

## ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE CARBONO EQUIVALENTE PARA DOIS TIPOS DE CARRO DE COMPETIÇÃO: ELÉTRICO E A COMBUSTÃO

HEITOR SOUZA CHAVES, HERON JOSÉ DIONÍSIO, SÉRGIO OSAMU HIROTA JÚNIOR & THALES FREITAS PEIXOTO\*

Graduandos em Engenharia Mecânica – FEM/UNICAMP.

\*E-mail do autor correspondente: [thalespeixoto37@gmail.com](mailto:thalespeixoto37@gmail.com)

**RESUMO:** Neste trabalho foram estimadas as emissões de carbono equivalente dos veículos de competição das equipes Unicamp E-Racing e FSAE Unicamp, por meio de dados coletados junto às mesmas. As estimativas foram feitas a partir da reação de combustão, para o carro movido a etanol, e através da calculadora de carbono equivalente do LEPAC, para ambos os veículos. Os resultados obtidos não concordaram entre si. Pela calculadora de carbono equivalente, a emissão de carbono equivalente do carro elétrico é menor, enquanto que a reação de combustão indica uma menor emissão de gás carbônico do carro movido à combustão.

**PALAVRAS-CHAVES:** veículo elétrico, motor a combustão, comparação de emissões.

### EQUIVALENT CARBON EMISSION ESTIMATION FOR TWO KINDS OF COMPETITION CARS: ELECTRIC AND COMBUSTION

**ABSTRACT:** In the current work it was estimated the equivalent carbon emissions of the competition vehicles of the teams Unicamp E-Racing and FSAE Unicamp, through data collected from the teams. The estimates were calculated from the combustion reaction, for the ethanol-moved car, and with the equivalent carbon LEPAC calculator, for both vehicles. The obtained results did not agree. With the equivalent carbon calculator, the electric vehicle carbon emission is smaller, while combustion reaction indicates that combustion's car equivalent carbon emission is smaller.

**KEYWORDS:** electric vehicle, combustion engine, equivalent carbon.

## INTRODUÇÃO

O agravamento dos problemas ambientais em todo mundo tem exigido medidas corretivas urgentes. Nos grandes centros urbanos o setor de transportes contribui com uma parcela expressiva da poluição atmosférica devido à queima de derivados de petróleo como combustível em veículos. Entre as possíveis medidas de serem adotadas em resposta a esta premente necessidade, a viabilização de veículos com propulsão elétrica é uma das mais cogitadas, por ser considerada, diferentemente das outras, como uma solução de propulsão automotiva com

característica de emissão zero de poluentes (AMARAL, 1998).

Já na década de 1980, questões ambientais referentes ao uso de combustíveis veiculares derivados de petróleo requeriam atenção, uma vez que tais combustíveis já eram responsáveis por uma considerável parte da poluição atmosférica. Por esta razão, conforme AMARAL (1998), o carro elétrico surgiu como uma das alternativas mais cotadas para solucionar o problema da poluição atmosférica causada por veículos movidos a combustíveis derivados de petróleo.

A Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) possui, assim como várias outras universidades ao redor do mundo, atividades extracurriculares que desenvolvem veículos de competição. Dentre elas, podem-se citar a equipe Unicamp E-Racing, que desenvolve um carro elétrico, e a FSAE Unicamp, que desenvolve um veículo movido a E-85 que apresenta 85% de etanol e 15% de gasolina, em volume (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2010). Embora não seja completamente derivado do petróleo, também emite carbono como resultado de seu processo de combustão.

O projeto Fórmula SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que tem como principal objetivo propiciar a difusão e o intercâmbio de técnicas e conhecimentos de Engenharia formula náutica entre estudantes e futuros profissionais da engenharia da mobilidade, através de aplicações práticas e da competição entre equipes (SAE BRASIL, 2012). No evento, durante três dias, os carros passam por provas estáticas e dinâmicas, avaliando-se o desempenho de cada projeto na pista, assim como as apresentações técnicas das equipes, que inclui projeto, custo, e uma apresentação de marketing. No último dia do evento, a prova mais difícil de toda a competição se constitui de um enduro de resistência onde os veículos percorrem 22 km, o que exige muito dos carros e pilotos. Os veículos que conseguem passar pelo enduro, ainda passam pela prova de consumo de combustível.

Por sua vez, o carro Fórmula Elétrico SAE é mais um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que já competem há alguns anos na categoria combustão com um novo foco na geração de veículos elétricos. Ao participar do Fórmula SAE Elétrico, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de projeto automotivo, desde sua a concepção, projeto detalhado, construção e testes (SAE BRASIL, 2012).

O objetivo deste trabalho é complementar o trabalho de FANTELLI (2013), que estimou as emissões de carbono equivalente dos veículos das duas equipes consideradas, e recalculou tais valores, por meio de duas outras metodologias. Vale mencionar que, embora os veículos aqui tratados sejam de competição, as tecnologias nestes desenvolvidas podem ser futuramente utilizadas em veículos comuns.

## MATERIAL E MÉTODOS

Foram coletados dados de ambos automóveis, tais como consumo, distância percorrida e tempo de funcionamento dos veículos de ambas as equipes. Em relação ao carro elétrico, obteve-se dados de potência, eficiência e tempo de utilização, a fim de se converter energia elétrica consumida em um determinado período em emissão de carbono equivalente. Já para o veículo a combustão, foram coletados dados de potência, consumo de combustível e distância percorrida a fim de se calcular quanto carbono o carro a combustão

(aqui considerado) emite em certo trajeto (Tabela 1).

**Tabela 1.** Dados dos veículos Fórmula SAE e Elétrico SAE usados pelos alunos da Unicamp.

VEÍCULO	SAE Combustão	SAE Elétrico
Combustível	E-85	Elétrico
Potência	86 HP (64 kW)	85 kW
Eficiência	6 km/Litro	80% a 85%

O trajeto escolhido foi o mesmo adotado na competição de âmbito internacional organizada pela SAE (*Society of Automotive Engineers*) para a prova de enduro, que corresponde a um percurso de 22 km.

O veículo elétrico (UNICAMP E-RACING) avaliado é apresentado na Figura 1. Por meio da calculadora de carbono compensado fornecido pelo Laboratório de Estudos e Pesquisas em Artes e Ciências (LEPAC, 2013), foi feito o cálculo da emissão equivalente de CO<sub>2</sub> a partir dos dados de energia consumida informados.



**Figura 1.** Veículo FSAE Elétrico da UNICAMP (UNICAMP E-RACING, 2012).

Sabendo a potência média do motor elétrico e a sua respectiva eficiência (por ser o valor mais crítico, optou-se por 80% de eficiência), além do tempo que o carro levou para percorrer os 22 km do enduro, pode-se

calcular a energia consumida ( $E_{cons}$ ) em kWh por meio da equação indicada em MORAN & SHAPIRO (2009),  $E_{cons} = \frac{Pot}{\eta} \cdot \Delta t$ , onde  $Pot$  é a potência média do motor medida em kW,  $\eta$  é a sua eficiência e  $\Delta t$  é o tempo de duração da prova, medido em segundos e convertido em hora.

O veículo a combustão interna (FSAE UNICAMP) avaliado é mostrado na Figura 2. Conhecendo-se a composição do combustível e os dados de consumo e distância percorrida durante a prova, pode-se avaliar as emissões equivalentes de carbono. Para tal, foram utilizados dois métodos distintos: calculadora LEPAC (LEPAC, 2013), e análise estequiométrica do processo de combustão do motor. Por fim, os valores foram comparados com aqueles que seriam obtidos por meio dos fatores de conversão estabelecidos pelo regulamento da competição FSAE BRASIL.



**Figura 2.** Veículo FSAE (Adaptado de ABVE, 2012).

Pelo primeiro método, é necessário apenas o consumo de combustível em litros, determinado a partir dos dados de consumo em quilômetros por litro e comprimento da prova.

Já o segundo meio de cálculo requer o conhecimento da composição química do E-85, relação ar/combustível, bem como requer informações sobre os produtos gerados na combustão. Com estes dados, monta-se a equação estequiométrica da queima do combustível, a fim de se determinarem as quantidades de CO e CO<sub>2</sub> produzidas. Assim, com os índices estequiométricos da equação já balanceada, é possível estimar a quantidade em litros e em quilogramas de carbono gerado.

A equação estequiométrica já balanceada considerando combustão incompleta (0,5% de CO como condição crítica, de acordo com CONTROLAR, 2010), de acordo com MORAN & SHAPIRO (2009), fica: **0,8 5C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH + 0,1 5H<sub>12</sub> + 4,3 7(O<sub>2</sub>+3,7 6N<sub>2</sub>) → 2,7 8CO<sub>2</sub> + 0,1 2CO + 3, 9H<sub>2</sub>O + 16,4 2N<sub>2</sub>**

Segundo FANTELLI (2013), medições realizadas através da sonda lambda do veículo FSAE revelam que a relação ar-combustível é quase sempre estequiométrica, validando a hipótese anteriormente adotada. A partir dos índices da equação, pode-se obter a emissão de CO<sub>2</sub> por volume de combustível  $(\frac{m_{CO_2}}{V_{Comb}})$  por meio da equação apresentada em MORAN & SHAPIRO (2009):

$$\frac{m_{CO_2}}{V_{Comb}} = \frac{n_{CO_2} M_{CO_2} \rho_{Comb}}{n_{Comb} M_{Comb}} \quad (1)$$

Onde  $n_i$  e  $M_i$  são o índice estequiométrico e a massa molar da substância  $i$  (subscrito  $comb$  para o combustível e  $CO_2$  para o gás de carbônico) e  $\rho_{comb}$  é a densidade do

combustível. Dispondo, pois, da quantidade (em kg) por unidade de volume (em litros) de CO<sub>2</sub> emitido, multiplica-se este resultado pelo volume de combustível utilizado, que por sua vez é obtido por meio da equação (4):

$$V_{comb} = \frac{\Delta S}{C} \quad (2)$$

Onde  $\Delta S$  é o comprimento da pista onde o enduro é realizado e  $C$  é o consumo em quilômetros por litro.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o VEÍCULO ELÉTRICO, o tempo para percorrer os 22 km foi de 1281,93 segundos, ou seja 0,3561 horas. Utilizando a equação (1), chega-se que a energia consumida é de 37,83 kWh. Pela calculadora do LEPAC, a produção de dióxido de carbono equivalente é de 0,02 toneladas (20 kg). Já para o VEÍCULO A COMBUSTÃO INTERNA, calculando-se o volume o volume de combustível consumido pela equação (4) com os dados da Tabela 1 (3,7 litros) e utilizando a calculadora do LEPAC novamente para um motor de 610 cc (motor padrão da competição), obtém-se uma emissão equivalente de 0,05 toneladas (50 kg). Para esse cálculo foi considerado o modelo disponibilizado no site para motocicletas devido à sua maior semelhança com motor utilizado pela FSAE.

Por outro lado, utilizando as equações (2) e (3) para o mesmo volume de combustível consumido, o resultado obtido foi de uma emissão equivalente de 6,1 kg de CO<sub>2</sub>.



## DISCUSSÃO

Comparando-se os dados obtidos por meio da calculadora do LEPAC, conclui-se que o carro elétrico emite cerca de 60% menos CO<sub>2</sub> em relação ao veículo a combustão. No entanto, o cálculo estequiométrico realizado forneceu um valor bem inferior para as emissões do carro a combustão interna. Levando-se em conta esse valor, o carro elétrico emitiria cerca de 3,3 mais do que o outro veículo.

Existe um manual com as regras da competição FSAE. Nele são utilizados fatores de conversão para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> para os veículos elétricos e a combustão, a saber, 0,65 kg/kWh e 1,65 kg/l, respectivamente. Adotando esses fatores, as emissões seriam 24,6 kg de CO<sub>2</sub> para o elétrico e 6,1 kg para o outro. Este último valor é compatível com aquele calculado a partir das equações (2) e (3), reforçando sua validade. Por esses resultados, mais uma vez, as emissões do carro elétrico superariam largamente as do outro carro, sendo, neste caso, cerca de 4 vezes maior.

É importante mencionar que os valores especificados no manual de regras da competição FSAE de emissão equivalente de carbono por kWh levam em conta a matriz energética dos Estados Unidos. Segundo FANTELLI (2013), *“para obter-se a comparação entre veículos elétricos e a combustão em outras partes do mundo uma pesquisa posterior é necessária, levando-se em consideração a matriz energética local para isso”*. Estimativas realizadas especificamente para o Brasil podem levar a

resultados diferentes tendo-se em vista que, segundo FANTELLI (2013), *“a matriz energética brasileira é considerada “limpa”, já que grande parte da geração de energia elétrica no Brasil é feita em usinas hidrelétricas, onde não há a emissão de dióxido de carbono no processo”*.

As divergências encontradas podem ser explicadas pela dificuldade de se alocar os dois veículos em uma das categorias previstas pela calculadora do LEPAC. Além disso, o algoritmo utilizado e os fatores que são considerados pela calculadora não são descritos na página do laboratório.

Pelo fato de levar em conta outros elementos que compõem o carro elétrico (bateria, controlador, etc.), os valores mais confiáveis são aqueles obtidos através dos fatores utilizados pela FSAE, pelos quais se pode inferir que o veículo a combustão interna emite menos CO<sub>2</sub> do que o elétrico. Isso se deve, entre outros motivos, à ineficiência nas operações de armazenamento e transferência de energia realizada pela bateria. No entanto, outro problema que também deveria ser considerado são as emissões de outros gases poluentes, entre eles o CO, óxidos de nitrogênio e óxidos de enxofre, por parte do motor a combustão. Estes gases, tóxicos, provocam outros problemas além do efeito estufa, que incluem a chuva ácida e problemas respiratórios. Além disso, o motor elétrico não emite de fato CO<sub>2</sub>, sendo que os valores calculados são apenas estimativos das emissões equivalentes geradas durante a



produção da energia elétrica consumida pelo veículo durante a competição de enduro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABVE. Equipe da UNICAMP participará da competição Fórmula SAE Elétrico. Disponível em: <http://www.abve.org.br/destaques/2012/FSAE-UNICAMP-2011.jpg> Acesso em: 14 de jun. 2013.

AMARAL, E. G. Veículo Elétrico com Sistema Energético Híbrido: Célula de combustível/baterias Eletroquímicas, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – FEEC, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1998.

CONTROLAR. Limites de Emissão. Disponível em: [http://www.controlar.com.br/AInspecao\\_LimitesEmissao.aspx#/Emissao-de-Gases](http://www.controlar.com.br/AInspecao_LimitesEmissao.aspx#/Emissao-de-Gases) . Acesso em: 14 de jun. 2013.

FANTELLI, F. C., 2013. Análise da Emissão de CO<sub>2</sub> por Veículos do Tipo Fórmula SAE

Elétricos e a Combustão. Revista Ciências do Ambiente On-line. 9(1):102-105.

LEPAC. Calculadora de Carbono Compensado. Disponível em <http://www.preac.unicamp.br/lepac/carbono/calcula.php?>>. Acesso em: 14 de jun. 2013.

MORAN, M. J., SHAPIRO, H. N, 2009. Princípios de Termodinâmica para Engenharia, 6ª Ed., Rio de Janeiro, LTC Editora.

SAE BRASIL, 2012. O que é o Fórmula Combustão e Elétrico. Disponível em: [http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/formula2012/formula.aspx](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/formula2012/formula.aspx) Acesso em: 27 de maio 2013.

SAE BRASIL, 2013. Competição Fórmula SAE BRASIL. Disponível em: [http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas\\_estudantis/formula2013/Default.aspx](http://www.saebrasil.org.br/eventos/programas_estudantis/formula2013/Default.aspx). Acesso em: 14 de jun. 2013.

US DEPARTMENT OF ENERGY. Handbook for Handling, Storing and Dispensing E85. 2010. 60p.