

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS ARARANGUÁ

POLÍBIO ÍCARO MORO CAPO

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
ENERGIA**

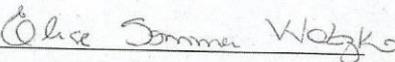
ARARANGUÁ, 2016

POLÍBIO ÍCARO MORO CAPO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na
modalidade de artigo científico para a
aprovação - na disciplina de Trabalho de
Conclusão de Curso do curso de Engenharia
de Energia da Universidade Federal de Santa
Catarina - Campus Araranguá

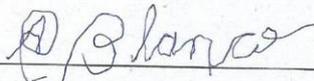
Aprovado em: 01/12/16



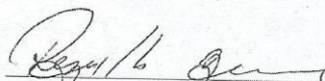
Profª. Dra. Elise Sommer Watzko (Orientadora)



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Examinador)



Engenheiro Mecânico Alberto Blanco (Examinador)



Prof. Dr. Reginaldo Jeremias (Supervisor)

MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DE UM VEÍCULO ELÉTRICO MOVIDO A CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL

Políbio Ícaro Moro Capo*

RESUMO

Os sistemas de tração veicular alternativos (híbrido, hidrogênio, elétrico) são uma resposta direta ao problema das emissões em áreas urbanas muito congestionadas. No Brasil, não existe opção no mercado de veículos elétricos a célula de combustível e poucos trabalhos são identificados na literatura. Portanto, o projeto e a otimização deste tipo de veículo através de modelos matemáticos podem trazer muitos benefícios. O uso de uma plataforma virtual ajuda a limitar gastos com atividades experimentais caras e demoradas. O presente trabalho teve o objetivo geral de modelar matematicamente e simular um veículo elétrico movido a células de combustível. Para tanto, foram utilizados perfis de condução e dados do veículo Toyota Mirai a fim de determinar a autonomia, consumo de hidrogênio e variações de potência nas células de combustível. Os resultados obtidos mostram que a modelagem matemática e simulação são ferramentas que podem auxiliar na tomada de decisões sobre o projeto de um veículo elétrico. Além disso, verificou-se que a autonomia e consumo de hidrogênio podem ser determinados através de diversos ciclos de condução.

Palavras-chave: modelagem matemática, veículos elétricos, célula de combustível.

1 INTRODUÇÃO

*Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas, Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP: 88906-072. E-mail: polibiomoro@hotmail.com

Os sistemas de tração veicular alternativos (híbrido, hidrogênio, elétrico) são uma resposta direta ao problema das emissões em áreas urbanas muito congestionadas (CIPOLLONE et al. 2014). Os veículos elétricos com bateria e de célula de combustível são cada vez mais predominantes no setor de transporte, devido a preocupações crescentes sobre a mudança climática, a poluição do ar urbano e a dependência do petróleo (LI, ZHANG, LI, 2016). Este fato é verdadeiro se a energia elétrica for gerada a partir de fontes renováveis. Portanto, os veículos elétricos podem ser usados para reduzir as emissões de carbono (LARMINIE, LOWRY, 2012).

Segundo Baran (2012) uma barreira enfrentada é que os híbridos e elétricos, atualmente, dependem de incentivos governamentais para serem economicamente atrativos ao consumidor final. Em lugares como Alemanha, Califórnia (E.U.A.), Dinamarca e China, estão em curso políticas de incentivo à fabricação e aquisição de veículos elétricos puros. Conforme Machado (2015), para proporcionar a inclusão do veículo elétrico no Brasil, seria necessário a implantação de uma infraestrutura, criação de estímulos para sua produção e comercialização através da redução ou isenção de alguns impostos. Ou seja, o apoio governamental para esse setor será fundamental.

De qualquer forma, a oferta real no mercado sobre veículos elétricos ainda é muito limitada e muito dispendiosa para atingir uma penetração relevante. Veículos elétricos de célula de combustível estão sendo introduzidos no mercado, o primeiro foi Toyota Mirai lançado em 2015. É evidente que é necessário um esforço profundo no desenvolvimento e na normalização dos produtos e que todos os subsetores do mercado devem ser considerados (CIPOLLONE, 2014).

No Brasil, não existe no mercado uma opção de veículos elétricos à célula de combustível e poucos trabalhos são identificados na literatura. Portanto, o projeto e a otimização deste tipo de veículo através de modelos matemáticos podem trazer muitos benefícios. O uso de uma plataforma virtual ajuda a limitar gastos com atividades experimentais caras e demoradas.

Diante dos pressupostos, o objetivo deste trabalho é modelar matematicamente e simular um veículo elétrico movido a células de combustível. Para tanto, foram utilizados perfis de condução e dados do veículo Toyota Mirai a fim de determinar a autonomia, consumo de hidrogênio e variações de potência nas células de

combustível. Os resultados obtidos mostram que a modelagem matemática e simulação são ferramentas que podem auxiliar na tomada de decisões sobre o projeto de um veículo elétrico. Além disso, verificou-se que a autonomia e consumo de hidrogênio podem ser determinados através de diversos ciclos de condução. Por fim, a metodologia utilizada atendeu de forma satisfatória ao objetivo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir estão descritos os principais pressupostos teóricos relacionados ao tema da presente pesquisa.

2.1 Breve histórico dos veículos elétricos

O surgimento dos veículos elétricos (VEs) se dá através do desenvolvimento de dispositivos de armazenamento de energia elétrica em conjunto com o motor elétrico. Em 1800, Alessandro Volta criou a primeira bateria conhecida “a bateria de Volta”. Michael Faraday descobriu a indução eletromagnética em 1831, onde demonstrou a relação entre magnetismo e corrente elétrica (CORRÊA, 2013).

Segundo Larminie e Lowry (2012), uma das primeiras locomotivas elétricas foi construída em 1837 pelo químico Robert Davidson, esta era alimentada por baterias não recarregáveis. Os primeiros bondes elétricos foram instalados experimentalmente em São Petersburgo, Rússia, em 1880.

Conforme Corrêa (2013), no período entre 1870 e 1881 surgiram os primeiros veículos elétricos para estradas. O lançamento do primeiro veículo elétrico ocorreu em 1881 pela *Paris Onibus Company*. Em 1882, na Inglaterra, William Ayrton e John Perry criaram um veículo elétrico com uma bateria de chumbo ácido. Esse veículo foi capaz de percorrer uma distância entre 16 a 40 km, de acordo com as condições do terreno, e a uma velocidade máxima de 14 km/h. Devido à sua velocidade, o veículo sofreu resistência através da lei “*Red Flag Act*” que limitava a utilização dos automóveis nas estradas a fim de não perturbar os cavalos que estivessem transitando por estas vias. Esta lei introduziu severas restrições sobre todos os

veículos tracionados mecanicamente nas ruas britânicas até sua reformulação em 1896.

Conforme Machado (2015), os veículos elétricos dessa época atraíam o público devido as suas características, tais como o baixo nível de ruído, a baixa trepidação, a não emissão de poluentes, principalmente a espessa fumaça em forma de fuligem emitida pelos veículos com motor de combustão. Além disso, proporcionavam maior conforto aos condutores como também evitavam assustar os cavalos. A maior facilidade de controle e condução, a menor necessidade de alavancas e comandos eram outras características superiores dos veículos elétricos em relação aos veículos a vapor e a gasolina.

Segundo Corrêa (2013) os veículos elétricos obtiveram os primeiros recordes de velocidade, atingindo 63 km/h em um percurso de mil metros. O belga Camille Jenatz construiu em 1899, um automóvel elétrico denominado “Le Jamais Contente”. Este veículo, visto na Figura 1, foi o primeiro a quebrar a barreira dos 100 km/h. Na época, a indústria dos veículos elétricos possuía uma rede industrial e tecnológica bem desenvolvida e com fácil acesso a fornecedores, pois utilizava componentes dos bondes elétricos, que eram o principal meio de transporte público das grandes cidades.



Figura 1 - Veículo de Camille Jenatz, o “Le Jamais Contente” Fonte: (LA FRANCE, 2016).

Conforme, Larminie e Lowry (2012), no início do século XX, os veículos elétricos eram fortes candidatos para dominar o transporte rodoviário. Se era necessário desempenho, os carros elétricos eram melhores do que os movidos a

vapor ou combustão interna. O veículo elétrico era relativamente confiável e ligava instantaneamente, enquanto que os veículos com motor de combustão interna estavam em um momento não tão confiável, expeliam fumaça malcheirosa e precisavam ser manualmente iniciados através de manivelas. O outro candidato, o veículo motor a vapor, possuía, relativamente, baixa eficiência térmica.

Apesar das qualidades em geral dos VEs, segundo Baran (2012), em termos de estratégia comercial, os fabricantes dos automóveis elétricos ou eram monopolistas, ou procuravam vender produtos caros a consumidores de alto poder aquisitivo. Já os fabricantes de automóveis a gasolina visavam o consumo de massa, e, para eles, o preço era um fator chave. Os fabricantes de automóveis a vapor eram avessos ao consumo de massa e se preocupavam em desenvolver produtos de alta performance, sem se importar com aspectos como preço e formas de pagamento.

Conforme Larminie e Lowry (2012), por volta do ano de 1920 centenas de milhares de veículos elétricos foram produzidos para uso como carros de passeio, vans, táxis, veículos de entrega e ônibus. No entanto, o petróleo estava barato e era amplamente disponível, ao contrário da rede de distribuição de energia elétrica que era deficitária. Este fato, tornou mais fácil o acesso ao veículo com motor a combustão em comparação ao motor elétrico, em termos de autonomia e pela facilidade na distribuição de combustíveis líquidos.

Conforme Baran (2012), a década de 70 foi uma época propícia para o desenvolvimento dos veículos elétricos que combinavam baixa emissão de poluentes com a possibilidade de utilizar energias renováveis. No entanto, os protótipos desenvolvidos nessa década nunca chegaram a ser produzidos e colocados no mercado, principalmente, devido ao fato de ser impossível atender à demanda com a tecnologia de bateria então existente.

Em 1990, o *Impact* foi introduzido pela General Motors (GM) como um protótipo. Esse veículo contribuiu com muitas tecnologias avançadas para a introdução do modelo de série EV1, Figura 2, em 1996, no mercado americano. O carro foi oferecido apenas como locação e não era vendido. A GM queria um grupo seletivo de clientes que tinham um pensamento "verde", uma renda anual acima de US\$ 125.000,00 e queriam usar o EV1 como um segundo carro (ANDERSON, ANDERSON, 2010). Segundo Sperling e Gordon (2009), o EV1 é uma das realizações mais impressionantes da GM, entretanto não foi bem comercializado e, em seguida, a

empresa rapidamente desistiu quando as vendas foram lentas. O EV1 estava disponível até 1999 e foi descontinuado em 2003.



Figura 2 – General Motors EV1 (Fonte: SMITHSONIAN COLLECTION, 2016).

Corrêa (2013), afirma que, em 1997, a fabricante japonesa de automóveis Toyota, lançou no mercado japonês o seu híbrido Prius, que teve uma boa aceitação no mercado. Segundo o autor, naquela época as montadoras europeias se dedicavam ao desenvolvimento de automóveis a diesel, visando reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Desta forma, os elétricos não despertavam o interesse. No final da década de 1990, a Honda foi a primeira empresa a lançar um híbrido no mercado norte-americano, o *Insight*, que foi um sucesso imediato, o que levou sua rival japonesa a lançar, no ano 2000, o Prius no mercado norte-americano, obtendo um sucesso muito maior que o esperado pela Toyota, que viria se repetir no mercado europeu mais tarde.

Excetuando-se as fabricantes tradicionais de veículos, destaca-se a Tesla Motors. O seu primeiro veículo, Tesla Roadster, foi lançado em 2008. Em 2012, a empresa lançou o *Model S*, Figura 3, o primeiro sedan elétrico *premium* do mundo. Esse veículo foi nomeado Carro do ano da *Motor Trend* 2013 e obteve uma classificação de segurança de 5 estrelas da *National Highway Traffic Safety Administration* - EUA (TESLA, 2016).



Figura 3 – Tesla Model S (Fonte: TESLA, 2016).

Segundo Machado (2015), atualmente existem, basicamente, três tipos de automóveis elétricos a venda no mercado para o consumidor: o Veículo Elétrico a Bateria (VEB), os Veículos Elétricos Híbridos (VEH), e por fim, os Veículos Elétricos Híbridos Plug-in (VEHP). Complementarmente, adiciona-se a informação de que se encontra em alguns mercados, por exemplo, o americano, uma nova tecnologia de veículos elétricos: os veículos elétricos abastecíveis. Como exemplo, existem os veículos que utilizam células de combustível para fornecer a energia elétrica ao sistema.

2.2 Tipos de veículos elétricos

A seguir serão descritos os conceitos básicos sobre as principais tecnologias de veículos elétricos.

2.2.1 Veículos elétricos a bateria

O esquema do VEB é apresentado de maneira conceitual na Figura 4. O veículo consiste de uma bateria elétrica para armazenamento de energia, um motor elétrico e um controlador de carga. A bateria é recarregada normalmente a partir da rede elétrica através de um cabo e uma unidade de carregamento que pode ser embutida ao veículo, ou montada no ponto de carregamento (LARMINIE, LOWRY, 2012).

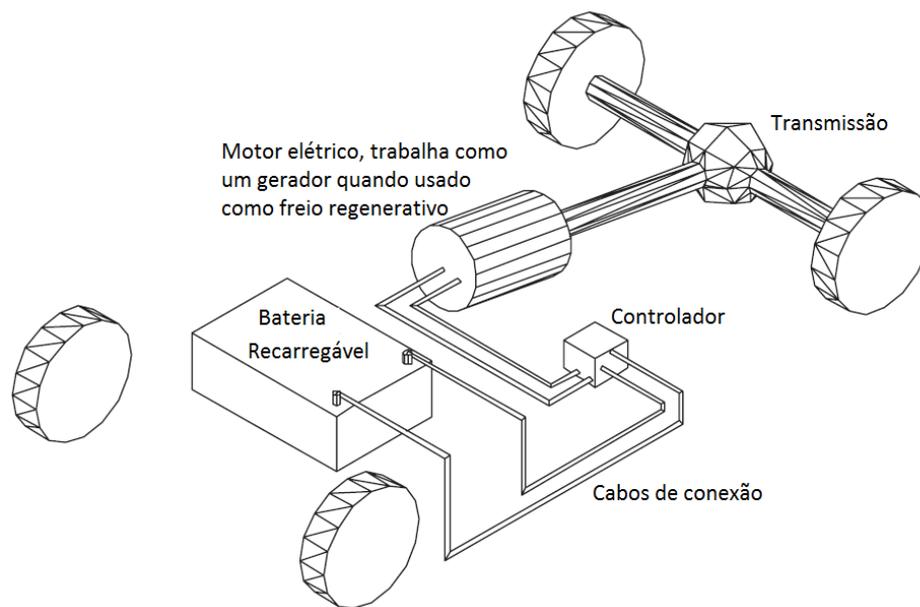


Figura 4 – Conceito de veículo elétrico à bateria (Fonte: LARMINIE, LOWRY, 2012, adaptado).

O controlador irá controlar a energia fornecida ao motor e, portanto, a velocidade do veículo. Normalmente é desejável a utilização de freios regenerativos, tanto para recuperar energia e como uma forma conveniente de frenagem. Há uma certa variedade de VEs deste tipo atualmente disponíveis no mercado, desde pequenas bicicletas, triciclos elétricos e veículos suburbanos pequenos. Vários fabricantes lançaram modelos comerciais. Por exemplo, podem-se encontrar modelos da BMW, Nissan, Mitsubishi, Tesla, entre outros.

2.2.2 O veículo híbrido motor elétrico/de combustão interna

Um veículo híbrido é um automóvel que possui mais de um motor de propulsão. A forma mais empregada e estudada de veículos híbridos é a que combina motor de combustão interna e motor elétrico (BORBA, 2012). Existem duas possibilidades básicas para veículos híbridos: o híbrido série e o híbrido paralelo (LOWRY, LARMINIE, 2012).

O sistema híbrido série, Figura 5, é aquele em que o motor elétrico é o responsável pela tração do veículo. O motor a combustão interna tem a função de gerar a energia necessária para o funcionamento do motor elétrico. Portanto, o motor

a combustão interna (CI) aciona um gerador, cuja energia pode ser utilizada para carregar as baterias e/ou acionar o motor elétrico (MACHADO, 2015).

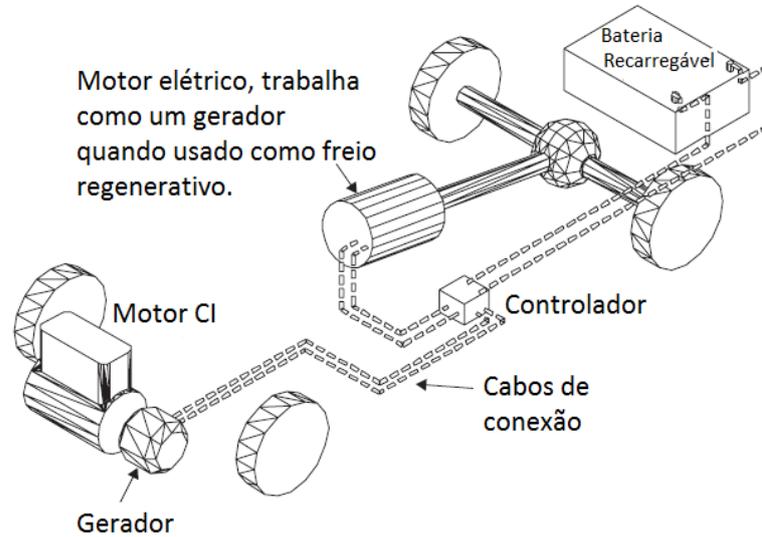


Figura 5 – Configuração do tipo híbrido série (Fonte: LARMINIE, LOWRY, 2012, adaptado).

Borba (2012) diz que o segundo tipo é o híbrido paralelo, Figura 6, em que o motor a combustão interna e o motor elétrico atuam de forma independente no acionamento das rodas do veículo, e o regime de funcionamento destas duas fontes de potência varia segundo a solicitação de carga do veículo. Portanto, os dois sistemas, o elétrico e a combustão interna, podem entregar energia diretamente ao eixo do veículo, conjuntamente ou de forma independente, conforme as solicitações de carga.

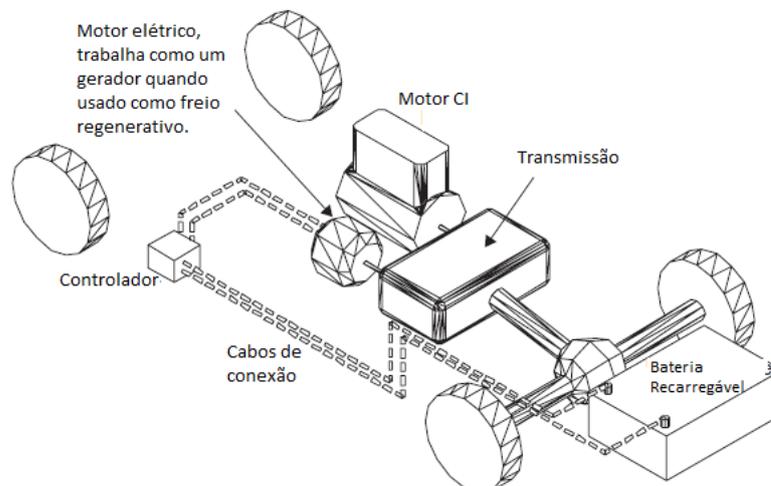


Figura 6 – Configuração do tipo híbrido paralelo (Fonte: LERMANIE, LOWRY, 2012, adaptado).

Existem vários veículos híbridos atualmente no mercado e este é um setor que deve crescer rapidamente nos próximos anos, principalmente, devido a maior autonomia quando comparados aos VEB. Diante dessa característica, surgem os veículos elétricos abastecíveis que utilizam o mesmo princípio dos híbridos convencionais com a vantagem de utilizarem combustíveis renováveis.

2.2.3 Veículos elétricos abastecíveis

O princípio básico de VEs que utilizam combustível é o mesmo que o VEB, mas com uma célula de combustível que pode substituir a bateria recarregável, ou utilizar em conjunto as tecnologias (LARMANIE, LOWRY, 2012). Na maioria dos casos, o motor de combustão interna é substituído por uma célula de combustível que atua como fonte contínua de energia, mas que deve ser acoplada a uma bateria secundária se a energia da frenagem regenerativa for recuperada, como mostrado esquematicamente na Figura 7.

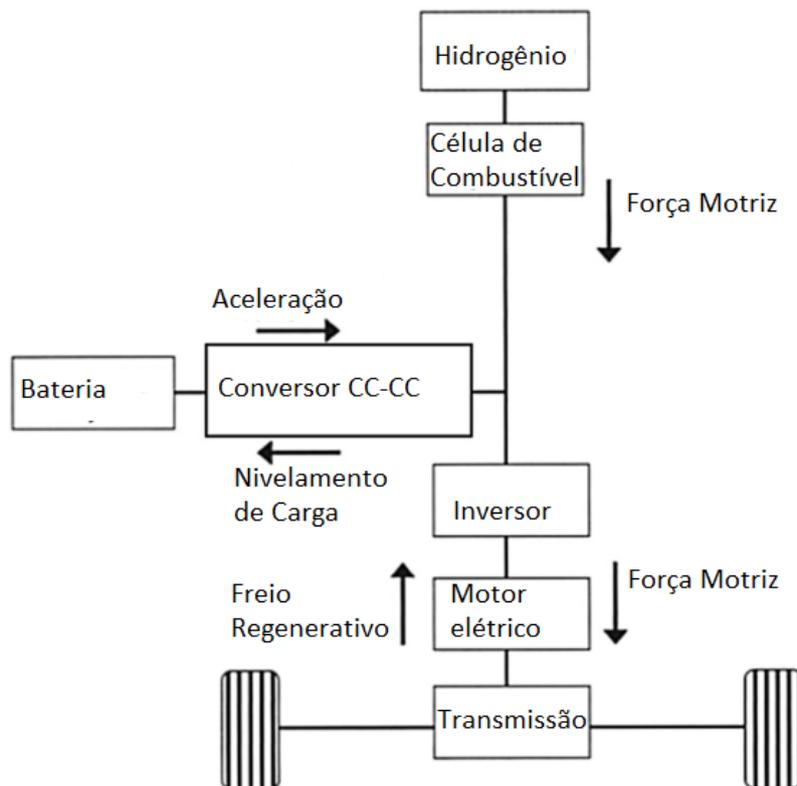


Figura 7 – Configuração do tipo abastecível (Fonte: SPERLING, GORDON, 2009, adaptado).

Segundo Larmanie e Lowry (2012), uma das desvantagens do uso de células de combustível é o armazenamento do combustível. O hidrogênio pode ser armazenado a bordo, embora isto não seja fácil. Uma alternativa é fazer com que ele seja obtido a partir de um combustível, tal como metanol. O carro pode ser reabastecido com metanol da mesma maneira como um veículo normal com gasolina. O hidrogênio poderia ser obtido através do processamento em um "reformador" a bordo do veículo. Verificou-se ser mais prático, no entanto, fornecer hidrogênio puro a partir de uma fonte externa para um tanque de armazenamento pressurizado montado no veículo. A Figura 8, representa sistema híbrido célula de combustível/bateria utilizado no veículo Toyota mirai, onde o hidrogênio puro é armazenado a bordo do veículo.



Figura 8 – Esquema dos tanques de hidrogênio no Toyota Mirai (Fonte: TOYOTA, 2016).

Os tanques podem ser reabastecidos com gás comprimido, mas a provisão de uma infraestrutura necessária para fornecer o hidrogênio convenientemente, ou seja, a partir de estações amplamente distribuídas como as estações de convencionais de gasolina, continua a ser uma questão significativa. Com isso, ciclos de condução tem sido adotados para estimar a autonomia desses veículos.

2.3 Ciclos de condução

Um ciclo de condução, geralmente, representa um conjunto de pontos de velocidade do veículo em função do tempo. É usado para avaliar o consumo de combustível e emissões poluentes de um veículo, de modo que diferentes tipos de veículos possam ser comparados (ARAÚJO, 2015). Hoje em dia, estes ciclos também

estão sendo utilizados para a certificação de veículos elétricos híbridos e os puramente elétricos (BENTO, 2015).

O ciclo de condução é um modelo composto de um conjunto diferente de parâmetros: velocidade, distância, aceleração, tempo de condução, duração e frequência de partidas e paradas com objetivo de simular um padrão próximo da realidade (TANAKA, apud BENTO, 2015).

Existem dois tipos e ciclos de condução, os modais e os transientes. A principal diferença é que os ciclos modais são uma compilação de aceleração em linha reta e de períodos de velocidade constante e não são representativos de comportamento de condução real, enquanto os ciclos transientes envolvem muitas variações de velocidade, típicas de condução em estrada (ARAÚJO, 2015).

Segundo Bento (2015), existem variados modelos de ciclos de condução, e os principais são divididos em 3 grandes grupos:

1. Ciclos de condução europeus; (EDC – *European Driving Cycles*);
2. Ciclos de condução norte-americanos; USDC – *United States Driving Cycles*);
3. Ciclos de condução japoneses; (JDC – *Japanese Driving Cycles*).

Durante a fase de projeto é interessante analisar o comportamento do veículo nesses ciclos de condução. A utilização de uma modelagem matemática adequada pode fornecer dados importantes sobre o comportamento do veículo antes que seja construído um protótipo.

2.4 Modelagem de veículos elétricos

A modelagem matemática dos veículos elétricos permite modificar parâmetros de interesse e avaliar os efeitos ocasionados no desempenho do veículo. Por exemplo, a autonomia, que é uma característica extremamente importante dos veículos elétricos, pode ser modelada matematicamente. Outros parâmetros podem ser considerados, como alterações no valor da massa e aspectos de *design*, permitindo verificar o impacto no desempenho dos motores elétricos. Portanto, a modelagem matemática torna-se uma ferramenta para auxiliar as decisões dos

projetistas. Segundo Daina, Sivakumar e Polak (2016), na literatura o uso de veículos elétricos é modelado com uma variedade de abordagens: modelagens de componentes, conexão à rede de distribuição, análises energéticas e ambientais.

Diante do avanço tecnológico das baterias, são encontrados diversos trabalhos sobre a modelagem de veículos que as utilizam como fonte de energia elétrica. Autores como Mesbahi et al. (2016) apresentam a modelagem de uma bateria Li-íon para aplicação em veículos elétricos. O desempenho do modelo foi avaliado sob diferentes condições dos ciclos de carga e descarga da bateria, bem como através da utilização de ciclos de condução.

Wager, Whale e Braunl (2016) utilizam em seu estudo os carros Nissan Leaf e o Mitsubishi i-MiEV. Os automóveis foram testados em estrada para determinar os consumos reais de energia e para coletar dados para calcular a autonomia. A fim de simular limites mais altos de velocidade, os vários componentes da demanda de energia das baterias foram modelados matematicamente e o consumo de energia dos carros foram calculados para estimar a autonomia a estas velocidades.

Os autores Fotouhi e colaboradores (2016), afirmam que a maioria dos trabalhos existentes foi realizado em tecnologia de íons de lítio (Li-ion), mas essa tecnologia está prestes a atingir os seus limites teóricos. Novas pesquisas estão explorando tecnologias promissoras de próxima geração, tais como lítio-enxofre (Li-S). Os autores analisam e discutem várias abordagens para modelagem da bateria, incluindo modelos matemáticos, modelos eletroquímicos e modelos de circuitos elétricos equivalentes.

Trabalhos como o de Boynuegri et al. (2014), avaliam questões como a conexão dos veículos elétricos à rede de distribuição. Os autores avaliam a mitigação dos problemas de qualidade de energia. Também realizam a comparação de diferentes estratégias de carregamento do VE. Por fim, uma análise experimental da estrutura proposta é efetuada.

Colonetti (2015) em seu estudo desenvolve um modelo para a avaliação do impacto da integração em larga escala de veículos elétricos na adequação de sistemas de geração. Os resultados mostram que o impacto da integração em larga escala de VEs na adequação de sistemas de geração depende do critério usado pelos proprietários no momento de decidir por carregar ou não seus automóveis.

Mahmud e Town (2016) demonstram em seu trabalho uma revisão das muitas ferramentas de simulação para modelar e gerenciar o impacto dos veículos elétricos em redes de distribuição de energia e aplicações associadas. Os autores identificaram cento e vinte e cinco ferramentas de simulação. As aplicações típicas das ferramentas incluem análise do sistema e controle do veículo, energias renováveis, integração de veículo à rede e análise de impacto, o comportamento do mercado de energia e agendamento de carga, gerenciamento de energia do veículo, e simulação do sistema de tráfego.

Conforme visto anteriormente, na literatura acerca dos veículos elétricos, as modelagens de componentes, principalmente baterias, conexão à rede de distribuição, análises energéticas e ambientais são amplamente estudadas por diversos autores. Diante do objetivo deste trabalho, identificou-se que na modelagem de veículos movidos à células de combustível os trabalhos caminham para a mesma direção dos veículos movidos a bateria e híbridos, principalmente em relação a modelagem de componentes do sistema, análises energéticas e ambientais.

Li, Zhang e Li (2016) efetuam um estudo teórico no qual apresentam os resultados das análises para VEB e veículos movidos a células de combustível (FCVEs) utilizando diferentes recursos energéticos e vias tecnológicas na China. O trabalho verifica o uso total de energia e emissão de gases de efeito estufa (GEE). Os tipos de energia incluem carvão, gás natural, energia renovável e recursos energéticos nucleares.

Fernandez, Cilleruelo e Martinez (2016) apresentam um conceito de extensão de autonomia com base em um FCVE. Um estudo é então desenvolvido, a fim de determinar as condições de trabalho que levarão a uma melhor eficiência e desempenho, referindo-se à capacidade de ambas as fontes de energia: eletricidade armazenada em uma bateria Li-Ion e gás hidrogênio em tanques de alta pressão.

Mallouh et al. (2016) analisam o desempenho de um veículo híbrido que utiliza célula de combustível e baterias através de diferentes ciclos de condução ao redor do mundo. Inicialmente, um modelo matemático é desenvolvido para representar o comportamento de um veículo de médio porte com motor à combustão interna (VCI). A validação é feita experimentalmente, uma vez validado é modificado com a inclusão de um motor elétrico alimentado por um sistema híbrido de células de combustível e

baterias. O efeito do padrão de condução, que varia de cidade para cidade e de região para região, é investigado.

Mokrani, Rekioua e Rekioua (2014), apresentam a modelagem, controle e gerenciamento de energia de um sistema híbrido de geração que utiliza módulos fotovoltaicos, células de combustível e um banco de baterias para o fornecimento de energia a um veículo elétrico. O sistema é usado para produzir energia sem interrupção. A simulação do modelo matemático de gerenciamento da geração energia e da alimentação do veículo é realizada em Matlab / Simulink.

Cipollone et al. (2014) avaliam a utilização ótima da energia da célula de combustível e da bateria por fluxos de energia e pela potência necessária em um ciclo de condução urbano. Com o método proposto, a configuração ideal pode reduzir a potência necessária e o peso dos componentes, economizando o combustível e reduzindo emissões CO₂.

Larminie e Lowry (2012) apresentam um guia com os princípios, *design* e aplicações da tecnologia do veículo elétrico. Os autores realizam uma cobertura dos principais aspectos de projeto, explicam o funcionamento e algumas das equações que regem os fenômenos relacionados aos veículos elétricos, sejam eles a bateria, híbridos e a célula de combustível.

Ao revisar a literatura, identificou-se que a maior parte dos autores modelam e simulam componentes específicos e/ou aplicam a estudos de casos em cidades ao redor do mundo. Além disso, poucos trabalhos brasileiros que avaliam a tecnologia de células de combustíveis em veículos elétricos foram encontrados nas principais bases de dados. Diante dos pressupostos, torna-se interessante avaliar o desempenho dos VEs utilizando uma modelagem que englobe o veículo como um todo. Portanto, o objetivo deste trabalho é modelar matematicamente e simular um veículo elétrico movido a células de combustível. Para tanto, utiliza-se perfis de condução e dados do veículo Toyota Mirai a fim de determinar a autonomia, consumo de hidrogênio e variações de potência nas células de combustível.

3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho estão descritos nas seções que se seguem.

3.1 Modelagem do veículo

A metodologia utilizada neste trabalho consiste em uma adaptação ao trabalho realizado por Larminie e Lowry (2012). Os autores apresentam algumas das equações que regem os fenômenos relacionados aos veículos elétricos. Entretanto, utilizam como referência os dados do veículo, descontinuado pela GM, o EV1 de 1996. Este utilizava baterias de Ni-MH (Níquel – Metal Hidreto). Portanto, neste trabalho adapta-se as equações e os dados para o veículo Toyota Mirai, Figura 9. Este é considerado o primeiro veículo do mundo, de produção em série, movido a células de combustível.



Figura 9 – Toyota Mirai (Fonte: TOYOTA, 2016).

Como visto, o princípio básico dos VEs abastecíveis é o mesmo que o VEB, mas com uma célula de combustível que pode substituir a bateria recarregável, ou utilizar em conjunto as tecnologias para alimentar o motor elétrico. Esses sistemas não são perfeitos e ocorrem diversos tipos de perdas, como por exemplo, perdas no motor elétrico.

3.1.1 Motor elétrico e perdas

As principais fontes de perdas podem ser consideradas as mesmas para quase todos os tipos de motores elétricos. Diante desse fato, neste trabalho considera-se que o veículo utiliza o motor elétrico de corrente contínua (CC) do tipo escovado. As perdas podem ser divididas em quatro tipos principais, conforme apresentado por Larminie e Lowry (2012).

Em primeiro lugar, existem as perdas no cobre. Estas são causadas pela resistência elétrica dos fios (e escovas) do motor. Isso faz com que haja aquecimento e, portanto, um pouco da energia elétrica fornecida é transformada em energia térmica. As perdas no cobre são determinadas pela Equação 1.

$$\text{Perdas no cobre} = k_c T^2 \quad (1)$$

Onde k_c é uma constante que depende da resistência das escovas, da bobina e também do fluxo magnético. Neste trabalho, considera-se o valor de $k_c=0,3$, conforme Larminie e Lowry (2012).

A segunda fonte importante de perdas são as perdas no ferro. Elas são causadas por efeitos magnéticos no ferro do motor, em especial no rotor. Existem duas principais causas destas perdas. A primeira é chamada de perda por histerese, que é a energia necessária para magnetizar e desmagnetizar o ferro continuamente, alinhar e realinhar os dipolos magnéticos. Em um bom ferro, essa perda deve ser muito pequena, mas não será zero. A segunda perda no ferro resulta do fato de que o campo magnético variável irá gerar uma corrente no ferro. Esta corrente provoca aquecimento e é chamada de corrente de Foucault.

As perdas no ferro são proporcionais à frequência em que ocorrem mudanças no campo magnético. A taxa de variação do fluxo magnético é diretamente proporcional à velocidade do rotor. Assim, pode-se dizer que as perdas no ferro são calculadas através da Equação 2.

$$\text{Perdas no ferro} = k_i \omega \quad (2)$$

Onde k_i é a constante de perdas no ferro. Na verdade, não será realmente constante, pois o seu valor será afetado pela força magnética de campo, entre outros fatores, que não são constantes. No entanto, um único valor pode, normalmente, ser

encontrado e fornece uma boa aproximação das perdas no ferro. O grau em que pode se dizer que k_i é constante depende da forma como o campo magnético é fornecido. Por simplificação, considera-se o valor recomendado por Larminie e Lowry (2012) onde $k_i = 0,01$.

A terceira categoria de perda é ocasionada devido ao atrito e ao sistema de arrefecimento do motor. O rotor também terá uma resistência ao ar, o que pode ser bastante grande se uma ventoinha é montada para realizar o arrefecimento. Para chegar a potência associada com essas forças, deve-se multiplicar o torque pela velocidade angular, como visto na Equação 3.

$$\text{Potência} = \text{torque} \times \text{velocidade angular} \quad (3)$$

A potência envolvida nessas forças será conforme as Equações 4 e 5

$$\text{Potência de atrito} = T_f \omega \quad (4)$$

$$\text{Potência resistência ao ar} = k_w \omega^3 \quad (5)$$

Onde ω é a velocidade angular, T_f é a força de atrito e k_w é uma constante que depende, principalmente, do tamanho e da forma do rotor, e se há ou não uma ventoinha de arrefecimento instalada. Considera-se que as perdas são muito baixas e o valor adotado para este trabalho é conforme Larminie e Lowry (2012) no qual, $k_w = 0,000005$.

Finalmente, abordam-se as perdas que ocorrem mesmo se o motor estiver totalmente parado, e que não variam com a velocidade, nem com o torque. No caso do motor ligado, as perdas não são desprezíveis. Como uma corrente elétrica (e, portanto, potência) deve ser fornecida à bobina para que haja campo magnético, ocorrerão perdas na forma de energia térmica. O único tipo de motor em que este tipo de perda possa ser zero é o motor de ímã permanente, pois não é necessário o fornecimento de corrente elétrica para que haja campo magnético. De maneira geral, para outros tipos de motores, a energia é necessária para ligar e manter os circuitos eletrônicos de controle que operam a todo momento. A letra C é usada para designar essas perdas. Considera-se como perdas constantes a Equação 6.

$$C = 1000 \text{ W} \quad (6)$$

É útil reunir todas essas perdas em uma única equação que permite modelar e prever as perdas em um motor elétrico. Embora a modelagem tenha levado em

consideração o motor CC escovado, esta equação é válida, com uma boa aproximação, para todos os tipos de motores, incluindo os tipos mais sofisticados (LARMINIE, LOWRY, 2012). Ao combinar as equações (1), (2), (4), (5) e (6), obtém-se a Equação 7, que é utilizada para determinar as perdas totais.

$$\text{Perdas Totais} = k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C \quad (7)$$

No entanto, geralmente, a eficiência do motor, n_m , é um dos parâmetros de interesse. Esta pode ser determinada conforme a Equação 8.

$$n_m = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}} \quad (8)$$

Considerando as perdas, a Equação (8) pode ser reescrita como Equação 9.

$$n_m = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada} + \text{Perdas Totais}} \quad (9)$$

Logo, ao combinar a Equação 9 com a Equação 7, tem-se a Equação 10 com a qual consegue-se determinar a eficiência do motor elétrico.

$$n_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C} \quad (10)$$

Os valores adequados para as constantes na Equação 10, normalmente, podem ser encontrados por experimentação ou utilizando valores de medição de eficiência. Portanto, neste trabalho adotam-se os valores utilizados por Larminie e Lowry (2012) que constam na Tabela 1.

Constantes	Valores adotados
k_c	0,3
k_i	0,01
k_w	0,000005
C [W]	1000

Tabela 1 – Valores adotados para as constantes. (Fonte: Elaborado pelo autor).

3.1.2 Esforço de tração

O esforço de tração é a força de propulsão do veículo que o movimentam para frente, ela é transmitida para o solo através das rodas. Portanto, na modelagem de desempenho do veículo, é fundamental produzir uma equação para o esforço de tração. Considerando que o veículo possui massa “ m ”, procedendo a uma velocidade “ v ”, com uma inclinação de ângulo “ ψ ”, como na Figura 10.

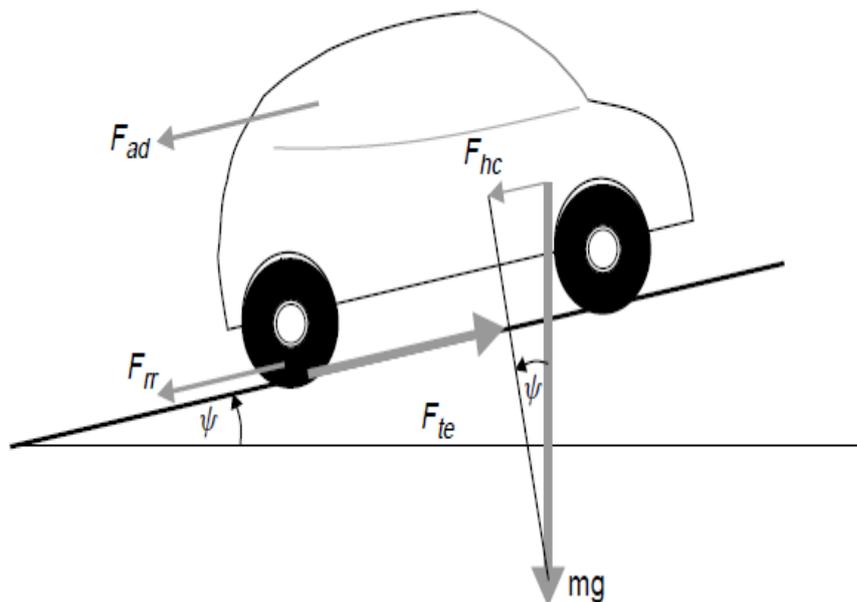


Figura 10 – Forças agindo no veículo (Fonte: LARMINIE, LOWRY, 2012).

A força de propulsão do veículo, denominada F_{te} , deve possuir um valor tal que:

- Supere a resistência ao rolamento, F_{rr} ;
- Supere o arrasto aerodinâmico, F_{ad} ;
- Proporcione a força necessária para superar a componente de peso do veículo, mg ;
- Acelere o veículo, se a velocidade não é constante.

Cada aspecto, acima mencionado, será tratado em detalhes na sequência do trabalho.

3.1.3 Força de resistência ao rolamento

A resistência ao rolamento acontece, principalmente, devido ao atrito dos pneus do veículo com o solo. A resistência ao rolamento é aproximadamente constante, e quase não depende da velocidade do veículo. A Equação 11 é utilizada para calcular a força de resistência ao rolamento.

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg \quad (11)$$

Onde,

μ_{rr} é o coeficiente de resistência ao rolamento;

m é a massa do veículo;

g corresponde a constante gravitacional.

Os principais fatores que afetam o coeficiente μ_{rr} são o tipo de pneu e a pressão em que eles se encontram. O valor de μ_{rr} pode ser determinado, razoavelmente, ao puxar um veículo com uma velocidade muito baixa e constante, medindo a força necessária para movimenta-lo.

Diante dos pressupostos, a fabricante Toyota apresenta para o Mirai uma massa de 1850 kg. Para a simulação realizada nesse trabalho adota-se que o veículo esteja ocupado por duas pessoas com massa de 75kg cada. Logo a massa total considerada corresponde a 2000kg.

Portanto, os valores utilizados na Equação 11 estão dispostos na Tabela 2.

Constantes	Valores utilizados
μ_{rr}	0,0048
m [kg]	2000
g [m/s ²]	9,8

Tabela 2 – Valores adotados para as constantes da força de resistência ao rolamento (Fonte: Elaborado pelo autor).

3.1.4 Arrasto aerodinâmico

O arrasto aerodinâmico ocorre devido ao atrito do corpo do veículo com o ar. É uma função da área frontal, da forma, das saliências (tais como espelhos laterais), passagens de ar e outros fatores. A Equação 12 é utilizada para determinar a força de arrasto aerodinâmico.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (12)$$

Onde,

ρ é a densidade do ar,

A é a área frontal,

C_d é a constante chamada "coeficiente de arrasto",

v é a velocidade.

A densidade do ar varia naturalmente com a temperatura, a umidade e altitude. No entanto, um valor de 1,25 kg/m³ é razoável para uso na maioria dos casos. (LARMANIE, LOWRY, 2012). Os dados utilizados na Equação 12 estão dispostos na Tabela 3.

Constantes	Valores utilizados
ρ [kg/m ³]	1,25
A [m ²]	1,8
C_d	0,29

Tabela 3 – Valores adotados para as constantes da força de arrasto aerodinâmico (Fonte: Elaborado pelo autor).

3.1.5 Força de aclave

A força de aclave é necessária para que o veículo se desloque durante uma inclinação no percurso. A Equação 13, corresponde ao processo.

$$F_{hc} = mg \sen \psi \quad (13)$$

Onde,

m é a massa do veículo,

g a força gravitacional,

ψ é o ângulo de inclinação ao longo do percurso.

Diante da complexidade de medição da inclinação do percurso a cada segundo, adota-se para este trabalho a hipótese de que o terreno seja completamente plano, portanto $\psi = 0$. Logo, $F_{hc} = 0$.

3.1.6 Aceleração

Se a velocidade do veículo muda, uma força terá de ser aplicada em adição às forças mostradas na Figura 10, vista anteriormente. Esta força vai proporcionar a aceleração linear do veículo, e é dada pela equação derivada de terceira lei de Newton, a Equação 14.

$$F_{la} = ma \quad (14)$$

Onde,

m é a massa do veículo,

a corresponde a aceleração.

No entanto, para uma modelagem mais precisa da força necessária para acelerar o veículo, deve-se considerar também a força necessária para fazer as peças rotativas girarem. É preciso considerar a aceleração angular, bem como a aceleração linear.

A questão principal é o motor elétrico, não necessariamente por causa de seu momento de inércia, mas por causa das velocidades angulares maiores. Fazendo referência à Figura 11, o torque, T , no eixo é igual ao esforço de tração, F_{te} , fornecido pela motorização.

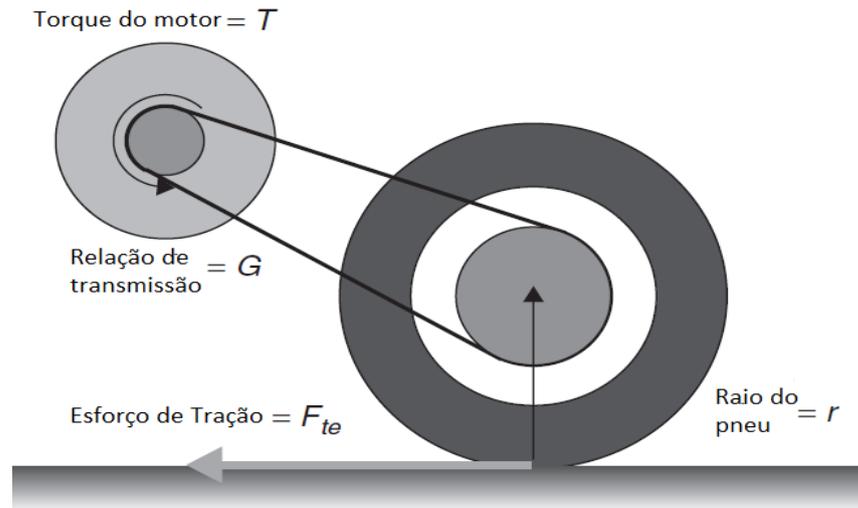


Figura 11 – Esquema do esforço de tração (Fonte: LARMINIE, LOWRY, 2012, adaptado).

Sendo r o raio do pneu do veículo e G a relação de transmissão do sistema conectando o motor ao eixo. Então pode-se dizer que a Equação 15 é utilizada para calcular o torque.

$$T = \frac{F_{te}r}{G} \quad (15)$$

Reorganizando a Equação 15 tem-se a Equação 16.

$$F_{te} = \frac{G}{r}T \quad (16)$$

Deve se observar que a aceleração angular é importante para determinar a força de aceleração angular, $F_{\omega a}$, dessa forma, a aceleração angular do motor é calculada conforme a Equação 17.

$$\dot{\omega} = \frac{G}{r} a \quad [rads/s^2] \quad (17)$$

O torque requerido para esta aceleração angular é obtido através da Equação 18.

$$T = IG \frac{a}{r} \quad (18)$$

Onde, I é o momento de inércia do rotor do motor.

A força necessária nas rodas para fornecer a aceleração angular ($F_{\omega a}$) é encontrada ao combinar a Equação 18 com a Equação 16, obtém-se a Equação 19.

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (19)$$

É importante ressaltar que nessas equações assumiu-se que o sistema de transmissão é 100% eficiente, ou seja, que não possua perdas. No entanto, ele nunca será 100% eficiente, e por isso deve-se refinar a equação incorporando o termo η_g que corresponde a eficiência do sistema de transmissão. A força necessária será ligeiramente maior, de modo que a Equação (19) pode ser refinada para a Equação 20.

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{n_g r^2} a \quad (20)$$

Ao verificar os valores para as constantes G , r , e I e ao substituí-las na Equação 20, identificou-se que a força de aceleração angular será tipicamente muito menor do que a força de aceleração linear dada pela Equação 14. O desenvolvimento dessa consideração está explicitado nas Equações 20 e 21 e 22.

$$F_{\omega a} = 4 \times 0,025 \frac{3,478^2}{0,9 \times 0,2159^2} a \quad (20)$$

$$F_{\omega a} = 28,83 a \quad (21)$$

Logo, ao realizar a divisão da força de aceleração angular pela força de aceleração linear, determina-se o percentual.

$$\frac{F_{\omega a}}{F_{la}} = \frac{28,83 a}{2000 a} = 0,0144 \times 100\% = 1,44\% \quad (22)$$

Portanto, pode-se desconsiderar a força e aceleração angular $F_{\omega a}$, e incrementar a massa em 1,44%, conforme Equação 23. Este valor torna-se praticamente desprezível em relação a massa de 2000kg.

$$F_{la} = 1,01 \times 2000 \times a \quad (23)$$

3.1.7 Esforço total de tração

O esforço total de tração, é a soma de todas as forças que atuam sobre o veículo, Equação 24.

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (24)$$

Onde:

- F_{rr} é a força de resistência ao rolamento, dada pela Equação 11.
- F_{ad} é o arrasto aerodinâmico, dada pela Equação 12.
- F_{hc} é a força de aclone, dada pela Equação 13.
- F_{la} é a força necessária para dar aceleração linear dada pela Equação 14.
- $F_{\omega a}$ a força necessária para se obter a aceleração angular da rotação do motor, dado pela Equação 20.

3.1.8 Fluxos de energia e potência

Os fluxos de energia em um veículo elétrico que utiliza células de combustível são mostrados na Figura 12. O processo visualizado é repetido até que o combustível seja totalmente consumido ou que atinja um nível de reserva previamente especificado.

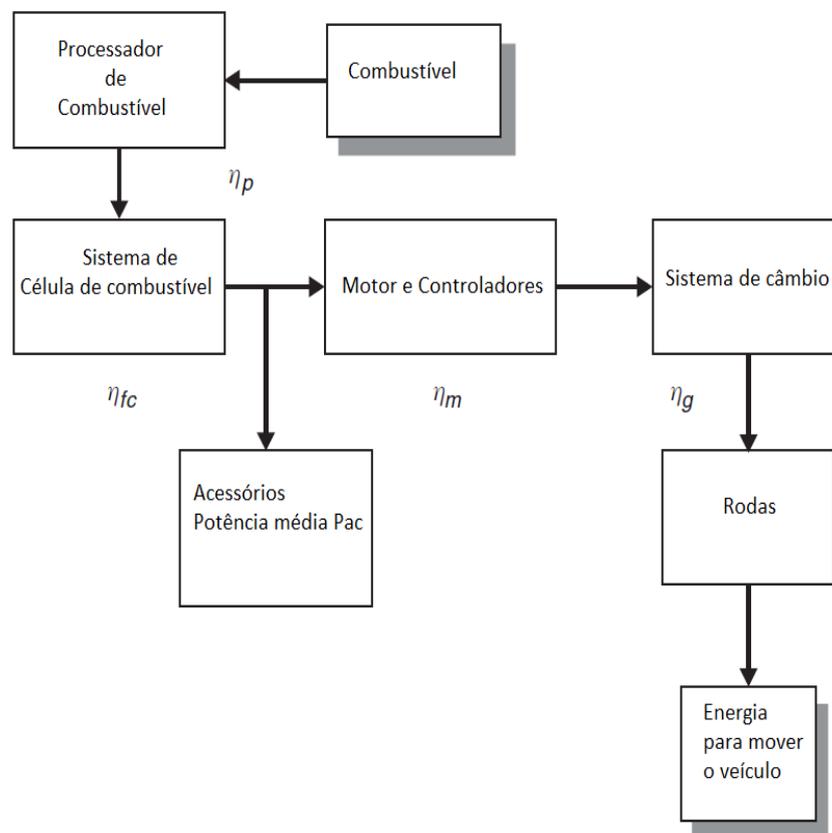


Figura 12 – Fluxos de energia de um veículo movido a células de combustível (Fonte: LARMINIE, LOWRY, 2012, adaptado.)

A modelagem dos sistemas auxiliares necessários para a operação da célula de combustível é extremamente complexa, em grande parte, devido ao sistema processador de combustível. Nesses sistemas existem muitos sub-processos variáveis no tempo. A simulação de tais sistemas de processamento de combustível é extremamente importante, entretanto, foge ao escopo deste trabalho. Além disso, a maior parte dos dados são confidenciais para as empresas que desenvolvem estes sistemas.

Para determinar a potência necessária utiliza-se a Equação 25, tendo em vista que a potência é igual a variação do trabalho (W) no tempo (t). Já o trabalho é igual a força (F) vezes o deslocamento (x). Reorganizando a equação tem-se que o deslocamento no tempo fornece a velocidade (v). Portanto, a potência P é calculada em função das forças necessárias para que o veículo se movimente e a velocidade com a qual ele se desloca.

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{d(Fx)}{dt} = F \frac{dx}{dt} = Fv \quad (25)$$

Conforme visto anteriormente na seção 3.1.7, a força necessária para o deslocamento do veículo é o esforço de tração. Logo, neste trabalho por utilizar intervalos de um segundo, a energia requerida para mover o veículo é a mesma que a potência, conforme Equação 26.

$$\text{Energia requerida a cada segundo} = P_{te} = F_{te}v \quad (26)$$

Para encontrar a energia necessária a partir da célula de combustível, deve-se encontrar as várias eficiências em todos os pontos de operação. A eficiência do sistema de câmbio η_g é assumida ser constante. Como em veículos elétricos, normalmente, as caixas de câmbio possuem apenas uma engrenagem a eficiência é normalmente alta, em torno de 90%.

Os ganhos de eficiência do motor e o seu controlador são geralmente considerados em conjunto, uma vez que é mais conveniente para medir a eficiência de todo o sistema. Na seção 3.1.1 verificou-se que a eficiência do motor varia consideravelmente com a potência, com o torque e também com o tamanho do motor. A eficiência é modelada pela Equação 10, vista anteriormente e reescrita abaixo.

$$n_m = \frac{T\omega}{T\omega + k_c T^2 + k_i \omega + k_w \omega^3 + C} \quad (10)$$

Onde k_c é o coeficiente de perda de cobre, k_i é o coeficiente de perdas no ferro, k_w é o coeficiente de perda do sistema de arrefecimento e C representa as perdas constantes que se aplicam a qualquer velocidade.

As ineficiências do motor, do controlador e do sistema de câmbio significam que a potência fornecida pelo motor não é a mesma que a potência necessária para a tração. Com isso, a energia elétrica necessária ao motor, $P_{mot_{in}}$, é maior do que a potência de saída mecânica, $P_{mot_{out}}$, de acordo com as equações 27 e 28

$$P_{mot_{in}} = \frac{P_{mot_{out}}}{n_m} \quad (27)$$

$$P_{mot_{out}} = \frac{P_{te}}{n_g} \quad (28)$$

As Equações 27 e 28 estão corretas no caso em que o motor do veículo é utilizado para colocá-lo em movimento. No entanto, se o motor for utilizado para reduzir a velocidade do veículo, a energia elétrica do motor é reduzida conforme as Equações 29 e 30.

$$P_{mot_{int}} = P_{mot_{out}} \times n_m \quad (29)$$

$$P_{mot_{out}} = P_{te} \times n_g \quad (30)$$

Assim, as Equações de 27 e 28 são utilizadas determinar a energia elétrica e as equações 29 e 30 para determinar a energia mecânica no motor. Durante a frenagem, a potência do motor será negativa, de modo que esta irá reduzir a magnitude da energia necessária à célula de combustível. Como simplificação, neste trabalho não são considerados os casos em que o motor é utilizado para frenagem.

No veículo existem sistemas elétricos como as luzes, indicadores e acessórios como o rádio, que também exigem determinada potência para seu funcionamento. Uma potência média terá de ser encontrada ou estimada para estes. Para tanto, adicionou-se a potência solicitada pelo motor uma potência média dos acessórios, P_{ac} . Com base nesse aspecto, a potência total requerida a partir da célula de combustível pode ser determinada conforme Equação 31.

$$P_{fc} = \frac{P_{te}}{n_m \times n_g} + P_{ac} \quad (31)$$

Neste trabalho adota-se como potência média dos acessórios o valor de 2000W, conforme verificado em Larminie e Lowry (2012).

3.1.9 Consumo de hidrogênio em uma célula de combustível

A energia necessária para os vários componentes auxiliares das células de combustível não foi explicitamente modelada. Diante desse fato, considerou-se ajustes no valor da eficiência da célula de combustível. A eficiência de uma célula de combustível está relacionada, com a sua tensão média de operação, V_c . Se a eficiência se refere ao valor poder calorífico inferior (PCI) do hidrogênio, então a eficiência é dada pela Equação 32 conforme apresentado por O'Hayre et al. (2006).

$$n_{fc} = \frac{V_{fc}}{1,23} \quad (32)$$

No presente momento, um valor típico para a eficiência de uma célula de combustível operando com hidrogênio puro é de 48% (CORBO, MIGLIARDINI, VENERI, 2011). Assim, a partir da Equação 32 obtém-se a tensão média de operação de uma célula de combustível vista na Equação 33 (O'HAYRE et al., 2006).

$$V_{fc} = 0,48 \times 1,23 \approx 0,6 \text{ V} \quad (33)$$

Para determinar a taxa de utilização de hidrogênio numa célula de combustível, parte-se da Equação 34, onde a potência é igual a tensão (V) vezes a corrente (I).

$$P = VI \quad (34)$$

Sabendo que a corrente necessária é igual a potência da célula de combustível, P_{FC} , dividida pela sua tensão V_{FC} , Equação 35.

$$I = \frac{P_{FC}}{V_{FC}} \quad (35)$$

A corrente envolvida é calculada diretamente pela variação da carga no tempo, Equação 36.

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (36)$$

Como a corrente I está envolvida numa reação eletroquímica, ela é medida diretamente da velocidade da reação, conforme a Equação 37 (O'HAYRE, et al., 2006).

$$I = nF \frac{dN}{dt} \quad (37)$$

Onde, n representa o número de elétrons transferidos, F é a constante de Faraday necessária para converter de mols de elétrons para coulombs e $\frac{dN}{dt}$ é a taxa em que ocorre a reação em mol/s. Logo, substituindo 37 em 35, tem-se a Equação 38.

$$\frac{P_{FC}}{V_{FC}} = nF \frac{dN}{dt} \quad (38)$$

Reorganizando a Equação 38, obtém-se a Equação 39.

$$\frac{dN}{dt} = \frac{P_{FC}}{n \times F \times V_{FC}} \quad (39)$$

Sabendo que a quantidade de matéria N é igual a massa m , dividida pela massa molar, M do hidrogênio. Logo tem-se a Equação 40.

$$\frac{d\left(\frac{m}{M}\right)}{dt} = \frac{P_{FC}}{2 \times F \times V_{FC}} \quad (40)$$

Reorganizando a Equação 40, é possível determinar a taxa de variação da massa de combustível, conforme a Equação 41.

$$\frac{dm}{dt} = \frac{M \times P_{FC}}{2 \times F \times V_{FC}} \quad (41)$$

Diante dos valores da massa molar, M , do hidrogênio, e da constante de Faraday F ,

$$M = 2,02 \times 10^{-3} \text{ kg/mol}$$

$$F = 96485 \text{ C/mol}$$

Substituindo os valores de M e F na Equação 41, tem-se a Equação 42.

$$\frac{dm}{dt} = 1,05 \times 10^{-8} \frac{P_{FC}}{V_{FC}} \quad (42)$$

Como a tensão da célula $V_{ic} = 0,6 \text{ V}$, logo a taxa de consumo do hidrogênio é calculada através da Equação 43.

$$\frac{dm}{dt} = 2,01 \times 10^{-8} \times P_{FC} \quad (43)$$

A Equação 43 não requer dados sobre a célula de combustível, tais como o número de células, a área do eletrodo, ou quaisquer outros detalhes. Esta modelagem é adequada para um sistema que utiliza hidrogênio puro armazenado em tanques a bordo do veículo, no caso em estudo do Toyota Mirai, são armazenados 5kg de

hidrogênio e considerados 10% de reserva. A Equação permite calcular diretamente a massa de hidrogênio em kg/s, consumido a cada segundo, para fornecer a energia elétrica necessária para atender ao veículo. A autonomia pode ser determinada com base no consumo de hidrogênio e no perfil de condução do veículo.

3.2 Ciclos de condução utilizados

Os ciclos utilizados neste trabalho foram escolhidos para representar as diversas regiões do mundo. Portanto, escolheu-se baseado nos três principais grandes grupos:

- Ciclos de condução europeus (EDC – *European Driving Cycles*);
- Ciclos de condução norte-americanos (USDC – *United States Driving Cycles*);
- Ciclos de condução japoneses (JDC – *Japanese Driving Cycles*).

Diante da diversidade dos ciclos encontrados dentro dos grandes grupos procurou-se escolher os ciclos clássicos e que representassem de maneira adequada o perfil de condução dos motoristas. O ciclo americano escolhido foi o *Highway Fuel Economy Test* (HWFET). O ciclo europeu *Extra-Urban Driving Cycle* (EUDC). O ciclo Japonês *Japanese 10-15 Mode Cycle* (JC10-15). Os gráficos encontram-se nos APÊNDICES A, B, C, D e E.

No Brasil, segundo o Ministério do Meio Ambiente (MMA) o ciclo de condução adotado para determinação de emissões em veículos leves e comerciais leves, é o ciclo americano conhecido como FTP-75 (*Federal Test Procedure 75*). Os procedimentos relativos a este ciclo de condução são descritos na Norma Brasileira (NBR 6601:2012). Portanto, adota este ciclo como referência para o cenário brasileiro. Além desse, optou-se também pela construção de um ciclo de condução no município de Araranguá.

O município de Araranguá, fica localizado no extremo sul do estado de Santa Catarina. Segundo o IBGE (2010) possui população estimada em 2016 de 66.442 habitantes e uma frota de veículos estimada de 28.161 unidades. Um dos trechos mais utilizados pelos araranguenses é o trajeto que leva ao município vizinho, Balneário

Arroio do Silva, principalmente para frequentar as praias no verão. Diante deste fato, buscou-se criar um ciclo de condução que corresponda a este deslocamento.

O ciclo foi confeccionado utilizando um veículo com velocímetro digital e realizando a filmagem do mesmo durante todo o trajeto. Após o término do percurso utilizou-se o software de edição de vídeos *Movie Maker*, executou-se o vídeo com pausas a cada segundo para verificar as velocidades, Figura 13.

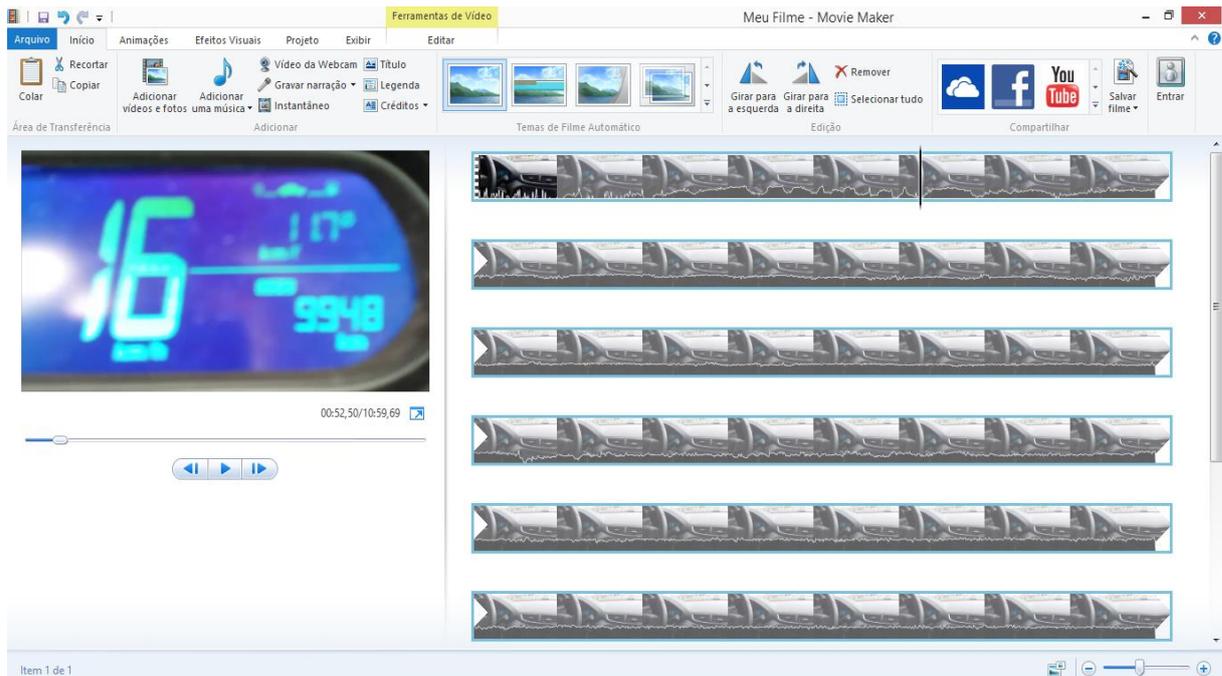


Figura 13 – Uso do *Movie Maker* (Fonte: Elaborado pelo autor).

Utilizou-se o trecho, Figura 14, tendo como início o centro do Balneário Arroio do Silva, ponto “A”, até o Campus da Universidade Federal de Santa Catarina, ponto “E”, unidade Jardim das Avenidas localizada no município de Araranguá. A escolha do percurso foi determinada pelo trecho compreender perímetro urbano e rodovia sendo possível obter variações de velocidade.

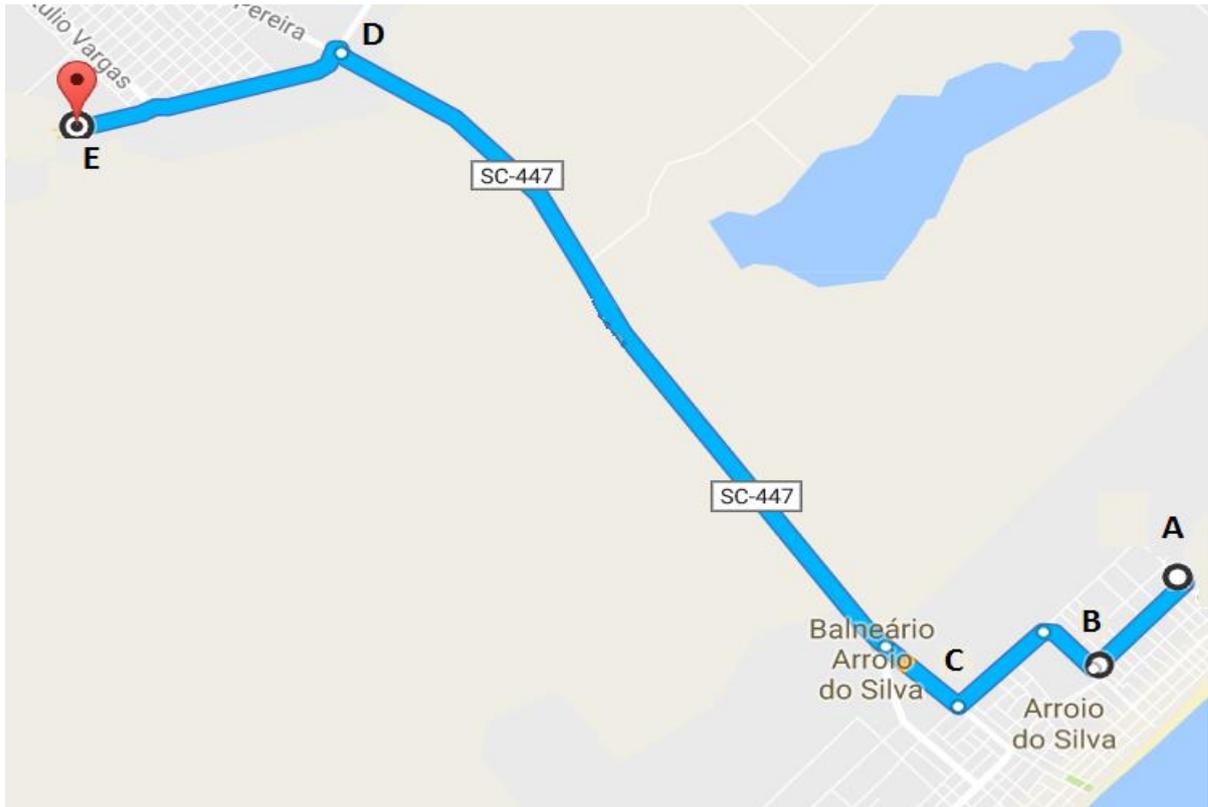


Figura 14 – Trecho utilizado para confecção do ciclo de condução (Fonte: GOOGLE MAPS, 2016).

Após a verificação do vídeo, criou-se um arquivo com os valores de velocidades que representam o percurso, conforme Figura 15, onde estão indicados os trechos com as letras A, B, C, D e E.

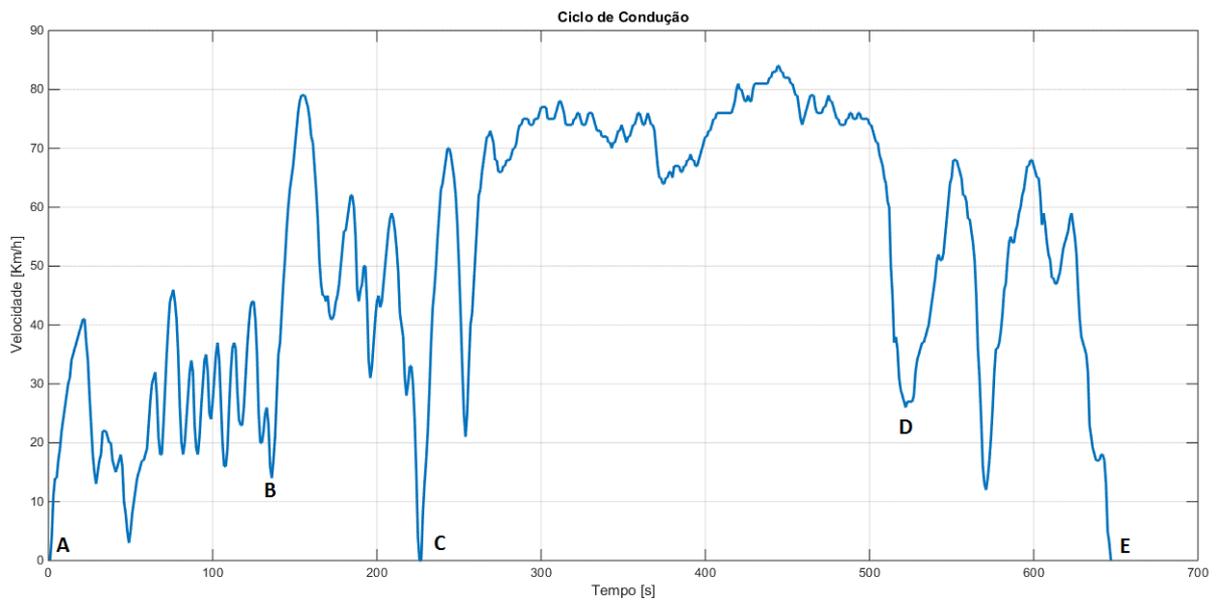


Figura 15 – Ciclo de condução Araranguá – Balneário Arroio do Silva. (Fonte: Elaborado pelo autor)

A fim de facilitar a comparação entre os ciclos construiu-se a Tabela 4. Este quadro sintetiza as informações utilizadas durante a simulação do veículo.

		Ciclos Utilizados				
		HWFET	EUDC	J10-15	FTP-75	ARA
Distância total do ciclo	km	16,51	7	6,3	17,7	9,4
Tempo total	s	765	400	892	1874	647
Velocidade Máxima	km/h	96,4	62,4	70	91,2	84
Velocidade Média	km/h	77,6	62,6	25,5	34,2	52,3

Tabela 4 – Características dos ciclos utilizados (Fonte: Elaborado pelo autor).

A Tabela 4 demonstra a gama de variações entre os ciclos. O tempo de duração em segundos representa a quantidade de valores de velocidade utilizados em cada ciclo. Esses parâmetros são os dados de entrada para a simulação.

3.3 Fluxograma da simulação

Nas seções anteriores foram discutidos os aspectos relacionados a modelagem matemática do veículo elétrico. Para verificar os parâmetros de interesse, por exemplo, determinar a autonomia do veículo, simula-se a modelagem matemática em um processo passo-a-passo. Neste trabalho utilizou-se o Matlab para efetuar a simulação do veículo. A forma como confeccionou-se o algoritmo é representada pelo fluxograma mostrado na Figura 16.

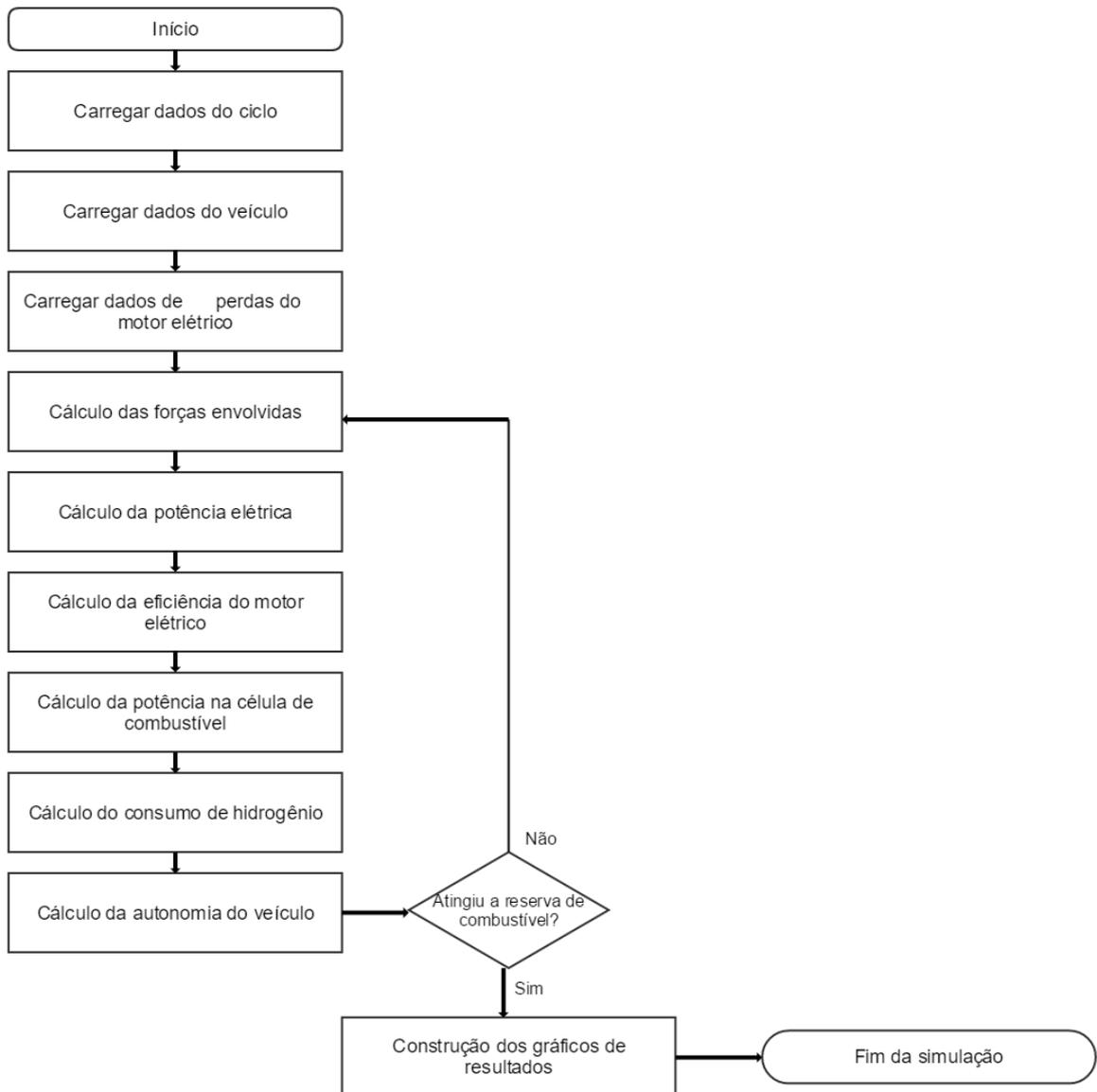


Figura 16 - Fluxograma da simulação. (Fonte: Elaborado pelo autor).

A primeira fase é carregar os dados de velocidade do ciclo de condução a ser utilizado. Isso é feito com um arquivo texto e importado por um arquivo MATLAB. A próxima etapa é configurar os parâmetros do veículo, tais como a massa, área frontal, quantidade de combustível no tanque, e assim por diante. A energia elétrica utilizada pelos acessórios Pac deve ser definida neste momento em conjunto com todas as demais constantes de perdas do motor elétrico. Após a introdução dos valores são efetuados os cálculos das forças envolvidas, F_{ad} , F_{rr} , F_{la} e, portanto, o esforço total de tração, F_{te} . Na sequência são calculadas as potências necessárias, potência elétrica, potência solicitada à célula de combustível, bem como a eficiência do motor elétrico.

Os valores calculados são armazenados nas respectivas variáveis computacionais, denominadas *arrays* de dados. Uma vez armazenados os parâmetros de interesse o algoritmo verifica se o limite especificado de reserva (10%) do tanque de combustível foi atingido. Em caso negativo, o algoritmo retorna aos cálculos. Em caso afirmativo, realiza-se a construção dos resultados em forma de gráficos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através dos resultados obtidos com a modelagem e simulação do Toyota Mirai observa-se que o valor de autonomia divulgado pela Toyota, utilizando um ciclo de condução estimado da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*), alcança um valor de 512km. Neste trabalho o valor encontrado na simulação é de 330km.

Ao comparar os resultados com o trabalho de Fernandez, Cilleruello e Martinez, 2016, os autores mencionam autonomia de 483 km para o Mirai sendo uma informação fornecida pela Toyota. No trabalho de Wang, 2016, o autor afirma que o Mirai possui autonomia de 650 km em velocidade de cruzeiro, mas não menciona o ciclo de condução utilizado. Ao verificar em outro portal da empresa, encontrou-se medidas baseadas no ciclo de condução japonês JC08, no qual estima-se que uma autonomia de 700km em velocidade de cruzeiro. O ciclo JC08 não estava disponível para a simulação deste trabalho, optou-se por utilizar o ciclo JC10-15 que é muito utilizado na Ásia em geral para simulação de veículos e, logicamente, o valor de 164km encontrado foi diferente do citado pela montadora.

Outro questionamento se dá em relação ao ciclo estimado USEPA, a Toyota não fornece detalhes sobre este ciclo, apenas afirma que utiliza velocidade de cruzeiro. Para fins de comparação utilizou-se neste trabalho o ciclo de condução americano que mais se aproxima dessas velocidades, o HWFET. Como a autonomia está relacionada com o perfil de condução a utilização desse ciclo, e não o realmente adotado pela empresa, certamente, é uma das causas na diferença dos resultados. Portanto, os valores encontrados e os divulgados pela empresa não podem ser comparados diretamente em termos numéricos, pois tratam-se de condições de

direção totalmente diferentes. Na Quadro 1 são apresentados os resultados, resumidamente.

	Toyota USEPA	Simulação HWFET	Toyota JC08	Simulação JC10-15
Autonomia [km]	512	330	700	164

Quadro 1 – Comparativo entre resultados da simulação e os divulgados pela Toyota. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Diante dos fatos apresentados, acredita-se que além das variações nos ciclos de condução, parte das discrepâncias encontradas ocorram, também, pelas simplificações adotadas na modelagem:

- Potência dos acessórios estimada e constante, 2000W, seção 3.1.8;
- Não utilização de freio regenerativo;
- Não utilização de baterias.
- Perdas no sistema de células de combustível.

A potência utilizada pelos acessórios varia conforme a utilização pelo usuário do veículo. Portanto, o valor médio utilizado pode não representar a realidade para alguns casos. Mas acredita-se que seja um valor adequado para fins de simulação e atende ao objetivo deste trabalho. O Toyota Mirai possui sistemas de baterias e freios regenerativos, portanto essas simplificações tornam o valor encontrado distante do divulgado pela montadora. Entretanto, o resultado encontrado evidencia o fato de que a tecnologia híbrida de FCs/Bateria aumenta de maneira satisfatória a autonomia do veículo e deve ser modelada em trabalhos futuros.

As perdas no sistema de células de combustível não foram consideradas, perdas ôhmicas, perdas por ativação, perdas de concentração, entre outras. Essas devem ser consideradas em continuações do presente trabalho.

Ao comparar os resultados entre o que a norma brasileira (NBR6601:2012) recomenda e o ciclo de condução criado para o município de Araranguá, Quadro 2, verificou-se que os valores de autonomia encontrados estão próximos. Mas, sabe-se que esses não devem ser comparados diretamente, eles fornecem uma estimativa para que sejam tomadas possíveis medidas em relação a inserção dos veículos elétricos no Brasil. Por exemplo, com os valores de autonomia podem ser criadas

estratégias para a inserção de postos de reabastecimento, em pontos otimizados, de acordo com os ciclos de condução típicos de cada município.

	FTP-75 (NBR6601:2012)	Araranguá
Autonomia [km]	195,46	197,38
Consumo de H₂ [km/kg]	43,43	43,86

Quadro 2 – Resultados da simulação Ciclos FTP-75 e ciclo Araranguá. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Além dos ciclos de condução, segundo a Toyota o hidrogênio deve ser fornecido em condições ideais de pressão e temperatura, (bomba fornecendo a 70Mpa, tanque a 10Mpa e temperatura ambiente de 20°C), para que os valores divulgados pela empresa sejam atingidos. Este fato é de suma importância, principalmente para o Brasil que possui variações climáticas conforme a região do território, recomenda-se que essa relação seja introduzida em trabalhos futuros.

Verificou-se que em condições com menor variação de velocidade atinge-se uma maior autonomia e menor consumo de combustível. Esse fato está relacionado a maneira como é solicitada potência à célula de combustível, Equação 31 da seção 3.1.8, com menores variações de velocidade, e, portanto, de aceleração e torque, o consumo de combustível será menor. Os resultados de autonomia na simulação do ciclo americano HWFET e do ciclo europeu EUDC demonstram esse fato e podem ser visualizados no Quadro 3 em comparação com os demais ciclos.

	EUDC	HWFET	FTP-75	Araranguá	JC10-15
Autonomia [km]	271,24	330,13	195,46	197,38	164,81
Consumo de H₂ [km/kg]	60,27	73,36	55,28	43,86	36,62

Quadro 3 – Resultados de autonomia e consumo de hidrogênio. (Fonte: elaborado pelo autor).

Em termos de variação de potência solicitada às células de combustíveis identificou-se, conforme esperado, que a variação de potência é influenciada pelo acréscimo e decréscimo na velocidade. A Figura 17 representa o ciclo de condução americano HWFET.

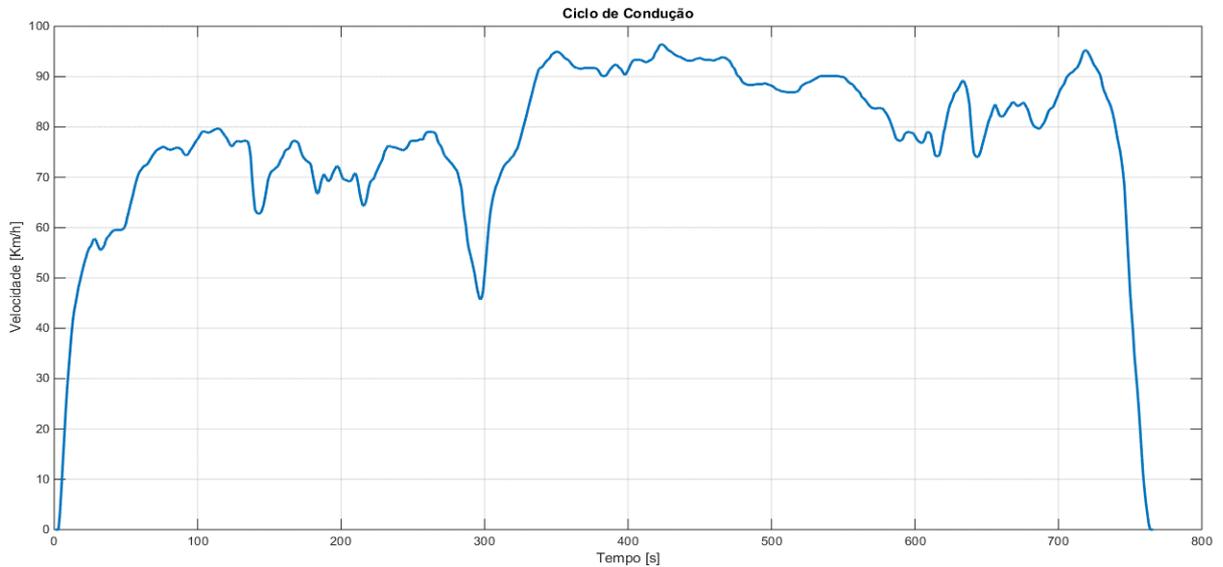


Figura 17 - Ciclo de condução HWFET. (Fonte: Elaborado pelo autor).

A Figura 18 representa a variação da potência solicitada às FCs no ciclo de condução americano HWFET.

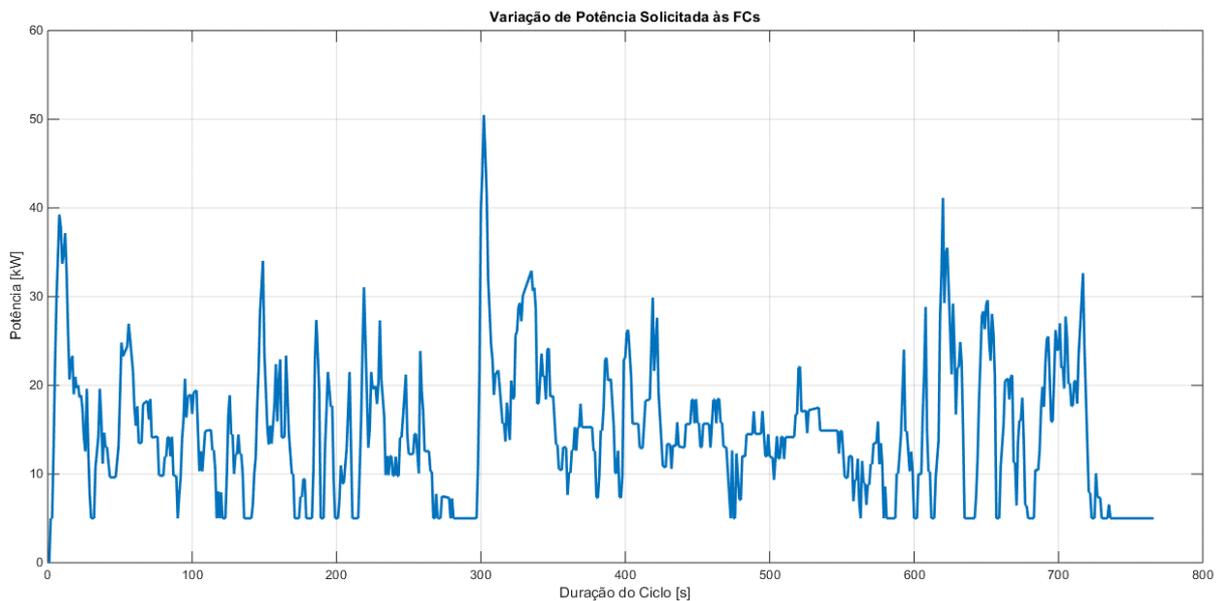


Figura 18 – Variação de potência solicitada à FCs no ciclo HWFET (Fonte: Elaborado pelo autor).

A cada variação de velocidade a potência sofre com picos, esse fato fica evidente na faixa dos 300s, onde há um incremento substancial de velocidade de 45

a 93km/h e ocorre o pico de potência solicitada a célula de combustível de 50,46kW. Em casos onde a potência será negativa (frenagem), a potência solicitada a célula será a equivalente ao dos acessórios do veículo, P_{ac} , nesse caso 2 kW.

Ao verificar um ciclo de condução com maior variação de velocidade, o ciclo Araranguense, Figura 19, verifica-se uma variação de potência muito alta na célula de combustível, Figura 20.

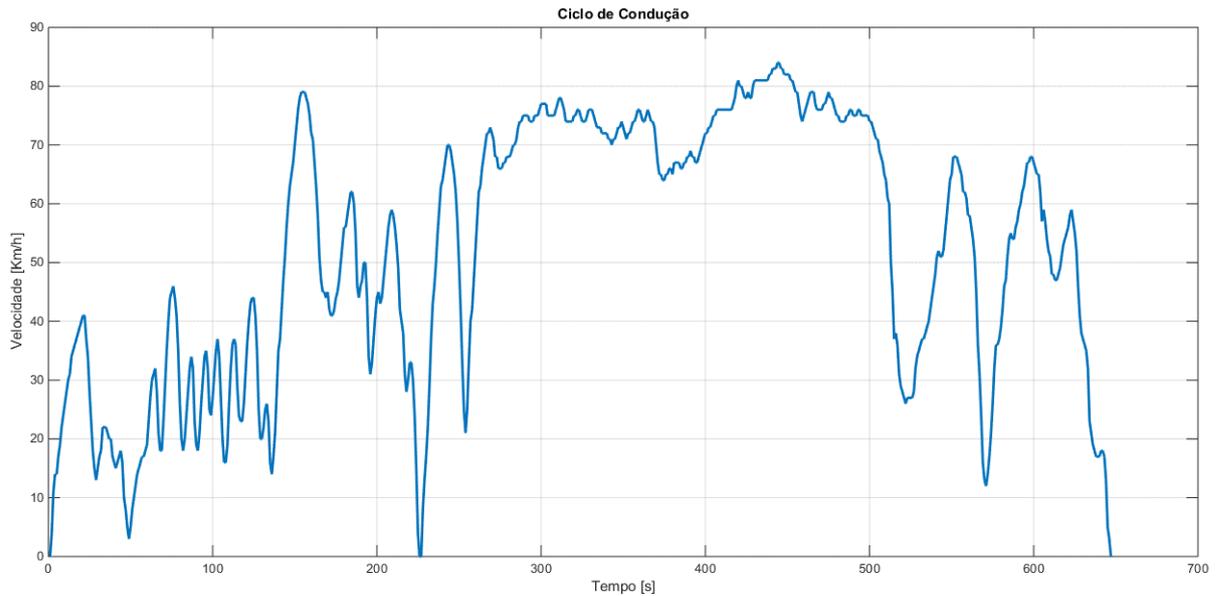


Figura 19 – Ciclo de condução Araranguá – Balneário Arroio do Silva. Fonte: (Elaborado pelo autor.)

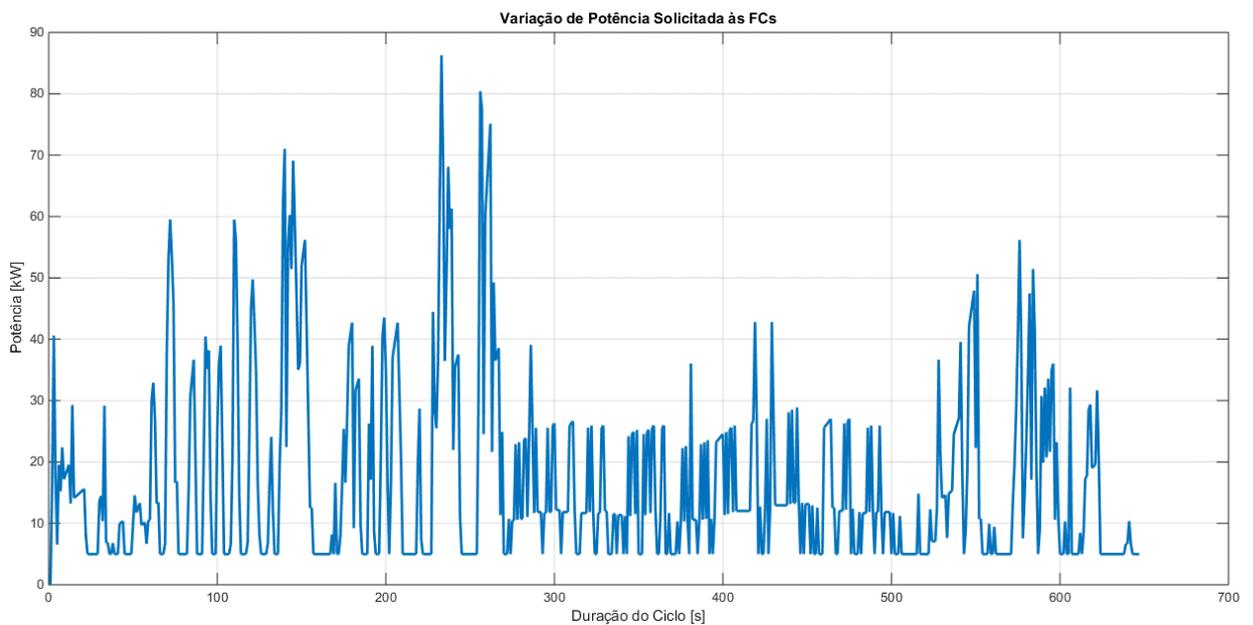


Figura 20 – Variação de potência solicitada às FCs no ciclo Araranguá – Balneário Arroio do Silva (Fonte: Elaborado pelo autor).

Os resultados apontam um pico de potência em 86 kW, onde acontece um aumento da velocidade de 0 a 70 km/h. Esses resultados eram esperados conforme a modelagem matemática e demonstram que a simulação está de acordo.

Por fim, os resultados encontrados nesse trabalho estão agrupados na Tabela 5. Recomenda-se que esses não sejam comparados diretamente, uma vez que são influenciados pela característica de cada ciclo de condução.

Características	Unidades	HWFET	FTP-75	JC10-15	EUDC	ARARANGUÁ
Distância total do ciclo	[km]	16,51	17,77	6,34	7	9,40
Velocidade Média	[km/h]	77,58	34,12	25,58	62,44	52,30
Velocidade Máxima	[km/h]	96,40	91,25	70,00	120,00	84,00
Autonomia	[km]	330,13	195,46	164,81	271,24	197,38
Consumo de H ₂	[km/kg]	73,36	55,28	36,62	60,2	43,86
Potência Máxima FC	[kW]	50,48	64,69	36,68	46,00	86,29
Potência Média FC	[kW]	14,64	11,87	9,67	14,59	17,01

Tabela 5 – Síntese dos resultados encontrados na simulação. (Fonte: Elaborado pelo autor).

Ao verificar os valores encontrados de autonomia, conforme esperado, os ciclos nos quais apresentam menor variação de velocidade, HWFET e EUDC, encontram-se as maiores autonomies e os melhores consumos de hidrogênio. Em ciclos mistos como o criado para Araranguá e o FTP-75 o consumo passa a ser intermediário quando comparado ao ciclo japonês JC10-15 que apresenta maior variação de velocidade e, portanto, uma menor autonomia do veículo.

Os resultados da modelagem e simulação atendem de maneira satisfatória ao objetivo do trabalho de determinar o comportamento do veículo com informações sobre a autonomia, consumo de hidrogênio e variação de potência na célula de combustível.

5 CONCLUSÃO

A metodologia apresentada por Larminie e Lowry (2012) e adaptada a este trabalho é satisfatória para uma modelagem inicial dos veículos elétricos. Os parâmetros de interesse podem ser modificados de maneira rápida, sem a necessidade de construir protótipos. Logo, considera-se que a modelagem e a simulação adequadas para esse trabalho é uma ferramenta importante para realizar um estudo inicial e verificar o desempenho provável e a autonomia do veículo.

Diante das simplificações adotadas, sabe-se que o consumo de hidrogênio é afetado pelas hipóteses de não existência de freio regenerativo e baterias. Entretanto, considera-se o resultado pertinente e que demonstra o potencial da tecnologia híbrida para aumentar a autonomia dos veículos elétricos.

A contradição nos valores de autonomia divulgados pela Toyota e a falta de algumas informações sobre o veículo são entendidas como estratégia de comercialização e como segredo industrial da empresa. A simulação utiliza os dados do Mirai por ser o primeiro veículo de produção em série do mundo com a tecnologia de células de combustíveis. Com isso, tem-se valores de referência para comparar com os resultados da simulação.

O perfil de velocidades no trajeto Balneário Arroio do Silva – Araranguá demonstra a aplicabilidade da tecnologia a realidade de um município brasileiro, ao verificar a norma NBR6601:2012 verificou-se que os valores são próximos, mas não devem ser comparados diretamente. Essa informação poderá ser útil para traçar uma futura instalação de postos de reabastecimento.

Por se tratar de segredo industrial, a Toyota não divulga todas as informações necessárias para a simulação dessa modelagem. Portanto, diante das estimativas sobre as perdas no motor elétrico, verificou-se a necessidade de se utilizar dados de outro motor elétrico com a mesma potência, entretanto, essas alternativas são recomendadas para trabalhos futuros.

Por fim, a modelagem e simulação atenderam ao objetivo de determinar o comportamento do veículo com informações sobre a autonomia, consumo de hidrogênio e variação de potência na célula de combustível. Dentro das informações disponíveis os resultados simulados foram considerados satisfatórios.

MATHEMATICAL MODELING AND SIMULATION OF FUEL CELL ELECTRIC VEHICLE

ABSTRACT

Alternative vehicle technology (hybrid, hydrogen, electric) is of considerable importance for today's issues regarding to pollutant emissions and traffic in urban areas. Unfortunately, technologies such as electric or fuel cell vehicles are not a choice in Brazil yet. Besides that, only few studies relating to the topic have been found. Therefore, the design and optimization through mathematical modeling can be very valuable rather than performing long and expensive experiments, once a virtual platform would help cut costs. Thus, the present work aims to model and simulate a fuel cell electric vehicle by using the drive schedule and data from Toyota Mirai in order to determine its performance, hydrogen consumption, and the fuel cell power range. The results obtained suggest that mathematical modeling and simulation are helpful tools for electric vehicle project decision making. Furthermore, vehicle performance and hydrogen consumption are found to be determined through different drive schedules.

Keywords: mathematical modeling, electric vehicles, fuel cells.

REFERÊNCIAS

ANDERSON, C. D., ANDERSON, J.. **Electric and hybrid cars: a history**. 2. ed. McFarland & Company, Inc., Publishers Jefferson, North Carolina, and London, 2010.

ARAÚJO, B. J. O.. **Desenvolvimento de um Modelo de Caracterização Energética de Ciclos de Condução**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho. Portugal, 2015.

Disponível em:

<<http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/34341/1/Dissertacao-BrunoAraujo38096.pdf>>

Acesso em: 13 out. 2016

BENTO, J. P. M.. **Análise da viabilidade de adaptação de motores elétricos nos cubos de rodas traseiros de veículos de passeio.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - Faculdade UnB Gama - FGA , Brasília, DF, 2015. Disponível em:<

http://www.bdm.unb.br/bitstream/10483/11497/1/2015_JoaoPauloMoreiraBento.pdf>

Acesso em: 13 out. 2016

BARAN, R.. **A Introdução de Veículos Elétricos no Brasil: Avaliação do Impacto no Consumo de Gasolina e Eletricidade.** Tese (doutorado) – UFRJ / COPPE / Programa de Planejamento Energético, Rio de Janeiro, 2012.

Disponível em:<<http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/baran.pdf>>

Acesso em: 13 out. 2016

BORBA, B. S. M. C.. **Modelagem Integrada da Introdução de Veículos Leves Conectáveis à Rede Elétrica no Sistema Energético Brasileiro.** Universidade Federal do Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2012.

Disponível em:< http://www.ppe.ufrj.br/pppe/production/tesis/bruno_borba.pdf>

Acesso em: 13 out. 2016.

BOYNUEGRI, A.R., UZUNOGLU, M., ERDINC, O., GOKALP, E.. A new perspective in grid connection of electric vehicles: Different operating modes for elimination of energy quality problems. **Applied Energy 132.** Elsevier, 2014.

Disponível em:<<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.050>>

Acesso em: 10 out. 2016

BRADY, J., O'MAHONY, M. Development of a driving cycle to evaluate the energy economy of electric vehicles in urban areas. **Applied Energy 177.** Elsevier, 2016.

Disponível

em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916306924>>

Acesso em: 18 jun. 2016.

COLONETTI, B. R. **Model for the impact evaluation of electric vehicle integration on the adequacy of generating systems.** TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina. Araranguá, 2015.

Disponível em:<<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/165188>>

Acesso em: 18 set. 2016.

CIPOLLONE, R., DI BATTISTA, D., MARCHIONNI, M., VILLANTE, C.. **Model based design and optimization of a fuel cell electric vehicle.** 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013. Energy Procedia 45 (2014). Elsevier, 2014.

Disponível em:< <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.009>>

Acesso em: 13 set. 2016.

CORBO, P., MIGLIARDINI, F., VENERI, O. **Hydrogen Fuel Cells for Road Vehicles**. Springer-Verlag London Limited 2011.

CORRÊA, F. C. **Desenvolvimento e Análise de Estratégias de Gerenciamento de Potência em Veículo Elétrico Híbrido de Configuração Paralela**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.

Disponível em:

<<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=000911996>>

Acesso em: 20 out. 2016.

DAINA, N., SIVAKUMAR, A., POLAK, J. W. Modelling electric vehicles use: a survey on the methods. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, 2016.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306566>>

Acesso em: 25 out. 2016.

FERNÁNDEZ, R. A., CILLERUELO, F. B., MARTÍNEZ, I. V. A new approach to battery powered electric vehicles: A hydrogen fuel-cell-based range extender system. **International journal of hydrogen energy 41 (2016)**.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319915316177>>

Acesso em: 15 set. 2016.

FOTOUHI, A. AUGER, D. J., PROPP, K., LONGO, S., WILD, M. A review on electric vehicle battery modelling: From Lithium-ion toward Lithium–Sulphur.

Renewable and Sustainable Energy Reviews 56 (2016). Elsevier, 2016.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013921>>

Acesso em: 10 set. 2016.

GOOGLE MAPS. **Google Maps**. Disponível em: <www.google.com/maps>

Acesso em: 9 jun. 2016.

IBGE – **Infográficos: Dados gerais do município**.

Disponível em: <

<http://www.cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?lang=&codmun=420140&search=%7Cararangua>>

Acesso em: 9 set. 2016.

La France. **29 avril 1899: La Jamais contente franchit les 100km/h et établit un nouveau record de vitesse**. (D’après « A travers le monde », paru en 1899 et « Histoire de l’automobile », paru en 1907) Publicado em 29 de Abril de 2016.

Disponível em: <<http://www.france-pittoresque.com/spip.php?article5753>>

Acesso em: 10 set. 2016.

LARMINIE, J., LOWRY, J.. **Electric vehicle technology explained**. Second Edition. Wiley, 2012.

LI, M., ZHANG, X., LI, G.. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. **Energy 94 (2016)**. Elsevier, 2016.

Disponível

em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215015583>>

Acesso em: 20 set. 2016.

MACHADO, F. F.. **Análise das Políticas Públicas para a Inclusão do Automóvel Elétrico no Brasil**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, 2015.

Disponível em:<www.iee.usp.br/sites/default/files/FelipeFerrazMachado.pdf>

Acesso em: 25 out. 2016.

MAHMUD, K. TOWN, G. E.. A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks. **Applied Energy 172 (2016)**. Elsevier, 2016.

Disponível

em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916304275>>

Acesso em 26 out. 2016.

MALLOUH, M. A.. ABDELHAFEZ, E.. SALAH, M.. HAMDAN, M.. SURGENOR, B.. YOUSSEF, M.. Model development and analysis of a mid-sized hybrid fuel cell/battery vehicle with a representative driving cycle. **Journal of Power Sources 260 (2014)**. Elsevier, 2014.

Disponível em:<

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531400305X>>

Acesso em: 14 set. 2016.

Mesbahi, T., Khenfri, F., Rizouga, N., Chaabana, K., Bartholomeüs, P., Le Moigne, P.. Dynamical modeling of Li-ion batteries for electric vehicle applications based on hybrid Particle Swarm–Nelder–Mead (PSO–NM) optimization algorithm. **Electric Power Systems Research 131 (2016)**. Elsevier, 2016.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615003144>>

Acesso em: 26 out. 2016.

Ministério do Meio Ambiente (MMA) - **Definições**.

Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/defini%C3%A7%C3%B5es>>

Acesso em: 15 out. 2016.

MOKRANI, Z., REKIOUA, D., REKIOUA, T. Modeling, control and power management of hybrid photovoltaic fuel cells with battery bank supplying electric vehicle. **International Journal of Hydrogen Energy 39 (2014)**. Elsevier, 2014.

Disponível

em:<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914009434>>

Acesso em: 13 out. 2016.

O'HAYRE, R., CHA, S., COLELLA, W., PRINZ, F. B.. **Fuel Cell Fundamentals**. Third Edition, Wiley, 2006.

SMITHSONIAN COLLECTION, EV1 electric automobile.

Disponível em: <http://amhistory.si.edu/onthemove/collection/object_1303.html>

Acesso em: 10 set. 2016.

SPERLING, D., GORDON, D.. **Two billion cars: driving toward sustainability.**

Oxford University Press, Inc. 2009.

TESLA. **Model S.**

Disponível em: <<https://www.tesla.com/models>>

Acesso em: 13 set. 2016.

TOYOTA - **The 2017 TOYOTA MIRAI.**

Disponível em: <<https://ssl.toyota.com/mirai/fcv.html>>

Acesso em: 15 set. 2016.

USEPA - United States Environmental Protection Agency - **Vehicle and Fuel Emissions Testing - Dynamometer Drive Schedules.**

Disponível em: <<https://www.epa.gov/vehicle-and-fuel-emissions-testing/dynamometer-drive-schedules>>

Acesso em: 10 ago. 2016.

WAGER, G., WHALE, J., BRAUNL, T.. Driving electric vehicles at highway speeds: The effect of higher driving speeds on energy consumption and driving range for electric vehicles in Australia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews 63 (2016).** Elsevier, 2016.

Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116301721>>

Acesso em: 14 out. 2016

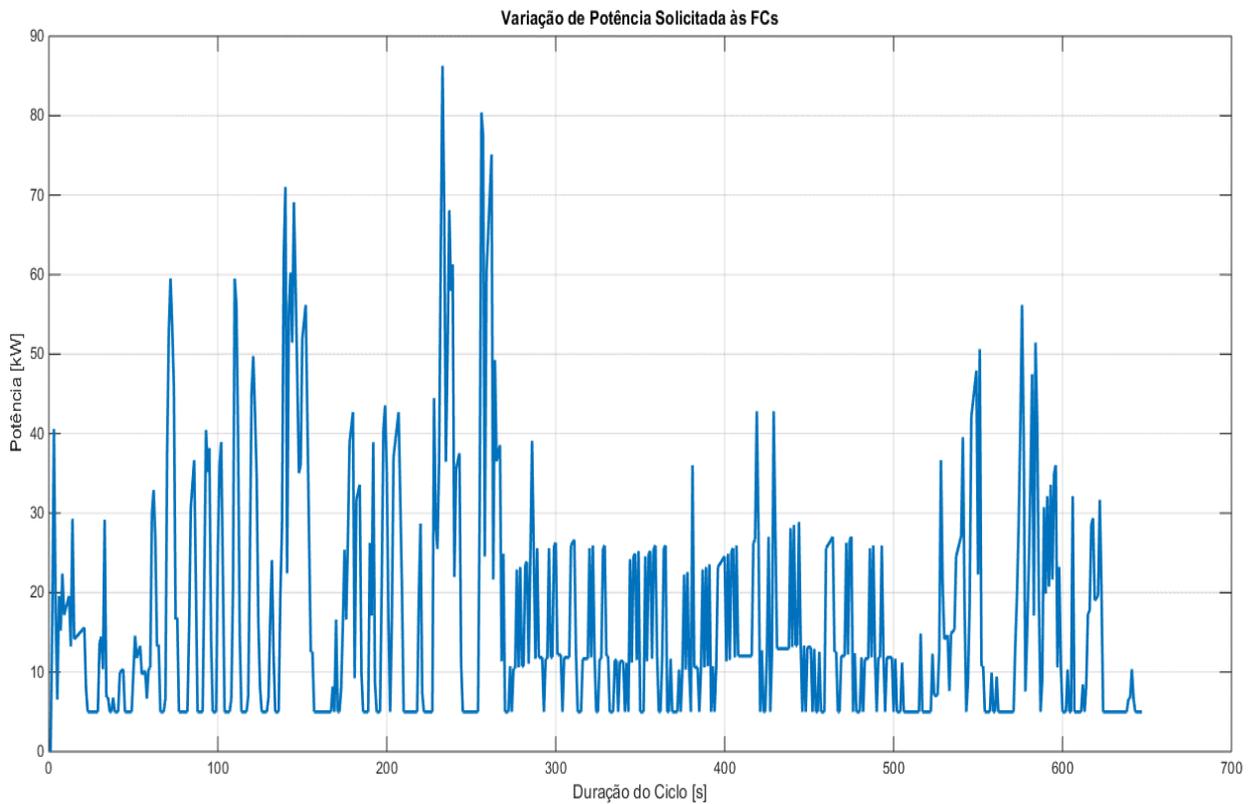
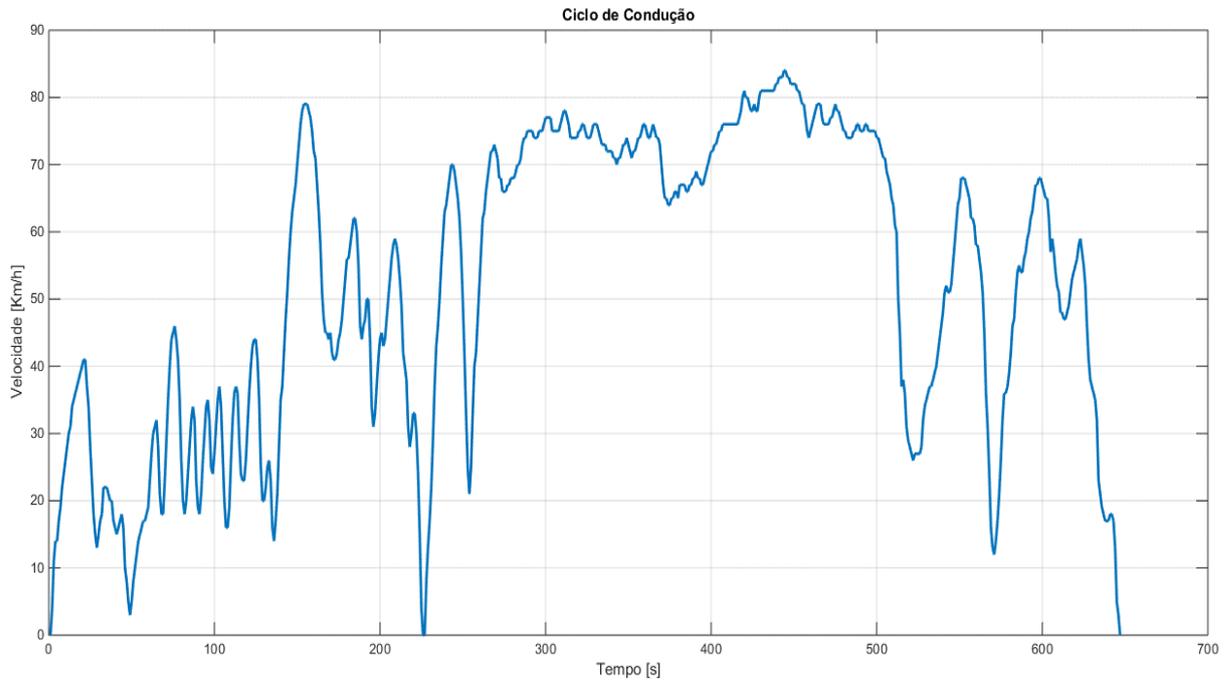
WANG, C.. **Extended Range Electric Vehicle Powertrain Simulation and Comparison with Consideration of Fuel Cell and Metal-air Battery.** Thesis (Mestrado) University of Waterloo. Waterloo, Ontario, Canada, 2016.

Disponível

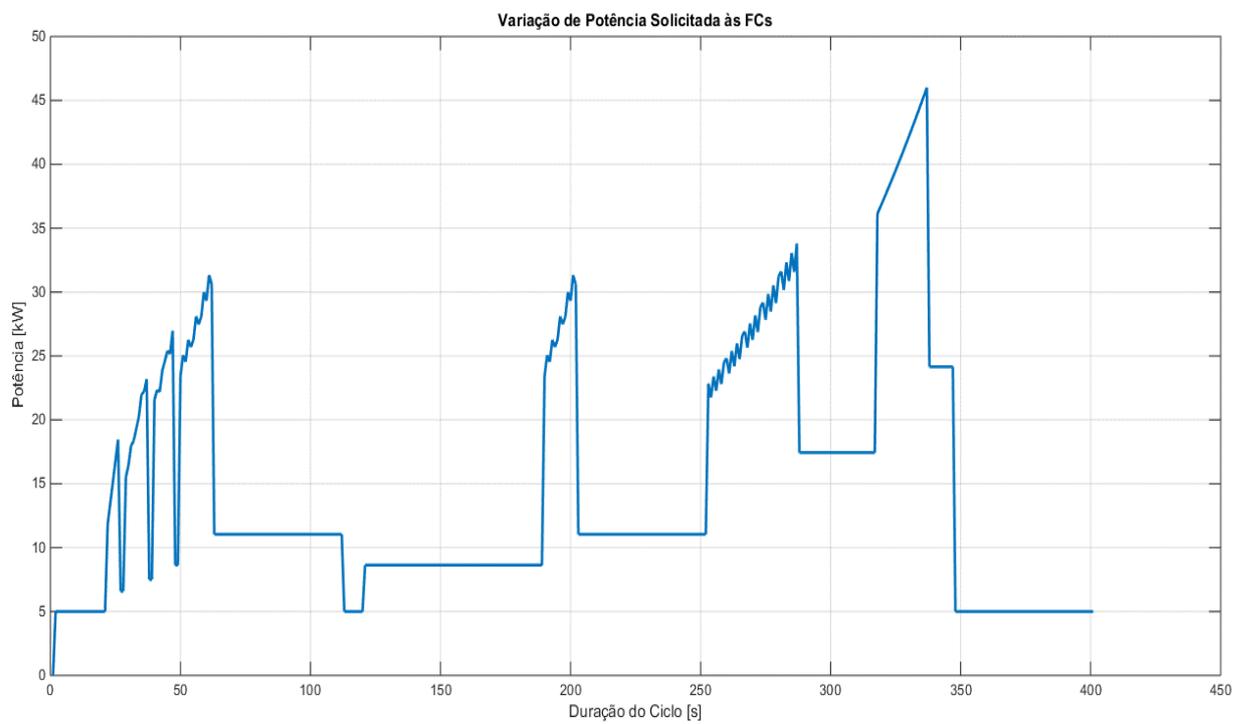
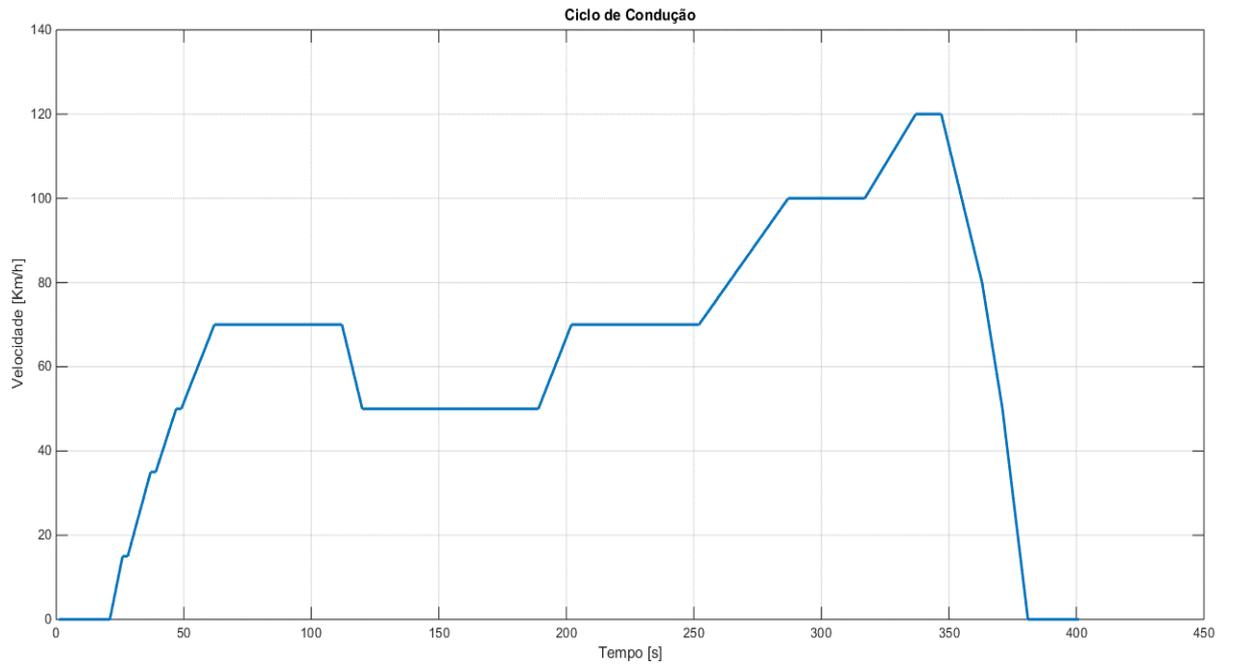
em: <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/10372/Wang_Caixia.pdf?sequence=3>

Acesso em: 9 set. 2016.

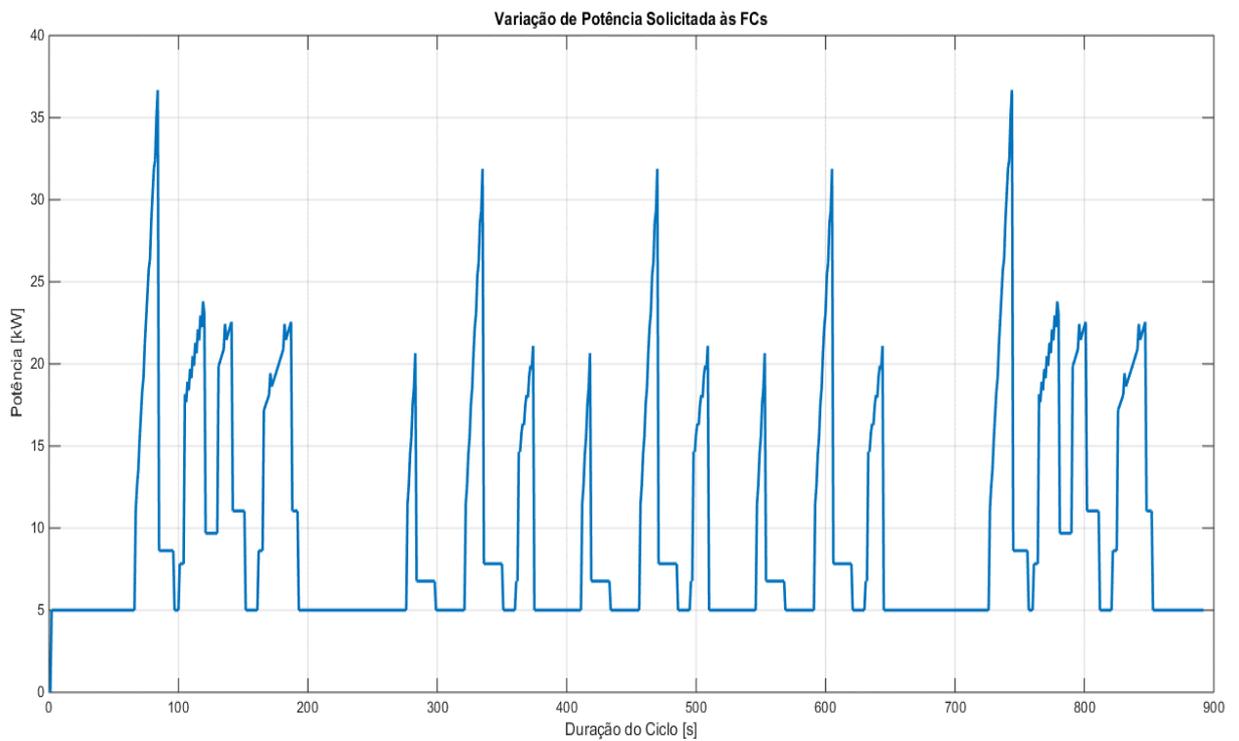
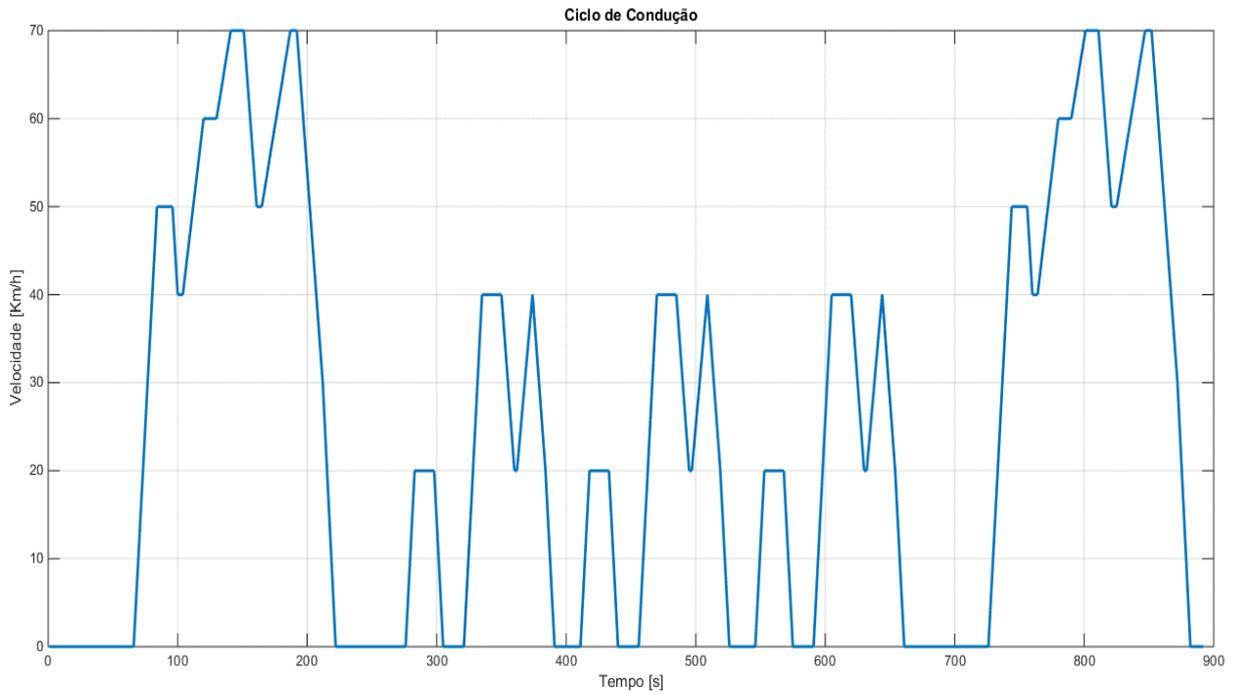
APÊNDICE A – Ciclo de Condução de Araranguá – Balneário Arroio do Silva e Variação de Potência nas Células de Combustível



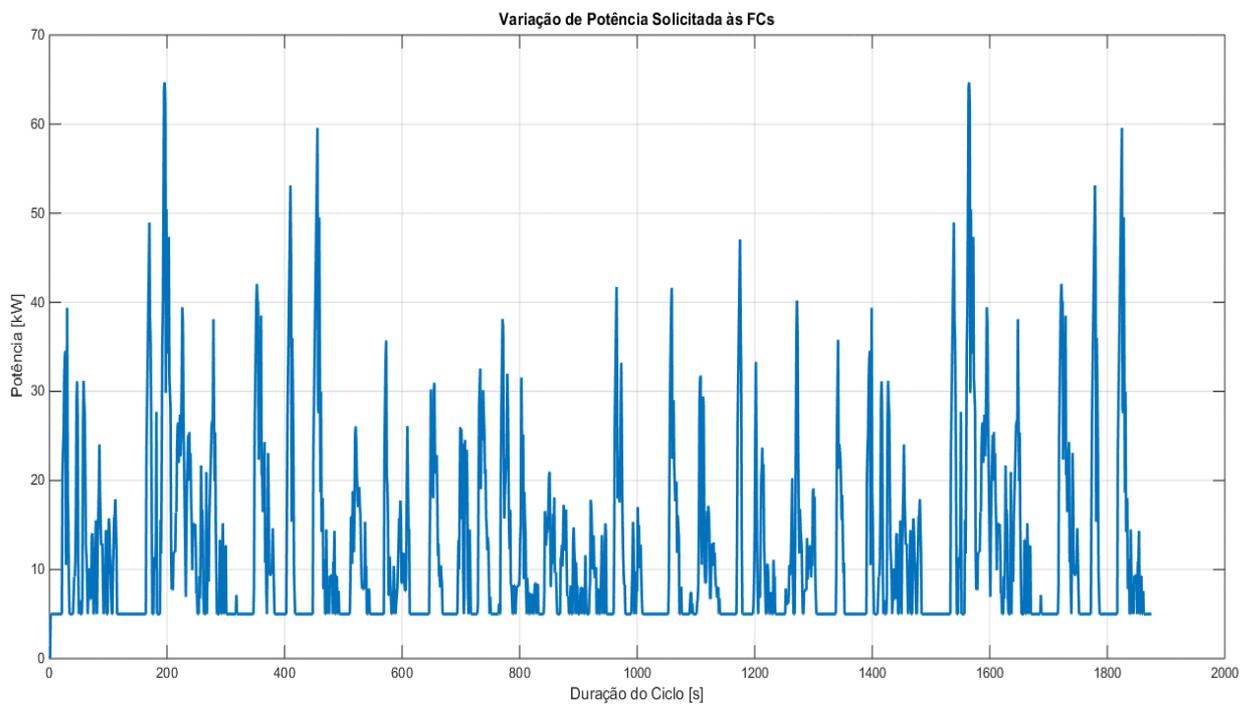
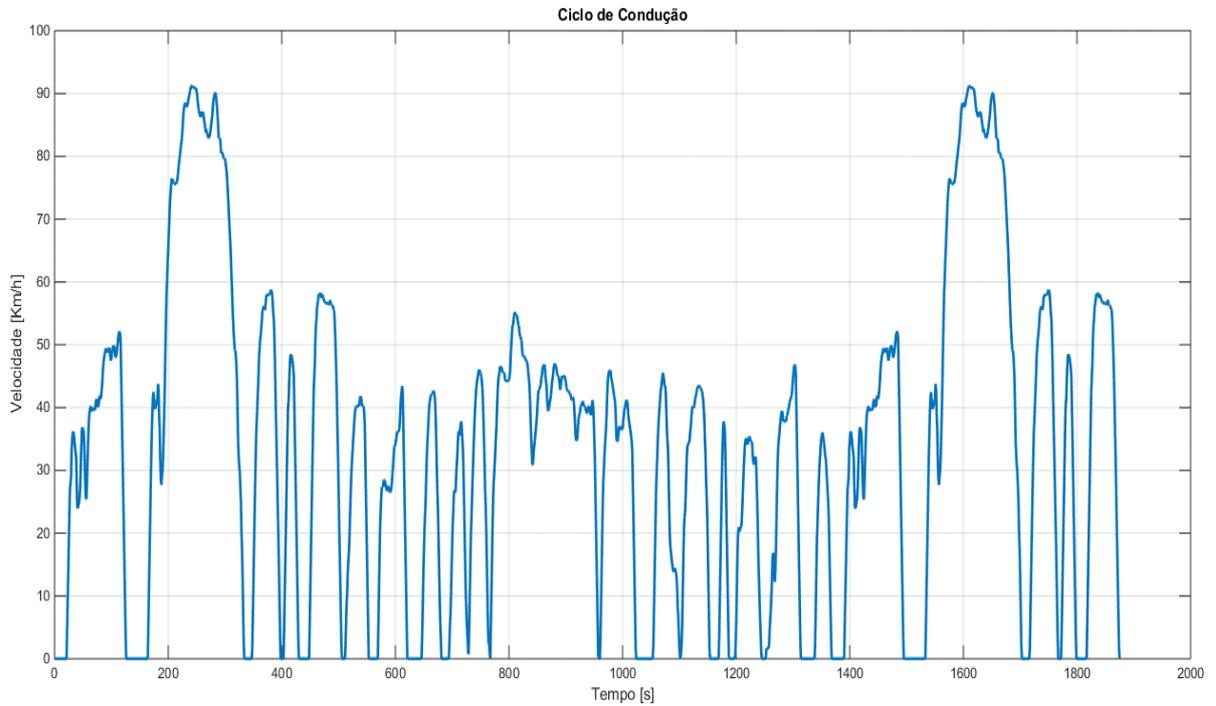
APÊNDICE B – Ciclo de Condução EUDC e Variação de Potência nas Células de Combustível



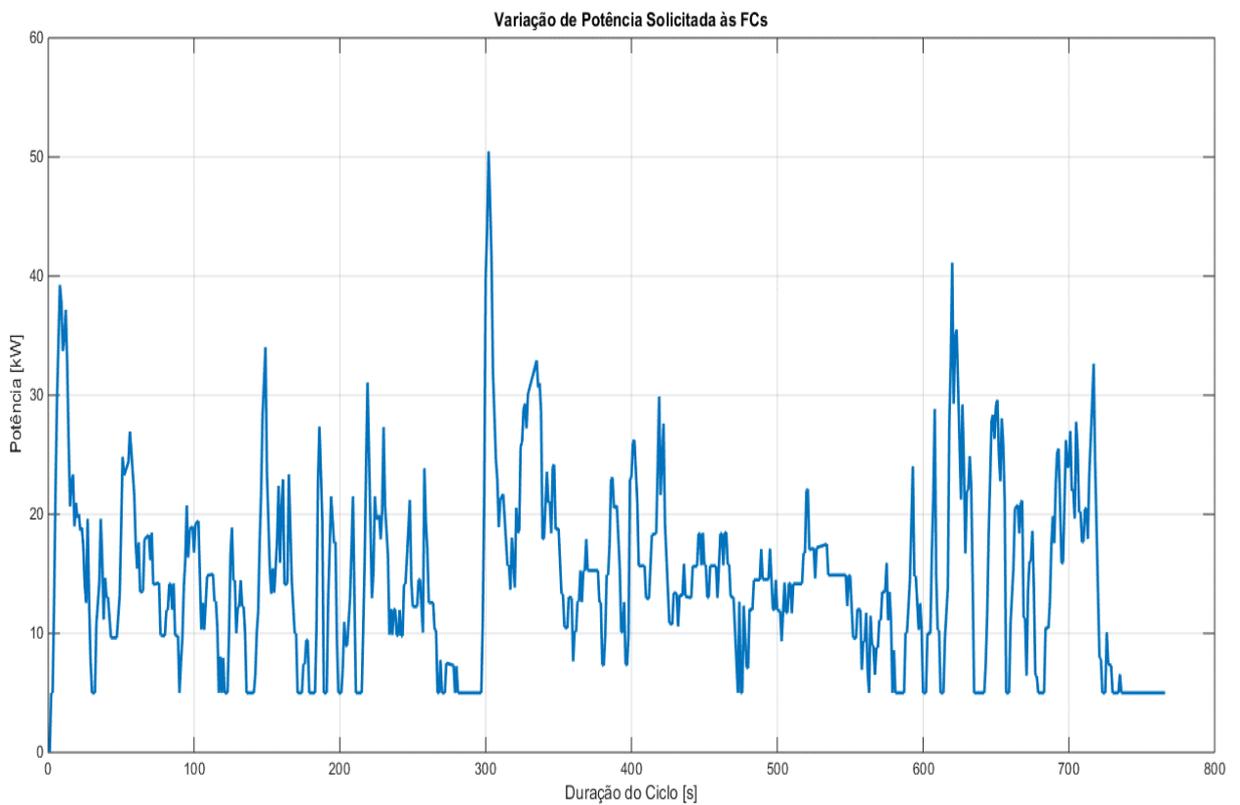
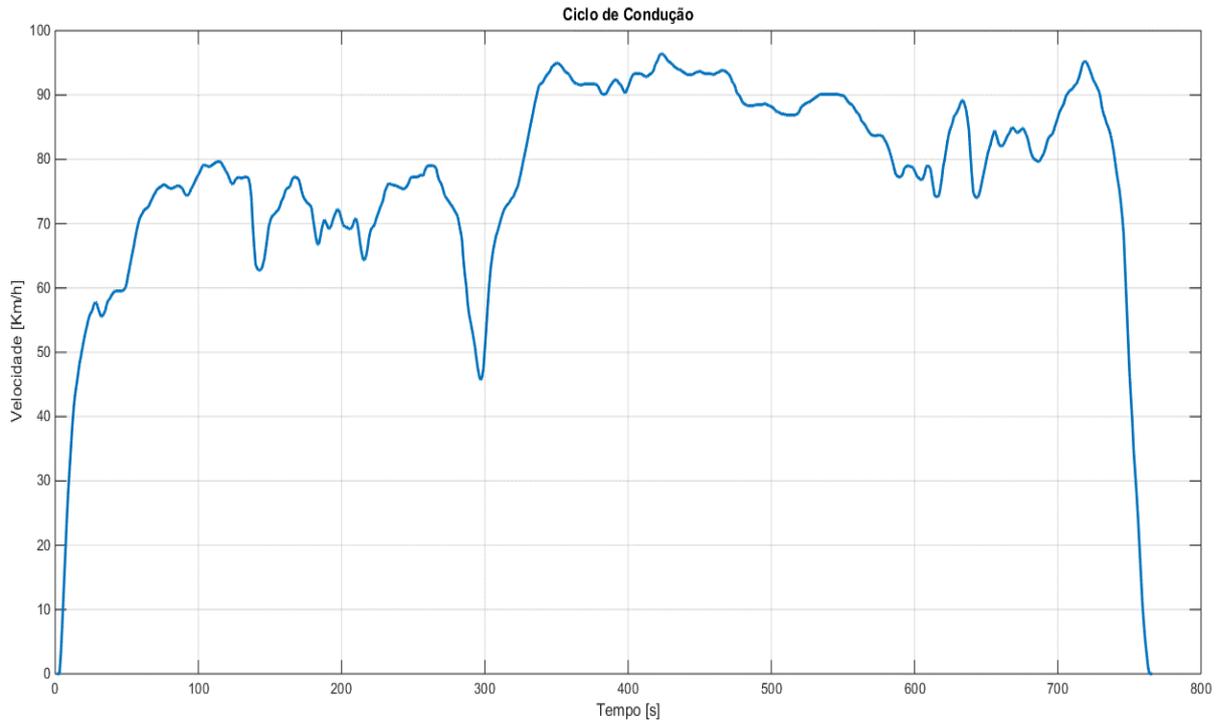
APÊNDICE C – Ciclo de Condução de JC10-15 e Variação de Potência nas Células de Combustível



APÊNDICE D – Ciclo de Condução de FTP-75 e Variação de Potência nas Células de Combustível



APÊNDICE E – Ciclo de Condução de HWFET e Variação de Potência nas Células de Combustível



AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Ângela por me proporcionar os maiores ensinamentos da vida. A minha namorada e futura esposa Edvana, por ser companheira durante essa caminhada.

A minha família, que mesmo ao me ausentar esteve sempre presente.

A Professora Dr^a Elise Sommer Watzko pela orientação e pelo tempo dedicado durante o desenvolvimento deste trabalho.

A todos do Campus Araranguá da Universidade Federal de Santa Catarina, que diante das dificuldades enfrentadas nunca deixaram de cumprir com excelência suas atividades.

Aos colegas do curso de Engenharia de Energia e aos colegas do basquete.