

KIT DIDÁTICO DE TRANSMISSÃO DE VEÍCULOS HÍBRIDOS

Rodrigo R. S. da S. Vieira¹, Flávio G. Pereira²

^{1,2}Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Serra, Serra – ES, Brasil
e-mail: rodrsvieira@gmail.com, flavio.garcia@ifes.edu.br

Resumo – O objetivo deste documento é apresentar os conceitos e os resultados obtidos com o desenvolvimento de um kit educacional para estudo do sistema de transmissão com engrenagem planetária presente em veículos híbridos. Kits educacionais no segmento de veículos híbridos se fazem necessários de modo a auxiliar na capacitação de profissionais a trabalharem com essa tecnologia, contribuindo em capacitar mão-de-obra que tem se mostrado defasada ao mercado automotivo internacional. O equipamento desenvolvido tem foco na dinâmica de transmissão de veículos híbridos modelo série-paralelo, como o Toyota Prius, que possui como elemento principal um conjunto de engrenagens do tipo planetária. O kit possui motores elétricos para emulação dos motores, elétricos e a combustão interna, presentes no veículo real, além de módulos eletrônicos de potência e monitoramento.

Palavras-Chave – Conjunto Planetário, Kit Didático, Veículos Híbridos, Transmissão Veicular.

HYBRID VEHICLE TRANSMISSION DIDACTIC KIT

Abstract – This paper presents the concepts and results obtained with the development of an educational kit to study the transmission system with planetary gear present in hybrid vehicles. Educational kits in the hybrid vehicle segment are necessary in order to assist in the training of professionals to work with this technology, helping to train a workforce that has been outdated in the international automotive market. The developed equipment focuses on the transmission dynamics of series-parallel hybrid vehicles, such as the Toyota Prius, whose main element is a planetary gear set. The kit has electric motors to emulate the electric and internal combustion engines present in the real vehicle, as well as electronic power and monitoring modules.

Keywords – Didactic Kit, Hybrid Vehicles, Planetary Set, Vehicle Transmission.

I. INTRODUÇÃO

Os veículos classificados como híbridos são aqueles que possuem pelo menos dois conversores de energia com alimentações distintas, sendo normalmente utilizados motores a combustão interna e motores elétricos. Entre os veículos híbridos existem também subclassificações quanto a transmissão e disposição dos motores para transferência de

tração para as rodas, podendo os mesmos serem série, paralelo ou série-paralelo (misto) [1].

O primeiro veículo híbrido comercial a ser lançado foi o Toyota Prius, em 1997. Com tecnologia híbrida inédita para a época, o Prius utiliza um mecanismo de transmissão com engrenagem planetária para dividir as forças de tração entre o motor a combustão interna e dois motores/geradores [2]. Essa divisão de tração é traduzida em economia de combustível para o veículo.

A engrenagem planetária é um conjunto formado de três outras engrenagens denominadas de anelar, satélites e solar. A interação entre essas três engrenagens é responsável pela dinâmica entre o motor a combustão interna, os motores/geradores e o eixo final das rodas, esta última composta ainda por um sistema de redução e diferencial. No Toyota Prius, o motor a combustão interna (ICE) é conectado as engrenagens satélites, dividindo sua força de tração em duas forças: uma transmitida via anelar para o eixo final das rodas e outra transmitida para o motor/gerador 1 (MG1) através da engrenagem solar. O motor/gerador 2 (MG2) também é conectado a engrenagem anelar convertendo a energia elétrica em força mecânica. A configuração simplificada do sistema de transmissão série-paralelo de um veículo híbrido pode ser visualizada na Figura 1. Na representação, foram retirados elementos como as reduções e o diferencial presentes no eixo final das rodas de modo a simplificar o entendimento do conjunto planetário.

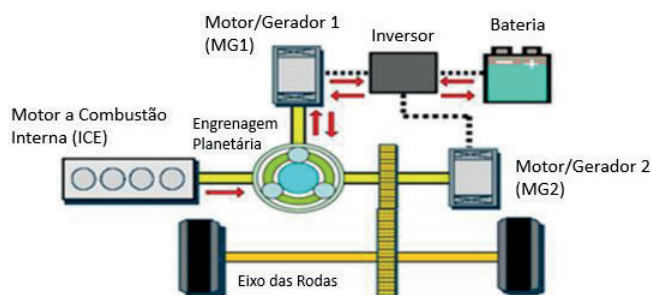


Fig. 1. Configuração do sistema de transmissão de veículo híbrido série-paralelo (misto). Adaptado de LIU, Jinming e PENG, Huei [3].

O sistema eletroeletrônico de monitoramento de potência de um veículo híbrido série-paralelo, como o Toyota Prius, é configurado de modo a extrair a maior eficiência dos motores em resposta a demanda de potência do veículo. Diversas outras estratégias como a frenagem regenerativa e o sistema start/stop também são implementados e otimizados para o modelo de transmissão utilizado.

Manuscript received 06/24/2022; first revision 09/19/2022; accepted for publication 02/20/2023, by recommendation of Editor Demercil de Souza Oliveira Jr. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2023.1.0028>

As diversas configurações e elementos que o sistema de transmissão com engrenagem planetária possui o tornam um sistema de difícil entendimento quando comparado aos veículos puramente a combustão ou puramente elétricos, o que acaba se tornando uma barreira para novos profissionais na área. O kit didático de transmissão em veículos híbridos possui foco no entendimento da dinâmica de transmissão e interação entre: o motor a combustão, os motores/geradores e o eixo final das rodas. O objetivo do presente trabalho é comprovar que o kit didático permite enxergar na prática como os elementos se correlacionam e como a dinâmica entre os eixos é obedecida, de modo a permitir que o equipamento seja um ferramenta para contribuir na formação de profissionais a trabalharem com esse tecnologia.

Estudos referentes a dinâmica de transmissão dos conjuntos planetários e sua utilização em veículos híbridos podem ser encontrados na literatura. LIU, Jinming e PENG, Huei [3] apresentaram um artigo contendo a modelagem para o conjunto planetário do Toyota Prius. Na modelagem apresentada, as velocidades angulares das três engrenagens (solar, anelar e satélites) deve satisfazer a equação cinemática presente na equação (1):

$$W_s S + W_a A = W_p (S + A), \quad (1)$$

onde: W_s é a velocidade angular da engrenagem solar, W_a é a velocidade angular da engrenagem anelar, W_p é a velocidade angular das engrenagens satélites, A é o raio da engrenagem anelar e S é o raio da engrenagem solar.

Essa equação cinemática pode ser visualizada no diagrama da Figura 2, em que os tamanhos das três setas representam os vetores velocidade angular das engrenagens e o tamanho das barras representa a relação relativa entre R e S . Os três vetores tocando a linha pontilhada demonstram a relação cinemática.

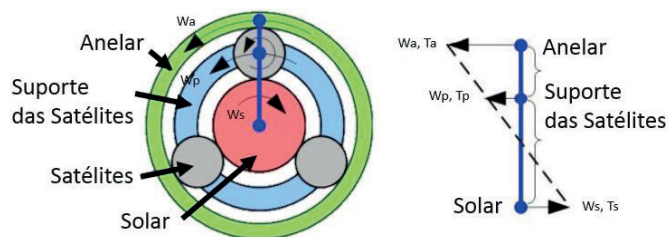


Fig. 2. Conjunto planetário e equação cinemática. Adaptado de X. Zhang et al [4].

Uma visão geral dos veículos híbridos, relacionando os diversos tipos de motores elétricos encontrados no mercado e a modelagem das forças de tração exercidas pelo veículo, foi apresentada por Momoh, O.D. e Omoigui, M.O. [5]. Já M. M. Hussain et al [6] elaborou um sistema eletrônico experimental de controle para motores CC aplicado a veículos híbridos, uma base utilizada para o kit didático de transmissão de veículos híbridos desenvolvido e apresentado neste documento.

II. ENGRENAGEM PLANETÁRIA NO VEÍCULO HÍBRIDO SÉRIE-PARALELO

A engrenagem planetária, também conhecida como conjunto planetário, é uma junção de três engrenagens que se correlacionam, permitindo relações dinâmicas de interdependência. A engrenagem mais externa é chamada de anelar, a mais central é a solar e as intermediárias são as satélites, como pode ser visualizado na Figura 3.

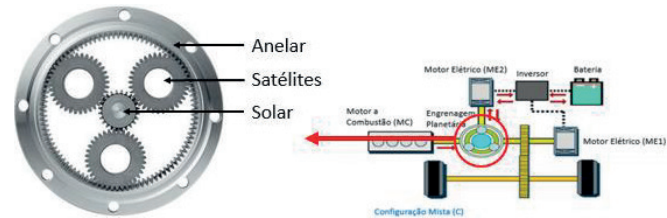


Fig. 3. Desenho de engrenagem planetária. Adaptado de RAVI INDÚSTRIA DE PEÇAS [7].

O conjunto de engrenagem planetária tem uma função primordial na dinâmica de transmissão do veículo híbrido modelo série-paralelo. A relação de transmissão e interdependência entre suas engrenagens permite o veículo alcançar todos os modos necessário à sua dirigibilidade. Tomando como base o Toyota Prius, os modos presentes no câmbio do veículo são: *Neutral* (N), *Drive* (D), *Reverse* (R) e *Break Force* (B).

Quando o veículo está parado os motores são desligados de modo a reduzir o consumo energético, salvo quando o nível de bateria estiver baixo, sendo então acionado o motor a combustão interna que rotaciona o motor/gerados 1 e carregar a bateria.

Com o câmbio na posição *Drive* (D), o motor/gerador 2 é acionado quando se faz necessário tirar o veículo da inércia, podendo atuar sozinho em baixas demandas de potência. A elevação na demanda de potência pelo veículo leva ao acionamento do motor a combustão interna, que passa a participar da dinâmica de funcionamento. O motor/gerador 1 também contribui para esse modo realizando primeiramente a partida do motor a combustão interna e depois influenciando diretamente na carga da bateria e na relação de transmissão entre a anelar e as planetárias. Essa relação infinita de transmissão gerada pela influência do motor/gerador 1 no Toyota Prius é denominada de *Electronically Controlled Continuously Variable Transmission* (eCVT).

Ainda no modo *Drive* (D) é possível observar uma dinâmica de recuperação de energia chamada de frenagem regenerativa. A regeneração se diz respeito a capacidade de converter a energia cinética armazenada no veículo em movimento em energia elétrica. O motor/gerador 2 que participa ativamente da dinâmica de regeneração, sendo responsável por gerar energia elétrica e consequentemente a força contra eletromotriz de frenagem.

O modo *Reverse* (R) diz respeito a marcha ré. Neste modo o veículo é tracionado somente pelo motor/gerador 2, sendo o mesmo rotacionado no sentido contrário ao modo *Drive* (D). O motor a combustão interna, como não possui a capacidade de inversão no seu sentido de giro, atua em conjunto com o motor/gerador 1 realizando a carga constante da bateria.

Dentre os modos presentes no câmbio do Toyota Prius, aquele que se destaca em relação aos veículos puramente a combustão é o *Break Force* (B). Esse modo permite que o motor/gerador 2, que está acoplado diretamente na anelar e no eixo final das rodas, trabalhe como gerador de energia, fornecendo uma carga mecânica constante ao veículo a partir de sua força contra eletromotriz. Esse modo pode ser utilizado em descidas de ladeiras exigindo menos dos freios mecânicos e gerando energia para o veículo.

III. O KIT DIDÁTICO

O Kit Didático de Transmissão de Veículos Híbridos é um equipamento que simula a dinâmica de um conjunto de engrenagens do tipo planetária, semelhante ao encontrado nos veículos híbridos modelo série-paralelo. Na primeira etapa do projeto foi desenvolvido o protótipo de um sistema de transmissão para veículos híbridos, completamente manual, em que se fez possível realizar a prova de conceito e o entendimento da dinâmica veicular envolvida no sistema, como mostrado na Figura 4. Neste primeiro equipamento existiam manivelas para realizar a simulação manual dos motores elétricos (MG1 e MG2) e a combustão (ICE) presentes em um veículo híbrido, além também de permitir a movimentação do eixo das rodas para verificação da dinâmica de ladeira e frenagem. [8]

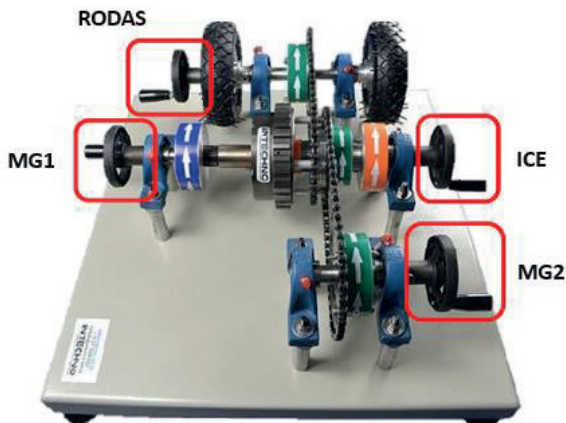


Fig. 4. Kit didático de transmissão de veículos híbridos.

Para o equipamento simulado e apresentado neste artigo, foram adicionados três motores elétricos de corrente contínua de 250 W cada, com sistema de redução de 1:15 conectado ao eixo solar. Cada um dos conjuntos motor/reductor simula um dos elementos do conjunto planetário: solar, satélites e anelar, que são conectados aos dois motores/geradores e ao motor a combustão interna de um veículo híbrido real. A inserção de motores elétricos de corrente contínua no equipamento se justifica pelo fato do mesmo ser focado na extração da dinâmica de transmissão da engrenagem planetária e não no funcionamento real dos motores. O equipamento desenvolvido pode ser visualizado na Figura 5. Uma manivela auxiliar foi adicionada ao eixo final da anelar de modo a elevar e aliviar a carga, permitindo simulações de subida e descida de ladeira, por exemplo.

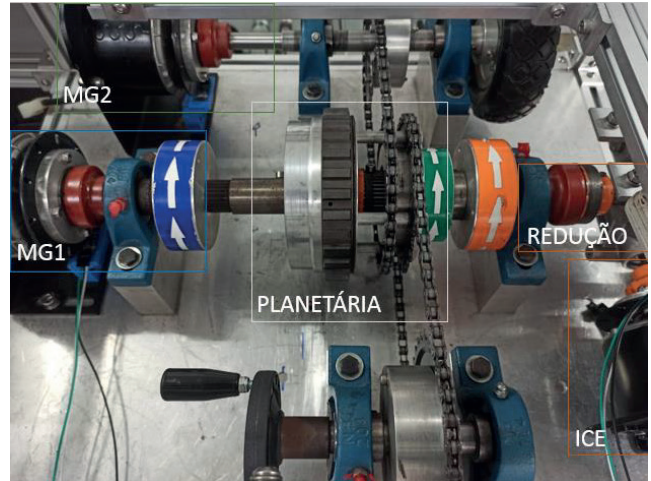


Fig. 5. Kit didático de transmissão de veículos híbridos.

A arquitetura completa do sistema desenvolvido, contendo os componentes, os posicionamentos e a interação entre eles, pode ser visualizada na Figura 6. O equipamento é composto por um módulo eletrônico principal que contém a lógica de funcionamento do equipamento e os circuitos de interface de entrada do usuário. O módulo principal realiza comunicação CAN com módulos secundários compostos por circuitos eletrônicos do tipo ponto H, dedicados a cada motor, responsáveis pela inversão de sentido e controle de velocidade.

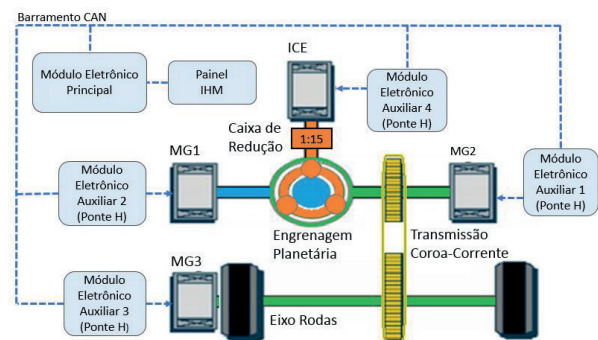


Fig. 6. Arquitetura do kit didático de transmissão em veículos híbridos.

Os dados de velocidade de rotação são coletados a partir de sensores encoders ópticos e apresentados ao usuário em uma IHM, como apresentado na Figura 7.

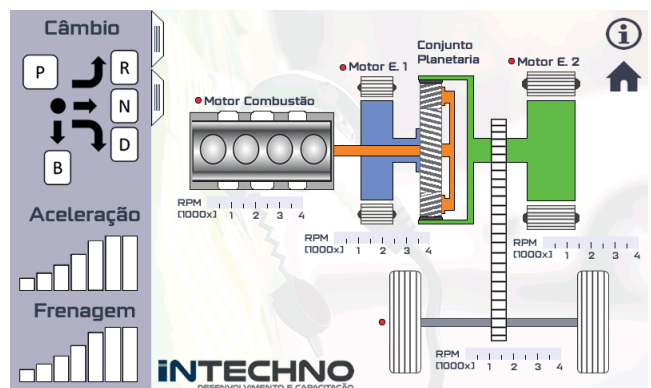


Fig. 7. Tela principal do display do kit didático.

A. Engrenagem Planetária

Para o equipamento foi utilizada uma engrenagem planetária de câmbio automático facilmente encontrada no mercado de reposição de peças automotivas. Embora não seja de um veículo híbrido, a dinâmica presentes no sistema de engrenagens utilizada se assemelha a de um veículo híbrido real, não comprometendo seu entendimento sobre o sistema.

A relação de transmissão entre a engrenagem anelar e solar, travando o eixo das planetárias, segue a relação de 1,92 no kit didático desenvolvido, diferentemente do Toyota Prius de 2,6 [9]. Já a relação entre as engrenagens satélites e a engrenagem solar, travando o eixo da engrenagem anelar, é de 2,92, contra os 3,6 do Toyota Prius. A comparação entre as engrenagens planetárias do kit didático desenvolvido e do Toyota Prius pode ser observado na Tabela I.

TABELA I
Engrenagens Planetárias do Toyota Prius e do Kit Didático

Eng. Planetária	Qtd. Dentes Anelar	Qtd. Dentes Satélite	Qtd. Dentes Solar
Toyota Prius	78	23	30
Kit Didático	71	17	37

Devido à disposição das engrenagens no sistema planetário, o eixo final das rodas conectado a engrenagem anelar, pode ter sua rotação elevada ou reduzida a depender das velocidades relativas das engrenagens solar e satélites. Essa dinâmica que permite que o veículo híbrido atinja diversas velocidades enquanto entrega a potência demandada pelo veículo.

Tomando como base a rotação desejada do eixo final das rodas (n_{MG2}) e a rotação do motor a combustão interna (n_{ICE}), é possível obter a rotação do motor/gerador 1 (n_{MG1}), conectado a solar, para que a correta relação demonstrada na equação (1) seja obedecida. Essa transmissão é denominada de eCVT e no caso do Toyota Prius segue a equação (2):

$$n_{MG1prius} = 3,6n_{ICE} - 2,6n_{MG2}, \quad (2)$$

onde: $n_{MG1prius}$ é a rotação do MG1 do Toyota Prius, n_{MG2} é a rotação do MG2 e n_{ICE} é a rotação do ICE.

Já o kit didático desenvolvido possui uma equação com dinâmica semelhante à do Toyota Prius, como pode ser visualizado na equação (3):

$$n_{MG1kit} = 2,92n_{ICE}R - 1,92n_{MG2}, \quad (3)$$

onde: n_{MG1kit} é a rotação do MG1 do kit didático e R é a relação de transmissão da caixa de redução de 1:15.

A constante R presente na equação do kit didático (2) é devido a presença de uma caixa de redução alocada na saída do ICE de modo a elevar o torque no eixo da engrenagem solar. Essa redução se fez necessária para que o motor de corrente contínua utilizado no equipamento fosse capaz tracionar o conjunto mesmo em baixas rotações.

B. Interação Entre os Motores - Resultados Práticos

Foram realizadas diversas coletas de dados das rotações dos motores de modo a validar a relação de transmissão das engrenagens do conjunto planetário no kit didático.

O primeiro teste realizado foi o monitoramento da rotação do eixo anelar (MG2), mantendo o eixo conectado as engrenagens satélites (ICE) parado. Esse teste permitiu validar a relação entre o eixo solar e anelar, encontrando o valor prático de 2,05. A curva gerada a partir da variação da rotação do MG1 pode ser visualizada na Figura 8.

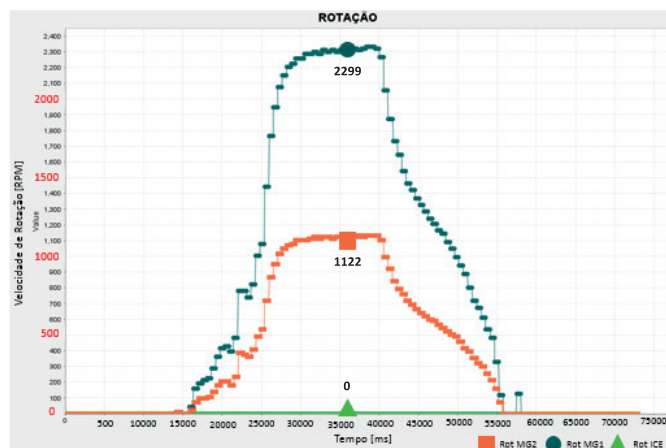


Fig. 8. Variação da rotação do MG2, mantendo o ICE parado e variando a rotação do MG1 da rotação mínima para a máxima e depois retornando para a mínima.

Um procedimento semelhante foi realizado para obter a relação entre o eixo das engrenagens satélites e a solar. Neste teste o eixo da anelar (MG2) foi mantido parado, realizando a rotação do eixo das engrenagens satélites (MG1) pelo eixo da solar (ICE). A relação encontrada foi de 0,19 e curva gerada pode ser visualizada na Figura 9.

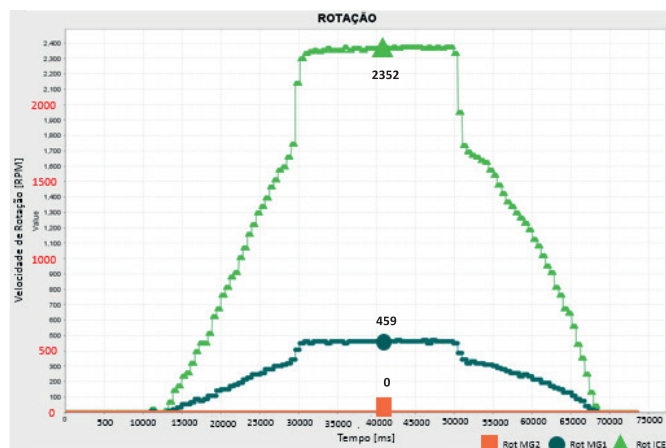


Fig. 9. Variação da rotação do ICE, mantendo o MG2 parado e variando a rotação do MG1 da rotação mínima para a máxima e depois retornando para a mínima.

Com as duas relações obtidas foi possível validar o correto equacionamento do sistema de transmissão do kit didático e do sistema de eCVT. Os valores podem ser substituídos na equação (1), resultando em (4):

$$n_{MG1kitTst} = 0,19n_{ICE} - 2,05n_{MG2}, \quad (4)$$

onde: $n_{MG1kitTst}$ é a rotação do MG1 do kit didático testado.

Essa equação se assemelha a obtida teoricamente a partir da relação entre dentes das engrenagens utilizadas. A equação teórica, substituindo o valor R na equação (3) pela constante de relação da caixa de redução 1/15, obtém-se o valor aproximado da primeira constante 0,195. A equação pode ser visualizada em (5):

$$n_{MG1kit} = 0,195n_{ICE} - 1,92n_{MG2}, \quad (5)$$

A semelhança da equação obtida teoricamente a partir da relação de dentes do kit didático em (4) e a extraída de forma prática a partir da interação entre os motores em (5), valida a equação dinâmica de transmissão do equipamento. A semelhança dessa equação com a equação dinâmica de um veículo híbrido, modelo Toyota Prius, descrita em (2), corrobora com a afirmação que o kit educacional desenvolvido pode ser utilizado para emular a dinâmica de funcionamento de um veículo híbrido real.

Com o equacionamento comprovado, um terceiro teste foi realizado de modo a validar o controle de velocidade do eixo da anelar (MG2) a partir da variação do eixo solar (MG1), mantendo o eixo das engrenagens satélites (ICE) em rotação constante. Esse teste demonstra a relação infinita de velocidade relativa a eCVT presente no kit didático e no veículo híbrido modelo série paralelo. O resultado do teste pode ser visualizado na Figura 10 e comprova os resultados da equação (5).

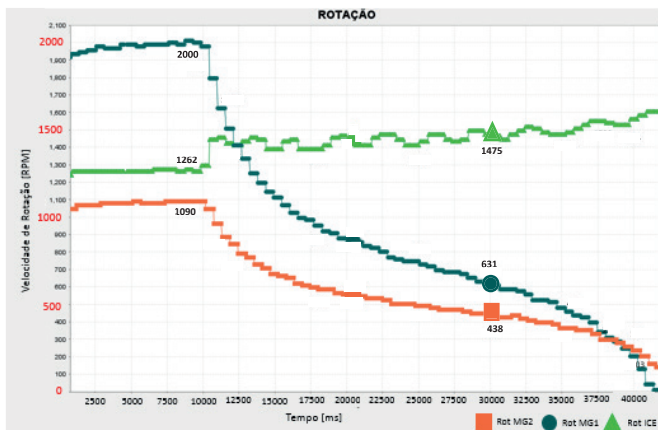


Fig. 10. Variação da rotação do MG2, mantendo o ICE em rotação constante e variando a rotação do MG1 do ponto de rotação máxima para mínima.

Outro modo também presente nos veículos híbridos modelo série paralelo, e comprovado no kit didático, é a possibilidade de alcançar todas as rotações no eixo final das rodas (MG2) necessárias para o funcionamento de um veículo real a partir da correlação entre o MG1 e o ICE. Uma das funções empregadas em veículos híbridos reais e presente no kit didático é a utilização do MG1 para elevar a rotação do eixo solar de modo a realizar a partida do ICE sem alterar a rotação do eixo anelar. Para realização dos testes e verificar toda a gama de rotações do eixo das engrenagens satélite (ICE), foi utilizado este como motor e o eixo solar (MG1) como movido, como pode ser visualizado na Figura 11.

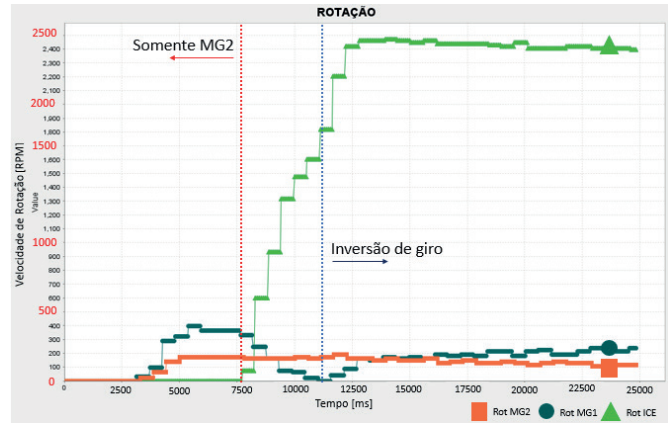


Fig. 11. Partida do ICE com o MG2 com rotação constante a partir da variação da rotação do MG1. A linha pontilhada azul indica o momento em que foi observada a mudança no sentido de giro do MG1, pois o sentido não é obtido com o sensor, somente a rotação. Já a linha pontilhada vermelha indica o momento da partida do ICE.

IV. CONCLUSÕES

Com os experimentos realizados foi possível comprovar que o Kit Didático de Transmissão de Veículos Híbridos projetado representa de maneira semelhante a dinâmica presente em veículos híbridos modelo série-paralelo, como o Toyota Prius. A fácil observação e controle das partes em funcionamento, além da presença do sistema de coleta de dados em tempo real e geração de gráficos, auxilia na didática do equipamento, podendo o mesmo ser utilizado em centros de capacitação como uma das ferramentas para o entendimento da tecnologia.

Como trabalhos futuros será realizada a alteração dos motores de corrente contínua por motores trifásicos assíncronos e um motor estacionário no eixo da engrenagem solar para simulação do ICE, de modo a se aproximar mais de um modelo híbrido real. Além da alteração dos motores, será retirada a caixa de redução presente no eixo da engrenagem solares, trazendo mais similaridade com a equação do Toyota Prius. Essas alterações trarão mais usabilidade para o equipamento, permitindo aferições de potência e construção de mapas de desempenho para a dinâmica de funcionamento do kit didático.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a equipe técnica da empresa Intechno Equipamentos Didáticos, pela colaboração neste trabalho. Este projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Espírito Santo (Fapes).

REFERÊNCIAS

- [1] CARDOSO, Daniel S.; FAEL, Paulo O.; ESPÍRITO-SANTO, Antônio. "A review of micro and mild hybrid systems", *Energy Reports*, [S.L.], v. 6, Supplement 1, p. 385-390, fev. 2020. Elsevier BV.
- [2] SASAKI, S.. "Toyota's newly developed hybrid powertrain", in *Proceedings of the 10th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs*.

- ISPSD'98 (IEEE Cat. No.98CH36212)*, Kyoto, Japan, pp. 17-22, 1998.
- [3] LIU, Jinming; PENG, Huei. "Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle", *IEEE Transactions On Control Systems Technology*, [S.L.], v. 16, n. 6, p. 1242-1251, nov. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- [4] X. Zhang, C. Li, D. Kum and H. Peng, "Prius and Volt: Configuration Analysis of Power-Split Hybrid Vehicles With a Single Planetary Gear", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 8, pp. 3544-3552, Oct. 2012.
- [5] Momoh, O.D., Omoigui, M.O. "An overview of hybrid electric vehicle technology", in *Proceedings of 2009 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, Dearborn, MI, USA, pp. 1286-1292, 2009.
- [6] Hussain, M. M., Rashid Mustafa, A., Chaudary, M. A., Razaq, A., "Design and Implementation of Hybrid Vehicle using Control of DC Electric Motor", in *Proceedings of 2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Bucharest, Romania, pp. 1-6, 2019.
- [7] RAVI INDÚSTRIA DE PEÇAS. Engrenagem Planetária, s/d [Online]. Disponível em: <https://www.ravi.ind.br/engrenagem-planetaria>. Acesso em: 15mar. 2022.
- [8] VIEIRA, R. R. S. S., PEREIRA, F. G., "Kit Didático de Transmissão de Veículos Híbridos [Not available in English]," in *Proceedings of 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, pp. 630-634, 2021 doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529458.
- [9] DAVIES, G. The Power Split Device. 2002 [Online]. Disponível em: <http://prius.ecrostech.com/original/PriusFrames.htm> Acesso em: 06jun 2022.

DADOS BIOGRÁFICOS

Rodrigo Rezende S. da S. Vieira, nascido em 16/12/1993 no Rio de Janeiro-RJ, é engenheiro eletricitista (2017), mestre em Engenharia de Controle e Automação (2022) pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

Atualmente é Gerente de Projetos na empresa Intechno Equipamentos Didáticos. Suas áreas de interesse são: eletrônica analógica e digital, sistemas embarcados, eletrônica de potência, veículos híbridos e elétricos.

Flávio G. Pereira, nascido em 09/02/1981 em Ibitira-ES, é engenheiro eletricitista, mestre (2006) e doutor (2012) em Engenharia Elétrica - Automação pela Universidade Federal do Espírito Santo.

O tema de sua tese foi Detecção de Pessoas e Reconhecimento de Gestos para Interação e Cooperação entre Seres Humanos e Robôs. Realizou parte das atividades de pesquisa de mestrado no Instituto de Automática (INAUT) da Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), Argentina. Realizou, também, durante o doutorado, uma pesquisa na Technische Universität Kaiserslautern, Alemanha, na área de cooperação e interação entre homens e robôs.

Atualmente é professor do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Robótica Móvel, Processamento de Imagens e Interação entre Homens e Robôs.