



<http://ensaios.usf.edu.br>

**ESTUDO DA FRENAGEM REGENERATIVA APLICADA A VEÍCULOS
ELÉTRICOS E SEU IMPACTO ECONÔMICO**
*REGENERATIVE BRAKING STUDY APPLIED TO ELECTRICAL VEHICLES AND ITS
ECONOMIC IMPACT*

SOUSA SHIMADA, Gabriel¹; SOBRINHO SOUZA, Gustavo¹; SOUZA MORAES, Mayara¹
¹Graduandos do Curso de Engenharia Elétrica – Universidade São Francisco
gshimada5@gmail.com; gst.gst.2012@gmail.com; mavarasmoraes90@gmail.com

RESUMO. Este artigo apresenta um estudo da frenagem regenerativa aplicada a veículos elétricos e o impacto econômico proporcionado pela sua utilização. Foram realizadas modelagens e simulações do sistema de movimentação e dinâmica de um veículo elétrico de forma simplificada, analisando-se os parâmetros principais como o ciclo de condução, as equações dinâmicas, os parâmetros físicos do veículo e o custo de energia em determinados locais. Para tais finalidades utilizou-se o MATLAB fazendo com que resolva as equações dinâmicas de acordo com os parâmetros principais. Os resultados indicam que, ao comparar as simulações do veículo utilizando e não utilizando a frenagem regenerativa, percebe-se diferença significativa na autonomia do veículo e conseqüentemente no impacto econômico a longo prazo.

Palavras-chave: frenagem regenerativa, veículo elétrico, modelagem, simulação.

ABSTRACT. This paper presents a study of regenerative braking applied to electric vehicles and the economic impact provided by its implementation. Performing modeling and simulations of the movement and dynamics system of an electric vehicle in a simplified way, analyzing the main parameters such as the driving cycle, the dynamic equations, the physical parameters of the vehicle and the energy cost in certain places. For such purposes, MATLAB was used to solve as dynamic equations according to the main parameters. The results show that, when comparing vehicle simulation while using and not using the regenerative braking, its shown significative difference in vehicle autonomy and therefore in its economic impact.

Keywords: regenerative braking, electric vehicle, modeling, simulation.

INTRODUÇÃO

Em meio às normas e leis cada vez mais rígidas e restritivas dos países que buscam controlar as emissões de gases poluentes provenientes dos automóveis, a indústria, junto com o desenvolvimento tecnológico, tende a se adaptar para que os motores sejam cada vez mais eficientes. O uso de carros elétricos se mostra importante para reduzir tais gases poluentes e são tecnologias em constante desenvolvimento nos dias atuais.

Os motores elétricos possuem diversas aplicações quando se referem à eficiência de um automóvel como um todo. Um dos seus grandes problemas é sua relativa baixa autonomia quando sua fonte de energia é única e exclusivamente composta por baterias. Além disso, em trechos de cidades grandes, a demanda de frenagem e aceleração é extensiva, o que gera no sistema a necessidade de picos elevados de potência da fonte, diminuindo ainda mais a autonomia e vida útil das baterias.



<http://ensaios.usf.edu.br>

A utilização da frenagem regenerativa é uma vantagem que pode ser explorada levando em consideração a baixa autonomia dos veículos elétricos. De acordo com Varocky, 2011:

Frenagem regenerativa é o processo no qual se transfere energia do motor elétrico para a bateria durante a frenagem do veículo, quando a inércia do veículo combinada com o controle do modo de operação do motor, forçam o motor a operar como gerador. Neste modo operando como gerador, é produzido um torque contrário ao movimento, provocando a frenagem no veículo. A energia cinética é convertida em elétrica e enviada novamente à bateria para posteriormente ser usada na propulsão do veículo (Varocky, 2011).

Quando há a integração com os outros sistemas do veículo, o uso da frenagem regenerativa (FR) como geradora de energia, traz ainda mais eficiência, visto que a carga útil da bateria será mantida por mais tempo e conseqüentemente maior autonomia para o automóvel.

Adicionalmente, pode-se fazer o uso de dispositivos armazenadores de energia, como por exemplo, banco de capacitores, que no veículo elétrico são usados para fornecer os níveis mais elevados de potência, deixando assim, as baterias responsáveis somente pela potência média da curva de aceleração e potência do veículo.

Funcionamento do carro elétrico

“Um veículo elétrico é movido por um motor elétrico e não por um motor a gasolina ou a diesel (BRAIN, 2009)”. O motor elétrico é alimentado por um regulador, cuja alimentação é feita por um conjunto de baterias recarregáveis. Os veículos elétricos normalmente fazem uso de bancos de baterias como fonte primária de energia. A energia armazenada nas baterias em forma química é convertida em energia elétrica, que por sua vez, é transportada até os motores que farão sua conversão em energia mecânica, proporcionando que o veículo se locomova.

Frenagem Regenerativa

Por definição, os motores elétricos são capazes de trabalhar sempre em dois modos: gerador ou motor propriamente dito. São máquinas capazes de converter energias elétricas (tensões elétricas) em mecânicas (torque) e vice-versa.

Fazendo o uso desta propriedade das máquinas elétricas é estudado o fenômeno da frenagem regenerativa (FR). Trata-se de um estado em que é removida a alimentação elétrica do motor e usa-se do giro de seu eixo para produção de tensão elétrica nos terminais. Essa condição será atingida em momentos em que é necessário reduzir a velocidade do motor para desaceleração do veículo. Assim, os freios do veículo entram em ação, e os comutadores e inversores de frequência nos terminais do motor mudam seu modo de operação. A figura 1 apresenta de forma simplificada o sistema de frenagem regenerativa.



<http://ensaios.usf.edu.br>

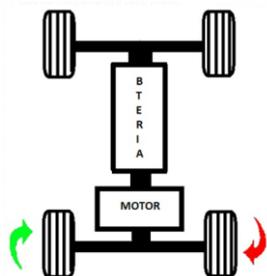


Figura 1 – Sistema da frenagem regenerativa de forma simplificada (Fonte: próprio autor).

Comentado [Deb1]: Todas as identificações de figura devem vir em cima.

A FR é uma alternativa para aumentar a autonomia do VE, podendo economizar de 8% até 25% da energia total (Varocky, 2011) “Geralmente, a força do sistema de FR não é suficiente para retardar totalmente a aceleração do veículo. Assim, é necessário aliar o sistema regenerativo e o sistema hidráulico convencional de freio, essa cooperação de sistemas é conhecida como torque *blending* (Boerboom, 2012)”.

A forma como o motor é desacelerado e a quantidade de energia regenerada nos terminais do motor depende muito dos parâmetros do motor, do veículo e do ambiente. Nas situações onde é necessária a freada brusca ou parada total do veículo, onde o motorista solicita uma desaceleração rápida, são obtidos resultados diferentes para tensão regenerada em relação a situação em que é solicitada uma desaceleração mais devagar.

A regeneração de energia através da frenagem prova-se uma ótima alternativa para aumento da autonomia das baterias dos veículos, propriedade que muitas vezes deixa a aquisição global dos veículos elétricos impraticável. O projeto da FR é estimar a desaceleração exigida e distribuir a força da frenagem regenerativa e da frenagem mecânica, podendo aumentar a eficiência do conjunto do veículo elétrico em 15 a 30% com uma boa sensação do pedal do motorista.

Nos veículos puramente elétricos, a energia cinética recuperada é direcionada a bateria sempre quando o estado de carga (SOC) está entre 30% a 80%. Posteriormente, sua carga é utilizada como fonte de energia para o motor elétrico (Varocky, 2011).

Quando o SOC da bateria é menor que 30%, a resistência interna das baterias possui um valor alto e não é eficiente utilizar a FR. Já quando o valor do SOC da bateria está entre 30% a 80%, as baterias devem ser recarregadas por uma corrente alta e a força de frenagem deve ser aumentada proporcionalmente. Porém quando o estado de carga da bateria está maior que 80%, a regeneração da mesma deve ser evitada, com intuito de aumentar a vida útil do conjunto de baterias (Guoqing, 2011). A relação que demonstra a força de FR com o SOC da bateria é mostrado na figura 2.



<http://ensaios.usf.edu.br>

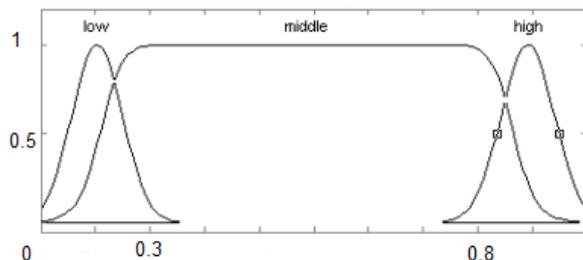


Figura 2 - Relação da força da FR com o SOC da bateria (Fonte: Guoqing X.; Weimin L.; Kun X. and Zhibin S., “An Intelligent Regenerative Braking Strategy for Electric Vehicles”, Energies 2011.)

Os níveis de energia regenerada e a desaceleração do motor do veículo serão simulados e apresentados no decorrer deste documento, onde será modelado o sistema elétrico do veículo elétrico comum em software de simulação, considerando diversas situações em que o veículo possa se encontrar. Os resultados obtidos serão comparados no final do artigo.

Formas de armazenamento de energia

Baterias

As baterias são dispositivos que convertem energia química armazenada em seus componentes em energia elétrica, através de reações químicas com transferência de elétrons de um material para outro.

No artigo será utilizado o termo estado de carga (*SOC – State of Charge*) que se refere à razão entre a carga útil e a capacidade útil de uma célula ou bateria, possuindo valores limitados entre 0 (0 %) e 1 (100 %) (Figueiró, 2015).

As baterias recarregáveis utilizadas em veículos elétricos podem ser de chumbo-ácido, hidreto metálico de níquel e de íon-lítio. A bateria do veículo elétrico (à base de íon-lítio) é composta pela associação de várias unidades (células galvânicas) de modo a alcançar a tensão e a corrente necessária para cada projeto de veículo elétrico (Santos, 2018).

As baterias de íon-lítio são atualmente as mais promissoras para aplicação de veículos elétricos devido ao seu alto potencial elétrico e baixo peso. Trabalham a temperaturas não muito diferentes da temperatura ambiente e podem ser carregadas em pouco tempo (Noce, 2010).

Supercapacitores

Para que a energia recuperada da frenagem possa ser armazenada e posterior utilizada como fonte para o motor, pode ser utilizado supercapacitores.

Os supercapacitores (SC) são também denominados ultracapacitores ou capacitores eletroquímicos de dupla camada. O valor extremamente elevado de capacitância é alcançado graças à enorme área superficial dos eletrodos e à mínima distância entre as cargas. São chamados supercapacitores por serem capazes de armazenar uma quantidade de energia muito maior do que qualquer capacitor convencional de massa ou volume equivalente (Guoqing, 2011).



<http://ensaios.usf.edu.br>

O uso de bancos de supercapacitores é primordial no processo da FR, pois possuem o objetivo de absorver a energia regenerada e fornecer para o sistema quando há a demanda de picos de potência exigidos pelo motor do automóvel (Ferreira, 2005). Outra vantagem é que podem ser utilizados quando há uma alta demanda de energia em um curto espaço de tempo, economizando assim, a vida útil da bateria.

METODOLOGIA

Ciclos de condução

Os ciclos de condução (*driving cycles*) são valores de velocidade no tempo para um período de condução do veículo. É uma metodologia utilizada para determinar e testar a eficiência de veículos e seus níveis de poluição em diferentes velocidades. Existem variados tipos de *driving cycles*, cada um com um diferente perfil de condução, tempo de análise e velocidade média.

Neste trabalho foram realizadas simulações considerando os ciclos de condução dentro do procedimento de testes de veículos *Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures* (WLTP). Dentro do procedimento WLTP existem os ciclos de condução nomeados *Worldwide Harmonized Light-duty vehicles Test Cycles* (WLTC) classe 1, WLTC classe 2 e WLTC classe 3, que serão utilizados para definir os dados de velocidade no tempo em que o veículo percorre.

Os ciclos de condução dentro do procedimento WLTP foram escolhidos pois se trata do procedimento mundial mais atual e apresenta dados que refletem o uso diário do veículo de forma mais precisa.

O ciclo de condução WLTC classe 1 é utilizado para veículos de baixa potência, possui zonas de baixa velocidade e seu percurso é relativamente pequeno.

A figura 3 representa o ciclo de condução classe 1 e suas características são:

Distância: 8,091 km
Duração: 1022 s
Velocidade média: 28.5 km/h

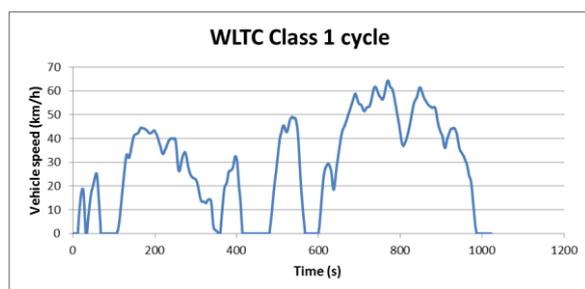


Figura 3 – Ciclo de Condução Classe 1 – (Fonte: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles>)

O ciclo de condução classe 2 apresenta amostras com velocidades relativamente baixas, médias e altas, cobrindo veículos de baixa potência.



<http://ensaios.usf.edu.br>

A figura 4 representa o ciclo de condução classe 2 e suas características são:

Distância: 14.664 km
Duração: 1477 s
Velocidade média: 35.7 km/h

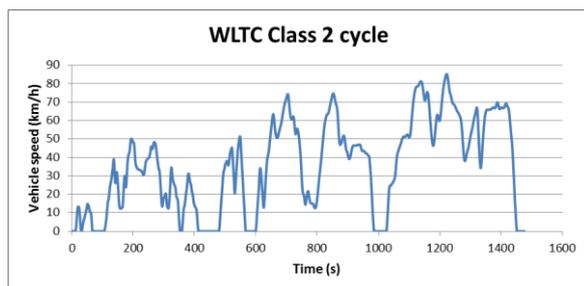


Figura 4 – Ciclo de Condução Classe 2 – (Fonte: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles>)

O ciclo de condução classe 3 é feito de quatro zonas de velocidade: urbano, suburbano, extra urbano e auto estrada.

A figura 5 representa o ciclo de condução classe 3 e suas características são:

Distância: 23 262 km
Duração: 1800 s
Velocidade média: 46.5 km/h

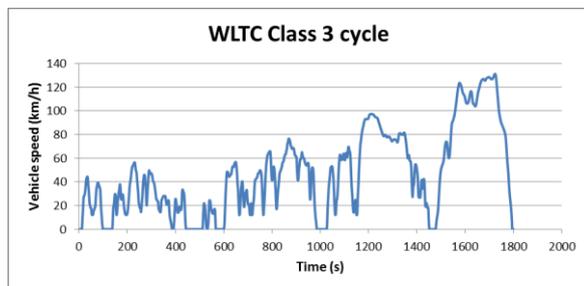


Figura 5 – Ciclo de Condução Classe 3 – (Fonte: <http://www.car-engineer.com/the-different-driving-cycles>)

Custos de energia

O custo de carregamento de um veículo elétrico depende inicialmente do custo da tarifa da concessionária de energia, o consumo em kWh do veículo elétrico e a quantidade de carga restante na bateria ao início da recarga. Foram utilizadas como base as tarifas de consumo medidas em kWh de uma das concessionárias dos estados de São Paulo (SP), Santa Catarina (SC) e Rio de Janeiro (RJ) analisando os valores em três situações: utilização durante a manhã, tarde e final da noite.



<http://ensaios.usf.edu.br>

As figuras 6 e 7 apresentam os valores em diferentes horários do dia utilizados como base para o cálculo de resultados.

Concessionária	Tarifa Convencional (R\$/kWh)	Tarifa Branca - Ponta (R\$/kWh)	Tarifa Branca - Intermediária (R\$/kWh)	Tarifa Branca - Fora ponta (R\$/kWh)
São Paulo – CPFL	0,523	0,903	0,582	0,435
Santa Catarina - Cersul	0,420	0,819	0,565	0,312
Rio de Janeiro - Light	0,626	1,147	0,764	0,552

Figura 6 - Tabela de tarifas de algumas principais concessionárias de energia do Brasil (Fonte: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>)

Concessionária	Horário Tarifa Convencional	Horário Tarifa Branca - Ponta	Horário Tarifa Branca - Intermediária	Horário Tarifa Branca - Fora ponta
São Paulo – CPFL	16:00 - 17:59	18:00 - 20:59	21:00 - 21:59	Restante
Santa Catarina - Cersul	17:30 - 18:29	18:30 - 21:29	21:29 - 22:30	Restante
Rio de Janeiro - Light	16:30 - 17:29	17:30 - 20:29	20:30 - 22:29	Restante

Figura 7 - Tabela de gestão honorárias tarifária de algumas principais concessionárias de energia do Brasil (Fonte: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>)

Equações dinâmicas

Para a análise e simulação foi modelado um sistema baseado nas equações dinâmicas, que consideram os parâmetros físicos do veículo e da via na qual trafega. Tais equações consideram as forças contrárias ao movimento do veículo como, atrito, resistência do ar e peso para definição da força necessária a ser fornecida pelo motor e consequentemente, pela bateria do veículo elétrico. A figura 8 apresenta resumidamente as forças que afetam um veículo em movimento.

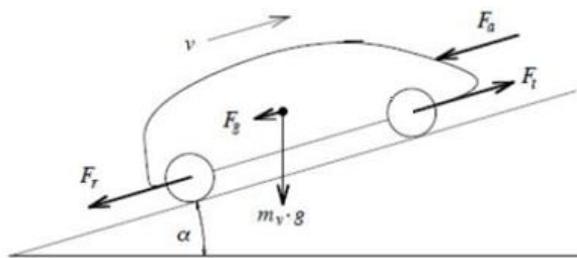


Figura 8 - Forças que atuam em um veículo em movimento (Fonte: Adaptada [1] Varocky B. J. Benchmarking of Regenerative Braking for a Fully Electric Car. 2011.)

A energia mecânica consumida durante todo o trajeto de um veículo depende, quase que exclusivamente, das perdas por atrito aerodinâmico, perdas por atrito de rolamento e a

Comentado [Deb2]: Talvez ficasse melhor junto com o referencial teórico na introdução ... me parece um quebra no fluxo da metodologia, apesar das equações serem utilizadas



<http://ensaios.usf.edu.br>

energia dissipada dos freios (Guodong, 2013). A equação que representa essa dinâmica longitudinal apresenta a seguinte forma:

$$mv' = Ft - (Fa + Fr + Fg)$$

onde:

m é a massa do veículo [kg],

v é a velocidade do veículo [m/s],

Ft é a força de tração gerada do veículo [N],

Fa é a resistência aerodinâmica que atua em direção contrária ao veículo [N],

Fr é a resistência de rolamento que atua em direção contrária ao veículo [N],

Fg é a força gravitacional gerada em trajetos verticais[N].

Força de tração

A força de tração Ft é a força gerada pelo carro menos a força usada para acelerar as partes rotacionais internas e menos todas as perdas.

Perdas por arrasto aerodinâmico

Todos os projetos de veículos estão sujeitos a vários testes. O teste aerodinâmico, mais conhecido como teste do túnel do vento, é necessário para determinar o coeficiente de arrasto (resistência do ar) quando o veículo está em movimento.

A perda gerada pela resistência do ar é definida como:

$$Fa = 1/2 \cdot \rho \cdot A \cdot Cx \cdot v^2$$

onde:

ρ é a densidade do ar [kg/m³],

A é a área frontal do veículo [m²],

Cx é o coeficiente de arrasto determinado em túnel do vento ou simulações de software [-],

v é a velocidade do veículo [m/s].

Resistência de rolamento

A força de resistência ao rolamento é resultado das perdas no contato dos pneus com a pista (Guodong, 2013), pode ser definida como:

$$Fr = Cr \cdot m \cdot g \cdot \cos(\alpha)$$

onde:

m é a massa do veículo [kg],

g é a aceleração da gravidade [m/s²],

α é o ângulo de inclinação que o veículo está sujeito [rad],

Cr é o coeficiente de resistência de rolagem [-], cujo coeficiente pode ser considerado constante [].



<http://ensaios.usf.edu.br>

Força gravitacional

Usando como base a segunda lei de Newton, que determina que a somatória das forças atuantes em um corpo é igual ao produto de seu coeficiente de inércia pela sua aceleração (Antunes, 2018) é definido que a força gravitacional que atua como uma resistência na dinâmica longitudinal do veículo é dada como:

$$F_g = m \cdot a \cdot \text{sen}(\alpha)$$

onde:

m é a massa do veículo [kg],

a é a aceleração do veículo [m/s^2],

α é o ângulo de inclinação que o veículo está sujeito [rad].

Dados da simulação

O programa de simulação que será utilizado para análise e modelagem dos dados será o MATLAB. Nele serão inseridas as equações dinâmicas, os parâmetros do veículo elétrico e também os parâmetros da via a qual o veículo deve percorrer durante a simulação e os *driving cycles*. A lógica de simulação está exemplificada através dos fluxogramas.

Nesta análise, utilizou-se um modelo de veículo puramente elétrico para a simulação. O modelo escolhido em questão é o Tesla Model S 100D 2018, que possui massa de 2247 [kg], resistência de rolamento de 0,010 [-], raio da roda de 21 polegadas (0,5334 [m]), área frontal de 2,39 [m^2], coeficiente de arrasto (C_x) de 0,24 [-]. A área frontal corrigida, dada como o produto da área frontal com o coeficiente de arrasto é 0,574 [m^2]. A propulsão do veículo é dada por dois motores elétricos de corrente alternada (AC), que em conjunto possuem potência máxima de 360 [kW], com torque de 660 [Nm]. A energia fornecida para os motores elétricos é proveniente de um conjunto de baterias do tipo íon-lítio, localizadas em toda região do assoalho do veículo, com capacidade máxima de 100 [kWh]. A figura 9 representa o modelo do veículo.



Figura 9 - Tesla Model S 100D 2018 (Fonte: <https://www.tesla.com/models>)

Estratégia de Controle

O código de simulação desenvolvido calcula o torque requerido (seja de tração ou frenagem) em função do perfil de velocidade (*Driving Cycle*). Do perfil de velocidade do

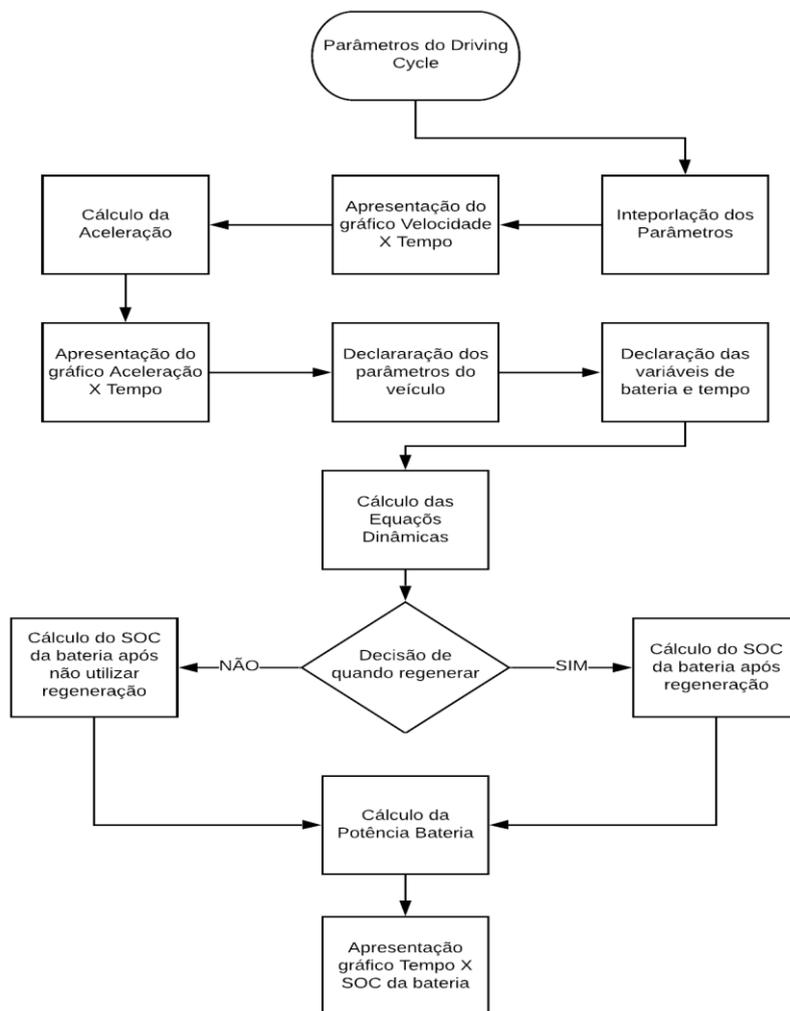


<http://ensaios.usf.edu.br>

ciclo e das equações dinâmicas, será determinada a potência necessária para superar todas as perdas e resistências do veículo e propulsiona-lo na velocidade desejada. O motor elétrico traciona o veículo, fornecendo potência às rodas (modo *Electric Drive*). Na frenagem pode ocorrer frenagem regenerativa apenas (modo *Regenerate*), convencional apenas ou ambos os tipos ao mesmo tempo.

As variáveis de controle são a potência requerida nas rodas e o estado de carga da bateria. A carga máxima da bateria considerada para uso da FR é de 80% da sua carga total e a mínima de 30%.

A figura 10 apresenta o fluxograma da estratégia de controle da simulação.





<http://ensaios.usf.edu.br>

Figura 10 – Fluxograma da estratégia de controle da simulação (Fonte: próprio autor).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o sistema modelado e simulado, foram extraídos os gráficos de autonomia da bateria no final do trecho simulado, onde, a partir dos dados de velocidade e aceleração do percurso, foi calculada a energia final da bateria do veículo elétrico com e sem a FR ativada.

As figuras abaixo representam os resultados obtidos para velocidade, distância, aceleração, distância, consumo de energia e estado de carga da bateria, em função do tempo.

Ciclo WLTC 1

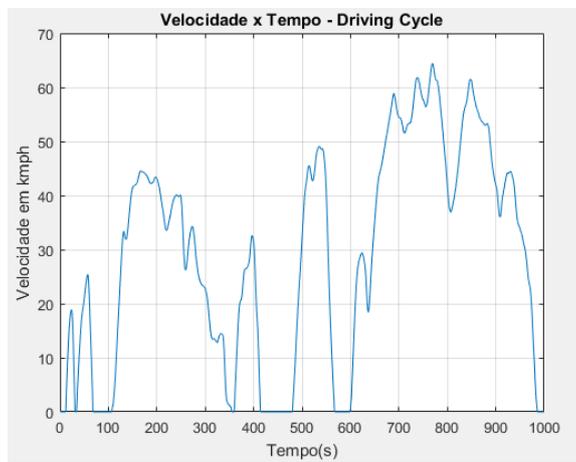


Figura 11 – Gráfico do ciclo de condução WLTC 1

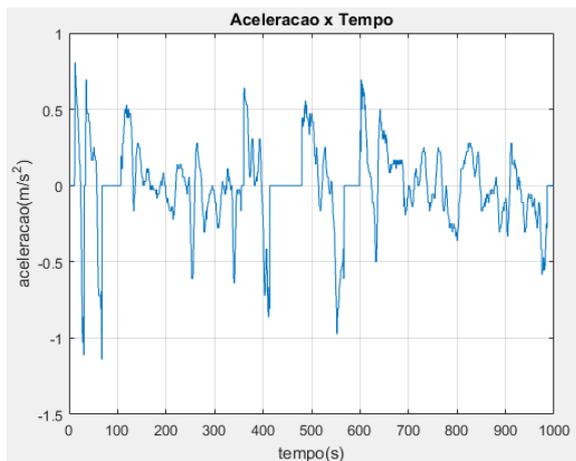


Figura 12 – Gráfico do resultado da aceleração no tempo do ciclo WLTC 1



<http://ensaios.usf.edu.br>

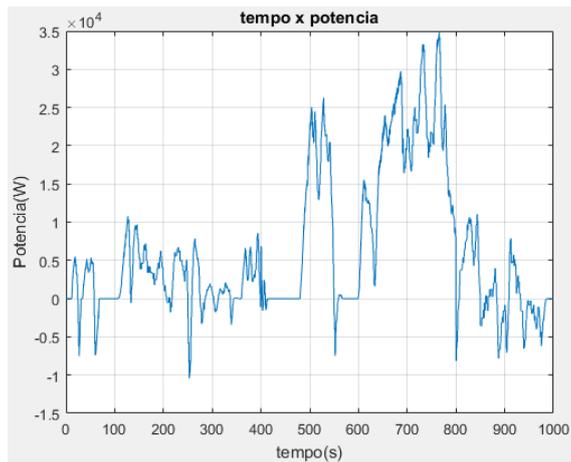


Figura 13 – Resultado do tempo pela potência no ciclo WLTC 1

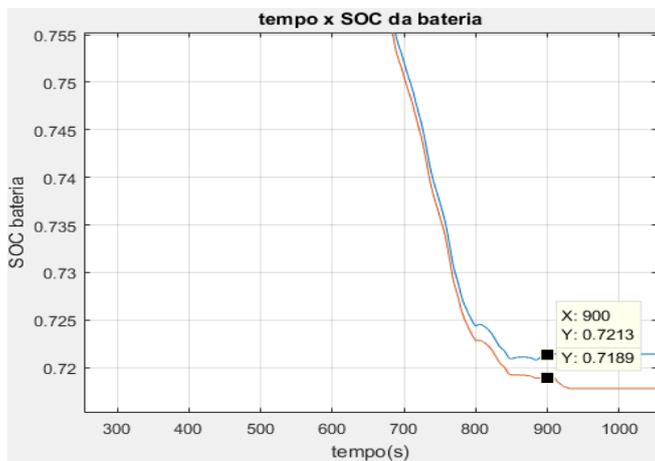


Figura 14 – Resultado do tempo versus o SOC no ciclo WLTC 1

A figura 11 apresenta o gráfico do ciclo de condução WLTC classe 1 e na figura 12 mostra a variação que a aceleração sofre no tempo nesse ciclo. O gráfico foi obtido a partir da derivada da entrada de velocidade no tempo, que retorna o valor de aceleração no tempo.

A figura 13, tem-se o gráfico da potência requerida pelo sistema para a aceleração e desaceleração do veículo. Pode ser verificado que é proporcional a potência requerida do sistema comparada a aceleração.

Comentado [Deb3]: A identificação de cada figura deveria vir antes da figura ... fica estranho começar o texto de cara com as figuras, sem explicação nenhuma ...



<http://ensaios.usf.edu.br>

Na figura 14, a curva em azul se refere o veículo trabalhando com a FR ativada e a curva vermelha, desativada. Observa-se no final de 900 segundos, o estado de carga da bateria está em 72,13% com a frenagem e 71,89% sem a frenagem. Pode-se ver que existe regeneração observando as duas linhas azul e vermelha, porém, o trecho é curto e com poucas desacelerações. Vê-se no gráfico da figura 13 que a potência requerida para movimentação (Potência maior que zero) é muito mais presente que a potência gerada na frenagem (Região do gráfico com potência menor que zero), por isso temos um estado de carga SOC semelhante nas duas situações, com e sem FR.

Ciclo WLTC 2

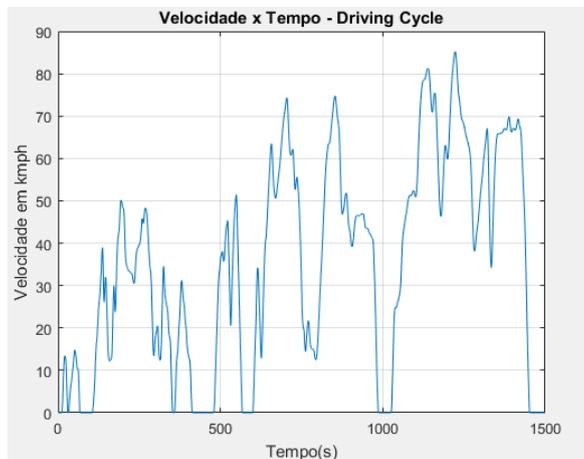


Figura 15 – Gráfico do ciclo de condução WLTC 2

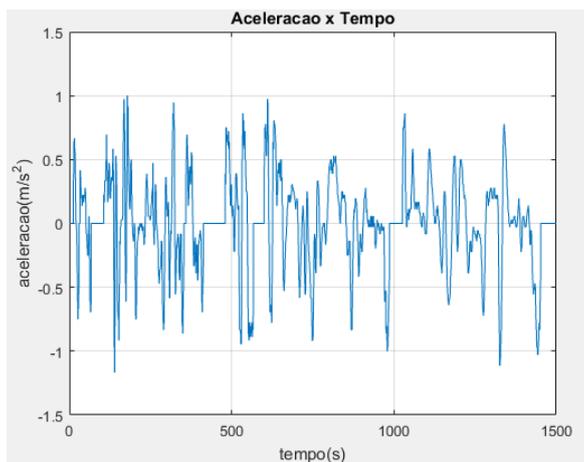


Figura 16 – Gráfico do resultado da aceleração no tempo do ciclo WLTC 2



<http://ensaios.usf.edu.br>

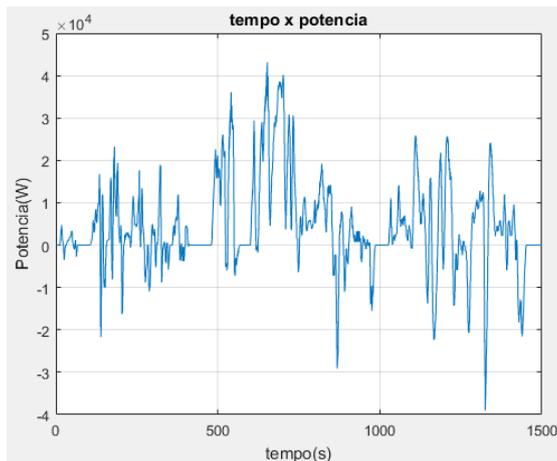


Figura 17 – Resultado do tempo pela potência no ciclo WLTC 2

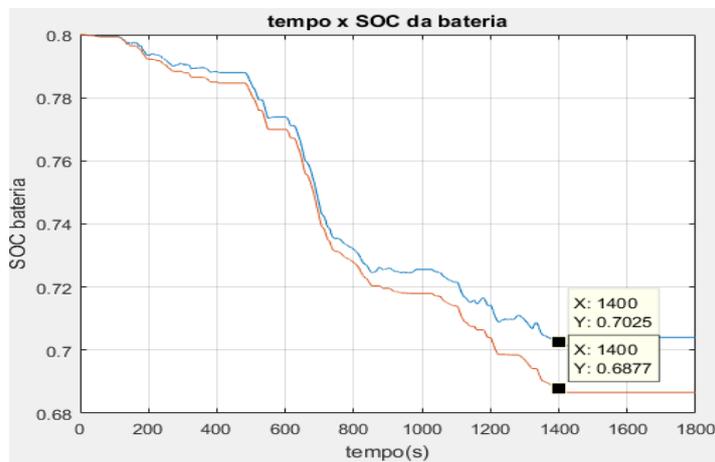


Figura 18 – Resultado do tempo x o SOC no ciclo WLTC 2

As figuras 15, 16, 17 e 18 são referentes ao ciclo 2 – Velocidade, aceleração, potência e estado de carga no tempo, respectivamente.

Neste ciclo, pode ser observado que o efeito da regeneração é maior, isso acontece pelo fato de existirem mais regiões de desaceleração no ciclo de condução, o que confirma a ideia inicial do presente artigo. De acordo com o gráfico, no instante de 1400 segundos, o estado de carga da bateria com a regeneração ficou em 70,25% e sem a regeneração em 68,77%.

Comentado [Deb4]: Idem anterior



<http://ensaios.usf.edu.br>

Ciclo WLTC 3

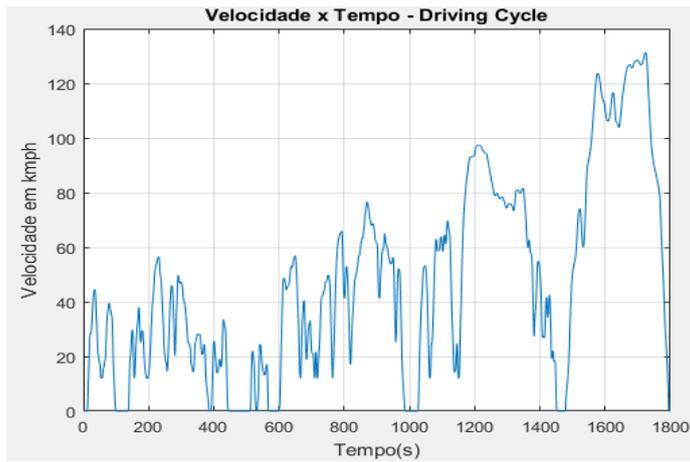


Figura 19 – Gráfico do ciclo de condução classe WLTC 3

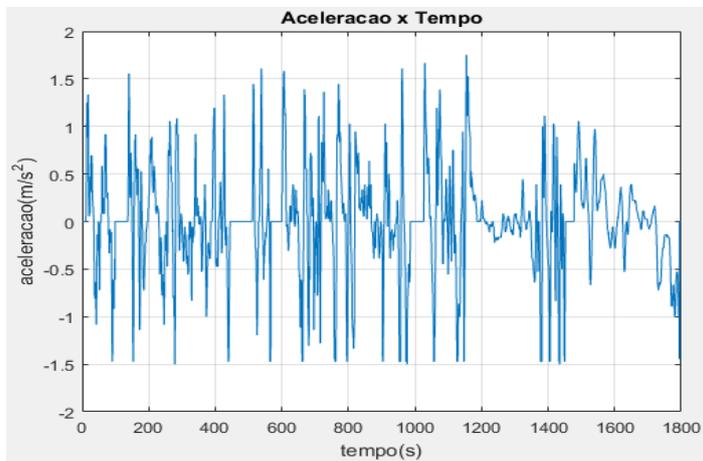


Figura 20 – Gráfico do resultado da aceleração no tempo do ciclo WLTC 3



<http://ensaios.usf.edu.br>

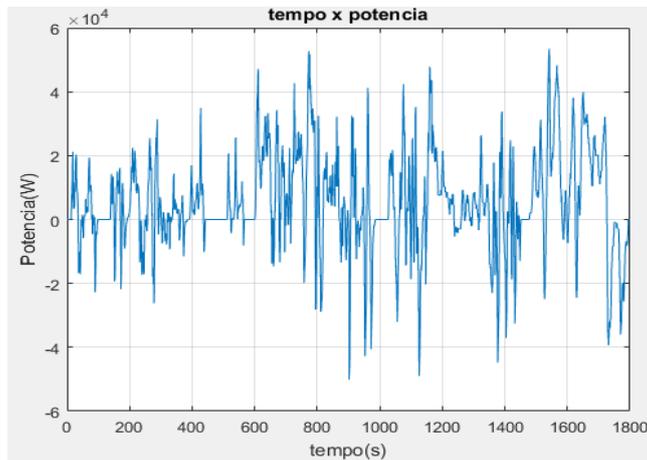


Figura 21 – Resultado do tempo pela potência no ciclo WLTC 3

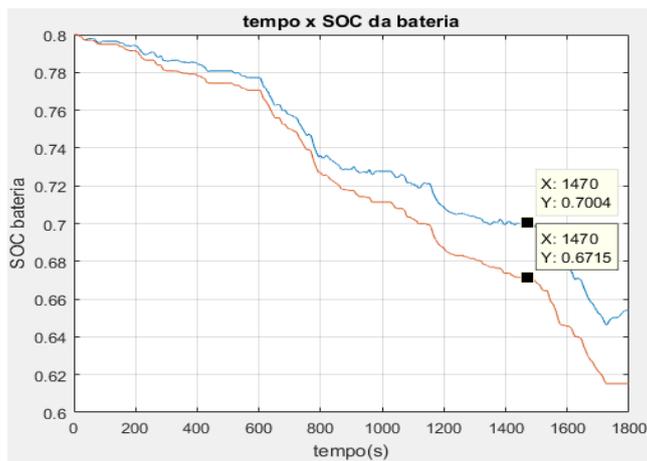


Figura 22 – Resultado do tempo versus o SOC no ciclo WLTC 3

Os gráficos 19, 20, 21, e 22 são referentes ao ciclo 3. A figura 19 reproduz a velocidade em função do tempo no respectivo ciclo de condução.

Neste ciclo, como pode ser observado na figura 22, há maior regeneração do sistema em relação aos demais ciclos de condução simulados. Isto se deve ao fato de o ciclo de condução possuir maior tempo de duração, velocidades maiores que os demais e maior variação de aceleração, portanto, potência. A região de potência menor que zero representa a energia regenerada pelo sistema, que coincide com os pontos de desaceleração das figuras 20 e 21 onde podemos ver que as regiões de aceleração e potências menores que zero são mais frequentes em relação aos demais ciclos, por isso, a regeneração da bateria acontece com



<http://ensaios.usf.edu.br>

maior presença neste ciclo de condução – Maior duração, maiores velocidades e mais instantes de desaceleração que os demais ciclos apresentados.

A partir dos resultados, foram feitos cálculos de custos de energia gasta apresentando quanto custaria ao usuário a energia necessária para carregar novamente a bateria caso a FR estiver desativada. A figura 23 apresenta os resultados da simulação, representando as potências, tempo de percurso e distância percorrida:

Ciclo de condução	Potência no mesmo instante (kW) Com FR	Potência no mesmo instante (kW) Sem FR	Tempo do percurso (minutos)	Distância percorrida (km)
Classe 1 (Baixa velocidade)	72,13	71,89	15,00	7,32
Classe 2 (Velocidades baixas, médias e altas)	70,25	68,77	23,33	13,93
Classe 3 (Urbano e autoestrada)	70,04	67,15	24,51	15,01

Figura 23 – Tabela dos dados obtidos no final das simulações com ciclos de condução WLTC (Fonte: próprio autor).

A figura 24 apresenta a tabela com os dados calculados baseado na tarifa de energia de São Paulo – Concessionária CPFL. A tarifa varia baseado no horário de utilização: neste caso foi considerada a recarga do veículo em horário de ponta, ou seja, entre 18h e 21h. Neste horário a tarifa tem um custo de R\$/kWh de 0,903. O horário foi escolhido pois é o período em que a maioria das pessoas estacionam seus carros em suas garagens após o trabalho e é o período em que a energia é a mais cara em relação aos demais. A recarga até 80% do SOC foi estrategicamente definida pois, conforme mencionado anteriormente, o veículo elétrico não realiza frenagem regenerativa quando seu estado de carga está maior que 80%. A recarga para SOC maior que 80% não se mostra vantajosa, visto que não há FR para aumentar a eficiência desses 20% de carga.

Ciclo de condução	Custo de recarga até 80% do SOC			Custo de recarga até 80% da capacidade da bateria Acumulado – 5 anos	
	Custo de recarga Com FR	Custo de recarga Sem FR	Percentual de economia	Custo Com FR	Custo Sem FR
Classe 1 (Baixa velocidade e duração)	7,10	7,32	3,00	12.791,90	13.181,99
Classe 2 (Velocidades baixas, médias e altas)	8,80	9,96	11,65	15.847,65	17.928,16
Classe 3 (Urbano e autoestrada)	8,99	11,60	22,50	16.188,98	20.886,39

Figura 24 – Tabela de valores para recarga do veículo elétrico estudado após simulação em diferentes ciclos de condução. (Fonte: próprio autor).



<http://ensaios.usf.edu.br>

CONCLUSÃO

Na simulação utilizando o MATLAB foi analisado o comportamento da frenagem em três ciclos diferentes de percurso, urbano, rodoviário e misto, onde foi verificado no final de cada percurso o valor do estado de carga da bateria, a potência requerida pelo sistema e a variação da aceleração no tempo.

Os valores obtidos no final da simulação são comparados entre si e também é considerada a possibilidade de não utilizar a FR, para que seja medido seu impacto no uso diário.

Após a simulação nos diferentes percursos percebe-se que a frenagem regenerativa se prova mais eficiente em trajetos onde existem maiores trechos de aceleração e desaceleração, vide percursos WLTC 2 e 3. O percurso WTC 3 representou o maior ganho de energia por frenagem que os outros dois percursos justamente por ser mais extenso, com maiores variações de velocidade e possuir velocidades médias mais altas.

Economicamente o sistema de FR, como visto nas tabelas, é capaz de promover uma significativa redução do custo de carregamento a longo prazo, e, conseqüentemente, do custo de utilização do veículo. Os três ciclos de condução simulados, caso sejam feitos pelo condutor do veículo representam uma economia média de 12,38% ao longo do tempo em relação a não utilização do sistema, e se prova muito mais eficiente e vantajoso para aqueles que realizam percursos diários semelhantes ao ciclo de condução WTC 3 – Urbano, suburbano e autoestrada. Visto isso, é comprovada a utilidade da implementação da FR nos veículos elétricos e prova-se que é um recurso que deve ser continuamente explorado e implantado para no futuro aumentar a procura pelos veículos elétricos no geral.

Os cálculos e simulações foram feitos considerando a forma física, potência e dinâmica de um veículo elétrico atual, o Tesla Model S. Os valores podem se alterar escolhendo um veículo de parâmetros diferentes, como por exemplo, de área frontal e peso menores e eficiência energética maior, podendo aumentar a autonomia e o impacto da FR ao longo prazo.

Comentado [Deb5]: O primeiro paragrafo da conclusão, deve retomar a proposta feita. E ainda acho que faltou um ultimo paragrafo comentando da importância desse tipo de estudo ...



<http://ensaios.usf.edu.br>

REFERÊNCIAS

- [1] VAROCKY, B.J. **Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car**. 2011. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2011.
- [2] FERREIRA, A.A.; SILVA, L.A.; POMILIO J.A. **Survey on supercapacitors applications in the power electronics**, in 7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP 2005, Recife – PE.
- [3] GUIA TECNOLÓGICO BMW. **Regeneração de energia de freio**. Disponível em: http://www.bmw.com.kh/asia/en/insights/technology/technology_guide/articles/mm_brake_energ_regeneration.html. Acesso em: 22 de mar. 2019.
- [4] GUOQING, X.; WEIMIN, L.; KUN, X.; ZHIBIN, S. **An intelligent regenerative braking strategy for electric vehicles**. 2011. Department of Electrical Engineering, Tongji University, China, 2011.
- [5] SANTOS, C.A.L. **Baterias de íons lítio para veículos elétricos**. 2018. Laboratório de Corrosão e Proteção, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., São Paulo, 2018.
- [6] **Ranking nacional de tarifas residenciais**. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em: 28 de agos. 2019.
- [7] GUODONG, Y; XIANJIAN, J. **Cooperative control of regenerative braking and anti lock braking for a hybrid electric vehicle**. 2013. School of Mechanical Engineering, Southeast University, China, 2013.
- [8] ANTUNES, C.A.; GALHARDI, V.B.; HERNASKI, C.A. **As leis de Newton e a estrutura espaço-temporal da mecânica clássica**. 2018. Universidade Estadual de Londrina, Departamento de Física, Londrina, PR, 2018.
- [9] NOCE, T. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.
- [10] FIGUEIRÓ, A. A. **Controle do balanceamento de bateria e estimação de estado de carga**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

Formatado: Português (Brasil)