potência alimenta o motor que proporciona a força necessária para fazer mover o veículo de acordo com o ciclo.

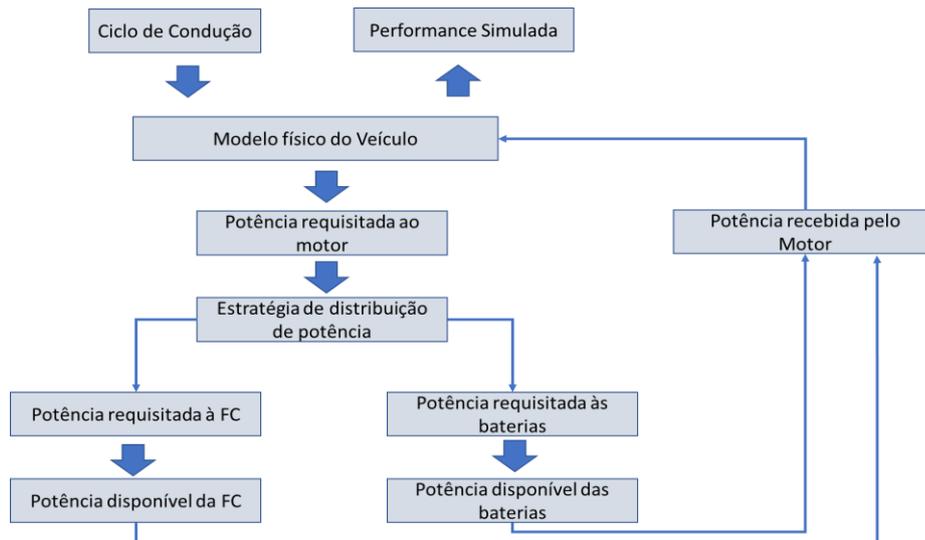


Figura 3.3.-Diagrama de funcionamento lógico do ADVISOR.

A figura 3.4 é ampliada da figura 3.2, onde está presente a primeira janela do software ADVISOR. É nesta janela onde são selecionados os valores nominais dos veículos em análise e escolhidas as características do veículo e respetivas componentes.

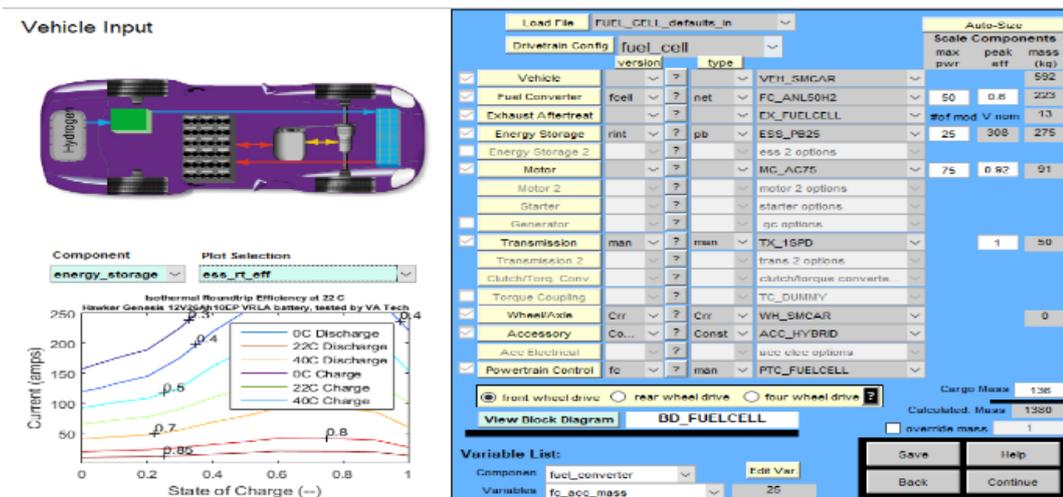


Figura 3.4.-Primeira janela do software ADVISOR

A segunda janela, figura 3.5 (esquerda), representa os dados do percurso em que o veículo é simulado. Nesta janela é possível selecionar testes de velocidade máxima, média e distância que permitem avaliar o desempenho e capacidades máximas do veículo.

A terceira janela, também na figura 3.5 (direita), apresenta os valores de emissões de escape, valores de consumo, resultados dos testes selecionados na janela anterior e resultados gráficos, quer do comportamento do veículo quer, do comportamento das componentes [61][63].

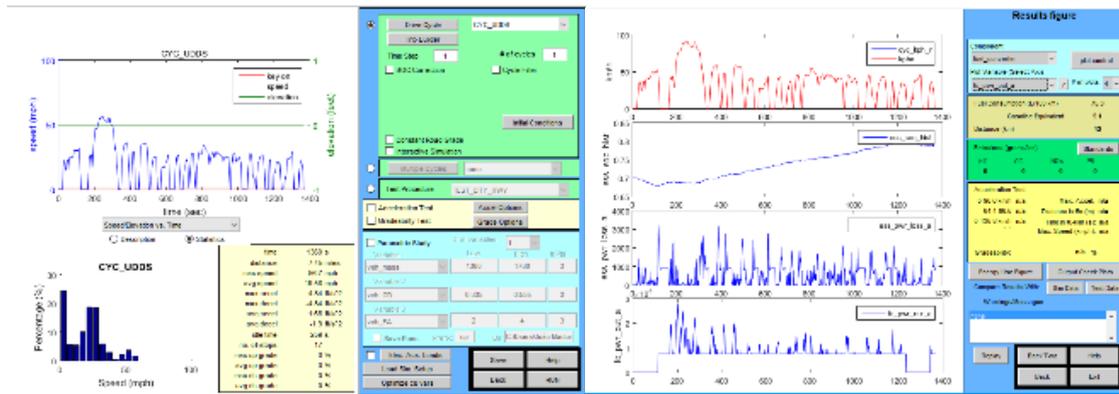


Figura 3.5.- Segunda janela à esquerda e terceira janela à direita [Fonte: Autor].

A validação deste software foi dada por entidades de renome internacional como : NREL, Departamento de Energia do EUA (DOE), Sociedade Internacional de Engenharia Automóvel (SAE International) e investigadores independentes [63][67].

3.3.1.- Equação Base do ADVISOR

A potência necessária para o percurso do veículo selecionado depende das várias forças resistivas aplicadas ao veículo. A força de tração, equação 3.1, força necessária para deslocar o veículo dependendo da velocidade e aceleração pretendidas, é a força resultante de todas as forças aplicadas no veículo. Assim, a soma das forças de resistência de rolamento (Rolling Resistance), resistência do ar (Drag Resistance), força de subida no caso de inclinação (Grading Resistance) e a força de aceleração é dada por:

$$F = mgf_r \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \rho_a C_d A_f v^2 + mg \sin(\alpha) + m \frac{dv}{dt} \quad (3.1)$$

A força de tração pode ser obtida no espaço temporal (Δdt), de acordo com a velocidade requerida de um determinado ciclo de condução e os parâmetros físicos do modelo de veículo em estudo como massa (m), área frontal (A_f), resistência de rolamento (f_r), coeficiente de arrasto (C_d) e (α) o ângulo de declive da superfície de contacto, neste caso da estrada.

A força de tração é, assim, calculada pela velocidade em tempo real do binário requerido no bloco rodas/eixo. A caixa de velocidade transforma a velocidade e o binário requerido no bloco rodas/eixo através de um rácio redutivo da velocidade e binário requerido no motor.

Como os veículos em análise não incluem caixa de velocidades, esse rácio será de 1:1 e adicionado um rácio de 1:7,36 entre o eixo de transmissão e o diferencial. Os componentes utilizados no ADVISOR são quasi-estáticos e maioritariamente modelos empíricos.

Apesar das equações usadas no ADVISOR serem de ordem 1, a sua precisão é válida para a análise de veículos. As forças de inércia dos componentes rotativos, uma vez que o seu valor é desconhecido e pela sua influência ser baixa na modelação de um veículo, foram consideradas zero.

3.3.2.- Potência requerida pelo veículo

Para ambos os autocarros as baterias são o principal fornecedor de potência. Como tal, é necessário que esta seja suficiente para atingir a velocidade máxima e o nível de inclinação

desejados. Os níveis de desempenho, representados na tabela 3.1, são referentes aos autocarros da STCP que circulam na cidade do Porto.

Tabela 3.1-Desempenho desejado para os dois autocarros escolhidos.

| Desempenho | Valor |
|--------------------------|--------|
| Velocidade máxima (km/h) | 15km/h |
| 0-50km/h, t_a (s) | 13 |
| Inclinação | 10% |

A potência requerida é dada pela equação 3.2, onde P_{req} é a potência requerida, η_t é a eficiência total na transmissão, e m a massa do veículo. Calculado o valor teórico máximo para a potência requerida (P_{req}), o resultado foi de 188.91kW, valor para o qual a potência máxima da bateria necessita de ser superior para fazer o carro entrar em movimento.

$$P_{req} = \frac{v}{\eta_t} \times (mgf_r \cos(\alpha) + \frac{1}{2}\rho_a C_d A_f v^2 + mgsin(\alpha) + m \frac{dv}{dt}) \quad (3.2)$$

3.4 - Arquitetura

O simulador impõe a escolha de uma arquitetura de veículo. A arquitetura utilizada para os autocarros BUS1 e BUS2 é a mesma, representada na figura 3.6. O fluxo de energia flui da FC para alimentar os dispositivos auxiliares e para carregar a bateria (em caso de emergência alimenta o motor), ao mesmo tempo que a bateria proporciona potência para o motor que proporciona a circulação do veículo. O *driver's Command* representa o ciclo de condução. E o *vehicle traction Controller* o controlador onde estará inserida a estratégia de controlo de energia. Apenas a estratégia de controlo de energia muda entre os dois veículos.

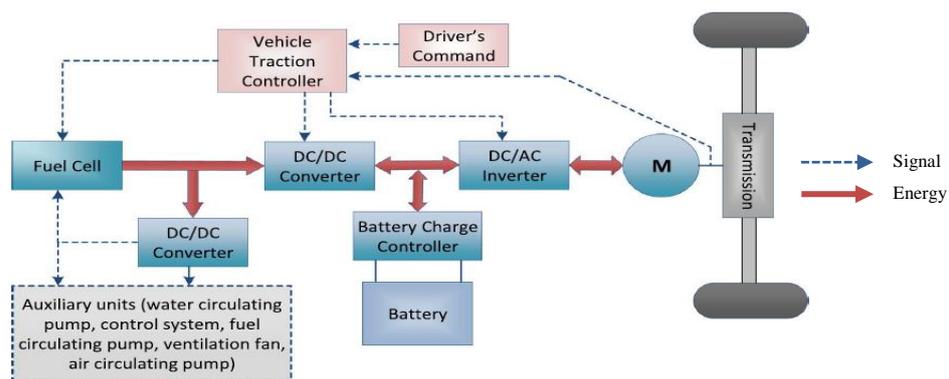


Figura 3.6 Arquitetura dos autocarros simulados [68]

A topologia de geração e armazenamento de energia da figura 3.7 caracteriza-se por cada fonte de energia estar ligada ao barramento DC. A FC está ligada através de um conversor *boost* e a potência dos auxiliares está ligada como uma carga constante, em paralelo, na representação da potência necessária para o motor de direção, compressor, bomba de água, bomba de H₂ e sistema AVAC (dados recolhidos para um autocarro elétrico, descritos nos subcapítulos 3.6 e

3.7). Desta forma, é possível a implementação de várias estratégias de controlo, como se verifica no presente caso de estudo. Torna-se, assim, possível retirar o máximo rendimento de cada fonte.

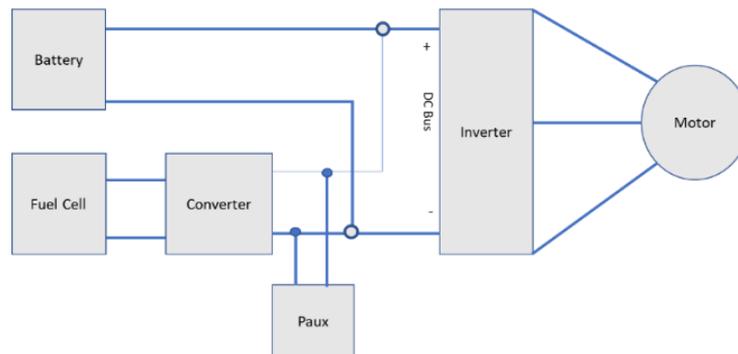


Figura 3.7.-Topologia de geração e armazenamento [Fonte: Autor].

Como o ADVISOR trabalha fundamentalmente com potências, tornou-se difícil escolher a topologia dos conversores e do inversor. A tensão média de funcionamento do barramento DC é definida em 635V. Para o cálculo das perdas na conversão, para o inversor, estipulou-se um rendimento de 95%. Este rendimento foi inserido no cálculo das potências correspondente ao componente a que está ligado (motor).

3.5 - Características dos autocarros

As características dos autocarros recolhidas pelos dados fornecidos foram: a estrutura, motor, baterias e FC. Estas foram implementadas no ADVISOR. O veículo escolhido, presente na figura 3.8, tem as mesmas características que os veículos em circulação na cidade do Porto, apresentadas na tabela 3.2.

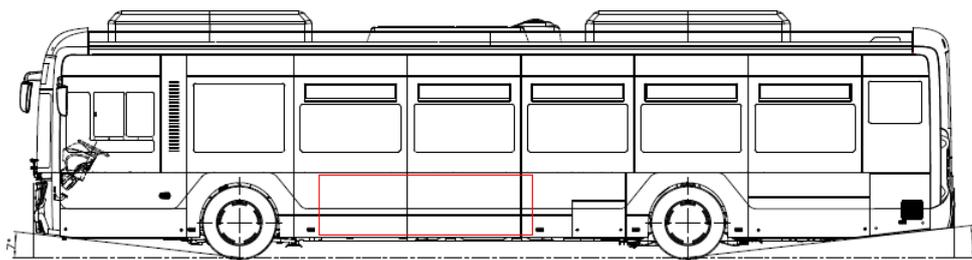


Figura 3.8.- Autocarro utilizado para simulação [Fonte: Autor]

Os dados da tabela 3.2 são os utilizados na equação 3.2 para o cálculo da potência requerida pelo ciclo de condução que será exigida ao motor.

Tabela 3.2.- Parâmetros, Valores e Unidades das características físicas dos autocarros. (1) -peso para o autocarro da bateria de 2 módulos 29.3Ah.

| Parâmetros | Valor |
|--|----------------------|
| Gravidade (m/s ²) | 9,81 |
| Coefficiente de atrito aerodinâmico | 0,7 |
| Área Frontal (m ²) | 8,221 |
| Altura (m) | 3,22 |
| Distância entre eixos (m) | 5,845 |
| Comprimento (m) | 11,9 |
| Peso (kg) | 13635 ⁽¹⁾ |
| Coefficiente de arrasto (S/Uni) | 0,01 |
| Densidade do ar a 20°C(kg/m ³) | 1,2041 |

Para a simulação partiu-se da premissa que cada pessoa pesa 70kg. O peso máximo legalmente admissível (segunda a Organização Internacional de Transportes Rodoviários, IRU) é de 19 toneladas. Sabendo que o peso máximo do autocarro é a soma do peso do autocarro com a carga admissível, obtém-se, assim, um máximo admissível de 4900kg para a carga que equivale a 70 lugares.

3.5.1.- Sistema FC

Através dos dados da tabela 3.3 e sabendo que o sistema FC tem 370 células, foi possível construir os dados da tabela 3.4. Para o cálculo da tensão da FC foi multiplicada a tensão da célula (V_{cell}) pelo número total de células, para o cálculo da potência elétrica da FC ($P_{FC_{el}}$) foi utilizada a equação 2.21. A potência útil elétrica ($P_{FC_{ut_{el}}}$) é obtida através do rendimento elétrico ($\eta_{elétrica}$) da equação 2.25, para a potência térmica ($P_{fc_{calor}}$) foi utilizada a equação 2.22, para o cálculo do fluxo molar foi utilizada a equação 2.11 e, por fim, para a eficiência foi utilizada a equação 2.25. Todas as equações estão presentes no Capítulo 2, subcapítulo 2.7, FC Proton Exchange Membrane (FC PEM).

Tabela 3.3.-Características da FC, corrente por célula, corrente total do sistema, potência dos auxiliares e tensão por célula.

| $I_{cell}(A/cm^2)$ | $I_{fc}(A)$ | $P_{AIRPUMP_WATER_H2}(kW)$ | $V_{cell}(V)$ |
|--------------------|-------------|------------------------------|---------------|
| 0 | 0 | 0 | 0,96 |
| 0,05 | 12,5 | 0,31 | 0,87 |
| 0,1 | 25 | 0,62 | 0,84 |
| 0,2 | 50 | 1,27 | 0,81 |
| 0,5 | 125 | 3,7 | 0,77 |
| 0,7 | 175 | 5,64 | 0,745 |
| 0,95 | 237,5 | 8,41 | 0,72 |
| 1 | 250 | 8,99 | 0,715 |
| 1,1 | 275 | 10,26 | 0,705 |
| 1,2 | 300 | 11,59 | 0,696 |
| 1,3 | 325 | 12,98 | 0,688 |

| | | | |
|-----|-----|-------|-------|
| 1,4 | 350 | 14,42 | 0,679 |
| 1,5 | 375 | 15,8 | 0,67 |
| 1,7 | 425 | 18,5 | 0,65 |
| 2 | 500 | 22,45 | 0,616 |

Tabela 3.4.- Resultados dos cálculos das tensões da FC, potência elétrica, potência útil, potência de calor, eficiência fluxo molar e caudal.

| V _{fc} (V) | P _{FC_el} (kW) | P _{FC_ut_el} (kW) | P _{fc_calor} (kW) | EF_fc(%) | q _{H2} (mol/sec) | mH ₂ (g/s) |
|---------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|---------------------------|-----------------------|
| 355,2 | 0 | 0 | 0 | 0- | 0 | 0 |
| 321,9 | 4,02 | 3,7 | 2,82 | 65,28% | 0,023 | 0,048 |
| 310,8 | 7,77 | 7,2 | 5,64 | 62,84% | 0,047 | 0,096 |
| 299,7 | 14,98 | 13,7 | 11,84 | 60,27% | 0,095 | 0,193 |
| 284,9 | 35,61 | 31,9 | 31,45 | 56,10% | 0,239 | 0,483 |
| 275,6 | 48,23 | 42,6 | 45,64 | 53,49% | 0,335 | 0,676 |
| 266,4 | 63,27 | 54,9 | 64,14 | 50,76% | 0,455 | 0,918 |
| 264,5 | 66,13 | 57,1 | 67,98 | 50,23% | 0,479 | 0,966 |
| 260,8 | 71,73 | 61,5 | 75,80 | 49,12% | 0,527 | 1,063 |
| 257,5 | 77,25 | 65,7 | 83,69 | 48,10% | 0,575 | 1,159 |
| 254,5 | 82,73 | 69,8 | 91,63 | 47,16% | 0,623 | 1,256 |
| 251,2 | 87,93 | 73,5 | 99,84 | 46,15% | 0,671 | 1,352 |
| 247,9 | 92,96 | 77,2 | 108,22 | 45,21% | 0,719 | 1,449 |
| 240,5 | 102,21 | 83,7 | 125,80 | 43,28% | 0,814 | 1,642 |
| 227,9 | 113,96 | 91,5 | 154,29 | 40,22% | 0,958 | 1,932 |

O ADVISOR proporciona vários tipos de modelação para o sistema de FC, GCTool (utiliza um programa externo para dimensionamento da FC), através da curva de polarização e através da curva de eficiência. Por razões de simplicidade de sistema, foi utilizada a modelação através da curva de eficiência. Foi calculado o caudal mássico de H₂ através da equação 2.16, onde os resultados estão apresentados na tabela 3.4. Para cada potência em determinado intervalo de tempo, o gráfico 3.1 permite verificar o caudal mássico de H₂ (g/s) por potência requerida.

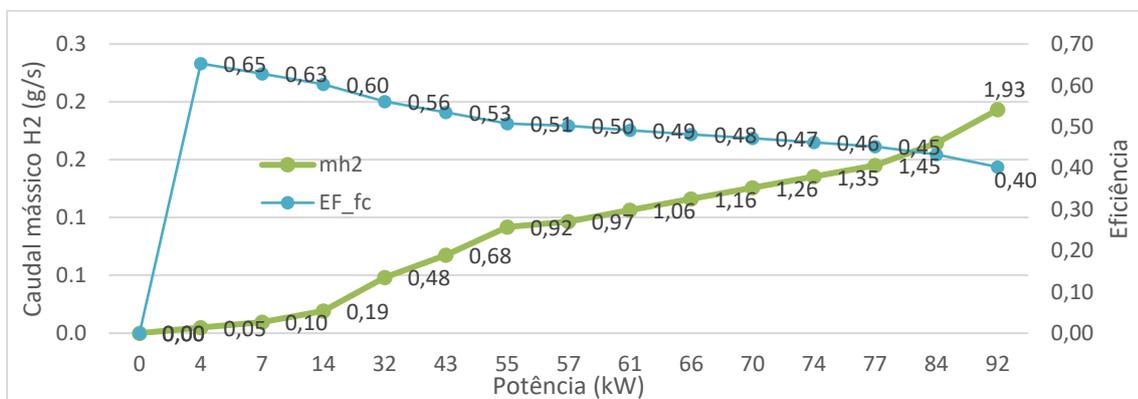


Gráfico 3.1.- Caudal mássico de H₂ consumido, potência utilizada e eficiência do sistema

O consumo de H_2 é calculado de 2 diferentes formas. Em kg/100km, equações 3.3 e 3.4, através do caudal mássico de H_2 , escolhido através da curva de eficiência de acordo com a potência alcançada, onde fc_fuel_rate é o caudal mássico de H_2 .

$$C_{H_2,g/km} = \frac{\int_0^t fc_fuel_rate}{Distância(t)} \quad (3.3)$$

$$C_{H_2,Kg/100km} = \frac{C_{g/km}}{(1000)} \times 100 \quad (3.4)$$

E em kWh/100km através das equações 3.5 e 3.6. Calcula-se com base na densidade energética específica, definida pelas equações 2.18 e 2.19. Os resultados do consumo através do PCS apenas são apresentados em Anexo C, uma vez que para este caso de estudo se assumiu que o resultado da reação química é H_2O em estado gasoso.

$$C_{PCS,kWh/100km} = \frac{C_{kg/100km} \times W_{H_2,PCS}}{(3600)} \quad (3.5)$$

$$C_{PCI,kWh/100km} = \frac{C_{kg/100km} \times W_{H_2,PCI}}{(3600)} \quad (3.6)$$

3.5.2.- Bateria

A bateria é composta por células de lítio fabricadas pela Toshiba de 23Ah e 2,3V. A tensão definida para a bateria dos autocarros a FC previamente caracterizados é de 635V, ou seja,

$$2,3 \times N = 635V$$

$$N = \text{Número de células em série} = 276 \text{ células} \quad (3.7)$$

Com estas 276 células formula-se um módulo e, dependendo da capacidade desejada, estes módulos são introduzidos em paralelo pois, segundo a Lei de Ohm, a tensão mantém-se e duplica-se a corrente.

$$C = 635 \times I \quad kWh \quad (3.8)$$

A tabela 3.5 que se segue representa o número de módulos constituído por 276 células em série que se encontram em paralelo entre si. Esta tabela encontra-se estruturada por ordem crescente de corrente, capacidade e potência máxima, para um total de 5 módulos.

Tabela 3.5. -Número de Módulos, na bateria com a respetiva corrente, capacidade de Potência Máxima

| Número de Módulos | Corrente (Ah) | Capacidade (kWh) | Pmáx (kW) |
|-------------------|---------------|------------------|-----------|
| 1 | 23 | 14,605 | 126,96 |
| 2 | 46 | 29,21 | 228,528 |
| 3 | 69 | 43,815 | 342,792 |
| 4 | 92 | 58,42 | 457,056 |
| 5 | 115 | 73,025 | 571,32 |

O esquema da bateria utilizado pelo ADVISOR é o de resistência interna expresso na figura 3.9. O ADVISOR calcula os parâmetros de corrente, tensão nos terminais, perdas de potência de acordo com as variações da temperatura, através da potência requerida pelo motor e o SOC da bateria no estado inicial. Depois do modelo iterativamente processar a potência alcançada e o SOC a esta associado, dá o sinal de potência ao controlador de energia. A estratégia utilizada pelo controlo é abordada nos subcapítulos seguintes.

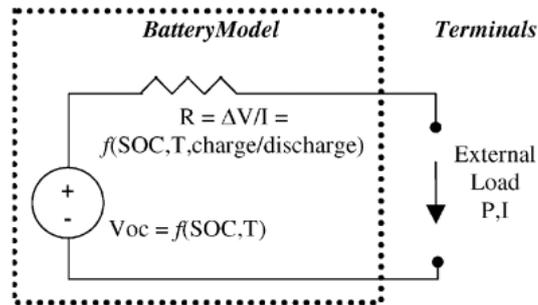


Figura 3.9.- Modelo utilizado pelo ADVISOR para a modelação da bateria [69].

A resistência interna é, pela lei de Ohm, a razão entre a variação de tensão e a corrente que é definida pela função f como representada na figura 3.9. A resistência interna tem como *inputs* o SOC, a temperatura a resistência de carga e a resistência de descarga. Como *output* são obtidos os valores de potência e corrente que a bateria conseguiu alcançar. O gráfico 3.2 representa os valores introduzidos no simulador para a resistência de carga e descarga de cada célula, recolhidos da *Datasheet* da bateria.

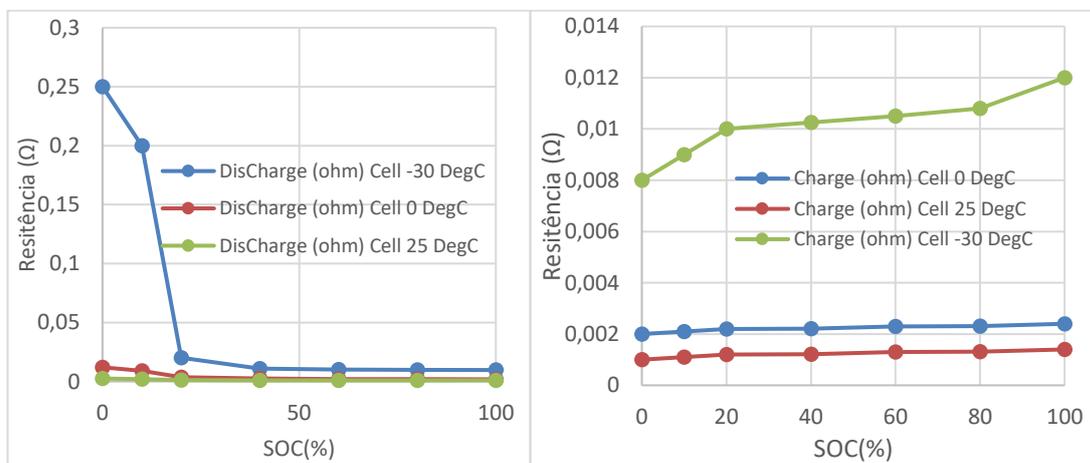


Gráfico 3.2.-Resistência de descarga (esquerda) e resistência da carga (direita) de uma célula de uma bateria Toshiba de 23Ah e 2,3V.

A tensão de circuito aberto representada na figura 3.9 é dada pelos valores do gráfico 3.3, para cada célula:

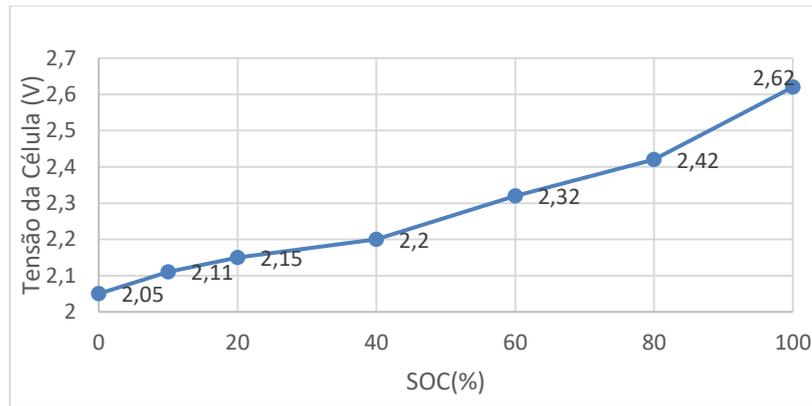


Gráfico 3.3.- Tensão de circuito aberto de uma célula Toshiba de 23Ah e 2,3V

Com estes dados é possível, através da potência requerida e do cálculo do SOC a cada intervalo de tempo, obter a potência gerada pela bateria através da tensão e da corrente, figura 3.10.

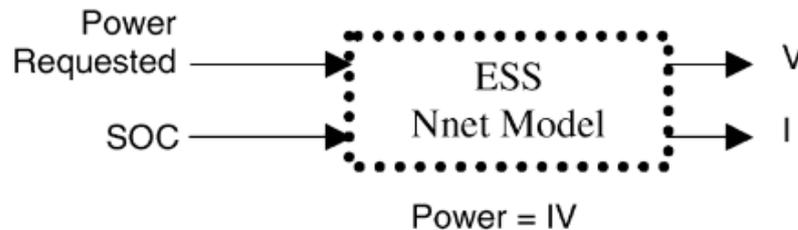


Figura 3.10.-Esquema em bloco da bateria presente no *Simulink* [65].

Sabe-se que cada módulo de bateria tem de 276 células. De modo a ser possível modelar uma bateria de um módulo, é necessário calcular a tensão de circuito aberto e a resistências de carga e de descarga. Para tal os valores dos gráficos 3.2 e 3.3 são multiplicados pelo número de células existentes num módulo (276), o que origina os gráficos de tensão 3.4 e de resistência interna de carga e descarga 3.5, presentes no ADVISOR.

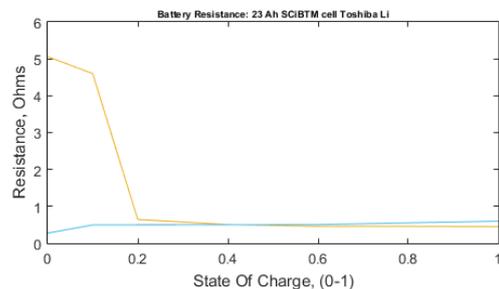
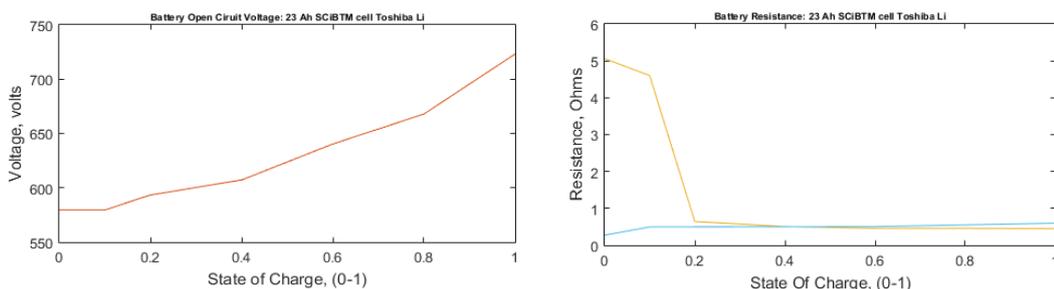


Gráfico 3.4.-Tensão de circuito aberto de uma bateria de um módulo de 276 células. **Gráfico 3.5.-**Resistência de carga e descarga uma bateria de um módulo de 276 células [Fonte: Autor].

As equações 3.9 e 3.10 permitem calcular o SOC para cada instante de tempo através da capacidade da bateria, onde I_{Max} é a capacidade máxima, $I_{usado}(Ah)$ é a capacidade usada e ess_init_soc é o estado inicial da bateria em percentagem.

$$SoC = \frac{I_{Max}(Ah) - I_{usado}(Ah)}{I_{Max}(Ah)} \quad (3.9)$$

$$I_{usado}(Ah) = \int_0^t (1 - ess_init_soc) \times I_{Max}(Ah) \quad (3.10)$$

3.5.3.- Motor

Para a modulação do motor, os dados fornecidos não foram suficientes, mais precisamente os dados que se referem à eficiência do motor Siemens de ímãs permanentes para cada rotação por minuto, dependendo do binário requerido. Como tal, para a modulação do motor, foi utilizado um motor de 160 kW de potência. O erro entre o motor original Siemens e o dimensionado é representado pelo gráfico 3.6. Sendo estes erros inferiores a 3,9%, foi validado para simulação o motor criado por Marco Santoro da Universidade de Dresden, Alemanha.

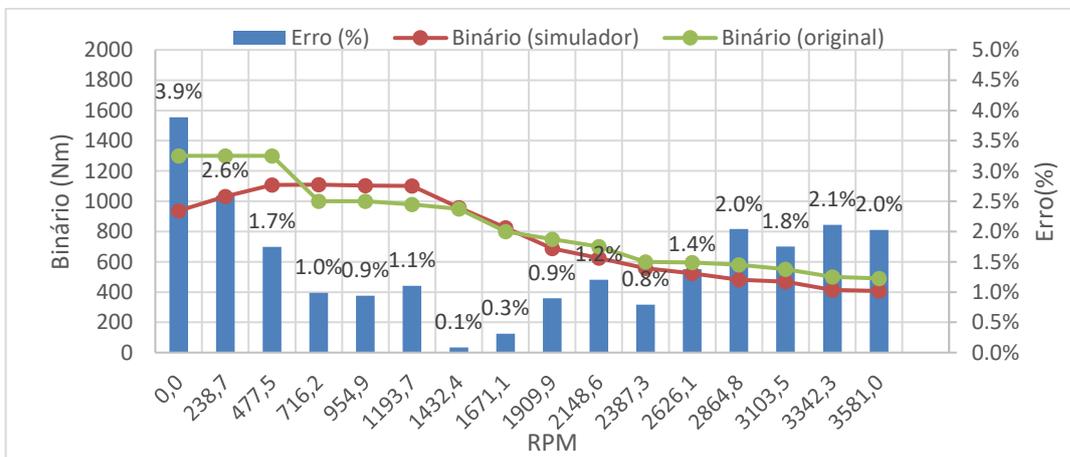


Gráfico 3.6 -Erro percentual entre o motor Siemens e o motor existente no ADVISOR

3.5.4.- Armazenamento

Para o armazenamento de H₂, figura 3.11, consideram-se 5 cilindros com um volume de água de 312L para um total de 37,5Kg, com uma eficiência de 96,2% (um total de 36,1Kg úteis de H₂), a uma temperatura de 15°C, o que dá uma densidade de H₂ de 23,14g/L, situado no tejadilho do autocarro.

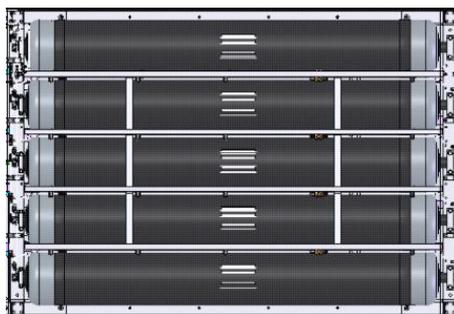


Figura 3.11.-Ilustração em SolidWorks do sistema de armazenamento de 5 cilindros com a capacidade de 37,5Kg [Fonte: Autor].

Como o ADVISOR parte de uma situação ideal em que o veículo possui armazenamento infinito, foi necessário criar um algoritmo para que fosse possível calcular a autonomia do autocarro. Através da potência requerida no gráfico 3.1, é possível obter o caudal mássico de H₂ necessário para satisfazer essa potência. O caudal mássico no ADVISOR é representado por fc_fuel_rate . Através do fc_fuel_rate e da distância percorrida calcula-se o consumo em g/km o que nos permite saber a autonomia com a quantidade total útil de armazenamento, equação 3.11.

$$Autonomia(km) = \frac{36100}{C_{H_2, g/km}} \quad (3.11)$$

3.6 - Ciclo de Condução

O ciclo de condução utilizado é o da rota 303 da STCP, como referido no Capítulo 2, Enquadramento. Os dados foram recolhidos através *Viriciti Route Analysis*, uma plataforma onde os operadores podem recolher dados dos autocarros em tempo real através do *Control Area Network (CAN)*. A velocidade média do veículo é registada de 50 em 50 milissegundos em tempo real.

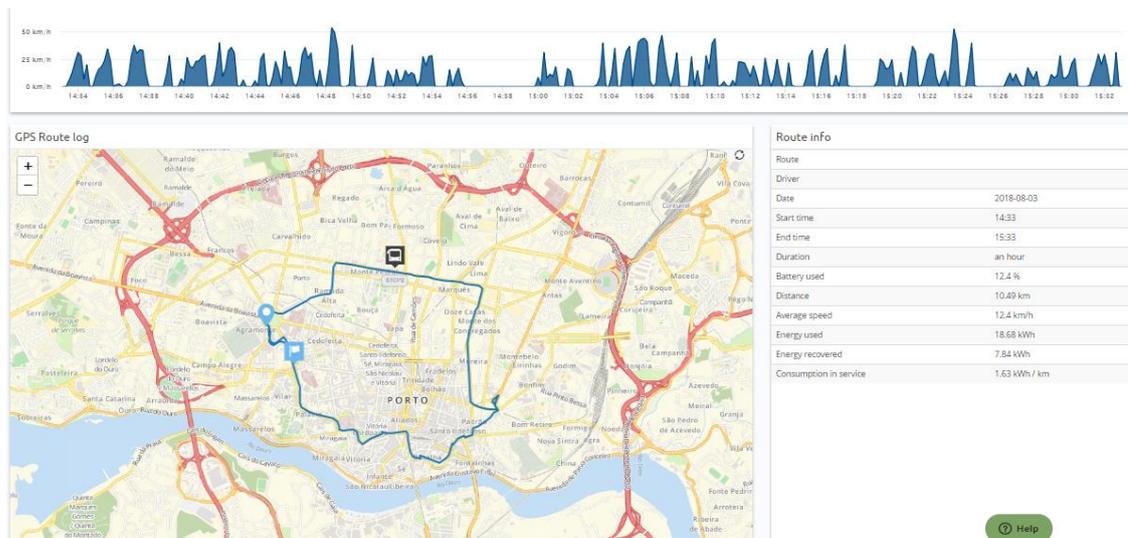


Figura 3.12.- Fotografia da Rota 303, retirada pelo modelo GPS do Viriciti conjugado com o Google Maps e respetivo consumo de um autocarro elétrico.

Como uma das limitações do ADVISOR é apenas ler os valores de velocidade em segundos, foi necessário converter os dados para segundos, calculando a média da velocidade para cada segundo, (sabendo que para cada segundo existiam 20 valores recolhidos), resultando no gráfico da figura 3.13, com as características da tabela 3.6.

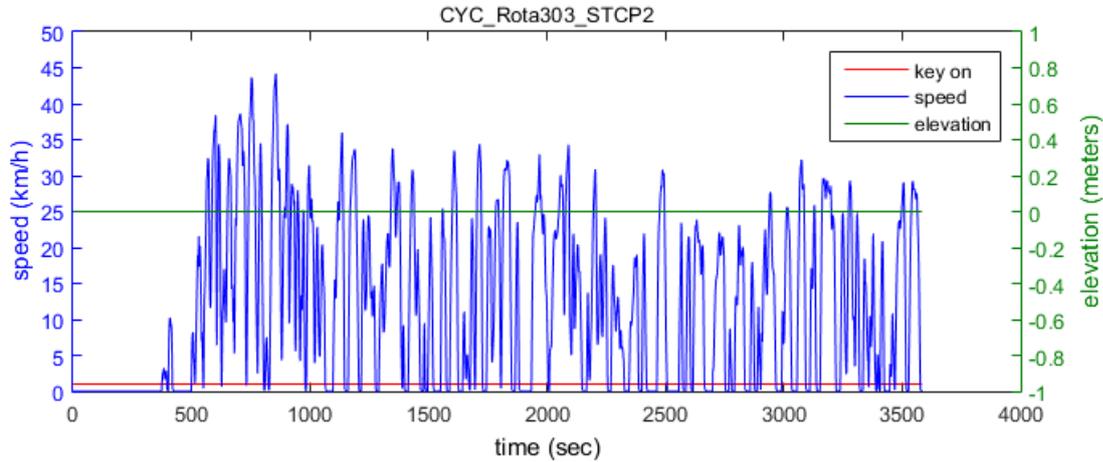


Figura 3.13.- Rota 303 STCP adotada.

Tabela 3.6.- Características da Rota 303 adotada.

| Parâmetro | Valor |
|--|-------|
| Tempo (s) | 3583 |
| Distância (km) | 11,8 |
| Velocidade máxima (km/h) | 44,14 |
| Velocidade média (km/h) | 11,85 |
| Aceleração máxima (m/s ²) | 1,36 |
| desaceleração máxima (m/s ²) | -2,86 |
| Aceleração média (m/s ²) | 0,39 |
| Desaceleração média (m/s ²) | -0,39 |
| Tempo parado(s) | 964 |
| Número de paragens | 38 |

A influência das baterias (número de módulos em paralelo) será testada para ambos os autocarros, BUS1 e BUS2. As baterias foram dimensionadas de maneira a que, sozinhas, proporcionem potência suficiente para garantir a demanda de potência necessária para fazer mover o veículo. O sistema de FC serve como auxílio de potência e origem de energia necessária para carregar a bateria durante o movimento.

$$P_{bateria} = P_{BarramentoDC} - P_{FC} \quad (3.12)$$

A equação 3.12 descreve a mínima potência de bateria ($P_{bateria}$) para garantir a potência requerida do barramento DC ($P_{BarramentoDC}$), com o auxílio de potência proporcionado pelo sistema FC (P_{FC}). A potência do barramento DC é composta pela potência do motor, potência dos auxiliares e potência das perdas.

A potência de pico da bateria deve suportar a potência requerida pelo veículo para alcançar o desempenho pretendido. Como tal, todos os módulos foram testados para o ciclo de condução escolhido. A figura 3.14 representa o ciclo de condução (a azul) com a velocidade requerida para cada segundo e a velocidade realmente alcançada pelo autocarro (a vermelho). Como era previsível, o veículo com apenas uma bateria de 1 módulo não consegue finalizar o percurso

requerido dado a sua capacidade máxima ser 14,6kWh, o que não satisfaz a energia necessária para realizar um ciclo completo de 19,8kWh. Para além disso, a potência máxima necessária para o motor é de 160kW quando a de uma bateria de 1 módulo é de 126,9kW o que não permite satisfazer os requisitos do motor para o binário máximo.

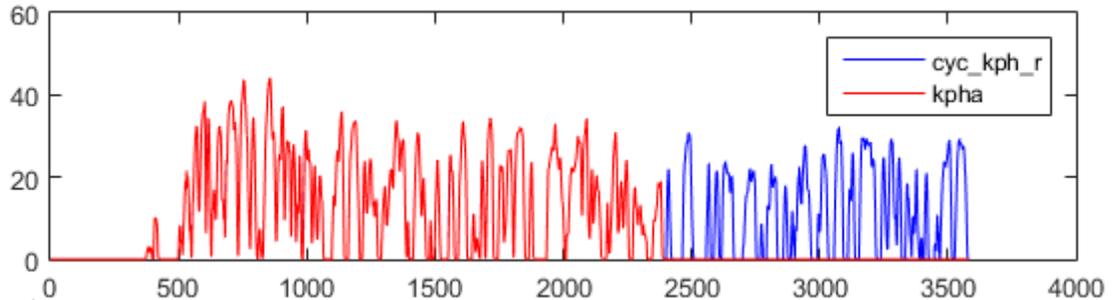


Figura 3.14.- Gráfico da distância percorrida pelo autocarro com 1 módulo de 23Ah, capacidade 14.6kWh

Por causa desta falta de potência instantânea e da capacidade ser insuficiente, não foi possível utilizar a bateria de 1 só módulo para a simulação. Todos os outros módulos conseguem satisfazer este requisito.

Esta simulação parte da premissa que o tipo de condução é não agressivo, ou seja, será sempre respeitada a aceleração do ciclo escolhido e, ainda, que as regras de segurança e velocidades estabelecidas por lei foram respeitadas.

O ciclo de condução foi simulado do seguinte modo: 1 vez para estudo de velocidade de descarga da bateria e 36 vezes para um estudo de autonomia (ciclo de 413km em 36h). Como o ADVISOR admite uma fonte infinita de H_2 , o fornecimento de energia (H_2) perpetua-se infinitamente. Por este motivo, foi necessário criar um algoritmo em Matlab de maneira a calcular a quantidade de H_2 de acordo com o seu consumo, quantidade percorrida, o tempo e a distância de cada ciclo. Assim, calcula-se a verdadeira autonomia dos autocarros, descrita no subcapítulo 3.5.4, Armazenamento.

3.7 - Estratégia de controlo de energia

Sendo a bateria o principal fornecedor de potência, a FC necessita de adotar uma estratégia de controlo de maneira a interagir com a bateria sem que esta seja comprometida a nível de consumo e que a eficiência da célula seja a melhor possível.

Para tal, foram escolhidos dois tipos de estratégias de controlo: para o BUS1, será utilizado o contínuo *on/off*, já de base do simulador ADVISOR criado por Michael J. Ogburn [69]. E foi adaptado o método de controlo anterior para o BUS2 que funciona em regime constante de abastecimento de H_2 ou entre 2 valores constantes de potência, (P_{FCmax} e $P_{FCminimo}$). Evitam-se, com este tipo de controlo, as perdas ativas da superfície eletroquímica causadas pela aglutinação de platina, consequência dos repetitivos ciclos *on/off* da célula galvânica (conclusões da investigação de revisão de desempenho e deteção de falhas de PEMFC de P Rama, R Chen, e J Andrews em 2008 [70]). Como mencionado anteriormente, será necessário dimensionar a bateria de maneira que esta, sozinha, consiga corresponder à potência requerida pelo veículo, ou seja, a potência de pico da bateria deve suportar a potência requerida pelo veículo para alcançar o desempenho pretendido.

A estratégia de controlo de energia do BUS1 define que a potência da bateria, equação 3.13, para o SOC compreendido entre SOC do momento e o SOC mínimo para a entrada no estado de *Charging Sustaining SOC_{low}*, é igual ao resultado da soma da potência requerida pelo motor P_{motor} , com a potência requerida para os auxiliares P_{aux} , (ou considerados como tal) do veículo e a potência das perdas P_{Loss} , menos a potência da FC, P_{FC} , modelada através do gráfico 3.1, de acordo com a sua necessidade. Esta é definida por um diagrama de blocos no *Simulink*, chamado “*FC command by SOC*”, que define a potência adicional da FC de maneira a manter o SOC igual ao SOC desejado, definido como a média aritmética do maior e menor SOC permitidos.

$$P_{bateria} = \begin{cases} P_{motor} + P_{aux} + P_{Loss} - P_{FC}, & SOC_{low} \leq SOC < 1 \\ P_{motor} \text{ se } w_{motor} < 0, & 0 \leq SOC < SOC_{low} \\ 0 \text{ se } H_2 = 0 & 0 \leq SOC < SOC_{low} \end{cases} \quad (kW) \quad (3.13)$$

Na equação 3.14, w_{motor} é a velocidade angular do motor. A potência do motor é limitada em 160 kW. Este motor permite velocidades angulares negativas que possibilita regenerar energia de frenagem para as baterias. Para o motor utilizado essa regeneração tem um pico em 160kW (negativa).

$$P_{motor} = \begin{cases} 0 \leq P_{a1} < 160, & w_{motor} > 0 \\ 0, & w_{motor} = 0 \\ -160 \leq P_{a1} < 0, & w_{motor} < 0 \end{cases} \quad (kW) \quad (3.14)$$

Para a potência dos auxiliares, equação 3.15, considerou-se como auxiliar o compressor de ar, $P_{airComp}$, o sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado, P_{AVAC} (AVAC), o sistema auxiliar da FC, $P_{AIR_PUMP_WATER_H_2}$, (bomba de água, bomba de H₂) e o motor da direção, $P_{MotorDirecção}$. A potência do compressor foi considerada constante e calculada através da média arimética para a rota escolhida.

$$P_{aux} = P_{airComp} + P_{AVAC} + P_{AIR_PUMP_WATER_H_2} + P_{MotorDirecção} \quad (3.15)$$

A potência dos auxiliares da FC já se encontra inserida na eficiência do sistema FC sendo que a potência anteriormente referida como P_{FC} se trata, na realidade, da potência útil, $P_{FC_ut_el}$. A potência dos auxiliares varia com a potência requerida, pelo sistema, à FC.

A potência do motor de direção foi também recolhida através do ViriCiti. A potência máxima possível quando a direção é ativa, é de 7,5kW, equação 3.16.

Para a simulação, foi considerada a média aritmética do valor da potência da direção para a rota escolhida (P_d), o que resultou num valor de 4,5kW. Da mesma maneira, foi calculada a potência do compressor de ar com um valor de 1,5kW.

$$P_{MotorDirecção} = \begin{cases} 0 \leq P_d < 7,5, & w_{motorDirecção} > 0 \\ 0, & w_{motorDirecção} = 0 \end{cases} \quad (kW) \quad (3.16)$$

O valor P_d é o valor para o qual a potência do motor da direção pode variar, de acordo com a velocidade angular do motor da direção. A potência do sistema AVAC pode ir a um máximo de

12kW de potência, no caso de o sistema estar a funcionar a 100%, e vai diminuindo de acordo com a definição manual da temperatura ambiente, equação 3.17.

$$P_{AVAC} = \begin{cases} 0 \leq P_a < 12, \\ 0, \end{cases} \quad \begin{matrix} Status = 1 \\ Status = 0 \end{matrix} \quad (kW) \quad (3.17)$$

A potência das perdas, equação 3.18, já se encontra inserida na potência do motor e na potência da bateria através de uma eficiência já definida no subcapítulo 3.4 Arquitetura.

$$P_{LOST} = P_{DC/DC} + P_{Heating} = constant \quad (kW) \quad (3.18)$$

A potência nominal da FC nos primeiros 90 segundos é zero. Estes segundos são considerados o tempo que a FC demora a aquecer até à temperatura normal de funcionamento. Este tempo é forçado no caso de SOC menor ou igual a SOC_{low} . A máxima potência da FC é de 92kW. Controlando o “declive” da potência da FC, é possível definir a potência de funcionamento P_b da 3.19. Para este controlo, utilizou-se uma taxa de crescimento de potência, $cs_max_pwr_rise_rate$, de 2000 W/s e uma taxa de decrescimento de potência, $cs_max_pwr_fall_rate$ de -200W/s.

$$P_{FC} = \begin{cases} 0, & t < 90 \text{ s} \\ 0 \leq P_b < 92, & t > 90 \text{ s} \end{cases} \quad (kW) \quad (3.19)$$

Para a simulação, foi definido um máximo possível de 5 módulos para as baterias. A estratégia de controlo inicia o seu funcionamento em *Charge Sustaining* e com um SOC inicial de 100%. De maneira encontrar o mínimo SOC para iniciar o estado *Charge Depleting*, criaram-se 3 controlos para o BUS1 onde se fez variar o SOC_{low} entre 20%, 40% e 60%. A escolha do melhor caso é feita no capítulo 4, Análise de Resultados.

Para o método de controlo do BUS2, a bateria mantém o funcionamento como principal fonte de potência e energia e a utilização da potência da FC continua como potência de auxílio, mas neste caso é constante. A potência fornecida pela FC segue uma curva constante de maneira a que esta se encontre sempre ativa e no máximo da sua eficiência. Com isto, a degradação da FC diminui e a eficiência de conversão de H₂ em energia aumenta. Não atinge picos e fornece menor potência, o que equivale a uma maior eficiência de conversão do sistema FC. Como tal, o cálculo da potência utilizada segue a mesma metodologia do BUS1 diferenciando-se apenas na potência da FC. A função objetivo descreve o mínimo de potência possível a ser fornecida pela FC para garantir o correto funcionamento do veículo e uma máxima autonomia, equação 3.20.

OBJ: min K

$$P_{FC}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 90 \text{ s e } SOC \neq 1 \\ K, & t > 90 \text{ e } SOC \neq 1 \\ 0, & t \in \mathbb{R} \text{ e } SOC = 1 \end{cases} \quad (kW), \quad (3.20)$$

onde K é a potência utilizada pela FC, que será objeto de estudo durante a fase de simulação de maneira a encontrar o melhor K que satisfaça a função objetivo. Os seguintes valores foram utilizados na simulação:

Tabela 3.7.- Valores de K utilizados na simulação do BUS2.

| Valores de K (kW) | Valores de K (kW) |
|-------------------|-------------------|
| 5 | 35 |
| 10 | 40 |
| 15 | 45 |
| 20 | 50 |
| 25 | 55 |
| 30 | 60 |

Este valor no caso de emergência (por exemplo no caso do SOC ser bastante baixo por algum defeito na bateria,) pode ser ultrapassado até à potência máxima da FC, 92kW. Para este controlo utilizou-se uma taxa de crescimento de potência, *cs_max_pwr_rise_rate*, de 210 W/s e uma taxa de decrescimento de potência, *cs_max_pwr_fall_rate* de -150W/s. As simulações para este tipo de controlo foram feitas apenas para baterias de 2 e 3 módulos. Em anexo A, apresenta-se um exemplo do resultado da simulação para este modelo, figura A.2.

3.8 - Parâmetros termodinâmicos do simulador

Em todas as simulações, os componentes estão sujeitos a perdas termodinâmicas. Estas afetam a eficiência dos componentes ao longo do tempo. A modulação deste sistema termodinâmico não foi alterada e mantém-se de base do software ADVISOR. Para esta dissertação, as condições iniciais usadas no ADVISOR são equivalentes a “arranque a frio”, figura 3.15, e o SOC inicial encontra-se a 100%. As condições iniciais incluem: temperatura do ar ambiente (*amb_tmp*), calor específico do ar em J/kg/K (*air_cp*), temperatura do catalisador (*ex_cat_mon_init_tmp*, *ex_cat_int_init_tmp*), temperatura do tubo de ligação com o catalisador (*ex_cat_pipe_init_tmp*, *ex_manif_init_tmp*), temperatura externa do catalisador (*ex_manif_init_tmp*), temperatura do interior e exterior da FC (*fc_i_init_tmp*, *fc_x_init_tmp*), do interior do cilindro de H₂ (*fc_c_init_tmp*), do capô do veículo (*fc_h_init_tmp*), temperatura da bateria e do motor elétrico (*ess_mod_init_tmp*, *mc_init_tmp*)

| Initial Conditions for simulation run | |
|---------------------------------------|------|
| <i>amb_tmp</i> | 20 |
| <i>air_cp</i> | 1009 |
| <i>ex_cat_mon_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ex_cat_int_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ex_cat_pipe_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ex_cat_ext_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ex_manif_init_tmp</i> | 20 |
| <i>fc_c_init_tmp</i> | 20 |
| <i>fc_i_init_tmp</i> | 20 |
| <i>fc_x_init_tmp</i> | 20 |
| <i>fc_h_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ess_mod_init_tmp</i> | 20 |
| <i>mc_init_tmp</i> | 20 |
| <i>ess_init_soc</i> | 1 |
| <i>ess2_init_soc</i> | 0.7 |

Figura 3.15- Valores utilizados para as condições iniciais usadas no ADVISOR são equivalentes a “arranque a frio” [Fonte: Autor].

3.9 - Equivalente de combustível

Para motivos de comparação e percepção de consumo, adaptou-se a equação 3.23 de equivalente a gasolina e criou-se a equação 3.25 para a equivalente a diesel. Trata-se da quantidade de H₂ necessário para igualar o conteúdo energético de 1 litro de gasolina ou diesel. As equações partem do ponto em que a densidade energética específica da gasolina é de 42600 J/g e a do diesel é de 43400 J/g. A densidade é de 853 g/L para o diesel e 749 g/L para a gasolina. Primeiro foi necessário verificar a quantidade de H₂ que existe em litros por 100km, equação 3.21.

$$C_{H_2,L/100km} = \frac{C_{g/km}}{23,14} \times 100 \quad (3.21)$$

A equação 3.22 calcula a taxa de quantidade de H₂ necessária para igualar o conteúdo energético de 1 litro de gasolina.

$$T_{Gasolina/H_2} = \frac{42600 \times 749}{120000 \times 23,14} = 11,49 \quad (3.22)$$

O consumo em equivalente de gasolina em litros por 100 km é por fim apresentado:

$$C_{equivalente\ a\ gasolina\ L/100km} = \frac{C_{H_2,L/100km}}{11,490} \quad (3.23)$$

O mesmo processo é repetido para o equivalente a diesel através da equação 3.24, onde T_{Diesel/H_2} é a taxa de quantidade de H₂ necessária para igualar o conteúdo energético de 1 litro de diesel. O consumo em equivalente de litros de H₂ em 100 km é calculado na equação 3.25.

$$T_{Diesel/H_2} = \frac{43400 \times 853}{120000 \times 23,14} = 13,33 \quad (3.24)$$

$$C_{equivalente\ a\ Diesel\ L/100km} = \frac{C_{H_2,L/100km}}{13,331} \quad (3.25)$$

3.10 - Veículo de referência projeto CUTE

O autocarro de referência é o autocarro Citaro a FC de 12 metro, da EvoBus do projeto CUTE. O sistema de FC e o sistema AVAC foram montados no tejadilho do autocarro, como se consegue ver na figura 2.2 do capítulo 2, Enquadramento Teórico. Este autocarro, como referido anteriormente, foi desenhado com foco na máxima fiabilidade e com o máximo de componentes standard possível [11] [71]. Com um peso de 14,3 toneladas tem a capacidade para 70 passageiros e uma autonomia de 200km a 250km. O Sistema FC utilizado foi HY-205 P5-1, a quinta geração para sistemas de tração para pesados desenvolvida pela Ballard. A energia gerada flui diretamente para o motor elétrico que proporciona a energia para o autocarro se mover, assim como para todos os sistemas auxiliares do autocarro como AVAC, compressor e motor de direção. O armazenamento é feito através de 9 compósitos forçados em fibra de carbono a uma pressão de 350 bar, com o volume de 205 litros e uma capacidade total de 40 a 44 kg a 15°C. A densidade

do H₂ é de 23,83g/L, aproximadamente a mesma que a dos autocarros simulados. O Sistema FC é composto por 2 módulos de *stacks*, com um output máximo de 125kW por *stack*. As características físicas do autocarro apresentam-se na tabela 3.8. Os resultados de consumo para a rota 303 realizados em 11 ensaios foram os apresentados na tabela 3.9.

Tabela 3.8.- Características do Autocarro projeto CUTE[11] [71]

| Parâmetros | Valor |
|---|--------------|
| Gravidade (m/s ²) | 9,8 |
| Coefficiente de atrito aerodinâmico (S/Uni) | 0,7 |
| Área Frontal (m ²) | 9,35 |
| Altura (m) | 3,7 |
| Comprimento (m) | 12 |
| Peso (kg) | 14200 |
| Coefficiente de arrasto (S/Uni) | 0,01 |
| Pneus | 295/60 R22,5 |
| Potência máxima do motor (kW) | 205 |
| PEM FC (kW) | 250 |
| Velocidade máxima (km/h) | 70 |
| Aceleração (0-50 km/h) (s) | 16-20 |
| Emissões de GEE na viagem (kg) | 0 |

Tabela 3.9.- Consumos de autocarro do Projeto CUTE[11] [71] (1)-Densidade do diesel 830 g/L

| Parâmetros | Valor |
|-----------------------------------|---------------------|
| Consumo em L/100km | 969,36 |
| Consumo em Kg/100km | 23,1 |
| velocidade média(km/h) | 11,938 |
| Equivalente em diesel (L/100km) | 76,9 ⁽¹⁾ |
| Densidade do H ₂ (g/L) | 23,83 |

3.11 - Testes de influência

Como a única diferença entre o BUS1 e BUS2 é a estratégia de controlo, é necessário estabelecer testes que distingam cada autocarro nos consumos e desempenho. Desta maneira, criaram-se três testes de influência: a influência da inclinação, do sistema AVAC e da carga.

Na inclinação, para verificar a sua influência, fez-se variar a mesma entre os valores presentes na tabela 3.10, através da percentagem tangencial do deslocamento horizontal, como representado na figura 3.16.

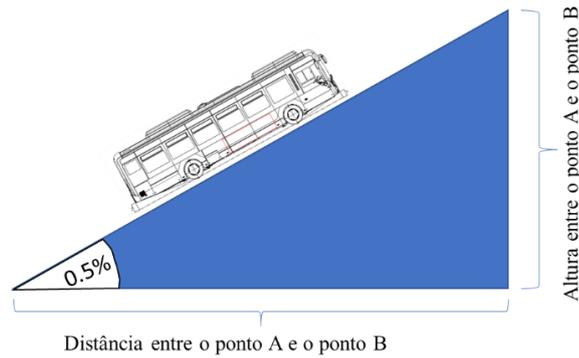


Figura 3.16. -Inclinação da estrada entre dois pontos, A e B, para uma inclinação de 0.5% [Fonte: Autor]

A tabela 3.10 representa o valor de altura atingida para as diferentes percentagens de inclinação que serviram para teste da influência da inclinação nas simulações dos autocarros.

Tabela 3.10.-Inclinações simuladas para 1 ciclo

| Inclinação | Altura de A a B |
|------------|-----------------|
| 0,5% | [0-55]m |
| 0 | 0m |
| -0,5% | [55-0]m |

Para testar a influência do sistema AVAC nos consumos, uma vez que o ADVISOR não permite regular este sistema ao longo da viagem, foi definido um valor de potência de acordo com a percentagem de capacidade de utilização. Onde 0% corresponde ao sistema desligado, 50% a metade da sua capacidade de utilização e 100% na máxima capacidade. Foram, assim, simulados os valores para P_{AVAC} da tabela 3.11.

Tabela 3.11.- Percentagem de potência do sistema AVAC utilizada.

| Percentagem | P_{AVAC} (kW) |
|-------------|-----------------|
| 0% | 0 |
| 50% | 6 |
| 100% | 12 |

Para a simulação da influência da carga, fez-se variar entre 0%, 50% e 100% a lotação máxima admissível pelo autocarro. A tabela 3.12 apresenta os valores de carga utilizados para cada percentagem. Desta maneira, foi possível estudar a influência nos consumos, de acordo com a lotação do autocarro.

Tabela 3.12.-Valores de carga referentes ao autocarro a FC com 2 módulos de baterias.

| Percentagem | Carga (kg) |
|--------------------|-------------------|
| 0% | 0 |
| 50% | 2450 |
| 100% | 4900 |

Capítulo 4

Análise de Resultados

Neste capítulo, apresentam-se as validações e resultados de inúmeras simulações para ambos os autocarros, BUS1 e BUS2. Começa pela verificação do consumo e autonomia do autocarro movido apenas pelas baterias, seguem-se os resultados do BUS1 quanto às influências da carga, inclinação e sistema AVAC, após prévia definição do melhor SOC. Realiza-se a mesma análise quanto às influências para o BUS2. Comparam-se os valores dos dois autocarros com o veículo de referência, que de agora em diante se denominará de CUTE. Nesta análise, para além do BUS1, BUS2 e CUTE, são incluídos os autocarros a diesel e 100% elétrico.

4.1 - Validação das baterias

A validação das baterias foi feita de acordo com o erro percentual entre o valor real recolhido através do Viriciti e os valores simulados após a modulação das baterias. Neste sistema, a componente FC não se encontra inserida. Chama-se a este sistema, um sistema 100% elétrico, no qual a propulsão do autocarro depende puramente da energia armazenada nas baterias. O consumo real para a rota escolhida é de 1,63kWh/km. Ao consumo real, é multiplicada a capacidade da bateria que resulta numa autonomia. Esta assume-se como sendo a autonomia real.

Para a rota simulada, a distância de um ciclo é de 11,8km e a energia consumida é, em média 19,62kWh (de todas as baterias), equivalente a um consumo médio teórico de 1.64kWh/km. Para o consumo e autonomia simulados repetiu-se 10 vezes o ciclo, o que equivale a 118km. Nesta situação seria necessário mais do que a capacidade presente na bateria de 5 módulos, uma vez que esta rota consome toda a energia armazenada nessa bateria. Torna-se, assim, possível calcular a sua autonomia para o ciclo escolhido pois toda a energia de qualquer bateria utilizada nesta simulação acaba antes do percurso finalizado. Os resultados estão presentes no gráfico 4.1.

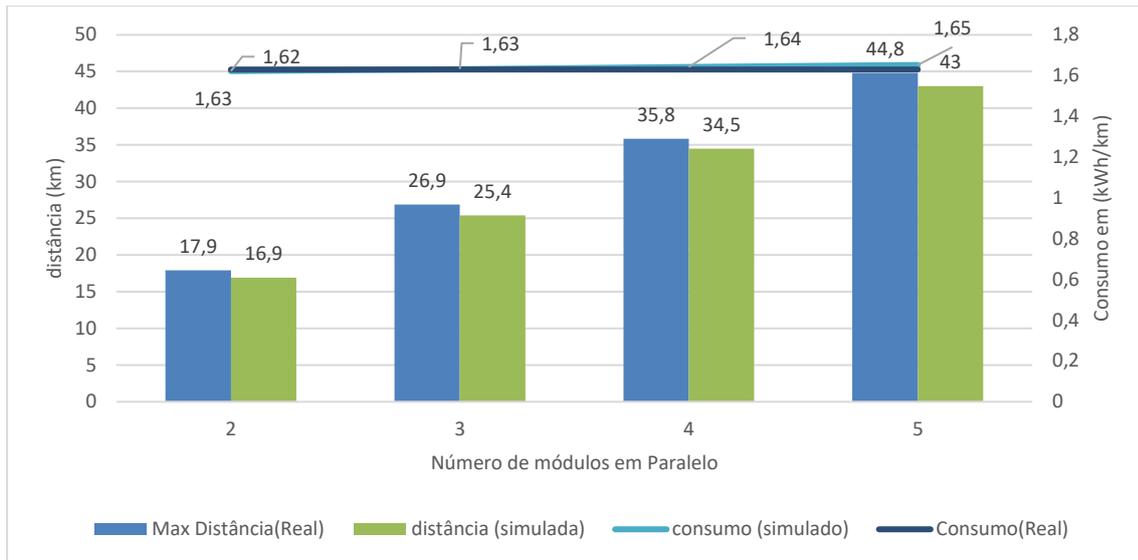


Gráfico 4.1. -Consumo e autonomia, reais e simulado das baterias sem a interferência do sistema FC para a rota escolhida

No gráfico 4.1, o consumo aumenta com o aumento do número de módulos em paralelo. Como este aumento de consumo é apenas 10Wh, justifica-se pelo aumento do peso das baterias que, por cada módulo, são aproximadamente 200kg. Assim como o consumo, a autonomia também aumenta com o número de módulos em paralelo. Perfeitamente comum, dado a energia armazenada aumentar na mesma proporção. A máxima autonomia simulada é sempre inferior à máxima autonomia real pois o simulador tem um erro percentual associado, representado no gráfico 4.2.

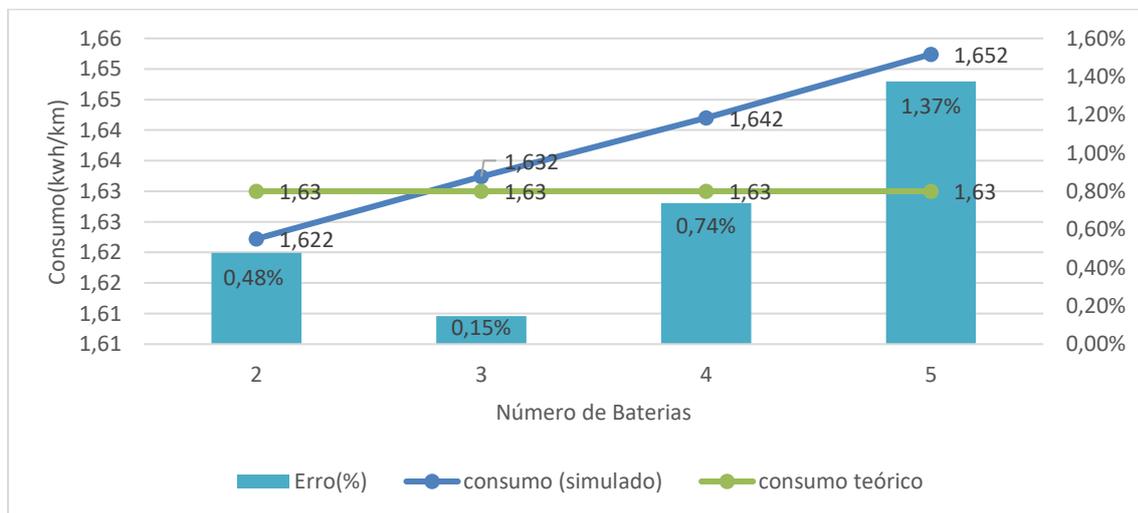


Gráfico 4.2. -Erro percentual entre os consumos reais e os consumos simulados

Uma vez que os erros percentuais em módulo são todos inferiores a 2%, foi considerada válida a modelação das baterias para a simulação.

4.2 - Controlo BUS1

Para este primeiro controlo, é necessário previamente definir o melhor SOC para o funcionamento das baterias na melhor eficiência, de modo a manter sempre o seu consumo de 1,64kWh/km, com metade do peso total e 6kW de potência para auxiliares. Os resultados de consumo em kWh (PCI) em 100km, Kg em 100km, litros em 100km, equivalente em litros a diesel em 100km e a autonomia a seguir apresentados são apenas de um sistema híbrido com FC e 2 módulos de baterias, onde se fez variar o SOC entre 20%, 40% e 60%. Os resultados com restantes os módulos estão representados em Anexo C.

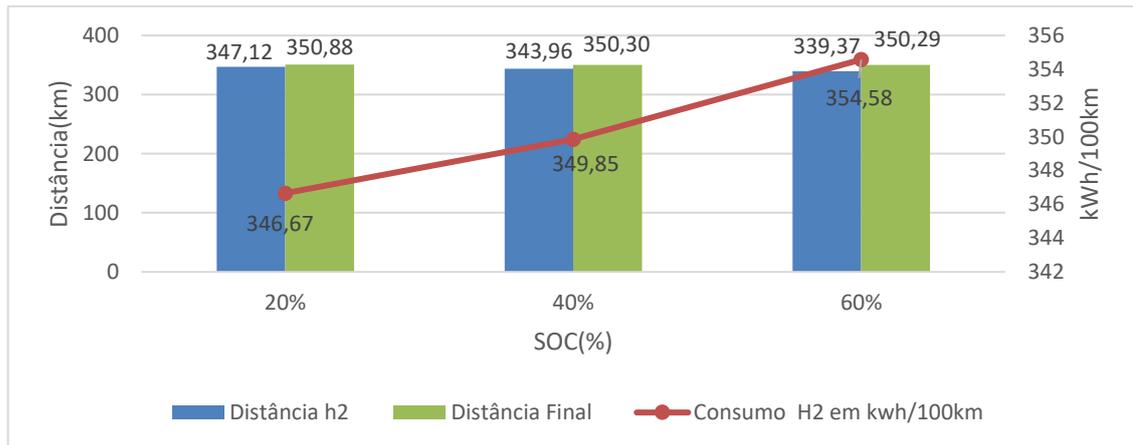


Gráfico 4.3.-Consumo de H₂ (PCI) em kWh por 100km e respetiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS1

No gráfico 4.3, a barra a verde corresponde à autonomia do conjunto dos sistemas FC e bateria. Esta barra representa o limite máximo de autonomia atingido devido ao fim da capacidade energética de ambas as tecnologias. Comparativamente ao SOC de 20%, quanto à autonomia de H₂, decresce 0,92% para o SOC de 40% e decresce 2,23% para o SOC de 60%. Já a autonomia do conjunto é a mesma, com algumas flutuações nas décimas causadas pelo SOC final, resultante de, na simulação, se tratar de um número decimal e não inteiro como desejado. O consumo é inversamente proporcional à autonomia do H₂ e diminui quando a mesma aumenta. Comparativamente ao SOC de 20%, quanto ao consumo de H₂ (PCI) em kWh por 100km, cresce 0,92% para SOC de 40% e 2,23% para o SOC de 60%. Analisando atentamente estes resultados, seria de esperar a escolha do SOC de 20% verificando este um menor consumo e, consequentemente, uma maior autonomia. No entanto não é assim, o problema dá-se na tensão da bateria para os vários estados de carga. Para o SOC de 20%, a tensão é de 590V, para 40% é de 607V e para 60% é de 640V. Uma elevada disparidade entre a tensão do sistema FC e do sistema da bateria leva à degradação dos componentes com os quais é feita a sua interligação, prejudicando a eficiência do sistema geral. Por este motivo, foi escolhido um SOC de 60% dada a queda de tensão ser a menor possível. Para os restantes testes de influência, foi utilizado o SOC de 60%. Para uma melhor perceção do consumo, é utilizada uma conversão do consumo em kWh por 100km para consumo de H₂ em litros por 100Km, Kg/100km e para equivalente em litros a diesel.

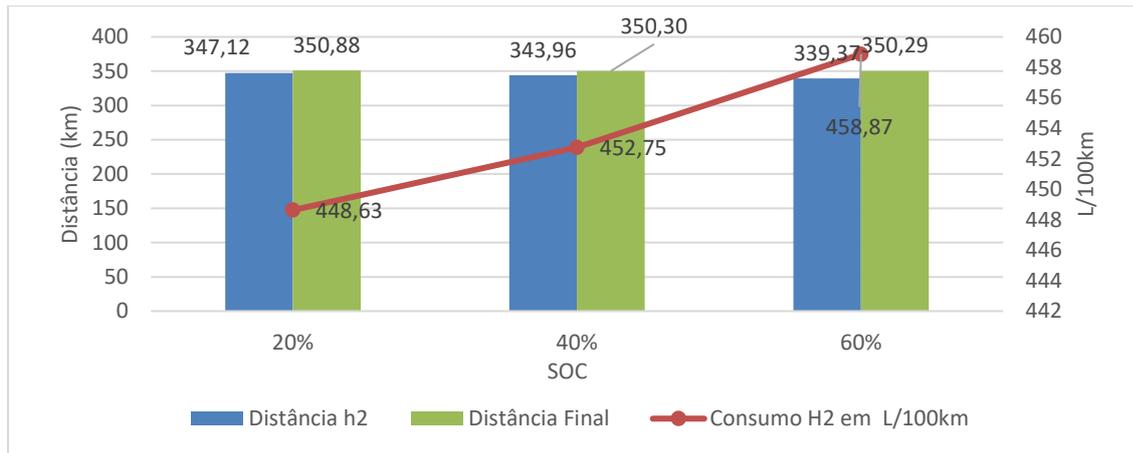


Gráfico 4.4.- Consumo de H₂ em Litros por 100km e respectiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS1.

O consumo total em litros de H₂ pode ser verificado através de uma simples multiplicação entre o consumo de H₂ em litros por 100km, gráfico 4.4, e a autonomia de H₂, correspondendo aos litros consumidos no fim da autonomia que, para o caso do SOC de 60%, são 1557.26 litros de um total de 1560 litros disponíveis em armazenamento. Os 2,74 litros que faltam para chegar ao limite do armazenamento são considerados perdas de conversão química.

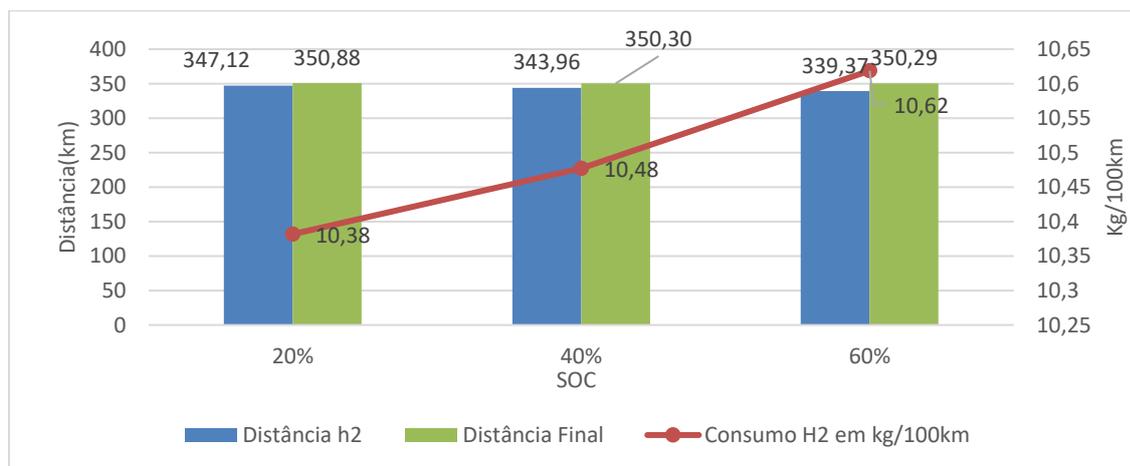


Gráfico 4.5.- Consumo de H₂ em Kg por 100km e respectiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS1.

O mesmo acontece para a quantidade de Kg, gráfico 4.5, que na sua totalidade são 36,1Kg. O consumo para o SOC de 60% é de 10,62kg/100km, equivalente a uma autonomia de 339,37km. O BUS1 consome 36,036Kg perdendo-se 63,4g na conversão.

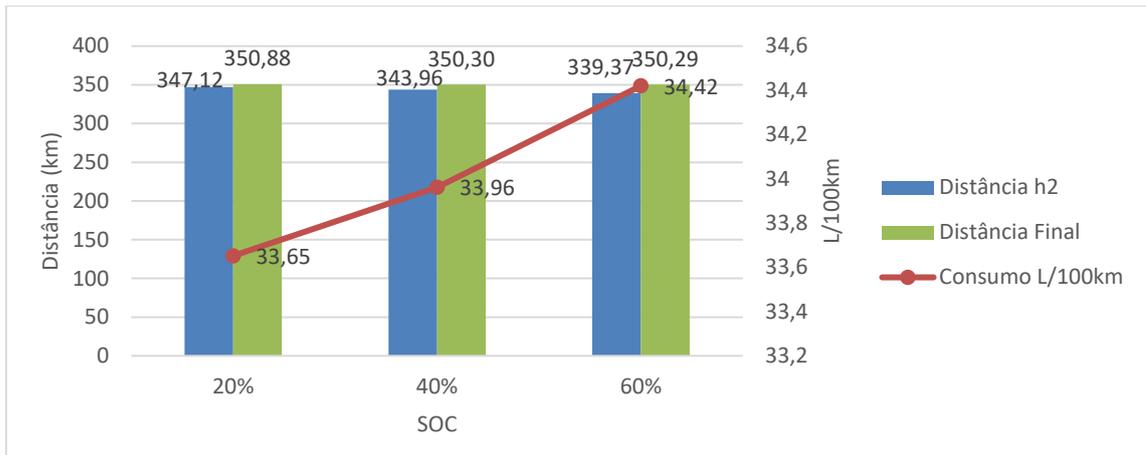


Gráfico 4.6.- Consumo de H₂ equivalente em Litros de diesel por 100km e respetiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS1.

O gráfico 4.6 representa o consumo equivalente de H₂ em litros de diesel. Para uma melhor noção da situação atual de consumo a diesel, um autocarro Citaro a diesel de Norma EURO VI da Mercedes Benz consome, em média, 38,7L/100km [72]. O consumo de BUS1 é inferior 11,05% em relação a um autocarro a diesel (SOC 60%).

4.2.1.- Variação da inclinação BUS1

Numa cidade como o Porto, com elevações irregulares em curtos espaços de tempo, este fator afeta a autonomia. Como este sistema não é dinâmico, as três opções escolhidas retratam um terreno plano (0%), uma subida (0,5%) e uma descida (-0,5%).

Os resultados da influência da inclinação para o BUS1 apresentados no gráfico 4.7, são apenas para uma bateria de 2 módulos. Os restantes módulos são apresentados em Anexo C. Esta simulação é realizada para uma lotação de 50% e potência de auxiliares de 6kW.

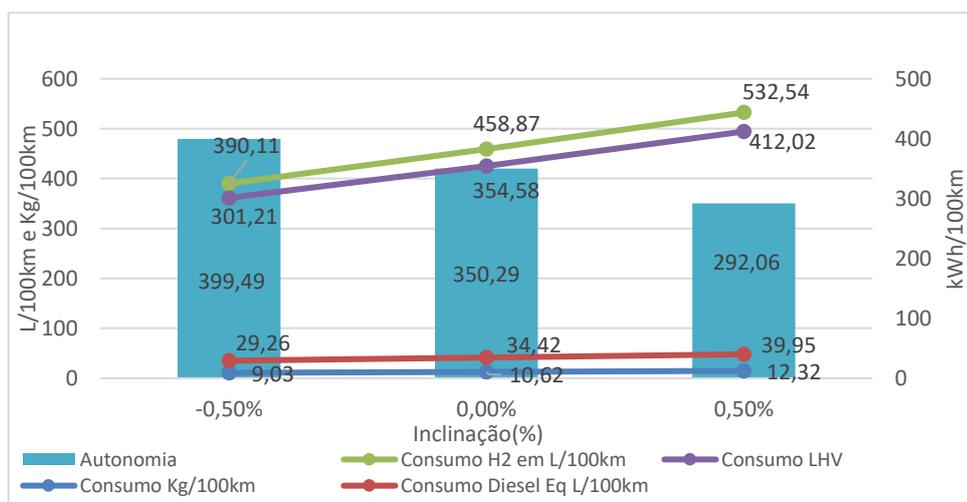


Gráfico 4.7.-Variação dos consumos de acordo com a percentagem de inclinação de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS1.

Com o aumento da inclinação, o consumo aumenta e, como consequência, a autonomia diminui. Isto deve-se a uma maior exigência do motor, o que faz aumentar a potência média do barramento DC que precisa de ser garantida pela bateria. Esta garantia faz com que a capacidade da bateria diminua mais rapidamente, necessitando que o sistema FC injete mais potência em menos tempo (aumento do fluxo de energia), justificando-se o aumento do consumo com a inclinação. Comparativamente à inclinação de 0%, estrada plana, o consumo diminui 15% para uma inclinação negativa (descida), e aumenta 16% para uma inclinação positiva (subida). O aumento do número de módulos da bateria aumenta a sua capacidade, o que faz com que a carga não diminua tão rapidamente e diminui o consumo de H₂ do sistema FC. Como consequência obtém-se uma maior autonomia, Anexo C.

4.2.2.- Variação da AVAC BUS1

O sistema AVAC é o principal fator auxiliar que prejudica o desempenho de um autocarro dado a sua elevada exigência de potência. Sabe-se que a potência máxima do sistema AVAC é de 12kW. Não sendo possível ativar ou desativar ao longo da viagem o sistema (não dinâmico), partiu-se da premissa que funcionaria a 0% (desligado) a 50% (metade da sua potência máxima) e a 100% (durante toda a viagem) até se esgotar toda a energia presente do sistema.

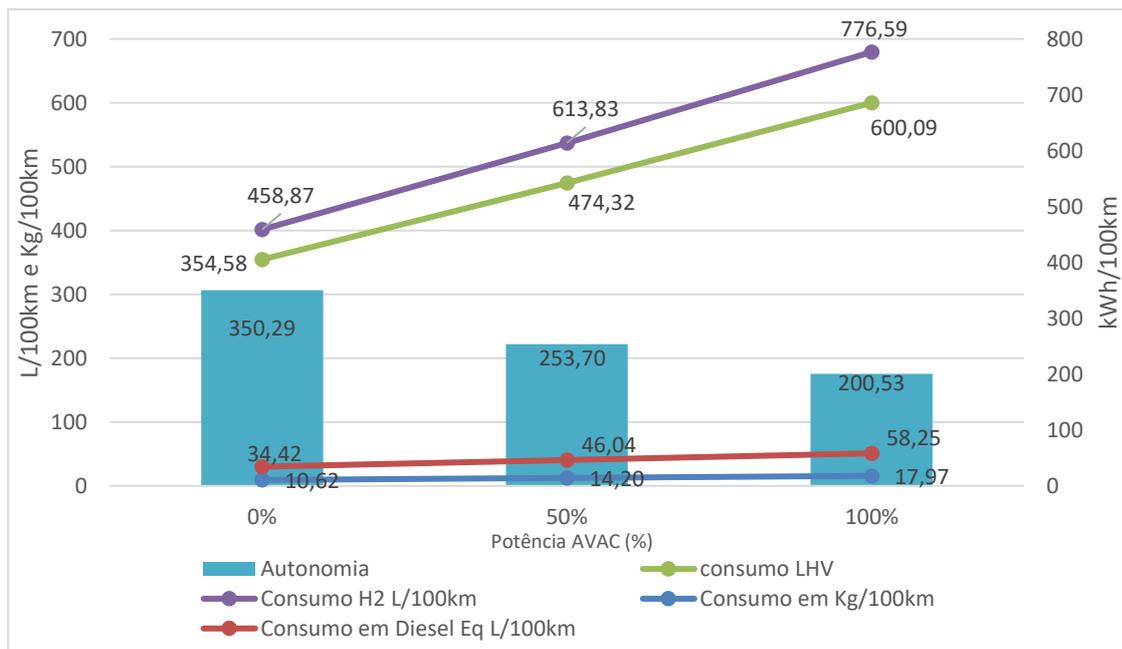


Gráfico 4.8.- Variação dos consumos de acordo com a percentagem de potência requerida para o sistema AVAC de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS1.

A energia necessária para alimentar o sistema AVAC faz com que a bateria rapidamente se descarregue. Assim como o que acontece com a influência da inclinação, o SOC da bateria diminui com o declive mais acentuado e mais rapidamente o sistema do controlo do BUS1 ativa o funcionamento em *Charge Sustaining*, aumentando a injeção de H₂ que por sua vez, aumenta o consumo e, conseqüentemente, diminui a autonomia. Comparativamente ao funcionamento a 0% (desligado), o consumo aumenta 33,7% para o funcionamento a metade da potência, e aumenta 70% para o funcionamento na máxima potência.

4.2.3.- Variação da carga BUS1

A variação da carga do autocarro é outro dos fatores importantes no que diz respeito aos transportes coletivos urbanos. As constantes paragens de entrada e saída de passageiros faz com que esta carga aumente ou diminua consoante o peso dos passageiros. Mais uma vez, não se tratando de um sistema dinâmico, assume-se que 0% retrata o autocarro vazio, 50% com metade da sua máxima lotação e 100% na máxima lotação. Para esta simulação, a inclinação é de 0% e a potência dos auxiliares é de 6kW.

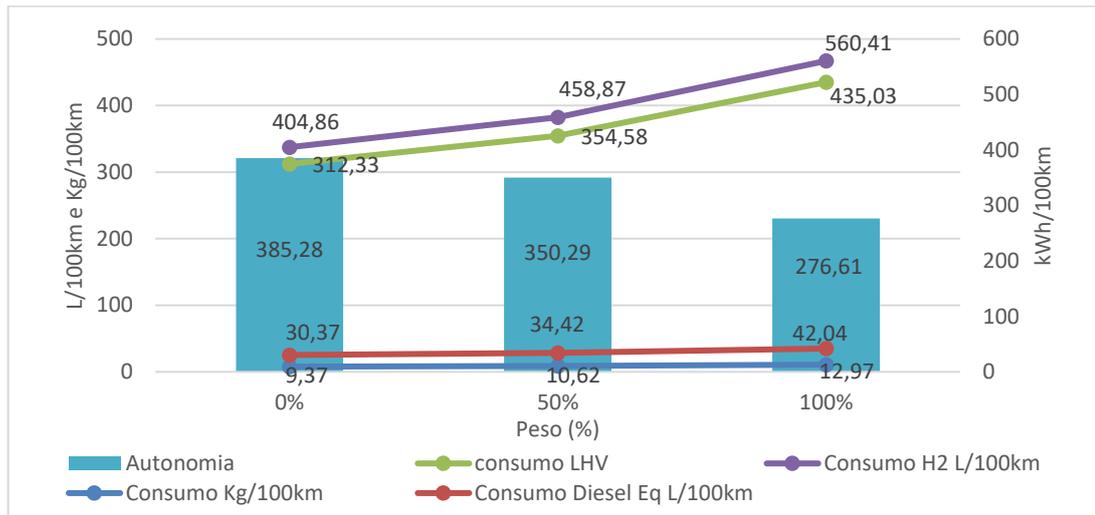


Gráfico 4.9.-Variação dos consumos de acordo com a percentagem do peso da carga correspondente à lotação de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS1

Em termos gerais, no gráfico 4.9 verifica-se que o aumento da carga vai provocar um aumento no consumo de energia. O aumento da carga vai impor ao BUS1 uma necessidade de maior binário, se quiser responder ao percurso como originalmente. Quanto maior o peso, mais tempo demora a atingir o desempenho original e o binário aproxima-se do binário máximo assim como a potência utilizada. Quanto maior a potência utilizada, maior é a energia necessária e, portanto, maior será o consumo que tem como consequência uma menor autonomia. Comparativamente a metade da lotação (referência das simulações), o consumo diminui 11,8% para o funcionamento com 0 passageiros e aumenta 22,1% para o funcionamento na máxima lotação.

4.3 - Controlo BUS 2

Para este controlo, é necessário previamente definir o melhor valor de K para o funcionamento constante do sistema FC que satisfaça sempre o consumo das baterias de 1,64kWh/km. Para a rota escolhida, a simulação é realizada com 50% da lotação total e 6kW de potência para os sistemas auxiliares. Os resultados de consumo em kWh (PCI) em 100km, Kg em 100km, litros em 100km, equivalente a diesel em 100km e autonomia, a seguir apresentados, são apenas correspondentes ao H₂ e a FC e para 2 módulos de baterias. Fez-se variar o K entre o intervalo de valores [5 - 60] kW. Os resultados dos restantes módulos estão representados em Anexo D.

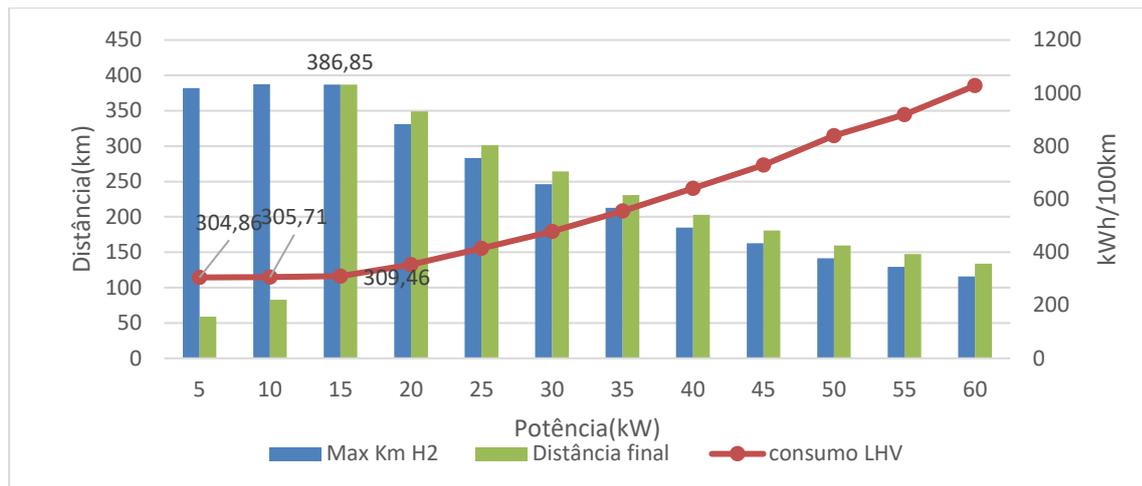


Gráfico 4.10.- Consumo de H₂ em Litros por 100km e respectiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS2.

No gráfico 4.10, a barra a verde corresponde à autonomia do conjunto dos sistemas FC e bateria (fim da capacidade de ambas as tecnologias). É visível que o melhor valor é o de 15kW para potência constante do sistema FC, sendo este o valor com maior autonomia e menor consumo. Apesar de, para potências de 5kW e 10kW, o valor de consumo ser igualmente baixo, este não era suficiente para que a quantidade de energia armazenada pela bateria fosse para mais de 5 e 9 ciclos respectivamente (59 e 83 km). Com o aumento de K, a autonomia diminui e o consumo aumenta. Com o aumento do número de módulos em paralelo, a tendência de K é de diminuir dado a bateria aguentar com mais potência instantânea. Para além disso, a potência constante de 15kW permite o funcionamento com uma pequena disparidade entre a tensão do sistema FC e do sistema da bateria de 1,20% (642,66V).

Para uma melhor perceção do consumo, é utilizada uma conversão do consumo em kWh por 100km para consumo de H₂ em L/100km, Kg/100km e para equivalente de litros a diesel.

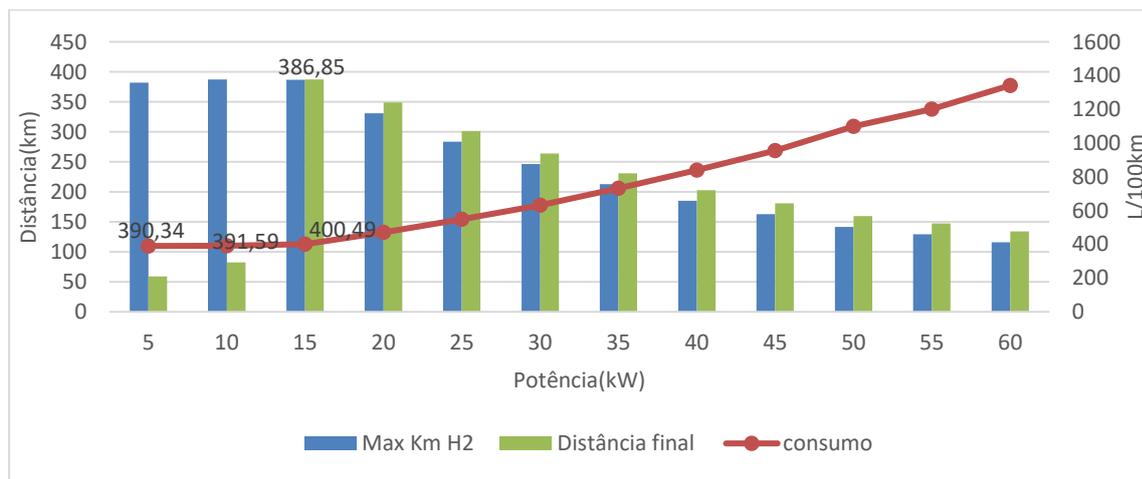


Gráfico 4.11.- Consumo de H₂ em Litros por 100km e respectiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS2.

O consumo total em litros de H₂, gráfico 4.11, pode ser verificado através de uma simples multiplicação entre o consumo de H₂ em kWh por 100km e a autonomia de H₂, correspondendo

aos litros consumidos no fim da autonomia. Para o caso do 15kW, é 1549,63 litros de um total de 1560 litros de armazenamento. Os 10,37 litros que faltam para chegar ao limite do armazenamento são considerados perdas de conversão química.

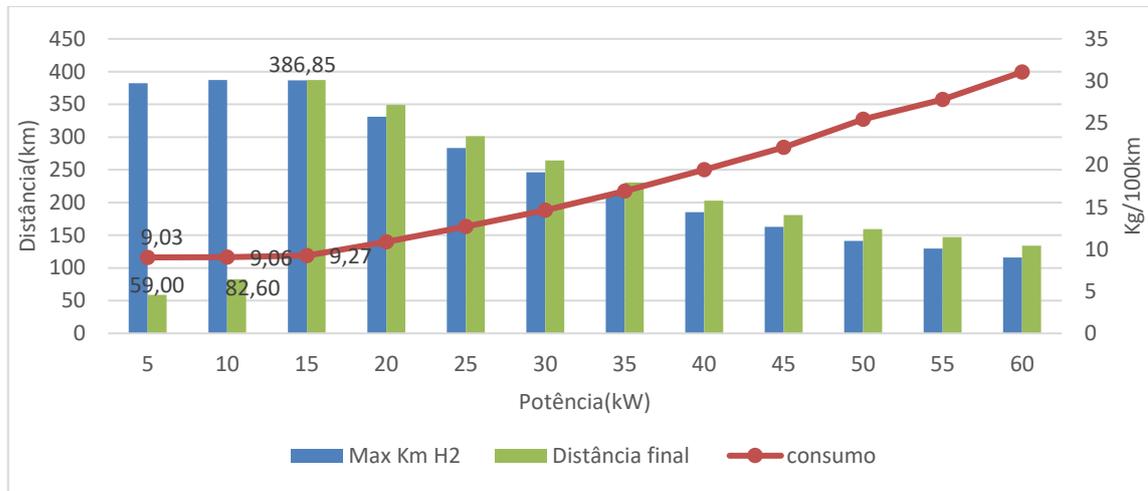


Gráfico 4.12.- Consumo de H₂ em Kg por 100km e respetiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS2.

O mesmo acontece para a quantidade de Kg que, na sua totalidade, são 36,1Kg. O consumo para 15kW é de 9,27kg/100km. Para uma autonomia de 386,85km, o BUS2 consome 35.860kg perdendo-se 240g na conversão.

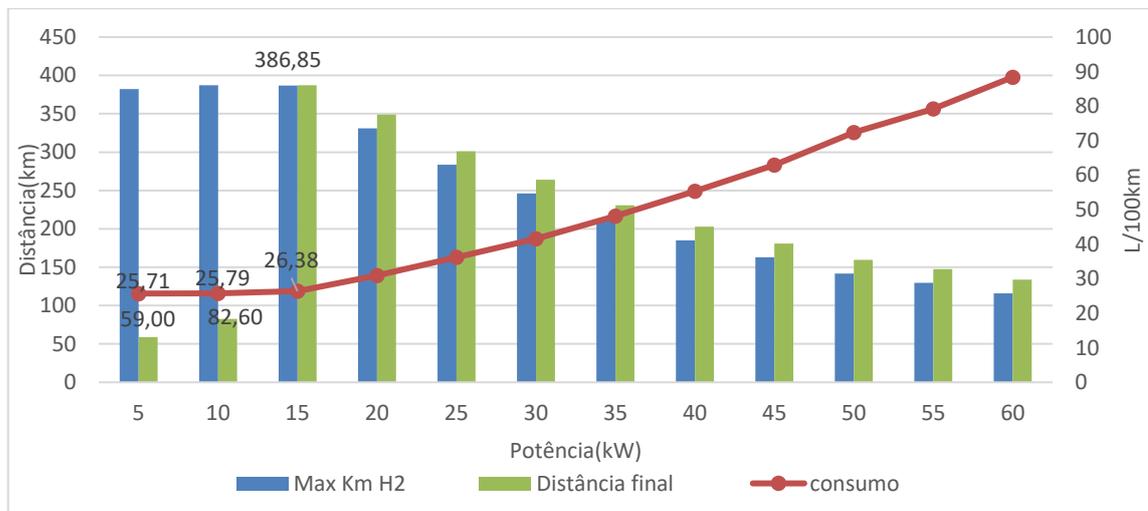


Gráfico 4.13.- Consumo de H₂ equivalente em Litros de diesel por 100km e respetiva autonomia para a bateria de 2 módulos em paralelo 29,2kWh do BUS2.

O gráfico 4.13 mostra o consumo equivalente de H₂ em litros de diesel. Para uma potência constante de 15kW, o consumo de BUS2 é inferior 31,8% em relação a um autocarro a diesel.

4.3.1.- Variação da inclinação BUS2

Assim, como aconteceu para o BUS1, são apresentados, neste subcapítulo, os resultados para a variação da inclinação para o BUS2, tendo em conta as mesmas condições de simulação, peso (50%) e de potência requisitada pelos sistemas auxiliares (6kW).

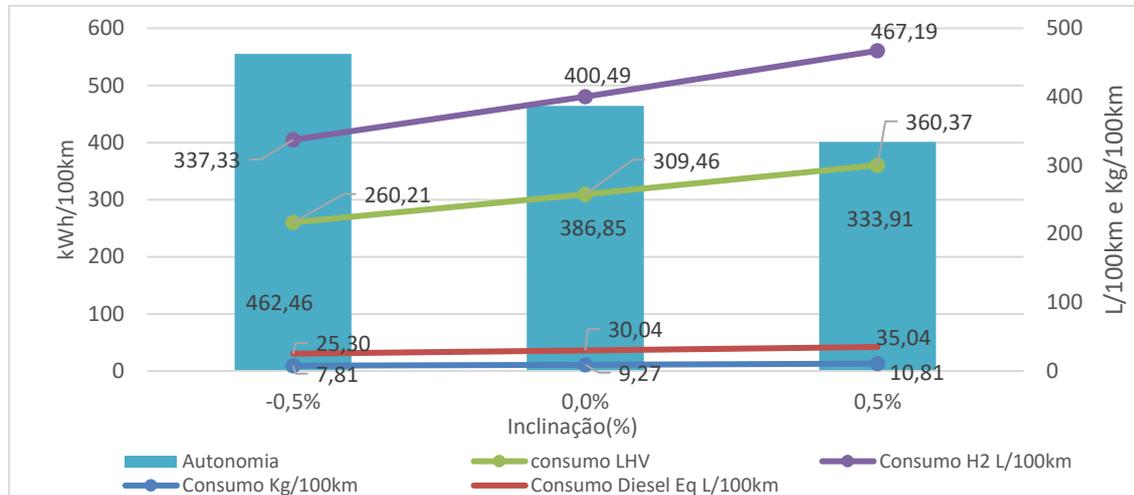


Gráfico 4.14.- Variação dos consumos de acordo com a percentagem de inclinação de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS2

Tratando-se de um controlo não dinâmico, foi necessário ajustar a potência de acordo com as necessidades do sistema de maneira ao autocarro cumprir as implicações de velocidade correspondentes à rota selecionada. Para a inclinação negativa e nula, foi utilizada uma potência inicial constante de 15kW e, para a inclinação positiva, uma potência inicial de 20kW, fazendo com que os requisitos do carro fossem cumpridos para a exigência de potência da rota 303. Com o aumento de inclinação, o consumo aumenta e como consequência a autonomia diminui, tal como o BUS1. Isto deve-se à mesma exigência do motor que aumenta a potência média do barramento DC que precisa de ser garantida pela bateria. Esta garantia faz com que a capacidade da bateria diminua mais rapidamente necessitando que o sistema FC injete mais potência em menos tempo (aumento do fluxo de energia), justificando-se o aumento do consumo com a inclinação. Como neste caso se trata de um controlo constante, aumenta-se a velocidade constante de injeção de H₂ na FC para uma conversão constante de 20kW. Comparativamente à inclinação de 0%, estrada plana, o consumo diminui 15,8% para uma inclinação negativa (descida), e aumenta 16,6% para uma inclinação positiva (subida). Em relação ao BUS1, os consumos do BUS2 são inferiores e diminuem 13,5% para a inclinação negativa, 12,7% para inclinação nula e 12,3% inclinação positiva.

4.3.2.- Variação da AVAC BUS2

A variação do sistema AVAC do BUS2 foi realizada para as mesmas condições de simulação do BUS1, peso (50%) e de potência requisitada pelos sistemas auxiliares (6kW). Não sendo possível ativar e desativar (não dinâmico) ao longo da viagem o sistema, partiu-se da premissa que funcionaria a 0%, ou seja, desligado, a 50% metade da sua potência máxima e durante toda a viagem e a 100%, até se esgotar toda a energia presente do sistema, gráfico 4.15.

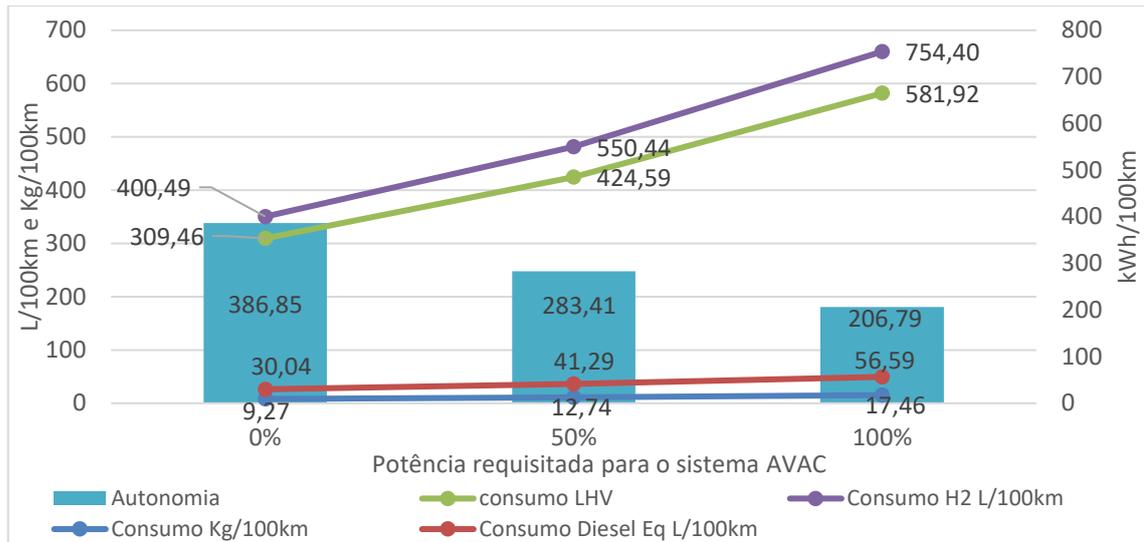


Gráfico 4.15.- Variação dos consumos de acordo com a percentagem de potência requerida para o sistema AVAC de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS2

Tal como no BUS1, a energia necessária para alimentar o sistema AVAC do BUS2 faz com que a bateria rapidamente se descarregue, o SOC da bateria diminua com declive mais acentuado, aumentando a injeção de H₂ que, por sua vez, aumenta o consumo e a autonomia diminui. Como neste caso se trata de um controlo constante, aumenta-se a velocidade constante de injeção de H₂ na FC para uma conversão constante de 25kW para o funcionamento a metade da potência e 35kW e para funcionamento à potencia máxima. Estes valores satisfazem, assim, o funcionamento do autocarro para toda a rota escolhida. Comparativamente ao funcionamento a 0% (desligado), o consumo aumenta 37,4% para o funcionamento a metade da potência e aumenta 88,3% para o funcionamento na máxima potência. Em relação ao BUS1, os consumos do BUS2 são inferiores e diminuem 12,7%, no caso de estar desligado o sistema AVAC, 10,3% para o funcionamento a metade da potência e 2,9% funcionamento na máxima potência.

4.3.3.- Variação da carga BUS2

Mais uma vez, não se tratando de um sistema dinâmico, assume-se que 0% retrata o autocarro vazio, 50% com metade da sua máxima lotação e 100% na máxima lotação. Para esta simulação, a inclinação é de 0% e a potência dos sistemas auxiliares é de 6kW. Para o peso da carga de 50% (metade da lotação), a potência assegurada e constante do sistema FC é de 10kW e para o peso da carga de 100% (lotação máxima) é de 30kW.

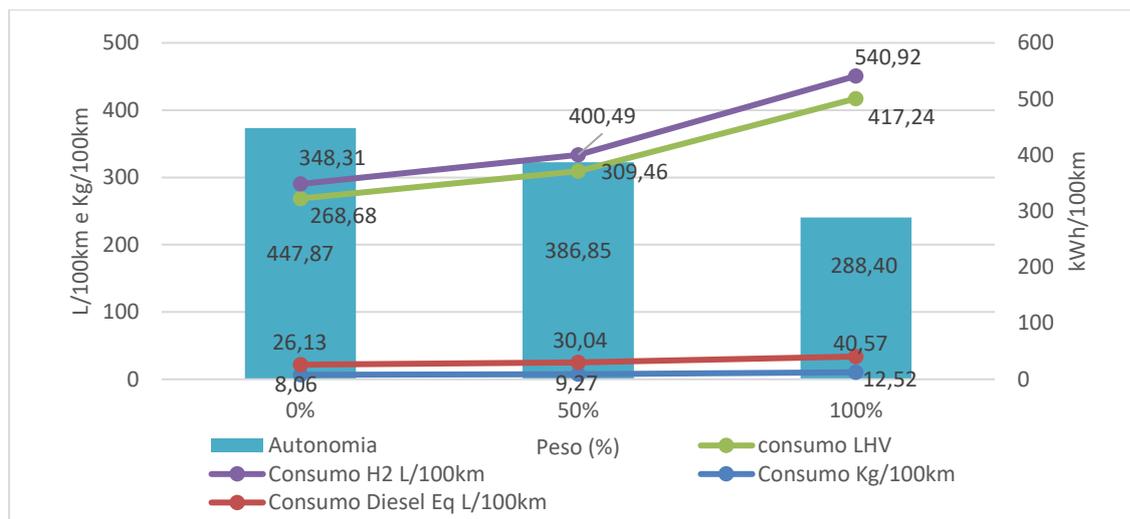


Gráfico 4.16.- Variação dos consumos de acordo com percentagem do peso da carga correspondente à lotação de uma bateria 2 módulos em paralelo 29,2kWh, para o BUS2

O aumento da carga vai impor ao BUS2 uma necessidade de maior binário se quiser responder ao percurso como originalmente. Quanto maior o peso, mais tempo demora a atingir o desempenho original e o binário aproxima-se do binário máximo assim como a potência utilizada pelo motor se aproxima da potência máxima. Quanto maior a potência utilizada, maior é a energia necessária, e, portanto, maior será o consumo. Tal como no BUS1, o consumo aumenta ao longo do tempo e, por sua vez, a autonomia diminui. Comparativamente a metade da lotação (referência das simulações), gráfico 4.16, o consumo diminui 13% para o funcionamento com 0 passageiros e aumenta 35,1% para o funcionamento na máxima lotação. Em relação ao BUS1, os consumos do BUS2 são inferiores e diminuem 14% no caso de o autocarro se encontrar vazio, 12,7% para metade da lotação e 3,5% para a lotação máxima.

4.4 - Relação de consumo com o CUTE

Este subcapítulo retrata um resumo de todas as simulações de ambos os autocarros, BUS1 e BUS2 e comparam-se valores com os recolhidos no projeto CUTE do autocarro a FC. Além disso, são adicionados a esta comparação os valores teóricos de autonomia dos autocarros Mercedes Benz Citaro a diesel [73] e o autocarro elétrico da STCP disponível através do Viriciti. Para uma análise apenas aos consumos de H₂ dos diferentes autocarros, construiu-se o gráfico 4.17. Nele estão presentes os consumos e autonomia de cada autocarro simulado, BUS1 e BUS2 e o do projeto CUTE.

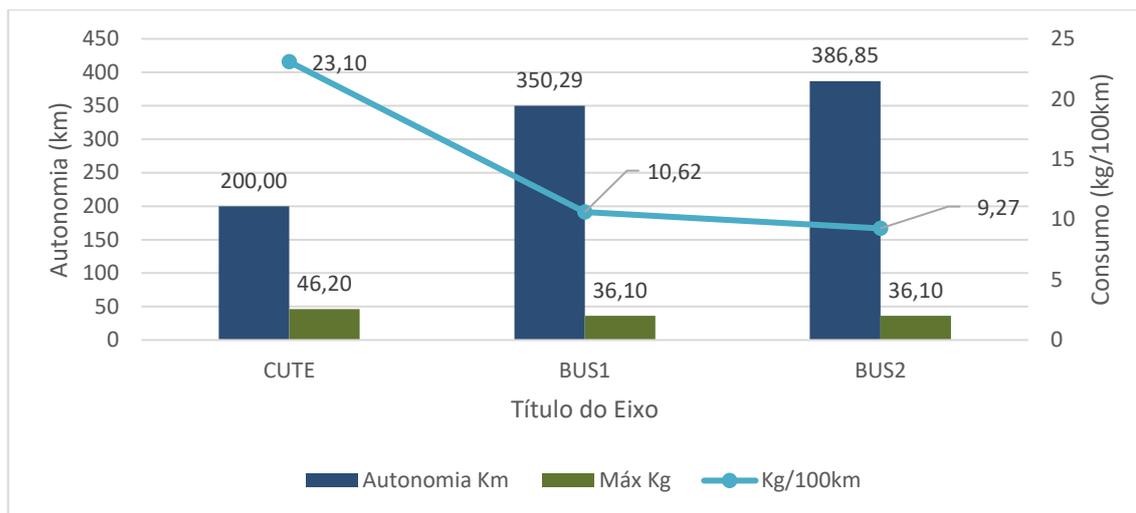


Gráfico 4.17.-Consumo em Kg/100km e autonomia em km para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC e para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29,3kWh.

Apesar de no autocarro do projeto CUTE a potência instalada ser maior, dado toda a energia ser garantida através da FC e não existindo qualquer tipo de bateria para aproveitar a energia regenerada por frenagem, a autonomia é a menor dos três autocarros. Isto deve-se à potência máxima que a FC necessita de garantir para respeitar as velocidades impostas pelo ciclo, ser muito elevada.

A hibridação, como já referido no enquadramento teórico (Capítulo 2), diminui o consumo de um autocarro não híbrido a FC para menos de metade, gráfico 4.17. O consumo do autocarro CUTE é, por isso, 2,17 vezes maior que o consumo do BUS1 e 2,51 vezes maior que o consumo do BUS2.

Também devido à hibridação, os BUS1 e BUS2, mesmo com uma capacidade de armazenamento menor, têm uma maior autonomia. Um aumento de cerca de 75,1% para o BUS1, e 93,4% para o BUS2, relativamente à autonomia do projeto CUTE.

Quanto aos diferentes métodos de controlo, o controlo *on/off* do BUS1 além de danificar o sistema FC, aumenta o consumo 14,5% em relação ao controlo de potência constante do BUS2. Apesar de o controlo do BUS2 não ser dinâmico, prova que uma alimentação sempre constante, mesmo que não utilizada, pode ser armazenada na bateria, e assim, é possível diminuir os picos de potência realizados pela FC. Para além de não danificar a FC aumenta a autonomia. Este controlo afeta principalmente o SOC da bateria que permite que ele descarregue “ao mesmo tempo” que a quantidade de H₂ presente no sistema de armazenamento. Esta característica afeta a autonomia positivamente, provoca o seu aumento.

O gráfico 4.18 apresenta os consumos em litros de diesel por 100km para os autocarros analisados anteriormente e para o autocarro Citaro a diesel e um autocarro 100% elétrico para a rota anteriormente selecionada. Apenas o consumo do autocarro a diesel e autonomia representam valores teóricos, calculados de acordo com a quantidade de litros que o seu armazenamento disponibiliza e o consumo recolhido do site oficial da Mercedes Benz. Este consumo é calculado para condições normativas de lotação nula, potência de auxiliares nula e inclinação nula, o que torna este valor válido, mas não realista para as condições da rota 303 em análise. No gráfico, destaca-se a autonomia do autocarro a diesel que, apesar de ter um consumo relativamente grande,

não afeta a autonomia pois a sua capacidade de armazenamento é 215L. De notar também, como referido anteriormente, que é o único autocarro que não está submetido às características do terreno e de simulação, sendo que todos os pressupostos indicam que estas características levariam a uma redução do valor da autonomia.

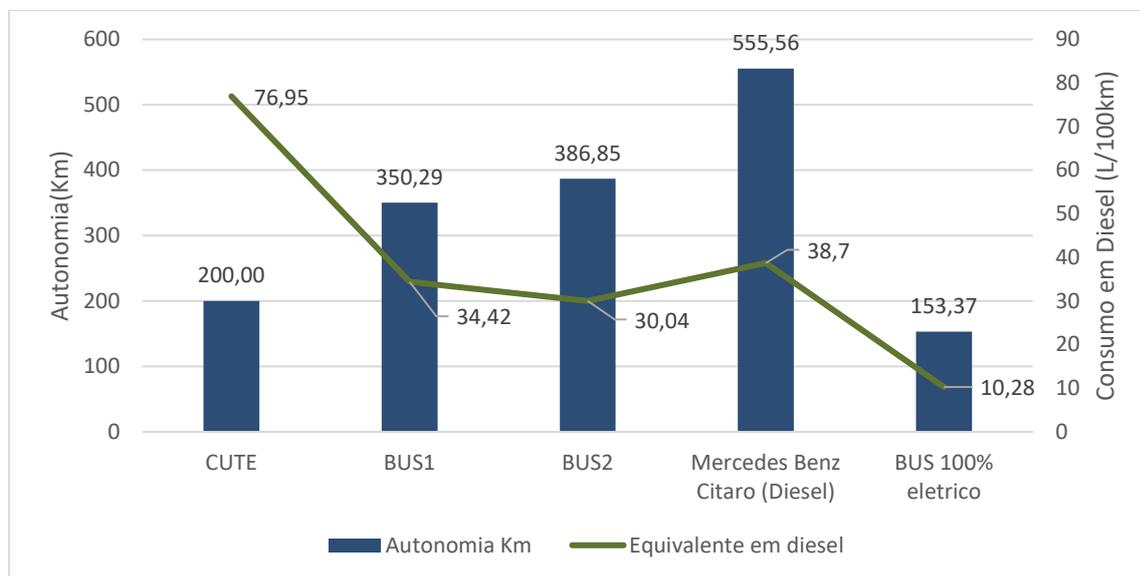


Gráfico 4.18.-Consumo em equivalente em diesel L/100km e autonomia em km para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para o autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e um autocarro 100% elétrico de 250kWh.

Verifica-se que em relação ao autocarro de menor autonomia (100% elétrico) há, para o autocarro CUTE, um aumento de 30% na autonomia. O mesmo se passa com os restantes autocarros, com um aumento na autonomia de 128%, 152% e 262% para os autocarros BUS1, BUS2 e Citaro a diesel, respetivamente, face à autonomia do 100% elétrico.

É de salientar que na autonomia e consumo do autocarro 100% elétrico, não está incorporada a energia recuperada por frenagem, daí os valores serem relativamente inferiores aos esperados (regenera 8kWh no ciclo escolhido).

Relativamente aos consumos em litros em equivalente a diesel, o autocarro 100% elétrico da STCP é o que tem um menor consumo. Mas, para o mesmo consumo de energia na bateria (1.63kWh/km) e, sabendo-se que não se trata um sistema híbrido, a bateria tem uma menor autonomia. Justifica-se pela densidade de energia das baterias de lítio ser menor que a densidade de energia do H₂ (Capítulo 2).

O consumo em equivalente a diesel é muito menor no autocarro 100% que nos autocarros a H₂. Isto deve-se à eficiência na conversão. Apesar do H₂ ter uma densidade energética maior, este perde cerca de 45% da sua energia na conversão. No caso dos autocarros híbridos, quando a energia armazenada na bateria acaba ou chega a um determinado SOC necessitam de garantir a propulsão através da energia armazenada nos cilindros de H₂. Como a eficiência da FC não é mais do que 65% o consumo é conseqüentemente maior que o autocarro 100% elétrico.

Os consumos dos autocarros CUTE, BUS1, BUS2 e Citaro a diesel são, respetivamente, 7,5;3,35; 2,92 e 3,76 vezes maiores que o consumo do autocarro 100 elétrico.

Capítulo 5

Custo de Investimento e Emissões para uma frota de autocarros

Neste capítulo, apresenta-se uma análise das emissões de CO₂ e custo de investimento total no primeiro ano de aquisição para uma frota de 20 autocarros. Nesta análise, para além do BUS1, BUS2 e CUTE, são incluídos os autocarros a diesel e 100% elétrico. Os dados do custo de manutenção e previsões para 2030, posteriormente apresentados, têm origem em documentação de projetos europeus propostos pelo Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU) [74][18].

5.1.- Equações e pressupostos

O ciclo de vida de um combustível tem em conta a sua produção, transporte, armazenamento e utilização. Nesta dissertação, os “combustíveis” são o H₂, a eletricidade e o diesel. Embora os VE (a FC e a baterias), não emitam CO₂ durante a sua utilização é errado dizer que são veículos não poluentes. No ciclo de vida de energia utilizada (eletricidade e H₂), existem muitas etapas que produzem emissões poluentes. No presente estudo, apenas se fará referência às emissões de CO₂ de produção e de utilização.

De maneira a ser possível calcular as emissões de uma frota de 20 autocarros de cada tecnologia para o primeiro ano de aquisição, partiu-se dos resultados dos consumos do Capítulo 3, Caso de Estudo, presentes na tabela 5.1. As emissões de CO₂ foram calculadas através da equação 5.1, que dependendo do tipo de combustível do autocarro, as calcula para produção e para o decorrer da viagem.

As emissões de CO₂ consideradas na documentação correspondem a 4.7kg na produção 1 kg de H₂, de acordo o projeto United Kingdom H₂ Mobility (UKH2M) [74]. Estas emissões devem-se à produção do H₂ ser através da reformulação do petróleo. Para as emissões na viagem, como já referido, a FC não produz qualquer emissão para além de água. Por este motivo, as emissões na viagem para os autocarros em que há utilização de H₂ como combustível são zero. O autocarro a diesel escolhido, cumpre as normas EURO VI de emissões de CO₂. Os autocarros que cumprem esta norma emitem 0,5g de CO₂ por litro de diesel consumido. Já na produção de cada litro de diesel são emitidos 2,68kg de CO₂.

Assim como os autocarros que utilizam o H₂ como combustível, o autocarro 100 % elétrico também só tem emissões na produção de energia, neste caso 149,33 g/kWh (valor de emissões recolhidos da página oficial da EDP do mês de outubro de 2018). A equação 5.1 permite, assim, calcular as emissões totais de cada autocarro em kg por 100km.

$$E_{CO_2,Bus} = (E_{produção} + E_{viagem}) \times Consumo \quad (5.1)$$

Nesta equação, $E_{CO_2,Bus}$ representa as emissões de CO₂ totais do autocarro específico, $E_{produção}$ representa as emissões de CO₂ na produção do “combustível” e E_{viagem} as emissões de CO₂ durante a viagem (de utilização).

Tabela 5.1.-Consumos e emissões de CO₂ para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada, de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para o autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e um autocarro 100% elétrico de 250kWh. (1) -Cálculo através da equação equivalente de litro de diesel para autocarros elétricos do ADVISOR.

| Autocarro | CUTE | BUS1 | BUS2 | BUS diesel | BUS 100% elétrico |
|--|--------|-------|-------|------------|----------------------|
| Consumo em equivalente a diesel (L/100km) | 76,95 | 34,42 | 30,04 | 38,70 | 10,28 ⁽¹⁾ |
| Consumo em Kg/100km | 23,10 | 10,62 | 9,27 | - | - |
| Consumo em kWh/100km | - | - | - | - | 163,00 |
| Emissões de CO₂ na Produção (kg/100km) | 108,57 | 49,91 | 43,56 | 103,72 | 24,34 |
| Emissões de CO₂ na viagem (kg/100km) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01935 | 0,00 |
| Total Emissões CO₂ (kg/100km) | 108,57 | 49,91 | 43,56 | 103,91 | 24,34 |

Obtidas as emissões por 100km -de maneira a ser possível calcular os custos de uma frota de autocarros de cada tecnologia para o primeiro ano de aquisição - partiu-se da premissa que cada autocarro faria uma média diária de 100km durante 1 ano. Através da equação 5.2 é calculado o custo total de investimento de uma frota de 20 autocarros para o primeiro ano de aquisição ($C_{T,1Ano}$), através da soma do custo de operação (C_{OPEX}) e o custo de despesa de capital (C_{CAPEX}).

$$C_{T,1Ano} = C_{OPEX} + C_{CAPEX} \quad (5.2)$$

O custo de operação é composto pelo custo do combustível consumido durante cada viagem, pelo custo de manutenção anual de cada autocarro e pela taxa sobre as emissões de CO₂, fixada pelo Diário da República, prevista no artigo 92 do Código dos Impostos Especiais de Consumo (CIEC), em 6,85 €/tonelada de CO₂. A equação 5.3 calcula o custo de operação anual para o primeiro ano de aquisição de uma frota de 20 autocarros.

$$C_{OPEX} = n + P_{Combustível} \times C_{anual} + n \times (C_M + C_{MP}) + n \times T_{CO_2} \times E_{CO_2,Bus,anual} \quad (5.3)$$

Onde n o número de autocarros, $P_{Combustível}$ é o preço de combustível em 2019, C_{anual} é o consumo anual de um autocarro, C_M o custo da manutenção preventiva por autocarro C_{MP} o custo da manutenção do sistema de propulsão por autocarro, T_{CO_2} é taxa sobre as emissões de CO₂ e $E_{CO_2,Bus,anual}$ as emissões de CO₂ totais do autocarro específico num ano. A tabela 5.2., apresenta os resultados dos consumos e emissões da tabela 5.1 para um ano de um autocarro de cada tecnologia.

Tabela 5.2.- Consumos e emissões anuais de CO₂ para o autocarro do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para os dois autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para o autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e um autocarro 100% elétrico de 250kWh. (1) -Cálculo através da equação equivalente de litro de diesel para autocarros elétricos do ADVISOR.

| Autocarro | CUTE | BUS1 | BUS2 | BUS diesel | BUS 100% elétrico |
|--|----------|----------|----------|------------|-------------------|
| Consumo equivalente a diesel (L/bus) | 28087,84 | 12563,37 | 10964,92 | 14125,50 | 3753,44 |
| Consumo em Kg por bus | 8431,50 | 3875,83 | 3382,71 | - | - |
| Emissões de CO₂(Produção) (kg/bus) | 39628,05 | 18216,38 | 15898,74 | 37857,8 | 8884,39 |
| Consumo em kWh por bus | - | - | - | - | 59495,00 |
| Emissões de CO₂ na viagem (kg/bus) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 7,00 | 0,00 |
| Total Emissões de CO₂ (kg/bus) | 39628,05 | 18216,38 | 15898,74 | 37863,4 | 8884,39 |

Para o H₂ é utilizado um preço de 8€/kg [74], para o diesel 1,284€/L (valor recolhido na página oficial da DGEG na região do Porto em janeiro de 2019), e para a eletricidade 0,16490€/kWh (valor recolhido na página oficial da EDP em janeiro de 2019). A tabela 5.3 apresenta os custos anuais de emissões e combustível para o primeiro ano de aquisição de uma frota de 20 autocarros das diferentes tecnologias. Para o C_M o valor é de 11765€/ano por autocarro, independentemente da tecnologia. Para o C_{MP} por autocarro, utilizaram-se os valores de 35294€/ano para 2019 e 17647€/ano para 2030. Para os autocarros a FC e a bateria e 11765 €/ano para o autocarro a diesel.

Tabela 5.3.- Custos anuais de CO₂ e de combustível para uma frota de 20 autocarros do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para 20 iguais aos autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para 20 autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e 20 autocarro 100% elétrico de 250kWh.

| Autocarro | CUTE | BUS1 | BUS2 | BUS diesel | BUS 100%elétrico |
|------------------------------------|------|------|------|------------|------------------|
| Custo combustível (mil €) | 1349 | 620 | 541 | 363 | 196 |
| Taxa CO₂ (mil €) | 5,43 | 2,50 | 2,18 | 5,09 | 1,22 |

A ElementEnergy, consultora que realizou a documentação e participa em projetos europeus do FCH JU, disponibiliza também no seu relatório [74], previsões para 2030 quanto ao custo dos combustíveis utilizados nos autocarros em análise, presentes na tabela 5.4. Através destes dados, tornou-se possível estimar os custos de combustível e emissões de CO₂ totais dos autocarros em análise para 2030.

Tabela 5.4.- Custo dos combustíveis utilizados para o cálculo do custo de Operação. (1). -Custo possível alcançar pelo projeto UKH2M, (2). -Aumento de 80% no preço do diesel e (3). -Aumento de 10% no preço da eletricidade.

| Tipo de Combustível | H ₂ | diesel | Eletricidade |
|---------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| Preço | 3,5€/kg ⁽¹⁾ | 2,3112€/L ⁽²⁾ | 0,18139€/kWh ⁽³⁾ |

A tabela 5.5 apresenta os custos anuais de combustível e emissões CO₂ de uma frota de 20 autocarros para os diferentes tipos analisados anteriormente para 2030. Os consumos de cada autocarro assumiram-se como os mesmos que os de 2019.

Tabela 5.5- Custos anuais de combustível e emissões de CO₂ para uma frota de 20 autocarros do projeto CUTE de 250kW de potência instalada apenas de sistema FC, para 20 iguais aos autocarros simulados, BUS1 e BUS2 com uma potência instalada de 92kW do sistema FC e uma bateria de 29.3kWh, para 20 autocarro Mercedes Benz a diesel de 215L de depósito e 20 autocarro 100% elétrico de 250kWh, para 2030.

| Autocarro | CUTE | BUS1 | BUS2 | BUS diesel | BUS 100%elétrico |
|------------------------------------|--------|--------|--------|------------|------------------|
| Custo combustível (mil €) | 590,21 | 271,31 | 236,79 | 652,94 | 215,84 |
| Taxa CO₂ (mil €) | 5,43 | 2,50 | 2,18 | 5,09 | 1,22 |

O custo de despesa de capital é calculado através da equação 5.3. A equação apresenta o número de autocarros (n) e o custo de venda por autocarro saídos da produção que inclui o custo dos devidos sistemas de propulsão ($C_{Prod+SP}$). O custo de venda por autocarro ($C_{Prod+SP}$), está apresentado na tabela 5.6 para o ano de 2019 e 2030.

$$C_{CAPEX} = n \times C_{Prod+SP} \quad (5.3)$$

Tabela 5.6. -Valor do custo de venda dos autocarros em análise

| Autocarro | BUS1 | | BUS2 | | CUTE | | 100%elétrico | | diesel | |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|--------------|------|--------|------|
| | 2019 | 2030 | 2019 | 2030 | 2019 | 2030 | 2019 | 2030 | 2019 | 2030 |
| $C_{Prod+SP}$ em mil €/bus | 650 | 240 | 650 | 240 | 1200 | 1200 | 300 | 233 | 280 | 280 |

5.2.- Análise de Resultados

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados dos custos de investimento e emissões previamente calculados. É ainda feita a análise a todos esses dados e são justificados os resultados obtidos.

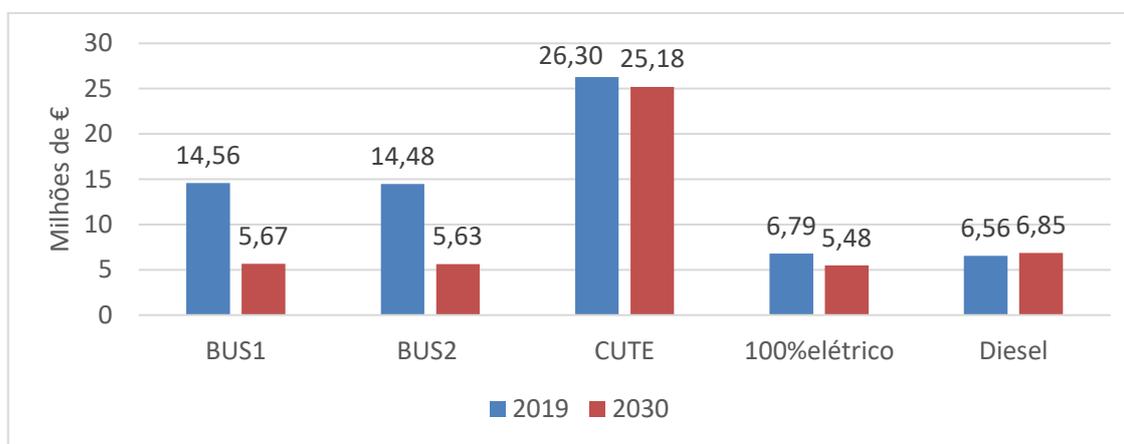


Gráfico 5.1.-Custo total de investimento de uma frota de 20 autocarro para o primeiro ano de aquisição, para os diferentes tipos de autocarros.

O gráfico 5.1 mostra que, atualmente (2019), o custo total de investimento de uma frota de autocarros híbridos plug-in a H₂ ou autocarros completamente a H₂ é entre 114% a 300% maior que o autocarro 100% elétrico e diesel. No entanto, segundo as previsões para 2030, o aumento do preço da eletricidade (justificado por uma maior procura) e dos combustíveis fósseis com as taxas de CO₂, juntamente com a maturação da tecnologia FC, integração e prospeção comercial, provocam uma redução nos custos totais dos autocarros híbridos, não híbridos a H₂ e 100% elétricos (apesar do aumento do preço da eletricidade, a tecnologia encontra o seu pico de maturação em 2030, diminuindo o preço da sua produção em série) e um aumento do custo no caso do autocarro a diesel. A variação percentual de 2019 para 2030 é representada pelo gráfico 5.2, onde as percentagens negativas correspondem a uma diminuição do custo de investimento e as positivas a um aumento do custo de investimento.

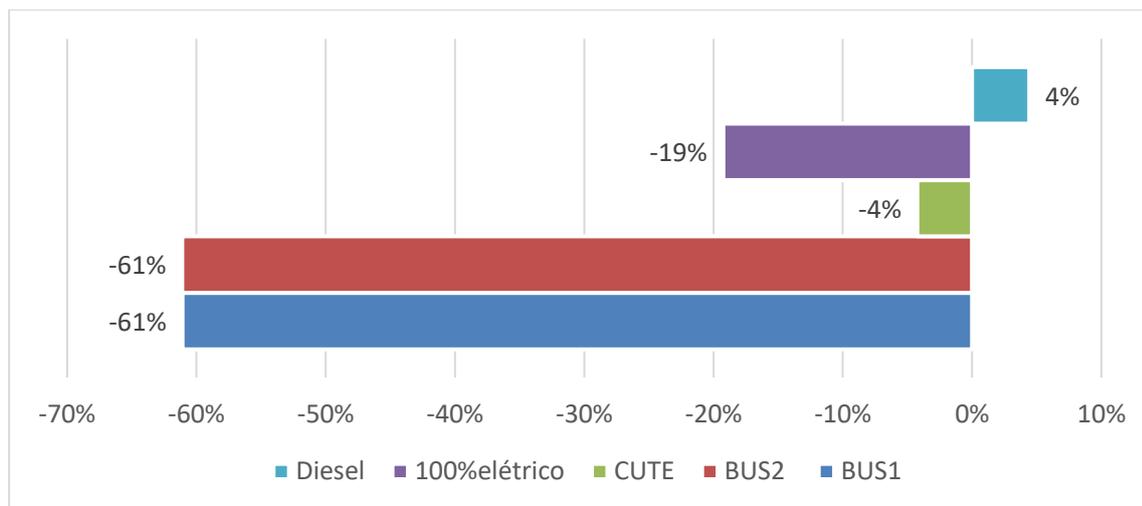


Gráfico 5.2.- Variação (%) entre o custo total de aquisição de uma frota de 20 autocarros de 2019 para 2030.

Para uma perceção melhorada é criado o gráfico 5.3, que indica o custo total em € por km, tornando-se possível calcular este custo para qualquer autocarro consoante a área abrangente (distância em km) da frota. Neste caso, a distância anual percorrida por autocarro é de 36500 km.

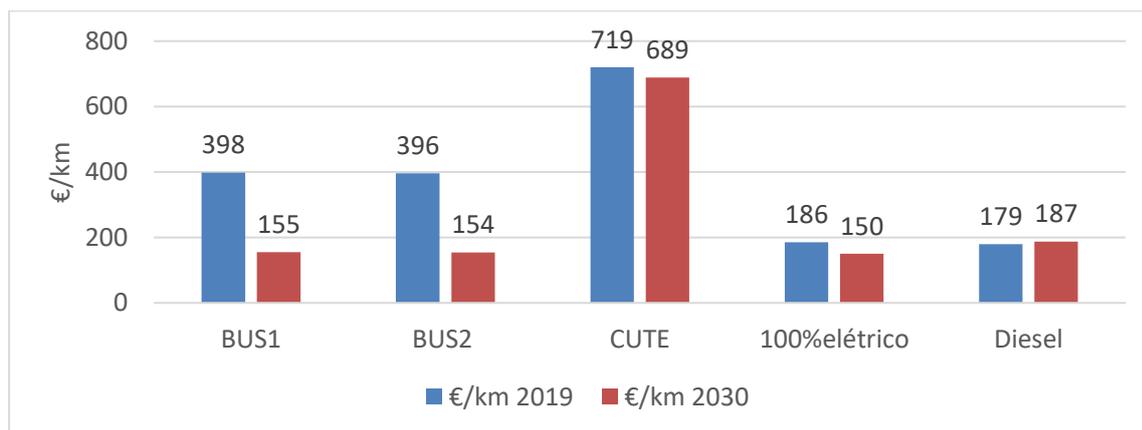


Gráfico 5.3.- Custo total por km para o primeiro ano de aquisição para uma frota de 20 autocarros

Como se pode verificar, os custos em 2030 por km de uma frota de 20 autocarros, são bastante aproximados para os BUS1, BUS2 e diesel. Além disso, a diferença do custo dos autocarros com FC, diminui em relação aos autocarros 100% elétricos. O custo dos autocarros iguais aos do projeto CUTE é mais elevado. É de salientar que os valores resultantes do autocarro projeto CUTE não englobam a evolução da tecnologia e maturação do mercado a nível de comercialização, que provocam um acentuado declínio no custo total no caso das restantes tecnologias com sistema a FC. Pelas previsões de 2030, o autocarro 100% elétrico é o de valor mais baixo, mas que tende a aumentar com o preço da eletricidade provocado pelo contínuo aumento do consumo de energia descrito no capítulo 2, Enquadramento Teórico.

Para finalizar este capítulo, é conveniente analisar as emissões de CO₂, em toneladas, recolhidas da tabela 5.3 e representadas no gráfico 5.4. Nenhum autocarro presente no gráfico, com exceção do Mercedes Benz Citaro a diesel, tem qualquer emissão durante a viagem, ou seja, desde o momento em que a energia é armazenada até à sua respetiva utilização não há qualquer

emissão de CO₂, o que não acontece no caso dos autocarros a diesel. Como tal, as emissões presentes nestes gráficos para os autocarros mencionados são as emissões para a produção dos quilogramas correspondentes ao consumo, no caso de autocarros a FC, e kWh, no caso do autocarro 100% elétrico.

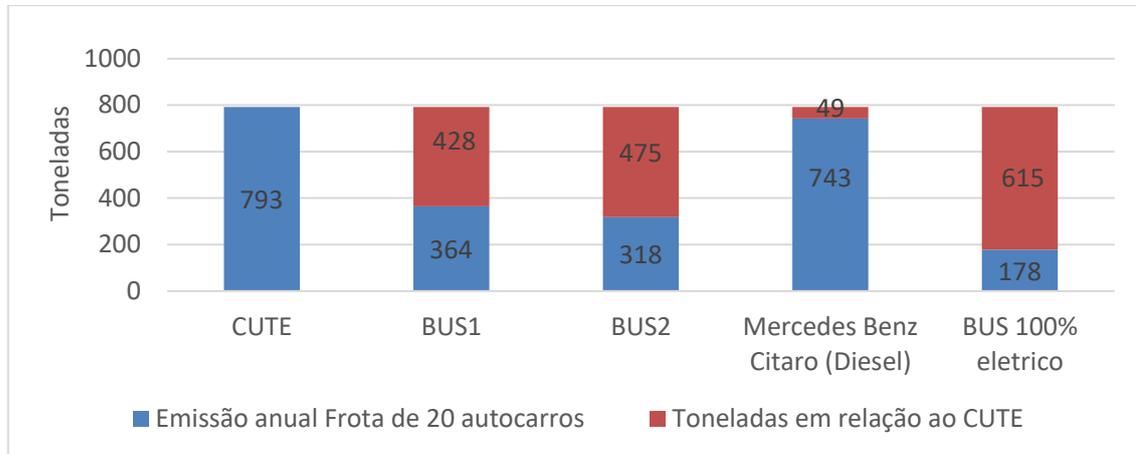


Gráfico 5.4.-Emissões de CO₂ anuais de uma frota de 20 autocarros

Pelo gráfico anterior, como as toneladas são proporcionais ao consumo, os autocarros com maior consumo são os com mais emissões, CUTE e Mercedes Benz Citaro a diesel. O autocarro menos poluente é o autocarro elétrico, com uma redução de 78% nas emissões em relação ao autocarro mais poluente - CUTE, segue-se o BUS2 com uma redução de 60%, em terceiro lugar por ordem decrescente de emissões está o BUS1 com uma redução de 54% em relação ao CUTE e, por fim, o autocarro a diesel com uma redução de 6%. O valor de emissões do autocarro CUTE é uma prova de que a produção de H₂ através de combustíveis fósseis é uma rejeição ao princípio ambiental da mobilidade dita de verde.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos futuros

Neste capítulo, apresentam-se as principais conclusões do trabalho desenvolvido, as quais permitiram responder às questões colocadas no Capítulo 1 desta dissertação. Além disso, apresentam-se algumas diretrizes para continuar e melhorar este trabalho.

6.1.- Satisfação dos Objetivos

O foco desta dissertação centrou-se na análise à viabilidade da integração dos veículos a FC nos transportes urbanos e ao impacto das “novas” tecnologias para a mobilidade que apresentam emissões zero e concorrem para garantir o cumprimento das metas impostas pelo Acordo de Paris.

Este desígnio foi conseguido, através da análise dos consumos de combustível e emissões do autocarro do projeto CUTE, comparando-o com o resultado de dois autocarros simulados e dois não simulados. O propósito deste projeto foi também conseguido através do software de simulação, onde foram modeladas as características físicas de um autocarro. Foram dimensionados e modelados as baterias e o sistema FC. Variou-se a estratégia de controlo de energia fornecida pela FC, entre fornecimento de auxílio *on/off* (BUS1) e fornecimento constante (BUS2). Testaram-se as diferentes condições que influenciaram os consumos e a autonomia destes autocarros. Finalmente, foram feitas, uma análise económica ao custo de aquisição e uma análise às emissões de uma frota de autocarros simulados e não simulados, com base em previsões de projetos europeus.

Os resultados obtidos permitiram responder as perguntas do Capítulo 1, no subcapítulo Objetivos, que levaram à realização desta dissertação.

“Terá a tecnologia FC evoluído o suficiente para competir com as tecnologias já existentes nos transportes urbanos?”

A tecnologia evoluiu o suficiente para competir com as tecnologias já existentes. Devido a esta evolução os consumos são 54% inferiores à tecnologia da altura, no projeto CUTE.

“Quais os consumos, para mesma rota do autocarro do projeto CUTE, de um autocarro Plug-In Híbrido a FC (PFCHEV) utilizando tecnologias atualizada?”

A hibridação, como já referido, diminui o consumo para menos de metade. O consumo é por isso 2,17 vezes maior para autocarro CUTE que o consumo do BUS1 e 2,51 vezes para o BUS2. Também devido à hibridação, os BUS1 e BUS2, mesmo com uma capacidade de armazenamento menor têm uma maior autonomia. Um aumento na autonomia de cerca de 75,1% para o BUS1, e 93,4% para o BUS2, relativamente à autonomia do projeto CUTE.

“Qual será a melhor estratégia de controlo de energia para a topologia híbrida do autocarro a PFCHEV?”

A estratégia de controlo do BUS1 *on/off*, além de diminuir o tempo de vida da FC, também tem um maior consumo em todo o tipo de testes de influência e uma menor autonomia, logo a melhor abordagem para a estratégia de controlo será a do BUS2, a potência constante que, para o caso de referência, tem uma autonomia de 387 km e um consumo de 9,3kg/100km.

“Quanto seria o investimento de uma frota de 20 autocarros a PFCHEV?”

Em 2019, devido à tecnologia FC não estar 100% explorada, à falta de infraestruturas de abastecimento (que apesar de não contribuírem para o custo de aquisição total influenciam o preço do combustível e do autocarro) e à necessidade de maturação a nível comercial, as frotas de PFCHEV são 2,2 vezes mais dispendiosas que a frota de elétricos e diesel.

“Será um autocarro a FC mais viável que um autocarro a bateria em 2030?”

Em 2030, as previsões indicam que com a maturação do mercado, da tecnologia, o aumento do preço dos combustíveis fósseis (Acordo de Paris) e da eletricidade (maior procura), a competitividade de preços de mercado de uma frota de 20 autocarros para todas as tecnologias, será aproximadamente a mesma. Em termos de viabilidade uma frota de autocarros PFCHEV será tão viável como uma de autocarros 100% elétrico (baterias).

“Será a aposta nas FC um bom caminho para a redução de emissão de gases para a atmosfera?”

A integração dos autocarros a H₂ na mobilidade como energia limpa seria uma mais-valia na luta contra as emissões de CO₂, mesmo o H₂ produzido através combustíveis fósseis, sendo que, com a arquitetura PFCHEV, é possível reduzir um máximo de emissões de cerca de 57% em relação ao diesel.

Tendo em conta a análise desenvolvida neste projeto, pode concluir-se que, apesar dos constrangimentos subjacentes à implementação das FC, elas constituem-se técnico-economicamente vantajosas, dada a comprovada redução de emissões de CO₂ e a apreciável competitividade de preços de mercado que promete a curto e médio prazos.

Por outro lado, a análise técnico-económica caminha lado a lado com a responsabilidade cívica que todos devemos ter na preservação do ambiente. Neste sentido, é inegável o potencial contributo das FC na diminuição do impacto ambiental ao revelar-se um recurso de emissões zero, alternativo para a construção de um mundo mais sustentável. Como tecnologia emergente para a mobilidade urbana, a FC poderá constituir uma estratégia de garantia da qualidade de vida das gerações futuras em comunhão com os demais seres vivos, pelo seu contributo para a verdadeira política de preservação do ambiente.

6.2.- Trabalhos Futuros

Para futuras investigações, seria profícuo um estudo para otimizar o controlo do BUS2, utilizando AG, de forma a reduzir o consumo de combustível e o custo do veículo. Desta forma, seria ainda mais aprimorada a eficiência do autocarro, para além do número de simulações ser consideravelmente menor.

Outra boa maneira de prosseguir o estudo, realizado nesta dissertação, seria otimizar a estratégia da gestão de energia através da utilização de um algoritmo de otimização como *fuzzy logic* para uma maior eficiência do controlo de potência para arquiteturas híbridas.

Um estudo ao autocarro FC da CaetanoBus, comparando os dados reais com os desta dissertação seria um bom ponto de partida para uma futura investigação para entusiastas pela mobilidade elétrica e tecnologias emergentes.

ANEXO A

Gráficos do ADVISOR do BUS1 e BUS2

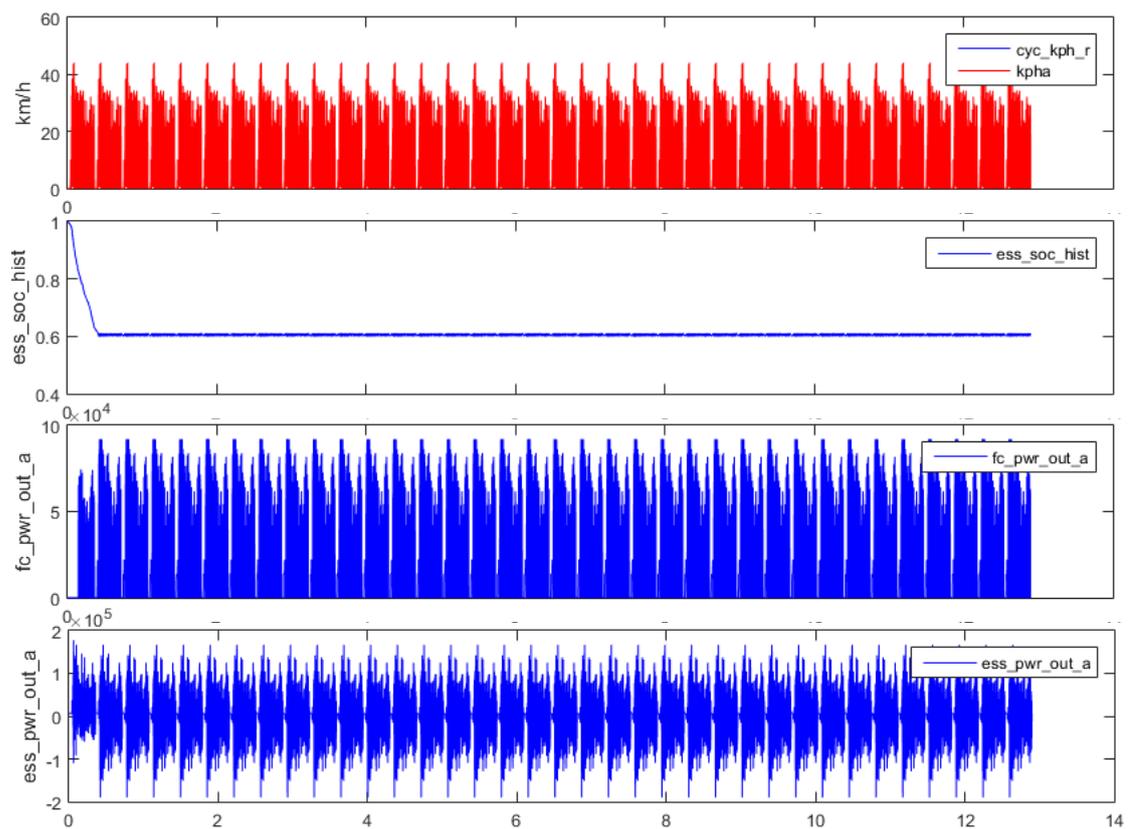


Figura A.1.-Gráficos do ciclo, SOC, potência da uma bateria e potência da FC para o caso de uma bateria 3 módulos de 43,8kWh para o BUS1.

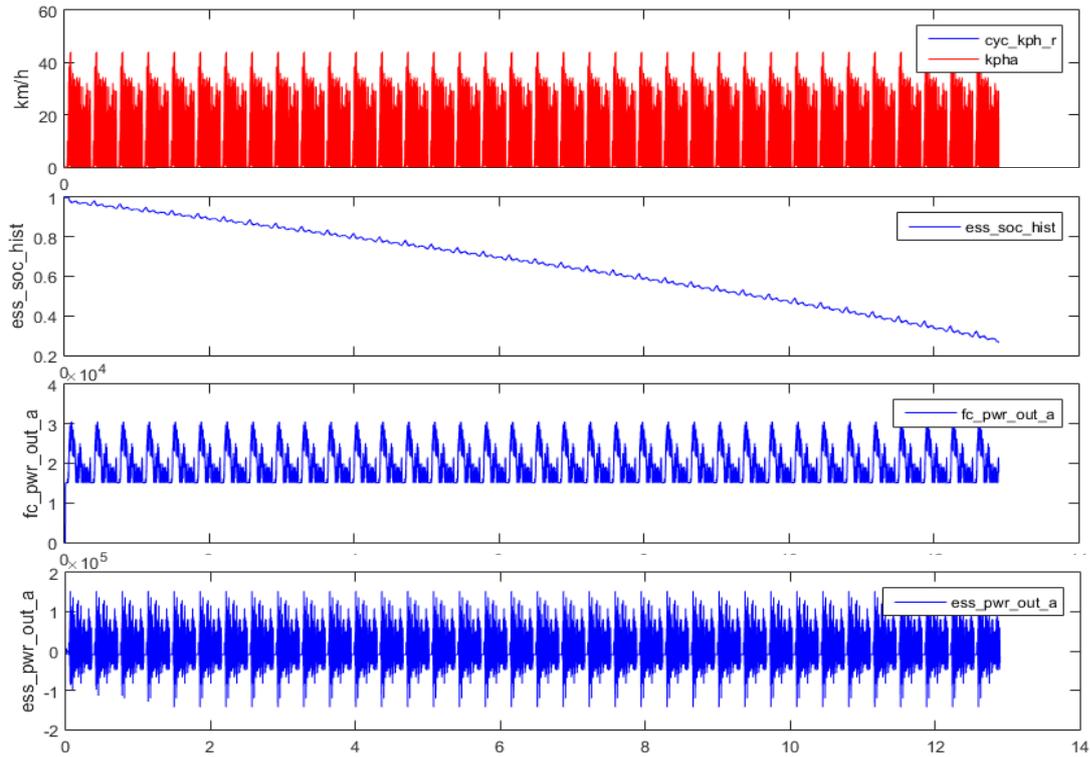


Figura A.2.-Gráficos do ciclo, SOC, potência da uma bateria e potência da FC para o caso de uma bateria 3 módulos de 43,8kWh, para o BUS2.

ANEXO B

Tipos de FC diferentes

| | AFC (Alkaline) | PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane) | DMFC (Direct Methanol) | PAFC (Phosphoric Acid) | MCFC (Molten Carbonate) | SOFC (Solid Oxide) |
|--|---|--|--|--|--|---|
| <i>Operating temp. (°C)</i> | <100 | 60-120 | 60-120 | 160-220 | 600-800 | 800-1000 low temperature (500-600) possible |
| <i>Anode reaction</i> | $H_2 + 2OH^- \rightarrow 2H_2O + 2e^-$ | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | $CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-$ | $H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$ | $H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$ | $H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2e^-$ |
| <i>Cathode reaction</i> | $\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2e^- \rightarrow 2OH^-$ | $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ | $3/2 O_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow 3H_2O$ | $\frac{1}{2} O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$ | $\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ | $\frac{1}{2} O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$ |
| <i>Applications</i> | Transportation Space Military Energy storage systems | | | Combined heat and power for decentralised stationary power systems | Combined heat and power for stationary decentralised systems and for transportation (trains, boats, ...) | |
| <i>Realised Power</i> | Small plants 5-150kW modular | Small plants 5-250 kW modular | Small plants 5 kW | Small - medium sized plants 50kW - 11MW | Small power plants 100-kW- 2 MW | Small power plants 100-250kW |
| <i>Charge Carrier in the Electrolyte</i> | OH^- | H^+ | H^+ | H^+ | CO_3^{2-} | O^{2-} |

Figura B.3.-Outros tipos de Células de combustível, por temperatura de operação, reação no ânodo, reação no cátodo, aplicação, potência e transportador de elétrons [47].

ANEXO C

Resultados do BUS1 para diferentes Baterias

Tabela C.6.1.- Resultados da influência do sistema AVAC para as várias baterias do BUS1.

| SOC 60% peso 50% | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| AVAC 50% 6kW | | | | | | AVAC 100% 12kW | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 253.6962 | 263.1804 | 268.3322 | 276.5041 | km | Max Km H2 | 200.526 | 206.2076 | 211.5247 | 215.8375 | km |
| consumo | 613.8329 | 591.6098 | 580.106 | 562.8325 | L/100km | consumo | 776.5928 | 755.0416 | 735.9005 | 721.0308 | L/100km |
| consumo | 14204.7237 | 13690.4577 | 13424.2468 | 13024.5213 | g/100km | consumo | 17971.1529 | 17472.4375 | 17029.4923 | 16685.3926 | g/100km |
| consumo | 14.2047 | 13.6905 | 13.4242 | 13.0245 | Kg/100km | consumo | 17.9712 | 17.4724 | 17.0295 | 16.6854 | Kg/100km |
| consumo HHV | 553.3741 | 533.4321 | 523.1905 | 507.7281 | kwh/100km | consumo HHV | 700.1031 | 680.8135 | 663.6997 | 650.4379 | kwh/100km |
| consumo LHV | 474.3207 | 457.2275 | 448.449 | 435.1955 | kwh/100km | consumo LHV | 600.0884 | 583.5544 | 568.8855 | 557.5182 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h | velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 53.4223 | 51.4882 | 50.487 | 48.9837 | L/100km | Equivalente em gasolina | 67.5874 | 65.7118 | 64.0459 | 62.7518 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 46.04427011 | 44.37724021 | 43.51435358 | 42.2186626 | L/100km | Equivalente em diesel | 58.25305791 | 56.63642966 | 55.20068535 | 54.08526366 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 60.9293 | 60.0265 | 60.2025 | 60.3456 | % | Fim | 60.8524 | 61.3229 | 61.2213 | 60.7151 | % |
| energia da bateria | 17.69441708 | 26.12191208 | 34.93 | 43.76896541 | kWh | energia da bateria | 17.67208463 | 26.68607036 | 35.52 | 44.03696561 | kWh |
| Km possíveis com bat | 10.90753629 | 16.00218458 | 21.43 | 26.48803637 | km | Km possíveis com bat | 10.89376969 | 16.3477858 | 21.79 | 26.65022432 | km |
| Distância final | 264.6037363 | 279.1825846 | 289.7618154 | 302.9921364 | km | Distância final | 211.4197697 | 222.5553858 | 233.3169663 | 242.4877243 | km |

Tabela C.6.2.- Resultados da influência da inclinação, para as várias baterias do BUS1

| SOC 60% _____ Paux=6KW | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Declive 0.5% | | | | | | Declive -0.5% | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 292.0595 | 303.2811 | 310.9887 | 321.2897 | km | Max Km H2 | 399.4943 | 415.1763 | 438.1844 | 454.1044 | km |
| consumo | 532.5381 | 512.6801 | 499.8035 | 483.6059 | L/100km | consumo | 390.1094 | 375.3295 | 355.5757 | 343.0625 | L/100km |
| consumo | 12323.4774 | 11863.9427 | 11565.9663 | 11191.1359 | g/100km | consumo | 9027.5316 | 8685.5088 | 8228.3865 | 7938.8183 | g/100km |
| consumo | 12.3235 | 11.8639 | 11.566 | 11.1911 | Kg/100km | consumo | 9.0275 | 8.6855 | 8.2284 | 7.9388 | Kg/100km |
| consumo HHV | 480.686 | 462.9002 | 451.4276 | 436.9542 | kwh/100km | consumo HHV | 351.4165 | 338.1429 | 320.3877 | 309.1555 | kwh/100km |
| consumo LHV | 412.0165 | 396.7716 | 386.938 | 374.5322 | kwh/100km | consumo LHV | 301.2142 | 289.8367 | 274.618 | 264.9905 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h | velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 46.3472 | 44.6189 | 43.4982 | 42.0886 | L/100km | Equivalente em gasolina | 33.9515 | 32.6652 | 30.946 | 29.857 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 39.94619836 | 38.4566279 | 37.49074279 | 36.27574713 | L/100km | Equivalente em diesel | 29.26254314 | 28.15388265 | 26.67212708 | 25.73346237 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 61.0019 | 60.9409 | 61.0123 | 61.0346 | % | Fim | 61.0367 | 60.9771 | 60.4818 | 60.5814 | % |
| energia da bateria | 17.71550078 | 26.51983428 | 35.40 | 44.26870055 | kWh | energia da bateria | 17.72560701 | 26.53558754 | 35.09 | 43.93999233 | kWh |
| Km possíveis com bat | 10.92053311 | 16.2459502 | 21.72 | 26.79046533 | km | Km possíveis com bat | 10.92676299 | 16.25560059 | 21.53 | 26.59153818 | km |
| Distância final | 302.9800331 | 319.5270502 | 332.7065709 | 348.0801653 | km | Distância final | 410.421063 | 431.4319006 | 459.7134347 | 480.6959382 | km |

Tabela C.6.3.- Resultados da influência do peso ou carga, para as várias baterias do BUS1

| SOC 60% _____ Paux=6KW | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Peso 0% | | | | | | Peso 100% | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 385.2823 | 390.7618 | 396.5395 | 399.7154 | km | Max Km H2 | 276.6081 | 283.9425 | 283.4256 | 287.1937 | km |
| consumo | 404.8643 | 399.1768 | 393.3364 | 390.1968 | L/100km | consumo | 560.4127 | 545.7002 | 546.4495 | 539.0317 | L/100km |
| consumo | 9368.9759 | 9237.3602 | 9102.2079 | 9029.5551 | g/100km | consumo | 12968.5245 | 12628.0624 | 12645.4009 | 12473.7461 | g/100km |
| consumo | 9.369 | 9.2374 | 9.1022 | 9.0296 | Kg/100km | consumo | 12.9685 | 12.6281 | 12.6454 | 12.4737 | Kg/100km |
| consumo HHV | 364.3793 | 359.2697 | 354.035 | 351.2221 | kwh/100km | consumo HHV | 507.5372 | 494.4272 | 495.3289 | 488.8299 | kwh/100km |
| consumo LHV | 312.3251 | 307.9455 | 303.4586 | 301.0475 | kwh/100km | consumo LHV | 435.0319 | 423.7947 | 424.5676 | 418.9971 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h | velocidade média | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | 11.8504 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 35.2356 | 34.7406 | 34.2323 | 33.9591 | L/100km | Equivalente em gasolina | 48.7731 | 47.4927 | 47.5579 | 46.9123 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 30.36927186 | 29.94270188 | 29.50454127 | 29.26904091 | L/100km | Equivalente em diesel | 42.03716401 | 40.93350856 | 40.98970551 | 40.43335569 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 60.8793 | 60.978 | 60.4691 | 60.5679 | % | Fim | 61.0521 | 60.0979 | 60.9779 | 60.5042 | % |
| energia da bateria | 17.67989663 | 26.53597919 | 35.08 | 43.93020071 | kWh | energia da bateria | 17.73007931 | 26.15298344 | 35.38 | 43.88399878 | kWh |
| Km possíveis com bat | 10.89858532 | 16.25584052 | 21.52 | 26.5856125 | km | Km possíveis com bat | 10.9295199 | 16.02121877 | 21.71 | 26.55765209 | km |
| Distância final | 396.1808853 | 407.0176405 | 418.0640141 | 426.3010125 | km | Distância final | 287.5376199 | 299.9637188 | 305.1312259 | 313.7513521 | km |

ANEXO D

Resultados do BUS2 para diferentes Baterias

Tabela D.6.4.-Resultados para os a bateria de dois módulos, capacidade de 29,3kWh, para os diferentes valores de K.

| Potência (kw) | Max Km H2 | consumo | consumo | consumo | consumo | consumo | consumo |
|---------------|-----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|
| kW | km | L/100km | g/100km | Kg/100k | kwh/100 | kwh/100 | LHV |
| 5 | 382.18 | 390.34 | 9032.76 | 9.03 | 367.33 | 304.86 | |
| 10 | 387.29 | 391.59 | 9061.86 | 9.06 | 362.49 | 305.71 | |
| 15 | 386.85 | 400.49 | 9267.66 | 9.27 | 361.03 | 309.46 | |
| 20 | 331.13 | 470.15 | 10879.84 | 10.88 | 423.96 | 353.40 | |
| 25 | 283.41 | 549.18 | 12708.57 | 12.71 | 495.36 | 414.59 | |
| 30 | 246.24 | 631.82 | 14621.04 | 14.62 | 570.14 | 478.69 | |
| 35 | 212.76 | 731.08 | 16917.94 | 16.92 | 659.86 | 555.59 | |
| 40 | 185.02 | 840.71 | 19454.80 | 19.45 | 758.79 | 640.39 | |
| 45 | 162.90 | 954.82 | 22095.53 | 22.10 | 861.82 | 728.70 | |
| 50 | 141.57 | 1098.79 | 25427.22 | 25.43 | 991.66 | 839.99 | |
| 55 | 129.47 | 1201.93 | 27813.87 | 27.81 | 1084.35 | 919.45 | |
| 60 | 115.94 | 1342.12 | 31058.10 | 31.06 | 1210.91 | 1027.92 | |

| km/h | L/100km | L/100km | % | % | kWh | km | km |
|-------|---------|---------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 11.85 | 116.81 | 100.67 | 100.00 | 99.92 | 29.02 | 17.89 | 133.82 |
| 11.85 | 104.60 | 90.16 | 100.00 | 99.92 | 29.02 | 17.89 | 147.35 |
| 11.85 | 95.63 | 82.42 | 100.00 | 99.91 | 29.01 | 17.89 | 159.46 |
| 11.85 | 83.10 | 71.62 | 100.00 | 99.91 | 29.01 | 17.89 | 180.78 |
| 11.85 | 73.17 | 63.06 | 100.00 | 99.90 | 29.01 | 17.88 | 202.90 |
| 11.85 | 63.63 | 54.84 | 100.00 | 99.91 | 29.02 | 17.89 | 230.64 |
| 11.85 | 54.99 | 47.39 | 100.00 | 99.90 | 29.01 | 17.88 | 264.12 |
| 11.85 | 47.80 | 41.19 | 100.00 | 99.91 | 29.01 | 17.89 | 301.29 |
| 11.85 | 40.92 | 35.27 | 100.00 | 99.91 | 29.02 | 17.89 | 349.02 |
| 11.85 | 34.85 | 30.04 | 100.00 | 98.05 | 28.47 | 17.55 | 404.41 |
| 11.85 | 34.08 | 29.37 | 100.00 | 0.47 | 0.14 | 0.08 | 82.60 |
| 11.85 | 33.97 | 29.28 | 100.00 | 0.51 | 0.15 | 0.09 | 59.00 |

Tabela D.6.5.-Resultados para os a bateria de dois módulos, capacidade de 43,8kWh, para os diferentes valores de K.

| Potência (kw) | km |
|---------------|---------|
| 5 | 406.368 |
| 10 | 417.228 |
| 15 | 388.532 |
| 20 | 330.725 |
| 25 | 282.585 |
| 30 | 245.748 |
| 35 | 212.673 |
| 40 | 184.904 |
| 45 | 162.781 |
| 50 | 144.499 |
| 55 | 129.406 |
| 60 | 115.936 |

| | | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|----------------|----------------|----------------------|--------------------------------|---------------------------|--------|---------|-----------------------|
| L/100km | g/100km | Kg/100k | kwh/100 | kwh/100 | km/h | L/100km | L/100km | % | % | kWh |
| 1342.24 | 31060.9 | 31.061 | 1210.91 | 1037.92 | 11.8506 | 100.683 | 114.663 | 100 | 99.9061 | 43.4764 |
| 1202.30 | 27822.5 | 27.8226 | 1084.86 | 929.883 | 11.8506 | 90.1860 | 102.708 | 100 | 99.9033 | 43.4752 |
| 1076.40 | 24909.0 | 24.909 | 971.554 | 832.761 | 11.8506 | 80.7419 | 91.9531 | 100 | 99.9029 | 43.4750 |
| 955.330 | 22107.3 | 22.1073 | 862.435 | 739.230 | 11.8506 | 71.6603 | 81.6105 | 100 | 99.9017 | 43.4745 |
| 841.067 | 19463.1 | 19.4632 | 759.252 | 650.788 | 11.8506 | 63.0893 | 71.8494 | 100 | 99.9036 | 43.4753 |
| 731.227 | 16921.3 | 16.9214 | 660.113 | 565.811 | 11.8506 | 54.8501 | 62.4662 | 100 | 99.902 | 43.4746 |
| 632.928 | 14646.6 | 14.6466 | 571.271 | 489.661 | 11.8506 | 47.4765 | 54.0688 | 100 | 99.9035 | 43.4753 |
| 550.663 | 12742.9 | 12.7429 | 496.801 | 425.829 | 11.8506 | 41.3058 | 47.0412 | 100 | 99.9038 | 43.4754 |
| 470.631 | 10890.8 | 10.8909 | 424.487 | 363.846 | 11.8506 | 35.3025 | 40.2044 | 100 | 99.9044 | 43.4756 |
| 400.735 | 9273.43 | 9.2734 | 361.330 | 319.712 | 11.8506 | 30.0595 | 34.2334 | 100 | 98.6663 | 42.9369 |
| 368.821 | 8534.89 | 8.5349 | 336.48 | 288.411 | 11.8506 | 27.6656 | 31.5071 | 100 | 0.27378 | 0.11914 |
| 372.526 | 8620.63 | 8.6206 | 345.472 | 296.119 | 11.8506 | 27.9435 | 31.8236 | 100 | 0.33751 | 0.14687 |
| consumo | consumo | consumo | consumo HHV | consumo LHV | velocida de média | Equivale nte em gasolina | Equivale nte em diesel | Inicio | Fim | energia da bateria |

| | |
|----------------------|-----------------|
| km | km |
| 26.6726 | 142.609 |
| 26.6719 | 156.078 |
| 26.6718 | 171.171 |
| 26.6714 | 189.453 |
| 26.6719 | 211.576 |
| 26.6715 | 239.345 |
| 26.6719 | 272.419 |
| 26.6720 | 309.257 |
| 26.6722 | 357.397 |
| 26.3416 | 414.874 |
| 0.07309 | 417.301 |
| 0.09010 | 406.458 |
| Km possíveis com bat | Distância final |

Tabela D.6.6.-Resultados da influência do sistema AVAC para as várias baterias do BUS2

| PW=25 e 35kW peso 50% | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| AVAC 50% 6kW | | | | | | AVAC 100% 12kW | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 283.4107 | 282.7309 | 282.0751 | 281.3041 | km | Max Km H2 | 206.788 | 206.4803 | 206.1476 | 205.7926 | km |
| consumo | 550.4379 | 551.7613 | 553.0442 | 554.56 | L/100km | consumo | 754.3959 | 755.52 | 756.7394 | 758.0446 | L/100km |
| consumo | 12737.6985 | 12768.3228 | 12798.01 | 12833.0877 | g/100km | consumo | 17457.4956 | 17483.508 | 17511.7248 | 17541.9291 | g/100km |
| consumo | 12.7377 | 12.7683 | 12.798 | 12.8331 | Kg/100km | consumo | 17.4575 | 17.4835 | 17.5117 | 17.5419 | Kg/100km |
| consumo HHV | 495.3549 | 496.5459 | 497.7004 | 499.0645 | kwh/100km | consumo HHV | 678.9026 | 679.9142 | 681.0115 | 682.1861 | kwh/100km |
| consumo LHV | 424.5899 | 425.6108 | 426.6003 | 427.7696 | kwh/100km | consumo LHV | 581.9165 | 582.7836 | 583.7242 | 584.731 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h | velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 47.905 | 48.0202 | 48.1318 | 48.2637 | L/100km | Equivalente em gasolina | 65.6556 | 65.7534 | 65.8595 | 65.9731 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 41.2889 | 41.3882 | 41.4844 | 41.5981 | L/100km | Equivalente em diesel | 56.588 | 56.6723 | 56.7638 | 56.8617 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 99.5886 | 99.6955 | 99.7325 | 99.7488 | % | Fim | 99.9155 | 99.9106 | 99.9082 | 99.9025 | % |
| energia da bateria | 28.92142574 | 43.38478982 | 57.87 | 72.34830338 | kWh | energia da bateria | 29.01636044 | 43.47839553 | 57.97 | 72.45978276 | kWh |
| Km possíveis com bat | 17.82830705 | 26.57735821 | 35.50 | 43.78363695 | km | Km possíveis com bat | 17.88682855 | 26.63470071 | 35.56 | 43.85110187 | km |
| Distância final | 301.2390071 | 309.3082582 | 317.5757706 | 325.0877369 | km | Distância final | 224.6748285 | 233.1150007 | 241.7108125 | 249.6437019 | km |

Tabela D.6.7.- Resultados da influência da inclinação, para as várias baterias do BUS2

| 20 KW-15kW Paux=6KW | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-----------|
| Declive 0.5% | | | | | | Declive -0.5% | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 333.9135 | 332.9227 | 331.7674 | 330.514 | km | Max Km H2 | 462.4558 | 461.502 | 460.7765 | 460.2642 | km |
| consumo | 467.1868 | 468.5773 | 470.209 | 471.9922 | L/100km | consumo | 337.3296 | 338.0267 | 338.5589 | 338.9357 | L/100km |
| consumo | 10811.1822 | 10843.3585 | 10881.1185 | 10922.3827 | g/100km | consumo | 7806.1519 | 7822.2849 | 7834.6005 | 7843.3208 | g/100km |
| consumo | 10.8112 | 10.8434 | 10.8811 | 10.9224 | Kg/100km | consumo | 7.8062 | 7.8223 | 7.8346 | 7.8433 | Kg/100km |
| consumo HHV | 420.4349 | 421.6862 | 423.1546 | 424.7593 | kwh/100km | consumo HHV | 303.5726 | 304.2 | 304.6789 | 305.018 | kwh/100km |
| consumo LHV | 360.3727 | 361.4453 | 362.7039 | 364.0794 | kwh/100km | consumo LHV | 260.2051 | 260.7428 | 261.1533 | 261.444 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h | velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 40.6596 | 40.7806 | 40.9226 | 41.0778 | L/100km | Equivalente em gasolina | 29.358 | 29.4187 | 29.465 | 29.4978 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 35.0442 | 35.1485 | 35.2709 | 35.4046 | L/100km | Equivalente em diesel | 25.3034 | 25.3557 | 25.3957 | 25.4239 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 98.3092 | 99.1095 | 99.331 | 99.4172 | % | Fim | 96.8126 | 98.092 | 98.553 | 98.769 | % |
| energia da bateria | 28.54987646 | 43.12977844 | 57.63 | 72.10779225 | kWh | energia da bateria | 28.11525035 | 42.68698992 | 57.18 | 71.63764955 | kWh |
| Km possíveis com bat | 17.59928943 | 26.4211392 | 35.36 | 43.63808478 | km | Km possíveis com bat | 17.33134876 | 26.14988862 | 35.08 | 43.35356453 | km |
| Distância final | 351.5127694 | 359.3438392 | 367.1251531 | 374.1520848 | km | Distância final | 479.7871488 | 487.6518886 | 495.857317 | 503.6177645 | km |

Tabela D.6.8.- Resultados da influência do peso ou carga, para as várias baterias do BUS2

| PW=10kW e 30kW _____ Paux=6KW | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| Peso 0% | | | | | | Peso 100% | | | | | |
| Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | | Número de Baterias | 2 Baterias | 3 Baterias | 4 Baterias | 5 Baterias | |
| Max Km H2 | 447.8712 | 446.679 | 445.5627 | 444.4127 | km | Max Km H2 | 288.3997 | 288.3997 | 287.6538 | 286.1583 | km |
| consumo | 348.3144 | 349.2441 | 350.119 | 351.0251 | L/100km | consumo | 540.9159 | 540.9159 | 542.3186 | 545.1528 | L/100km |
| consumo | 8060.3528 | 8081.8665 | 8102.1137 | 8123.0809 | g/100km | consumo | 12517.348 | 12517.348 | 12549.8085 | 12615.3958 | g/100km |
| consumo | 8.0604 | 8.0819 | 8.1021 | 8.1231 | Kg/100km | consumo | 12.5173 | 12.5173 | 12.5498 | 12.6154 | Kg/100km |
| consumo HHV | 313.4582 | 314.2948 | 315.0822 | 315.8976 | kwh/100km | consumo HHV | 486.7858 | 486.7858 | 488.0481 | 490.5987 | kwh/100km |
| consumo LHV | 268.6784 | 269.3956 | 270.0705 | 270.7694 | kwh/100km | consumo LHV | 417.2449 | 417.2449 | 418.3269 | 420.5132 | kwh/100km |
| velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h | velocidade média | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | 11.8506 | km/h |
| Equivalente em gasolina | 30.314 | 30.395 | 30.4711 | 30.55 | L/100km | Equivalente em gasolina | 47.0763 | 47.0763 | 47.1984 | 47.445 | L/100km |
| Equivalente em diesel | 26.1274 | 26.1972 | 26.2628 | 26.3308 | L/100km | Equivalente em diesel | 40.5747 | 40.5747 | 40.6799 | 40.8925 | L/100km |
| Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % | Início | 100 | 100 | 100 | 100 | % |
| Fim | 98.3333 | 98.9861 | 99.1874 | 99.2733 | % | Fim | 99.9111 | 99.9111 | 99.9013 | 99.9011 | % |
| energia da bateria | 28.55687532 | 43.0760781 | 57.55 | 72.00342086 | kWh | energia da bateria | 29.01508264 | 43.47861312 | 57.96 | 72.45876734 | kWh |
| Km possíveis com bat | 17.6035838 | 26.38824257 | 35.31 | 43.57492146 | km | Km possíveis com bat | 17.88604086 | 26.634834 | 35.56 | 43.85048736 | km |
| Distância final | 465.4747838 | 473.0672426 | 480.8693374 | 487.9876215 | km | Distância final | 306.2857409 | 315.034534 | 323.2145564 | 330.0087874 | km |

ANEXO E

FAQ's do projeto CUTE

1. É possível construir uma infraestrutura de abastecimento de H₂ para abastecer autocarros, principalmente com base em fontes de energia renováveis?

Nove estações de abastecimento foram construídas nas nove cidades europeias[17]. Foram instaladas para reabastecer frotas locais de autocarros com H₂ a 350 bar. Estas estações fornecem entre 100 a 200 kg de H₂ todos os dias. O seu custo ronda os 1,5 milhões de euros.

2. É seguro usar H₂ como combustível?

Nenhum acidente relacionado ao H₂ ocorreu durante o período de demonstração de dois anos do projeto CUTE [9]. Os riscos relacionados ao H₂ são simplesmente diferentes daqueles relacionados a outros combustíveis, e podem ser gerenciados. O CUTE mudou o estado da arte no que diz respeito às tecnologias de H₂ e FC para os transportes, um avanço significativo. Colocou a indústria, as cidades e os investigadores europeus entre os líderes globais na produção e operação de autocarros FC a H₂, bem como na produção e distribuição de H₂.

Referências

- [1] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2017», *Int. ENERGY AGENCY Together Secur. Sustain.*, vol. Executive, p. 13, 2017.
- [2] W. Meteorological e O. Wmo, *WMO Statement on the State of the Global Climate in 2017*, n. 1212. 2017.
- [3] IPCC, «Global Warming of 1.5°C. Summary for Policymakers».
- [4] P. Eickemeier *et al.*, *Climate Change 2014 Mitigation of Climate Change Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014.
- [5] M. R. Hannah Ritchie, «Energy Production & Changing Energy Sources», *Our World Data*, 2019.
- [6] I. E. Agency, «World Energy Outlook-2017», 2017.
- [7] A. Veziroglu e R. MacArio, «Fuel cell vehicles: State of the art with economic and environmental concerns», *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, n. 1, pp. 25–43, 2011.
- [8] AP2H2, «Hidrogénio: o próximo passo para a Sustentabilidade. A».
- [9] Johann Goethe, «Crystalline Undulator: Theory and Experiment», Germany, 2018.
- [10] B. Unveils e N. Generation, «Newsroom Ballard Unveils Next Generation Zero-Emission», pp. 1–5, 2018.
- [11] M. Binder, M. Faltenbacher, M. Kentzler, e M. Schuckert, «CUTE - Deliverable No. 8: Final Report», 2006.
- [12] U. Nations, «Paris Agreement», *Paris, Fr.*, 2015.
- [13] B. Kahn, «We just reached the 410 parts per million CO2 Threshold», pp. 2–4, 2017.
- [14] IPCC, «2018/24/PR IPCC PRESS RELEASE 8 October 2018», n. October, pp. 13–16, 2018.
- [15] Eurostat, «Greenhouse gas emission statistics - emission inventories - Statistics Explained», *Europa.eu*. 2018.
- [16] IPCC, *Final Government Draft- Chapter 4: Strengthening and Implementing the Global Response*, n. June 2018. 2018.
- [17] H2me, «Hydrogen Mobility Europe», *Hydrogen Refuelling Infrastructure*, 2016. [Em linha]. Disponível em: <http://h2me.eu/about/hydrogen-refuelling-infrastructure/>.
- [18] B. Biebuyck, «Sustainability and Energy security; FCH in the context of EU energy policy Stockholm», 2018.
- [19] D. Bodansky, «The History of the Global Climate Change Regime», n. January, 2001.
- [20] UN, «Kyoto Protocol to the United Nations», 1998.
- [21] Ieta.org, «International Emission Trading Association- History».
- [22] IETA, «COP24 Summary Report», 2018.
- [23] n. . 20/2013 Resolução do Conselho de Ministros, «Presidência do conselho de ministros», em *Diário da República*, n. 1º série-Nº121, 2017, pp. 3190–3228.
- [24] D. V. TV, «Governo português acredita que o hidrogénio é o futuro dos elétricos», *03.10.2018*.

- [25] H. C. November, «Hydrogen scaling up», n. November, 2017.
- [26] M. De Jong, S. Joss, D. Schraven, C. Zhan, e M. Weijnen, «Sustainable-smart-resilient-low carbon-eco-knowledge cities; Making sense of a multitude of concepts promoting sustainable urbanization», *J. Clean. Prod.*, vol. 109, pp. 25–38, 2015.
- [27] National Renewable Energy Laboratory, «Fuel Cell Transit Bus Evaluations Joint Evaluation Plan for the U . S . Department of Energy and the Federal Transit Administration», 2010.
- [28] J. Lação, «Diagnóstico do Sector de Hidrogénio em Portugal e Recomendações de Ação».
- [29] UITP, «ZeUS eBus Report: An overview of electric buses in Europe», *ZeEUS*, p. 118, 2016.
- [30] «Urbino Electric». [Em linha]. Disponível em: <https://www.solarisbus.com/en>.
- [31] L. Lucas, «El Dorado fuel cell buses complete testing, ready for service throughout California», *Fuel Cells Bull.*, vol. 2018, n. 8, pp. 2–3, 2018.
- [32] T. M. Corporation, «Toyota Unveils FC Bus Concept - Sora», pp. 3–5, 2018.
- [33] H. Klingenberg, «Clean Hydrogen in European Cities European background», *Hydrog. Fuel Cells Bus Semin. 2014 CHIC Phase 2 Work.*, n. April 2014, p. 2014, 2014.
- [34] B. Madden e B. Biebuyck, «Press release: COMMERCIALISATION OF FUEL CELL BUSES MOVES ONE STEP CLOSER WITH THE LAUNCH OF THE JIVE 2 PROJECT», n. January, 2018.
- [35] The European Union, «High VLO City», 2012. [Em linha]. Disponível em: <http://highvlocity.eu/>.
- [36] FCH-JU Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking e European Commission, «Hydrogen Europe: European Hydrogen & Fuel cell Project Database - Project HyTransit», pp. 10–11, 2018.
- [37] R. Matulka, «The History of the Electric Car», *Energy.gov*. pp. 1–11, 2014.
- [38] T. Dalgleish *et al.*, *Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles - Mehrdad Ehsani*, vol. 136, n. 1. 2005.
- [39] H. C. B. Jensen, E. Schaltz, P. S. Koustrup, S. J. Andreasen, e S. K. Kær, «Evaluation of fuel-cell range extender impact on hybrid electrical vehicle performance», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2013.
- [40] A. Meintz, M. Ferdowsi, e K. B. Martin, «Supervisory control development of a fuel cell plug-in hybrid electric vehicle», em *5th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '09*, 2009, pp. 986–991.
- [41] Y. Liu, J. Li, M. Ye, D. Qin, Y. Zhang, e Z. Lei, «Optimal energy management strategy for a plug-in hybrid electric vehicle based on road grade information», *Energies*, vol. 10, n. 4, 2017.
- [42] Ballard, «BATTERY-FUEL CELL HYBRID ELECTRIC BUSES Optimized solutions for zero-emission transit», n. November, 2018.
- [43] F. A. da Silva, «Tecnologias para Armazenamento de Energia Elétrica-TAEE», 2016.
- [44] U. Bossel, *The birth of the fuel cell*. Oberrohrdorf: European Fuel Cell Forum, 2000.
- [45] K. Kendall e B. G. Pollet, *Hydrogen and fuel cells in transport*, vol. 4. Elsevier Ltd., 2012.
- [46] L. Martins, «Fuel Cells 2- Desenvolvimento Das Pilhas De Combustível», *Fuel Cells*, vol. 2, pp. 1–23, 2003.
- [47] L. Carrette, K. A. Friedrich, e U. Stimming, «Fuel Cells - Fundamentals and Applications», *Fuel Cells*, vol. 1, n. 1, pp. 5–39, 2001.
- [48] H. A. Gasteiger Arnold Lamm Wolf Vielstich, *Handbook of Fuel Cells Vol. 1*, 1^o Edition. 2003.
- [49] TOYOTA Global Newsroom, «Toyota Launches Production Model "Sora" FC Bus». .
- [50] L. Lucas, «Van Hool to build 40 buses for Cologne and Wuppertal, with order for Ballard fuel cells», *Fuel Cells Bull.*, vol. 2018, n. 3, pp. 2–3, 2018.
- [51] J. Wang, H. Wang, e Y. Fan, «Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization», *Engineering*, vol. 4, n. 3, pp. 352–360, 2018.
- [52] Y. Yang, «PEM Fuel Cell System Manufacturing Cost Analysis for Automotive Applications», 2015.
- [53] N. R. Council, *Transitions to Alternative Vehicles and Fuels*. Washington, DC: The National Academies Press, 2013.
- [54] P. C. Baptista, C. M. Silva, e T. L. Farias, «Monitoring and Simulation of Fuel Cell Electric Vehicles», vol. 3, pp. 511–518, 2009.
- [55] J. Wang e H. A. Rakha, «Fuel consumption model for conventional diesel buses», *Appl. Energy*, vol. 170, pp. 394–402, 2016.
- [56] N.-O. Nylund e P. Koponen, *Fuel and technology alternatives for buses*. 2012.
- [57] M. Å. Saxe, A. Folkesson, e P. Alvfors, «Energy system analysis of the fuel cell buses operated in the project : Clean Urban Transport for Europe», vol. 33, n. November 2005, pp. 689–711, 2008.
- [58] C. Cockroft e A. Owen, «Hydrogen Fuel Cell Buses : an Economic Assessment Hydrogen Fuel Cell Buses : An Economic Assessment», n. November, 2014.

- [59] P. Melo, J. Ribau, e C. Silva, «Urban Bus Fleet Conversion to Hybrid Fuel Cell Optimal Powertrains», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 111, pp. 692–701, 2014.
- [60] G. A. Gonçalves, J. T. Bravo, P. C. Baptista, C. M. Silva, e T. L. Farias, «Monitoring and simulation of fuel cell electric vehicles», *World Electr. Veh. J.*, vol. 3, n. 3, pp. 511–518, 2009.
- [61] J. Ribau, «Análise de consumo eléctrico e de hidrogénio em veículos Plug-in puramente eléctricos e híbridos eléctricos c / Pilha de combustível. Master Thesis in Mechanical Engineering, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa.», 2009.
- [62] P. Dinis e B. Silva, «Configuração Óptima de um Autocarro Híbrido a Hidrogénio para Frotas Urbanas : caso de estudo Lisboa e Funchal Engenharia Mecânica Júri», 2014.
- [63] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, e S. D. Burch, «ADVISOR 2.1: A user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 48, n. 6, pp. 1751–1761, 1999.
- [64] K. W. Chew, C. K. Koay, e Y. R. Yong, «ADVISOR Simulation of Electric Vehicle Performance on Various Driving Cycles», vol. 1, n. 8, pp. 70–76, 2014.
- [65] T. Markel *et al.*, «ADVISOR: a Systems Analysis Tool for Advanced Vehicle Modelling», *J. Power Sources*, vol. 110, pp. 255–266, 2002.
- [66] E. Aftertreatment, «Chapter 3 : How ADVISOR works – ADVISOR Documentation», pp. 1–5, 2003.
- [67] R. D. Senger, D. J. Nelson, W. F. O. Brien, W. R. Saunders, e R. D. Senger, «Validation of Advisor», 1997.
- [68] H. S. Das, C. W. Tan, e A. H. M. Yatim, «Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 76, n. March, pp. 268–291, 2017.
- [69] M. J. Ogburn e C. F. Reinholtz, «Systems Integration , Modeling , and Validation of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle by Systems Integration , Modeling , and Validation of a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle», *Fuel Cell*, 2000.
- [70] P. Rama, R. Chen, e J. Andrews, «A review of performance degradation and failure modes for hydrogen-fuelled polymer electrolyte fuel cells», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy*, vol. 222, n. 5, pp. 4214–441, 2008.
- [71] P. Id e S. Country, «HYFLEET : CUTE Report Summary», pp. 1–2, 2005.
- [72] A. Euro *et al.*, «Setra ComfortClass e Mercedes Citaro Recorde de consumo para autocarros Euro 6 da EvoBus», pp. 5–6, 2012.
- [73] 70327 Stuttgart BUS/MPM-B voBus GmbH, Mercedesstraße 127/6, «Citaro City Mercedes Benz». 2017.
- [74] Element Energy Ltd, «Economic Case for Hydrogen Buses in Europe-FCH JU&Ballard», n. May, 2017.

