

Desenvolvimento de um Código em Linguagem MATLAB® para Previsão do Consumo de Combustível de um Veículo Ultra Eficiente

Development of a MATLAB® Language Code for Prediction of Ultra Efficient Vehicle Fuel Consumption

Gabriel Carvalho Candido¹, Tobias Anderson Guimarães²

RESUMO

A busca constante por evolução, otimização e novas tecnologias acontece em todos os campos existentes, não poderia ser diferente no ramo da engenharia mecânica, em especial na redução do consumo de combustível no setor automobilístico. Ao olhar o contexto atual onde a maioria busca por veículos mais econômicos e novas fontes de energia, fica claro a importância da eficiência energética. Visando este cenário, a equipe Triângulo Verde da Universidade Federal do Triângulo Mineiro tem o propósito de construir um protótipo ultra eficiente para participar de algumas competições, entre elas, a Shell Eco Marathon Brasil. Pensando em ajudar a equipe, este trabalho foi desenvolvido. Nele foi levantado os principais fatores que influenciam no consumo do protótipo, posteriormente foi desenvolvido um algoritmo em MATLAB® com o intuito de otimizar o consumo de combustível do veículo com base em alguns parâmetros de entrada, por exemplo a velocidade máxima, a relação de transmissão e a porcentagem de pressão do acelerador.

Palavras-chave: Consumo de Combustível. Eficiência Energética. Modelagem Matemática. Veículo Ultra Eficiente.

ABSTRACT

The constant search for evolution, optimization and new technologies takes place in all existing fields, it could not be different in the field of mechanical engineering, especially in the reduction of fuel consumption in the automotive sector. When looking at the current context where most people are looking for more economical vehicles and new energy sources, the importance of energy efficiency becomes clear. Aiming at this scenario, the Triângulo Verde team of the Federal University of Triangulo Mineiro intends to build an ultra-efficient prototype to participate in some competitions, including the Shell Eco-Marathon Brazil. Thinking about helping the team, this work was developed. In it, the main factors influencing the consumption of the prototype were raised, later an algorithm was developed in MATLAB® in order to optimize the vehicle's fuel consumption based on some input parameters, for example, maximum speed, transmission ratio and the percentage of throttle pressure.

Keywords: Consumption of Fuel. Energetic Efficiency. Mathematical Modelling. Ultra Efficient Vehicle.

¹ Graduando em engenharia elétrica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6381-094X>

E-mail:

gabrielcandido1999@gmail.com

² Doutorado em engenharia mecânica, Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6350-7867>

1. INTRODUÇÃO

Entre os maiores desafios da indústria automobilística está a construção de veículos que sejam seguros, sustentáveis e principalmente com a maior eficiência energética possível, ou seja, busca-se em especial, a construção de veículos com o menor consumo de energia. Porém, para que se atinja o ponto máximo de eficiência energética, muitas variáveis devem ser levadas em conta, pois cada uma influencia o consumo de alguma forma.

De uma forma geral, o consumo de combustível de um veículo é função da potência requerida para o seu acionamento (GILLESPIE, 1991). Quanto maior a potência, maior o consumo específico de combustível do motor. Porém, para estimar o consumo de um veículo são necessários alguns outros parâmetros de entrada além da potência requerida para o acionamento. Uma forma de adquirir alguns desses parâmetros é obter as curvas de torque e consumo do motor, da sua rotação de marcha lenta até a rotação máxima. Destas curvas, pode-se relacionar as zonas onde há um maior ou menor consumo de combustível do motor (PELLEGRINO, 2015).

Existem também importantes parâmetros de entrada específicos que afetam diretamente o consumo de um veículo. Por exemplo, o coeficiente de arrasto depende da geometria da carenagem do veículo. O peso do veículo também tem muita relevância sobre o consumo. Por fim, o coeficiente de arrasto do veículo e a calibragem de pneus devem ser considerados de grande valia ao avaliar a utilização de combustível de um carro. De todos os parâmetros citados, para veículos que trafegam em baixa velocidade, o fator que possui maior influência no consumo de combustível é o peso do veículo, ou seja, quanto menor a massa do veículo menor será a potência requerida para o seu acionamento. Apesar de não influenciar tanto quanto o peso, o sistema de transmissão também requer um ponto de atenção já que este possui uma considerável influência no consumo devido as perdas de potência que ocorrem na transferência do torque e rotação do motor para a roda traseira motriz.

Em sua dissertação, Ferreira (2017) desenvolve um código em MATLAB® com o intuito de prever e otimizar o consumo de combustível para veículos construídos para a competição Shell Eco Marathon de Londres, levando em consideração fatores que impactam este consumo. Ele também considerou vários modos de funcionamento, com valores de entrada diferentes entre eles, para cada um deles acontece uma simulação diferente que altera o código. Neste trabalho foi desenvolvido um código em linguagem

MATLAB® usando uma metodologia similar a proposta por Ferreira (2017) para estimar o consumo de um veículo ultra eficiente para competição na Shell Eco Marathon Brasil. Os diversos parâmetros de influência no consumo de combustível do veículo, como por exemplo, perfil da pista, massa e velocidade do veículo, coeficientes de atrito e arrasto aerodinâmico, etc., também foram considerados na elaboração do código.

Nesse sentido, com o intuito de projetar e criar um carro ultra eficiente e sustentável, a equipe de eficiência energética da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, chamada Triângulo Verde, desenvolve protótipos para competir em eventos patrocinados pela Petrobrás e Shell. E foi em um desses protótipos da equipe que o estudo deste trabalho foi realizado. Neste contexto, o principal objetivo do trabalho foi desenvolver e prever o consumo de combustível de um protótipo ultra eficiente com base em alguns dados de entrada do veículo utilizado fazendo uso de um código de programação em MATLAB®. E com base nos resultados obtidos através do código, buscar a otimização do protótipo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Uma vez por ano, estudantes do Brasil e da América do Sul participam no Rio de Janeiro em busca do título de protótipo veicular com maior eficiência energética (Figura 1). A Shell Eco Marathon busca estimular o desenvolvimento de ideias sustentáveis nos alunos através da pesquisa e inovação. Os estudantes devem projetar, construir e testar veículos ultra eficientes para competir em um desafio desenvolvido pela Shell que acontece a mais de 35 anos. O objetivo da competição é desafiar os limites de como usar a energia em automóveis, seja ela proveniente de uma bateria elétrica, etanol ou gasolina.



Figura 1. Protótipo de um veículo ultra eficiente (Shell, 2021).

A competição acontece no Brasil desde 2016, e é declarado como vencedor a equipe que projetar, construir e dirigir o veículo que percorrer a maior distância possível com a menor quantidade de energia. Para conseguir atingir o objetivo da competição que é a construção de um protótipo ultra eficiente, o veículo é desenvolvido com o uso de materiais de baixo peso, além da carenagem possuir um bom formato aerodinâmico para tentar reduzir as forças de arrasto e o sistema de transmissão deve ser o mais eficiente possível afim de conseguir reduzir as perdas de potência necessárias para o seu acionamento.

Nesse sentido foi desenvolvido neste trabalho um código em linguagem MATLAB® para estimar o consumo de combustível do veículo ultra eficiente da Equipe Triângulo Verde da UFTM. A elaboração do código foi baseada no trabalho de Ferreira (2017). Esse código possui como parâmetros de entrada as coordenadas, x, y e z do perfil da pista de competição, velocidade de condução do veículo e os parâmetros de projeto do veículo, isto é, massa, área frontal, coeficiente de arrasto aerodinâmico, coeficiente de atrito de rolamento dos pneus e eficiência na transmissão de potência do sistema de correias.

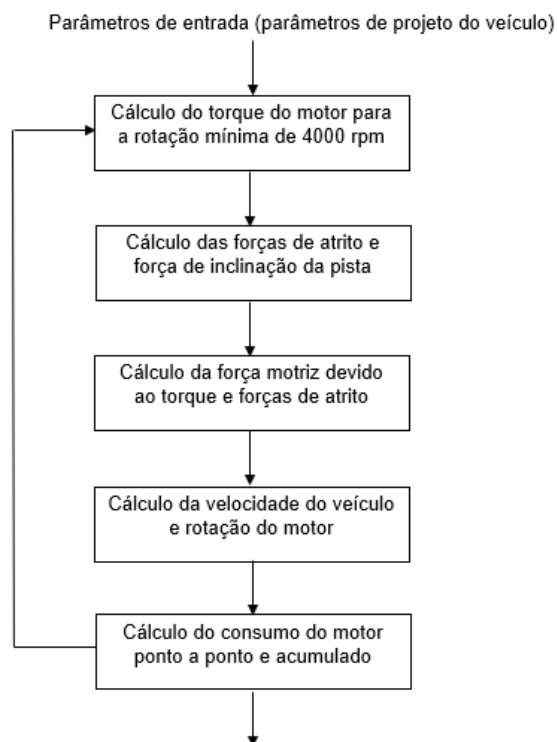


Figura 2. Fluxograma do algoritmo para estimativa do consumo de combustível.

O funcionamento do código que estima o consumo de combustível do veículo de competição é mostrado de maneira simplificada no fluxograma da Figura 2. Na elaboração

do código foram utilizadas as equações para a formulação prevista da área de dinâmica de veículos para o cálculo do torque do motor e requerido para o acionamento, força de tração necessária para o movimento do veículo, potência de acionamento e as forças de atrito devido ao arrasto do veículo com o ar e a força de atrito de rolamento entre os pneus e pista de competição (GILESPIE,1991; FERREIRA, 2017).

A ideia do algoritmo de cálculo é calcular o torque do motor necessária para iniciar o movimento do veículo em repouso (partida na competição). Posteriormente, a rotação do motor é estimada com base na força de tração dada pela diferença entre a força motriz provida pelo motor e as forças de atrito e gravitacional devido a inclinação da pista. Usando essa rotação, é calculado então o torque e o consumo dadas pelas curvas características do motor. No próximo passo do algoritmo, é estimada a força motriz com base no torque calculado no passo anterior e o procedimento é repetido ponto a ponto usando as coordenadas da pista. O consumo de combustível é também estimado ponto a ponto de forma acumulativa usando a potência requerida pelo motor do veículo até completar o percurso. A Tabela 1 descreve as características do veículo.

Tabela 1. Dados de entrada do algoritmo.

Parâmetro	Magnitude
Massa do veículo e piloto [kg]	90
Coeficiente de atrito de rolamento entre os pneus e a pista []	0,01
Coeficiente de atrito de rolamento em curva entre os pneus e a pista []	0,02
Coeficiente de arrasto aerodinâmico []	0,2
Área frontal do veículo [m ²]	0,5
Eficiência na transmissão de potência []	0,98
Relação de transmissão 1 fixa na saída do motor []	1/3
Raio da roda traseira [m]	0,25
Densidade da gasolina [g/ml]	0,76
Volume do tanque de combustível [ml]	250

Durante a execução do algoritmo descrito na Figura 2, nas etapas do cálculo do torque e consumo do motor Honda do veículo ultra eficiente, modelo GX-35, foram empregadas as curvas características fornecidas pelo fabricante (FERREIRA, 2017). As curvas características de torque e potência do motor estão ilustradas na Figura 3 (FERREIRA, 2017). Na elaboração do programa em linguagem MATLAB® para o cálculo do consumo e torque fornecido pelo motor, foram empregadas funções de interpolação de 3º grau com base em alguns pontos das curvas características ilustradas na Figura 3.

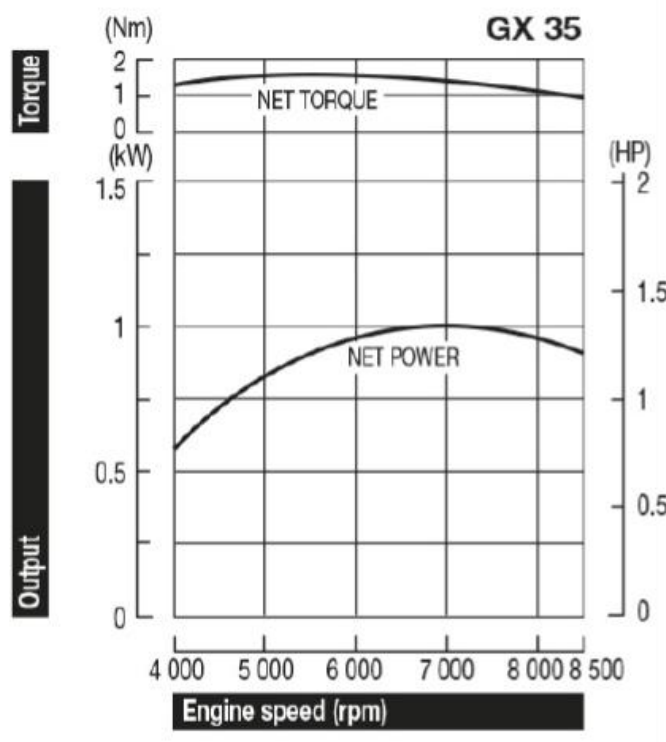


Figura 3. Curvas características de torque e potência do motor Honda, modelo GX-35 (FERREIRA, 2017).

Após o desenvolvimento do código em linguagem MATLAB® foram feitas simulações para avaliar a melhor condição operacional do veículo buscando a minimização do consumo de combustível ou maximização da eficiência energética. Como o principal objetivo é obter os melhores parâmetros a serem utilizados no veículo para que este tenha seu melhor rendimento, a metodologia adotada foi de variar as seguintes entradas no código: velocidade máxima, pressão exercida no pedal do acelerador e a segunda relação de transmissão.

Inicialmente manteve-se a segunda relação de transmissão e a pressão exercida no pedal do acelerador constantes para os valores de 1/4 e 70%, respectivamente. Em seguida, variou-se a velocidade máxima para os valores de 20km/h, 25km/h e 30km/h.

Após isso, selecionou-se a velocidade em que o carro obteve seu melhor rendimento, manteve-se a pressão no pedal ainda constante em 70% e variou-se a relação de transmissão para os seguintes valores de pinhão e coroa que são mostrados na Tabela 2. Depois de variar a velocidade e a segunda relação de transmissão (escolheu-se a combinação para esta última que gerou mais economia), foi a vez de mantê-las constantes e variar a pressão exercida no pedal. Utilizou-se as pressões de 50%, 60%, 70% e 90%.

Por fim, após realizar testes variando os três parâmetros, foi possível analisar com qual combinação de velocidade máxima, razão de transmissão e pressão no pedal do acelerador o veículo obterá uma melhor eficiência energética.

Tabela 2. Dados da segunda transmissão de potência do veículo por correntes para a roda motriz traseira.

Número de dentes do pinhão	Número de dentes da coroa	Relação de transmissão
14	56	1/4
11	54	11/54
15	50	3/10

3. RESULTADOS

Para este trabalho, o perfil da pista utilizado foi a pista da competição Shell Eco Marathon Brasil do ano de 2018. O evento aconteceu no centro de convenções Riocentro, localizado no bairro da Barra da Tijuca, na cidade do Rio de Janeiro. O perfil mostrado na Figura 4 foi extraído com o auxílio do software Google Earth® que fornece as coordenadas x, y e z da pista, bem como a latitude e longitude dos pontos.



Figura 3. Perfil da pista da competição Shell Eco Marathon Brasil 2018 (Google Maps®, 2021).

Após extrair os pontos em coordenadas, fez-se necessário o uso do software TCGeo® do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) para transformar o sistema de coordenadas no sistema UTM (Universal Transversa de Mercator). A opção de usar o sistema de coordenadas UTM é devido ao fato deste sistema basear-se no plano cartesiano (eixos x e y) e, principalmente, por utilizar a unidade metro para medir distâncias.

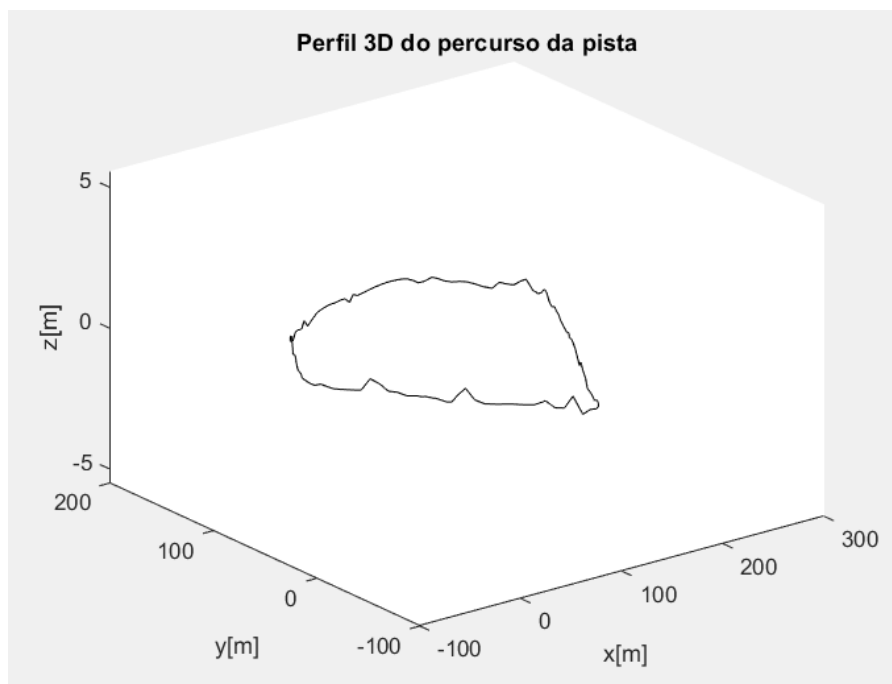


Figura 4. Perfil da pista da competição 3D gerada no software MATLAB com coordenadas cartesianas.

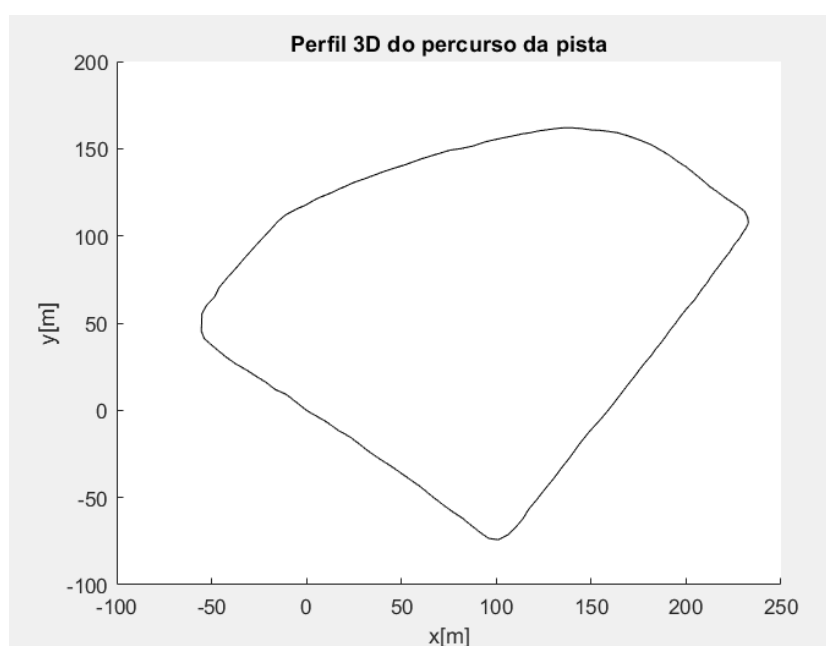


Figura 5. Vista superior da pista de competição gerada no software MATLAB®.

As coordenadas extraídas do perfil da pista foram discretizadas em vários pontos e estes pontos foram plotados no MATLAB®. A Figura 4 mostrada a seguir ilustra o perfil da pista de competição em 3D. Já na Figura 5 pode-se notar a semelhança entre a vista superior da pista gerada no MATLAB® com a pista extraída do Google Earth® que foi mostrada na Figura 3, validando a extração dos pontos. Na Figura 3 aparece a pista com 800m, já no algoritmo, a pista possui 779,35m, ou seja, uma divergência de apenas 2,58%.

Após a definição das coordenadas da pista de competição foram realizadas as diversas simulações variando os parâmetros de entrada do algoritmo de cálculo do consumo de combustível, conforme descrito anteriormente. Ao todo foram realizados sete testes. Para os testes obteve-se os gráficos de velocidade, torque, consumo e rotação do motor ao longo do percurso em função dos pontos da pista. No eixo das abcissas dos gráficos das figuras a seguir, está o número de pontos em que o percurso foi discretizado, um total de 137 pontos.

Nos primeiros testes realizados, os parâmetros de entrada foram definidos da seguinte forma: massa do conjunto (piloto + carro) = 90kg; pressão no pedal do acelerador = 70%; relação de transmissão = 1/4. As velocidades do veículo foram de 20, 25 e 30 km/h. Para este teste, foram obtidos os gráficos de velocidade, torque e rotação do motor ao longo do percurso. Para a velocidade de 20 km/h, os gráficos estão ilustrados nas Figuras 6, 7, 8 e 9, respectivamente.

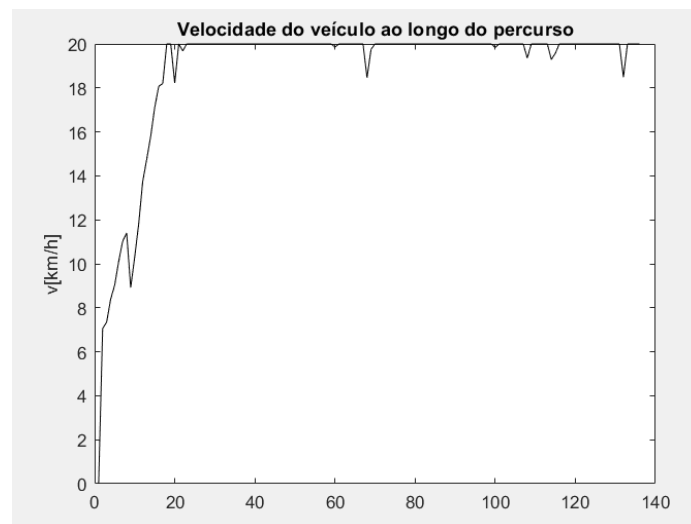


Figura 6. Velocidade do veículo ao longo da pista para 20 km/h.

Observa-se pela Figura 6 que o veículo atinge a velocidade de 20km/h. Também é possível notar pelas Figuras 7 e 8 que o torque e as rotações do motor ao longo do percurso

se estabilizam em valores próximos a, respectivamente, 0.80 N.m e 3310 rpm. Além de notarmos pela Figura 7 que o torque de partida do veículo foi de 1.36 N.m.

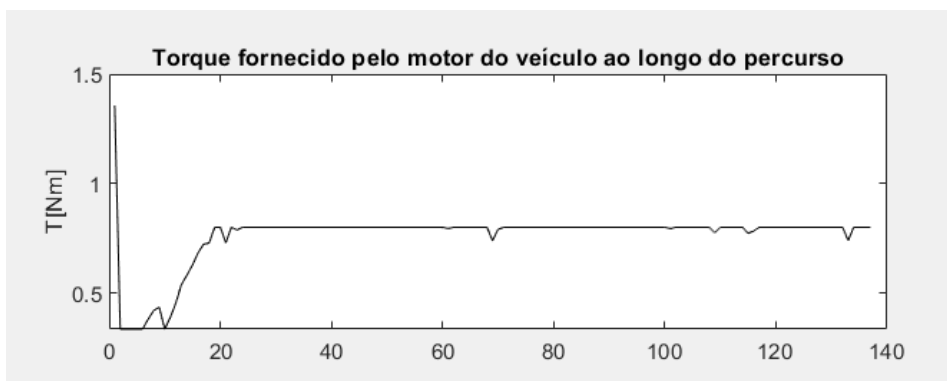


Figura 7. Torque fornecido pelo motor do veículo durante o percurso para 20 km/h.

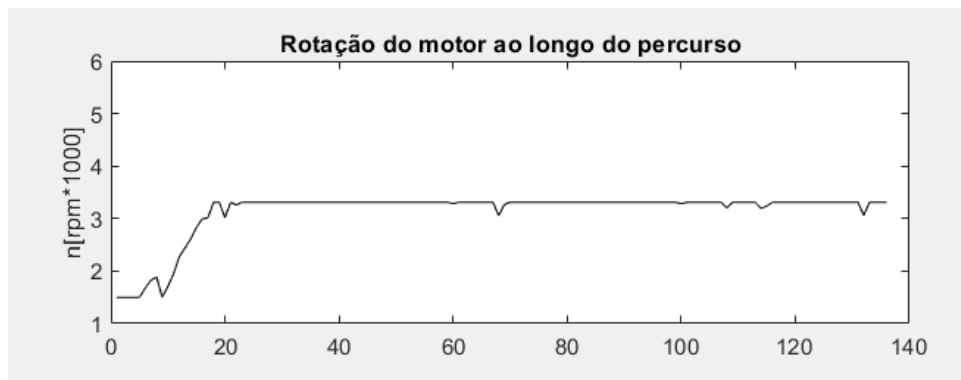


Figura 8. Rotação do motor ao longo do percurso para 20 km/h.

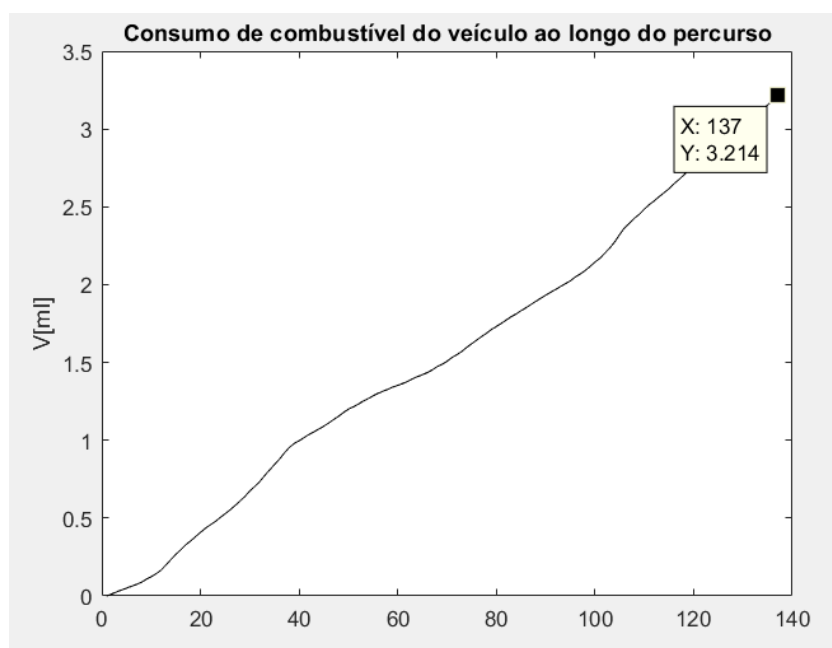


Figura 9. Consumo de combustível do veículo durante o percurso da competição para 20 km/h.

Ainda sobre o teste com velocidade de 20 km/h, o mesmo nos retorna como resultado da simulação um consumo médio de 242,50 km/L. Fazendo com que o veículo consuma 3,21 mililitros de combustível por volta, conseguindo percorrer 77 voltas completas do percurso. Para efeito de comparação, a equipe vencedora da Shell Eco Marathon Brasil de 2019 para veículos a gasolina, conseguiu um consumo de 542,4 km/L. A Figura 9 mostra o consumo do combustível do veículo ao longo do percurso, nota-se que a curva é acumulativa, atingindo os 3.21 ml já mencionados ao fim do percurso.

Para as velocidades de 25 e 30 km/h mantendo constante a pressão do pedal de 70 % com a relação da 1ª transmissão igual a 1/4, o consumo de combustível determinado pelo código após as simulações foi de 3,37 e 3,72 ml, respectivamente. Como o consumo por volta para a velocidade de 20 km/h foi menor (3,21 ml/volta), foi escolhido essa velocidade para as demais simulações variando a relação da 2ª transmissão e a pressão do pedal do acelerador.

Para a análise da relação da 2ª transmissão do veículo, foram realizados dois testes, um com relação de 3/10 e outro de 11/54. Passados os testes variando a relação de transmissão, decidiu-se por realizar testes variando a pressão no pedal do acelerador. A relação de transmissão de 3/10, pois foi a que obteve a melhor performance em relação ao consumo nos testes anteriores. As variáveis de entrada dos testes a seguir foram utilizadas com os seguintes valores: massa igual a 90kg; a velocidade máxima igual a 20 km/h e a razão de transmissão igual a 3/10. Já a pressão no pedal do acelerador foi testada em 50%, 60% e 90%.

As Figuras 10, 11, 12 e 13 ilustram o comportamento da velocidade, torque, rotação do motor e consumo de combustível para a situação mais eficiente do veículo, do ponto de vista de eficiência energética, com velocidade de 20 km/h, relação de transmissão de 3/10 e pressão no pedal do acelerador de 60%. Comparando com o gráfico da velocidade das Figura 10 e 6, vemos que com a pressão no pedal do acelerador em 60%, o veículo demora mais tempo para atingir a velocidade final de 20km/h. Na última condição, a rotação do motor também se estabiliza em 2759 rpm após atingir a velocidade máxima, já o torque, este se estabiliza em um valor bem abaixo quando comparado ao teste anterior, 0.56 N.m.

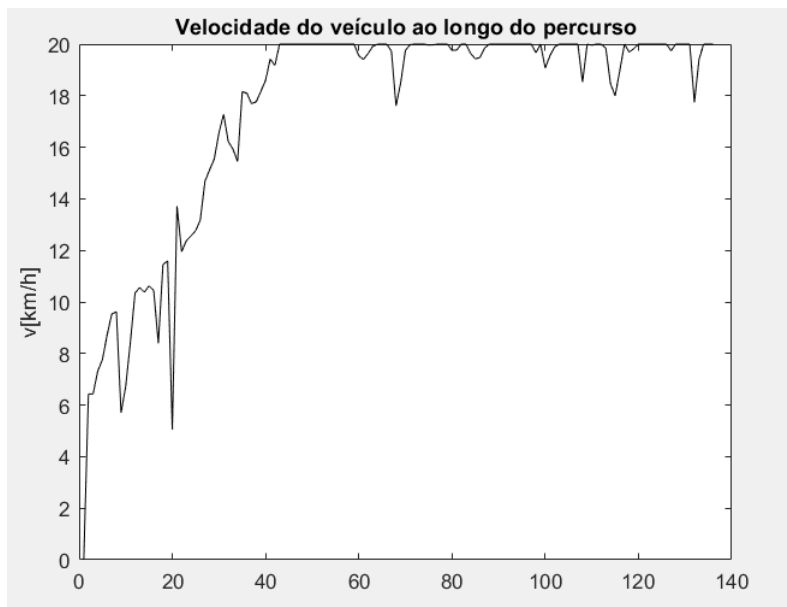


Figura 10. Velocidade do veículo ao longo da pista para 20 km/h, relação de transmissão de 3/10 e pressão no pedal de 60%.

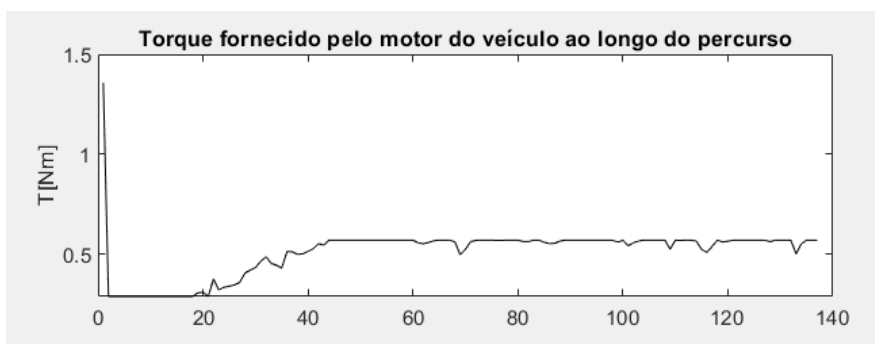


Figura 11. Torque fornecido pelo motor do veículo durante o percurso para 20 km/h, relação de transmissão de 3/10 e pressão no pedal de 60%.

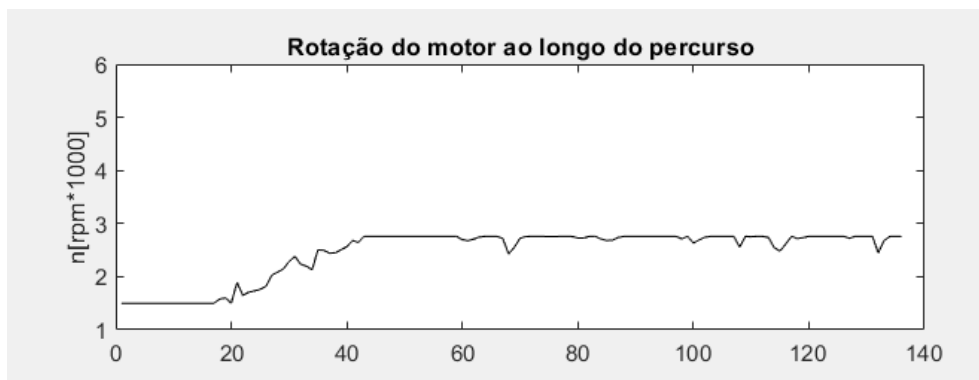


Figura 12. Rotação do motor ao longo do percurso para 20 km/h, relação de transmissão de 3/10 e pressão no pedal de 60%.

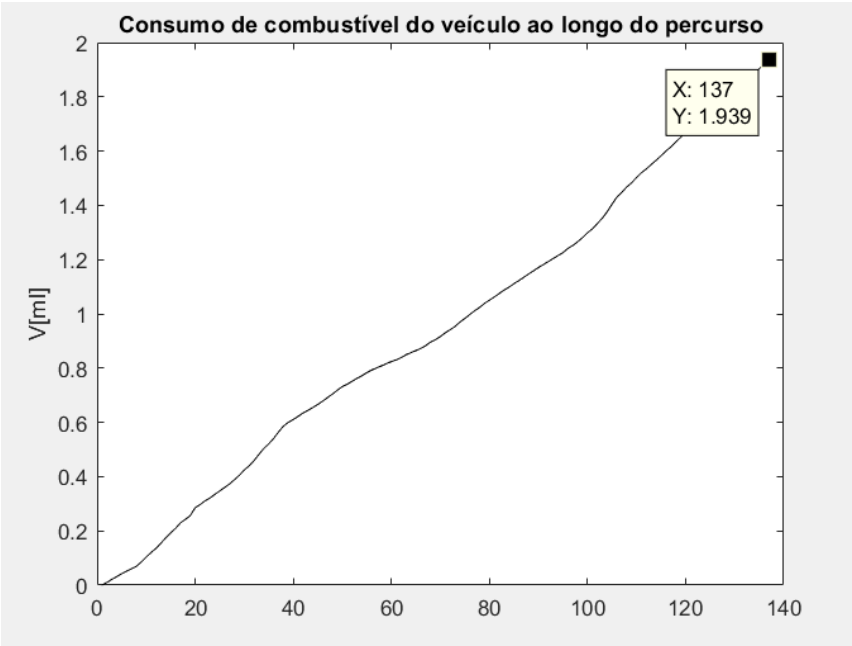


Figura 13. Consumo de combustível do veículo durante o percurso da competição para 20 km/h, relação de transmissão de 3/10 e pressão no pedal de 60%.

4. DISCUSSÃO

Tabela 3. Comparação do consumo de combustível do veículo para as simulações realizadas para as velocidades de 20, 25 e 30 km/h, 2ª relação de transmissão de 1/4, 11/54 e 3/10 e pressão no pedal do acelerador de 50, 60, 70 e 90%.

Média de consumo [km/l]	Número de voltas completas	Velocidade [km/h]	2ª relação de transmissão	Pressão no acelerador [%]
242,50	77	20	1/4	70
232,14	74	25	1/4	70
205,90	66	30	1/4	70
296,35	95	20	3/10	70
187,45	60	20	11/54	70
Percurso não efetuado	0	20	3/10	50
178,85	57	20	3/10	90
401,96	128	20	3/10	60

A Tabela 3 descreve e compara os resultados obtidos do consumo de combustível para todas as simulações avaliadas neste trabalho, com as velocidades de 20, 25 e 30 km/h, 2ª relação de transmissão de 1/4, 11/54 e 3/10 e pressão no pedal do acelerador de 50, 60, 70 e 90%. Para a combinação ideal em termos de eficiência energética, com uma velocidade máxima de 20 km/h, uma razão de transmissão de 3/10 e pressão no pedal do

acelerador de 60%, o veículo consegue completar o percurso levando um maior tempo para efetuar as voltas. No caso da pressão do pedal em 50% que poderia ser a situação mais eficiente, o veículo não consegue completar o percurso devido ao menor torque fornecido pelo motor ser insuficiente para vencer a inclinação da pista de competição.

Com a realização deste trabalho, é notável o quanto alguns fatores possuem grande influência no consumo de combustível de veículos motorizados. Pequenas mudanças nos valores de entrada, como por exemplo, variar a velocidade máxima, razão de transmissão ou a pressão no pedal do acelerador geram grandes impactos nas curvas de torque, rotação e consumo de combustível.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia para previsão do consumo de combustível de um veículo ultra eficiente de competição com base nos parâmetros operacionais, tais como, velocidade média, curvas características de torque e consumo do motor a combustão interna, pressão no pedal e perfil da pista. Os resultados obtidos mostraram que o algoritmo em MATLAB® performou bem ao longo dos testes, trazendo resultados coerentes que já eram esperados.

Comparando os testes em que apenas a velocidade máxima foi variada, o aumento da velocidade trouxe um aumento no consumo médio de combustível. Já alterando a razão de transmissão, uma relação de transmissão curta gerou uma combinação de maior torque e maiores rotações no motor, porém com mais gasto de combustível. Por fim, a pressão no pedal do acelerador teve influência semelhante à variação da velocidade máxima, ou seja, o desempenho diminuía conforme o parâmetro era aumentado.

Após as simulações visando a estimativa do consumo e potência requerida pelo veículo, a próxima etapa será a validação experimental dos resultados obtidos numericamente, ou seja, a confirmação se os resultados simulados estão aceitáveis. Para isto, pretende-se mensurar nesta fase a potência necessária através de medições da rotação e torque da roda motora e também o consumo de combustível pela medição do volume de combustível consumido. Ao final dos experimentos, os dados obtidos numericamente serão comparados com os dados experimentais a fim de se verificar as possíveis concordâncias e discrepâncias. Para isso, deve-se utilizar uma pista conhecida e de fácil acesso para que os dados experimentais possam ser verificados.

Uma vantagem da utilização do código para a competição é a previsão da melhor condição dos parâmetros operacionais do veículo visando o melhoramento do consumo de combustível. Assim, usando o perfil da pista da competição e as possíveis combinações dos parâmetros de entrada, tais como, velocidades de operação, relações de transmissão (quantidade de dentes das rodas dentadas do pinhão e coroa) e pressão do pedal de aceleração é possível prever qual a melhor condição que não comprometa a classificação da equipe de forma a minimizar o consumo de combustível.

Como sugestão de trabalho futuro, pretende-se empregar o método do algoritmo genético para otimização do consumo de combustível e sem a necessidade de testar diferentes configurações operacionais com base em tentativa e erro. Outro ponto a ser estudado é a influência da embreagem centrífuga presente no acionamento do sistema de transmissão devido ao escorregamento entre o disco de embreagem e o eixo do motor.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, J. P. **Apostila Elementos de Máquinas**. Instituto Federal do Espírito Santo – Campus São Mateus, 2011.

FERREIRA, S. F. P. **Desenvolvimento de software para simulação e otimização de consumo de veículos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade da Beira Interior, 2017.

GILLESPIE, T. D., **Fundamentals of Vehicle Dynamics**, 1a Edição, SAE (Society of Automotive Engineers), 1991.

GOOGLE MAPS, **RIO CENTRO - Rua Abrahão Jabour - Jacarepaguá, Rio de Janeiro – RJ**. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/place/RIO+CENTRO/@-22.9759336,-43.4114433,17z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x9bdc0935d70f3d:0x656e315c9d2348ee!8m2!3d-22.9759336!4d-43.4092546>>. Acesso em: 20 junho 2021.

HONDA, **Manual do Proprietário Motor GX35**. Disponível em: <https://www.honda-engines-eu.com/34?e=1_30&p=all&d=all&l=pt_PT&t=all>. Acesso em: 05 nov. 2021.

PELLEGRINO, M. A. P. **Metodologia para simulação do consumo de combustível em veículos automotores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Fundação Educacional Inaciana Padre Sabóia de Medeiros, 2015.

SHELL, **Shell Eco-Marathon 2018 Official Rules Chapter I**, 2018.

SHELL, **Shell Eco-marathon Brasil**. Disponível em: <<https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon/shell-eco-marathon-brasil.html>>. Acesso em: 25 maio 2021