

Projeto, dimensionamento e simulação de um conjunto trator-implemento de propulsão híbrida.

William K. Moreira* Prof. Dr. Julian C. Giacomini**
Prof. Dr. Cassiano Rech*** Prof. Ph.D. Vinicius K. Marini****
Leonardo B. Vieira†

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: klaus_moreira@outlook.com).

** Instituto Federal Farroupilha (IFFarroupilha), RS, (e-mail: julian.giacomini@iffar.edu.br).

*** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: rech.cassiano@gmail.com).

**** Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: marini@inriufsm.com.br).

† Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: leonardo.vieraa@outlook.com).

Abstract: The article presents an analytical method for the development of an agricultural tractor with regard to the use case of planting, where it draws a row crop planter with traction from a hybrid propulsion system, where the specific goal is the sizing of the internal combustion and electric machines. With basis on operating and soil property parameters, it is possible to predict the torque and power requirements from the tractor at all of the high demand points and, hence, establish the peak power values for the system. The presented methodology is tested considering a soybean planting operation, in which a power-split planetary gearing topology of the hybrid powertrain is considered, and the results shows a possible configuration that has the best overall efficiency of the system.

Resumo: O artigo apresenta um método analítico para o desenvolvimento de um trator agrícola em respeito ao caso de uso de plantio, em que o veículo traciona uma semeadora de precisão com potência de tração a partir de um sistema de propulsão híbrido, onde o objetivo específico é o dimensionamento das máquinas de combustão interna e elétricas. Com base em parâmetros operacionais e de propriedades de solo, é possível prever os requisitos de torque e potência do trator em todos os pontos de alta demanda e, assim, estabelecer os valores máximos das potências requisitadas pelas máquinas. A metodologia apresentada é testada considerando uma operação de plantio de soja, na qual é considerada uma topologia de engrenagem planetária power-split para o sistema de acionamento híbrido, e os resultados mostram uma possível configuração que tem a melhor eficiência geral do sistema.

Keywords: agricultural machinery; hybrid powertrain; electric tractor; propulsion sizing.

Palavras-chaves: máquinas agrícolas; powertrain híbrido; trator elétrico; dimensionamento de propulsão.

1. INTRODUÇÃO

As atividades rurais na produção de alimentos vêm evoluindo a passos largos nas últimas décadas com a utilização de máquinas cada vez mais potentes e eficientes. O plantio, as aplicações e a colheita, segundo GVRResearch (2020), são exemplos de operações que demandam equipamentos sofisticados de elevada potência para a execução do trabalho, onde se torna primordial o correto dimensionamento destes. Também, há uma crescente busca em reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera, fator este diretamente relacionado ao setor agrícola, visto que uma parte considerável dessas emissões são provenientes desse ramo, de acordo com Fao (2020). Assim, torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de máquinas agrícolas mais eficientes,

através de tecnologias sustentáveis e de energia limpa. Alguns modelos de tratores completamente elétricos de pequeno porte já foram propostos para aplicações em pequenas propriedades, como em Melo et al. (2019), embora o custo-benefício de um exemplar comercial puramente elétrico, no mercado atual, torne-os inviáveis no momento, conforme estudado por Karner et al. (2014). Desta forma, a propulsão híbrida se mostra uma alternativa razoável entre as vertentes elétrica e convencional, segundo Moreda et al. (2016).

Com a ideia principal de melhorar o rendimento global do motor à combustão, os tratores híbridos (ou HETs, do inglês hybrid electric tractors) podem ser construídos de diversas formas em diferentes topologias. Em Scolaro et al. (2021) são apresentadas as principais topologias de

híbridos estudadas atualmente, sendo elas as configurações série, paralela e série-paralela. O dimensionamento das máquinas nestas topologias híbridas deve buscar o equilíbrio entre as fontes de energia embarcadas, além da correta determinação dos respectivos pontos de operação. Algumas técnicas de projeto já foram desenvolvidas para o dimensionamento de veículos urbanos híbridos em Zhang et al. (2015), como o algoritmo PEARS (*Power-Weighted Efficiency Analysis for Rapid Sizing*), onde não só a eficiência global do sistema é levada em consideração, mas também o tempo necessário para efetuar os cálculos. Assim, estas técnicas podem ser adaptadas e aplicadas também em tratores e equipamentos aplicados ao meio rural.

Desta forma, este trabalho possui como objetivo aplicar as técnicas desenvolvidas para os mecanismos de propulsão híbrida do meio urbano ao dimensionamento de um trator agrícola, por meio da adaptação dos algoritmos de projeto com os parâmetros de uma operação rural. Os resultados são avaliados por meio da comparação do consumo de combustível do conjunto trator-implemento projetado com um mecanismo convencional equivalente, utilizando a metodologia de cálculo apresentada pela ASABE (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*).

2. PROJETO DO CONJUNTO TRATOR IMPLEMENTO

O conhecimento teórico, quando elaborado sobre uma fundamentação matemática sólida, e principalmente aliado ao conhecimento prático, é capaz de fornecer informações confiáveis sobre o comportamento real do sistema e permite uma análise específica de cada um dos parâmetros da planta, permitindo o seu correto dimensionamento. Assim, a elaboração de um bom modelo é de suma importância para um projeto eficiente e condizente com as situações encontradas no mundo prático. Diversos trabalhos relacionados ao assunto já foram elaborados com o intuito da elaboração de modelos que coincidam com os resultados práticos de campo. As normas da ASABE foram elaboradas com o intuito de auxiliar os projetistas de equipamentos agrícolas, fornecendo modelos preditivos padronizados desenvolvidos com base em estudos práticos e teóricos de diversos implementos em variados ambientes. Segundo as normas ASABE EP496.2 e D497.4, a potência demandada por um conjunto mecanizado (trator-implemento) é dado pela expressão:

$$P_t = \frac{P_{db}}{(\eta_m \eta_t)} + P_{pto} + P_{hyd} + P_{el} \quad (1)$$

onde P_{db} é a potência demandada na barra de tração do trator, η_m e η_t são as eficiências da transmissão e da tração dos rodados no solo, respectivamente, P_{pto} é a potência demandada na tomada de potência, P_{hyd} é a potência do sistema hidráulico e P_{el} a potência elétrica demandada pelo implemento. O mecanismo que será dimensionado neste trabalho é composto por um veículo trator acoplado a uma semeadora-adubadora de precisão e plantio direto equipada com um sistema dosador pneumático de pressão negativa de semente, equipamento este comumente empregado no ramo agrícola conforme GVResearch (2020). Um exemplo do conjunto é mostrado na Figura 1.



Figura 1. Exemplo de conjunto trator-implemento. Fonte: www.greenmaquinas.com.br

A determinação das condições de operação do sistema é fundamental para o seu correto dimensionamento. Neste sentido, o conhecimento prévio das atividades as quais o conjunto será empregado é fator decisivo, pois as condições de ambiente no meio agrícola apresentam larga variabilidade. A textura, o teor de umidade, a densidade, estrutura, declividade, características de vegetação e resíduos de culturas anteriores são propriedades do solo que influenciam diretamente a eficiência da tração do trator, de acordo com Yanai et al. (1999). Além disso, a velocidade de deslocamento, profundidade e largura de trabalho são parâmetros de trabalho do implemento que afetam diretamente a magnitude da força de tração necessária para a execução da operação em questão. Assim, as condições de operação do conjunto trator-implemento projetado neste trabalho seguirão as seguintes considerações:

- Operação: semeadura de semente de soja;
- Caixa de mudanças de câmbio em carga 16 à frente x 16 a ré, com reversor.
- Velocidade máxima de operação: 6 km/h;
- Condições de solo: argiloso com umidade e textura média;
- Terreno plano (inclinação inferior a 5°);
- Eficiência da tração do sistema rodado-solo: 0,78 (ASABE (1999));
- Eficiência da transmissão do trator: 0,83 (ASABE (1999)).

O conjunto trator-implemento foi baseado no trator modelo 7230J da marca John Deere e na plantadeira modelo Generalle Plus da marca KF, apresentando as seguintes características:

- Potência máxima do motor à combustão: 158 kW (215 cv);
- Massa total do conjunto (caixas de adubo e semente cheias): 12.650 kg;
- Número de linhas de plantio: 18;
- Rodado traseiro do trator: 20.8-42 R1 (raio externo: 0,92 m).

Na configuração pretendida, o acionamento do implemento é feito através da barra de tração do trator, em conjunto com sistema hidráulico movimentando a turbina de vácuo e o levante da estrutura de suporte dos carros de linha. Os dosadores de fertilizantes e sementes são movimentados por árvores e caixas de transferência a partir de roda-à-terra. O sistema hidráulico considerado no projeto será caracterizado na seguinte forma:

- Vazão máxima da bomba hidráulica: 174 l/min;
- Pressão de trabalho: 210 bar.

Após estabelecidas as condições de contorno do equacionamento, é possível prosseguir com o dimensionamento. A potência na barra de tração P_{db} é dada em função da força de arrasto do implemento e da velocidade de operação, sendo calculada por:

$$P_{db}(\text{kW}) = \frac{Ds}{3,60} \quad (2)$$

onde s é a velocidade em km/h. A variável D é a força de arrasto em kN demandada pela semeadora, e seu valor é calculado através de parâmetros fornecidos pelas normativas da ASABE em função das condições do solo, do número de linhas de semeadura e do tipo de tecnologia de distribuição de semente e abertura de sulco no solo. Seu valor é calculado por:

$$D = F_i[A + B(s) + C(s)^2]W \quad (3)$$

sendo F_i referente à textura do solo; A , B , C , parâmetros tabelados relativos ao tipo do implemento e W o número de linhas de plantio. Para as condições supracitadas, considerando a velocidade máxima de plantio de 6 km/h e as constantes F_i , A , B e C iguais a 0,96, 1820, 0 e 0 respectivamente, a força de arrasto e potência calculada para a barra de tração é de 31,45 kN e 52,43 kW, respectivamente.

Na semeadora em questão, não há a utilização da tomada de potência (TDP) do trator, logo a potência P_{pto} é nula. Da mesma forma, não há demanda de potência elétrica expressiva pelo implemento, portanto, a potência P_{el} também é nula. A potência do sistema hidráulico é calculada em função da pressão e da vazão de trabalho supracitadas, através de:

$$P_{hyd}(\text{kW}) = \frac{pF}{1000} = \frac{210 * 100 * 174}{1000 * 60} = 60,90 \text{ kW} \quad (4)$$

onde p é a pressão de trabalho em kPa e F a vazão do fluido em l/s. A potência demandada pelo sistema hidráulico é portanto 60,90 kW. Desta forma, considerando os valores de eficiência do sistema rodado-solo e da transmissão supracitados, a potência total demandada pelo conjunto trator-implemento é dada por:

$$P_t = \frac{52,43 \text{ kW}}{0,78 * 0,83} + 60,90 \text{ kW} = 141,88 \text{ kW} = 193,03 \text{ cv.} \quad (5)$$

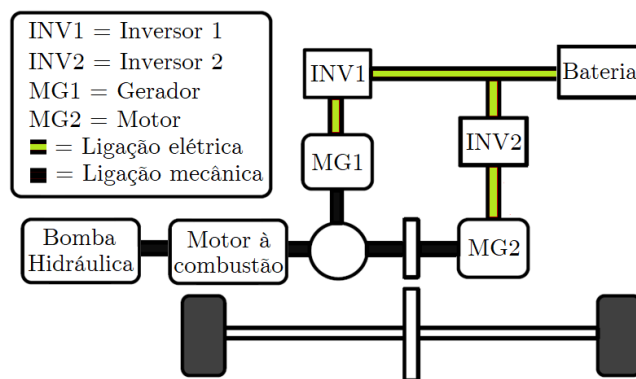


Figura 2. Topologia da configuração híbrida adotada.

Esta é a potência total mínima que o mecanismo de propulsão deve produzir para cumprir com a exigências que a operação citada requer.

3. PROJETO DO SISTEMA DE PROPULSÃO HÍBRIDO

A tecnologia híbrida é composta basicamente de um motor a combustão (ICE, do inglês *internal combustion engine*) convencional e de um ou mais motores elétricos com a função de melhorar o aproveitamento da energia proveniente da queima do combustível no ICE. Há também o emprego de um armazenador de energia elétrica na forma de um banco de baterias e/ou um banco de capacitores. Também, é necessário a utilização de conversores de energia elétrica para converter a energia armazenada na forma de corrente contínua para o formato adequado às máquinas elétricas, juntamente de uma central de controle de energia (EMS, do inglês *energy management system*). A maioria dos motores aplicados nesse segmento segundo Kim et al. (2010) são motores de ímãs permanentes internos (PMSM, do inglês *permanent magnet synchronous motor*) ou motores de indução (IM, do inglês *induction machine*), enquanto que os conversores comumente empregados nesta tarefa conforme Sclaro et al. (2021) são os inversores de tensão (VSI, do inglês *voltage source inverter*). Para este trabalho específico, o foco é o dimensionamento da potência das máquinas empregadas, portanto, os conversores não fazem parte do escopo de estudo neste trabalho.

As configurações comumente empregadas nos veículos híbridos resultam de diferentes arranjos das máquinas presentes no sistema de propulsão, onde cada arranjo possui vantagens e desvantagens um em relação ao outro. Desta forma, cabe ao projetista analisar com base nas condições de contorno do problema em questão a melhor configuração para a tarefa a ser realizada. Neste trabalho, a configuração série-paralela foi escolhida para o projeto, visando uma melhor controlabilidade do motor à combustão. Esta é apresentada na Figura 2.

Esta configuração possui um sistema planetário de engrenagens responsável por conectar o motor à combustão, o gerador MG1, o eixo de saída e o motor MG2. O ICE, responsável por alimentar a bomba hidráulica, carregar as baterias e tracionar o veículo é conectado ao eixo portador (em inglês, *carrier*); o gerador MG1, que atua carregando as baterias e fornecendo energia ao motor MG2, à engrenagem sol (em inglês, *sun*) e o eixo de saída à engrenagem

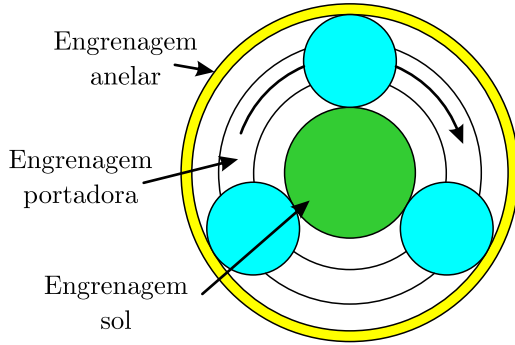


Figura 3. Descrição das engrenagens presentes no planetário.

anel (em inglês, *ring*), juntamente com o motor MG2, também responsável por tracionar o veículo. A conexão destes eixos é ilustrada na Figura 3.

A relação de velocidades entre os eixos do planetário é dada pela seguinte expressão:

$$\omega_s S + \omega_r R = \omega_c (R + S) \quad (6)$$

onde R e S são as quantidades de dentes da engrenagem anel e sol do planetário, respectivamente. Conforme apresentado por Zhang et al. (2015), o sistema híbrido na configuração supracitada pode ser modelado através do balanço de torques aplicados sobre o conjunto de engrenagens planetárias:

$$\begin{bmatrix} I_e & 0 & 0 & D_1 \\ 0 & \frac{mr^2}{K^2} + I_{MG2} & 0 & D_2 \\ 0 & 0 & I_{MG1} & D_3 \\ D_1 & D_2 & D_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\omega}_e \\ \dot{\omega}_{out} \\ \dot{\omega}_{MG1} \\ F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_e \\ T_{MG2} - T_{load} \\ T_{MG1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde I_e , I_{MG1} e I_{MG2} são as inércias das máquinas; m é a massa do conjunto trator-implemento; r é o raio do pneu conectado ao eixo de saída; K é a relação de transmissão entre a engrenagem anel do planetário e o eixo de saída; D_1 , D_2 e D_3 são termos referentes a $R + S$, $-R$ e $-S$, respectivamente; $\dot{\omega}_e$, $\dot{\omega}_{MG1}$ e $\dot{\omega}_{out}$ são as acelerações dos eixos do ICE, do gerador MG1 e do eixo de saída, respectivamente e F é a força interna entre os dentes das engrenagens do planetário. T_e , T_{MG1} e T_{MG2} são os torques das máquinas e T_{load} é o torque da carga resistente ao movimento. Esta carga refere-se ao peso do implemento agrícola conectado ao trator, e é dada pela expressão:

$$T_{load} = \frac{Dr}{K\eta_t\eta_m}. \quad (8)$$

Os momentos de inércia das máquinas e relações de engrenagens no planetário considerados são:

- $I_e = 0,18 \text{ kgm}^2$;
- $I_{MG1} = 0,023 \text{ kgm}^2$;
- $I_{MG2} = 0,023 \text{ kgm}^2$;
- Relação $R:S = 2,6$.

Rearranjando os termos da equação (7) e substituindo os valores referentes aos parâmetros mecânicos da planta supracitados, os torques das máquinas elétricas são dados por:

$$T_{MG1} = 0,072\dot{\omega}_{out} - 0,28T_e \quad (9)$$

$$T_{MG2} = T_{load} - 0,72T_e + 6,57\dot{\omega}_{out}. \quad (10)$$

A velocidade do gerador MG1 pode ser dada através da equação (6) em função das demais máquinas do sistema, enquanto a velocidade do motor MG2 é estabelecida pela relação final de transmissão. Logo, é possível obter as seguintes expressões:

$$\omega_{MG1} = \frac{\omega_e (R + S) - (\omega_{MG2} R)}{S} \quad (11)$$

$$\omega_{MG2} = K\omega_{out}. \quad (12)$$

Através dos resultados de torque e velocidade de cada uma das máquinas elétricas presentes no modelo de propulsão híbrido, é possível calcular as respectivas potências através da expressão:

$$P = \omega \times T. \quad (13)$$

Desta forma, é possível calcular a potência das máquinas elétricas em função de um ponto de operação do ICE (ω_e^* , T_e^*) e do ciclo de trabalho do trator ($v(t)$, $a(t)$), onde v é a velocidade e a é a aceleração longitudinal em um instante de tempo t .

4. DIMENSIONAMENTO DAS MÁQUINAS E SIMULAÇÃO.

Dentro do escopo apresentado, os fatores determinantes no dimensionamento do conjunto apresentado são a demanda de velocidade e aceleração e o ponto de operação do ICE. Os dois primeiros referem-se ao ciclo de trabalho da atividade em questão, definido na ocasião como a operação de semeadura de semente de soja. Em função das condições do terreno local, o mecanismo deve atuar sob diferentes demandas de deslocamento, devendo ser capaz de manter o bom desempenho sob as várias adversidades presentes no campo. O ciclo de trabalho utilizado no dimensionamento foi obtido no software ADVISOR desenvolvido por Wipke et al. (1999) e adaptado para representar a operação agrícola em questão, sendo apresentado nas Figuras 4 e 5.

Quanto à determinação do ponto de operação do ICE, relacionado ao torque e a velocidade angular de trabalho, é necessário levar em consideração os aspectos relacionados às eficiências individuais das máquinas, juntamente com a eficiência global do mecanismo. Dado que as velocidades e torques das três máquinas estão relacionadas através das expressões (6) e (7), e ambos os torques das máquinas elétricas são controlados em função da operação do motor à combustão, conforme as expressões (9) e (10), é de suma importância a correta definição do ponto de operação do

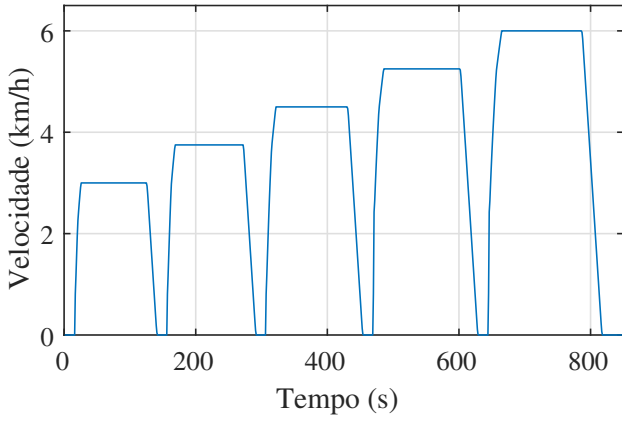


Figura 4. Curva de referência de velocidade.

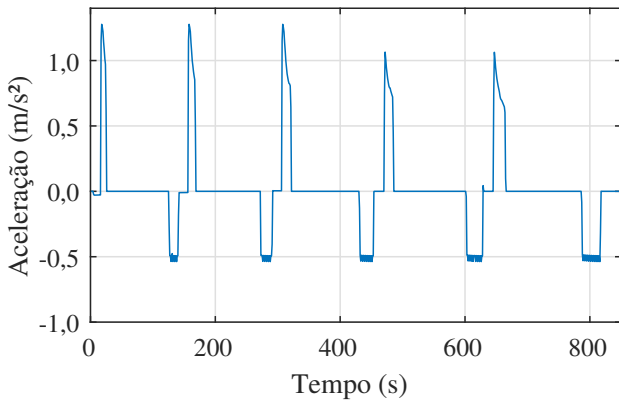


Figura 5. Curva de referência de aceleração.

ICE. Este parâmetro deve ser encontrado de forma a maximizar a eficiência do trator e consumir menos energia. Zhang et al. (2015) apresenta o cálculo da eficiência global da configuração híbrida na topologia série-paralela, onde a eficiência do mecanismo é dada pela soma dos termos referentes a cada parcela de potência produzida pelo ICE (potência transmitida pelo gerador MG1 para a bateria, para o motor MG2 e diretamente ao eixo de saída), de acordo com a equação (17):

$$\eta_1(\omega_e, T_e) = \frac{P_{e1}\eta_{MG1}\eta_{bat}/(\eta_{e,max}\eta_{MG1,max})}{P_{ICE} + P_{bat}} \quad (14)$$

$$\eta_2(\omega_e, T_e) = \frac{P_{e2}\eta_{MG1}\eta_{MG2}/(\eta_{e,max}\eta_{MG1,max}\eta_{MG2,max})}{P_{ICE} + P_{bat}} \quad (15)$$

$$\eta_3(\omega_e, T_e) = \frac{P_{e3}/\eta_{e,max} + P_{bat}\eta_{bat}\eta_{MG2}/\eta_{MG2,max}}{P_{ICE} + P_{bat}} \quad (16)$$

$$\eta_{hibrido}(\omega_e, T_e) = \eta_1 + \eta_2 + \eta_3 \quad (17)$$

onde η é a eficiência do componente em função do seu ponto de operação em um dado instante de tempo, η_{max} é a eficiência máxima, P_{ICE} é a potência total proveniente da queima do combustível do motor à combustão e P_{e1} , P_{e2} , P_{e3} e P_{bat} são definidos por:

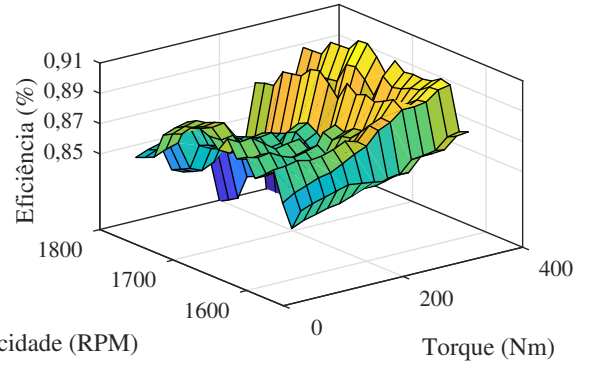


Figura 6. Mapa de eficiências para o instante de tempo t .

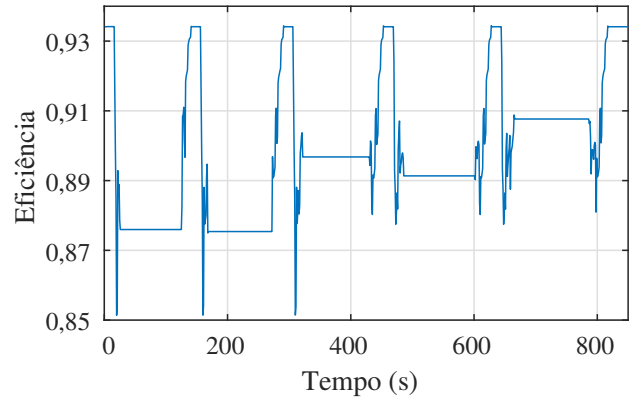


Figura 7. Melhor eficiência global para o período completo de simulação.

- P_{e1} = Parcela da potência do ICE que é transferida ao gerador MG1 e recarrega a bateria;
- P_{e2} = Parcela da potência do ICE que é transferida ao gerador MG1 e alimenta o motor MG2;
- P_{e3} = Parcela da potência do ICE que é transferida diretamente ao eixo de saída;
- P_{bat} = Potência da bateria transferida ao sistema; 0 quando está carregando.

As eficiências das máquinas são tabeladas pelos fabricantes e possuem diferentes valores para cada ponto de operação. As curvas de eficiência utilizadas neste trabalho foram obtidas através do software ADVISOR utilizando linguagem de programação do software MATLAB (2010).

Dado que a potência das máquinas é fornecida pela expressão (13), calculando o valor de $\eta_{hibrido}$ para diferentes valores de ω_e e T_e para um determinado instante de tempo t , é possível encontrar a combinação de potências que apresenta a melhor eficiência global. Considerando a velocidade de operação igual a 6 km/h, os valores de $\eta_{hibrido}$ para um intervalo de ω_e e T_e variando de 1500 a 2200 RPM e 300 a 750 Nm, respectivamente, são apresentados na Figura 6.

O valor máximo de $\eta_{hibrido}$ para o ponto considerado na Figura 6 é de aproximadamente 0,91. Calculando a resposta para os demais pontos do ciclo de trabalho da Figura 4, obtém-se a curva apresentada na Figura 7.

Desta forma, para o ponto de velocidade igual a 6 km/h, a eficiência global do sistema é 0,91 onde o torque e a

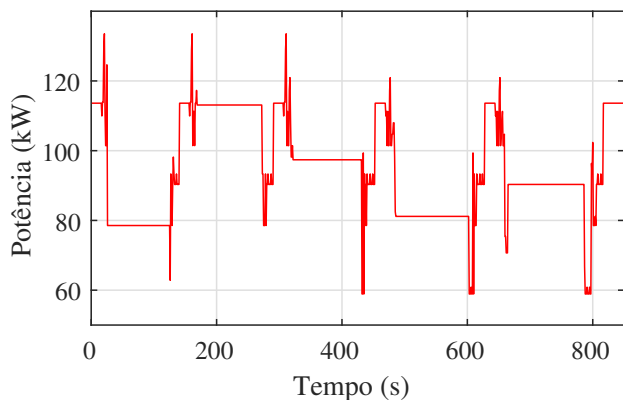


Figura 8. Demanda de potência sobre o motor à combustão.

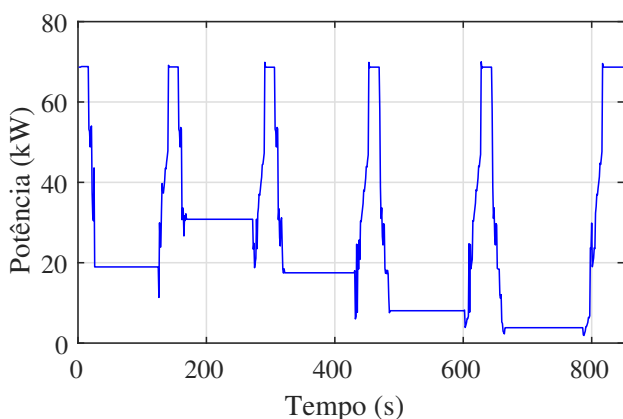


Figura 9. Demanda de potência sobre o gerador MG1.

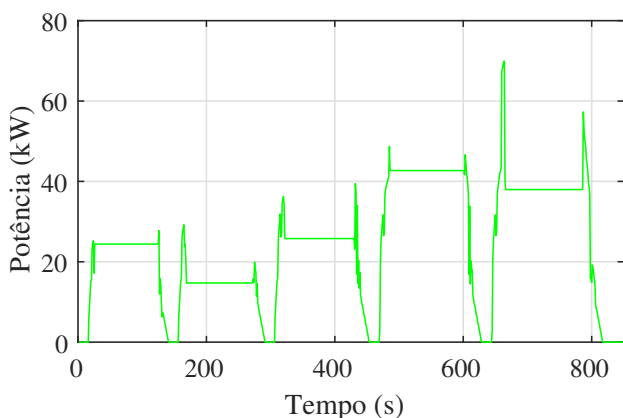


Figura 10. Demanda de potência sobre o motor MG2.

velocidade do ICE são, respectivamente, 600 Nm e 1500 RPM, produzindo uma potência igual a 94,25 kW, conforme a expressão (13). Assim, os torques e velocidades das máquinas MG1 e MG2 nesse ponto podem ser encontrados a partir das equações (9) (10) para os torques e (11) (12) para as velocidades. As potências para este instante de tempo, portanto, são dadas conforme a expressão (13), sendo respectivamente 3,83 kW e 37,97 kW. Para os demais instantes de tempo da curva da Figura 4, as potências das máquinas são apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10.

A potência nominal das máquinas deve ser relativa ao maior valor demandado durante a operação para o qual o equipamento é projetado. Assim, considerando os valores máximos apresentados durante os instantes de operação nas Figuras 8, 9 e 10, desconsiderando os momentos de aceleração e desaceleração, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 1.

Assim, após efetuado o dimensionamento proposto, é necessário um parâmetro de comparação que traduza o resultado obtido em valores quantitativos que representem a melhoria prática alcançada. Para esta finalidade, o consumo de diesel do motor à combustão é um parâmetro decisivo que aponta não apenas a eficiência em relação ao objeto de referência, mas também serve como um indicativo da viabilidade econômica da implementação prática do escopo deste trabalho. A norma (ASABE (1999)) apresenta uma fórmula que permite uma estimativa do consumo de combustível para uma determinada operação de um veículo agrícola convencional movido a diesel. Este cálculo é dado por:

$$Q_t = 2,64X + 3,91 - 0,203\sqrt{738X + 173} \quad (18)$$

onde Q_t é o consumo de combustível em l/kW.h da máquina agrícola e X é a razão entre a potência demandada na operação e a potência máxima disponível no motor. Para um trator convencional, onde o motor à combustão é integralmente responsável por gerar a propulsão do veículo, o consumo de diesel para o ciclo de trabalho da Figura 4 é de 11,12 l.

Para uma estimativa do consumo do trator híbrido, a potência demandada deve considerar apenas a demanda relativa ao motor à combustão, e a potência máxima disponível é o resultado apresentado na Tabela 1. Assim, adaptando a equação (18) considerando a demanda referente ao ICE em cada instante de tempo da Figura 4, o consumo do motor à combustão do mecanismo híbrido é de 9,85 l. A Figura 11 apresenta a comparação com o consumo do trator convencional aplicado ao mesmo ciclo de trabalho. Conforme pode ser observado na figura e nos valores supracitados, o *powertrain* híbrido projetado apresenta uma redução de consumo de 11,42 % em relação ao trator convencional aplicado na mesma operação em questão, resultando na economia de 1,27 litros de diesel.

5. CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida no escopo deste trabalho possibilitou o dimensionamento de um mecanismo de propulsão híbrida para um trator agrícola tracionando uma semeadora-adubadora, com base no ciclo de trabalho de aplicação e das condições de contorno referentes à atividade em si. Através de diversos parâmetros relacionados à operação agrícola, como as características do solo e relevo, juntamente com aspectos construtivos internos, como o

Tabela 1. Tabela das potências projetadas.

| Potência das máquinas | | |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| | Potência projetada (kW) | Potência projetada (cv) |
| P_{ICE} | 113,10 | 153,88 |
| P_{MG1} | 30,81 | 41,93 |
| P_{MG2} | 42,69 | 58,08 |

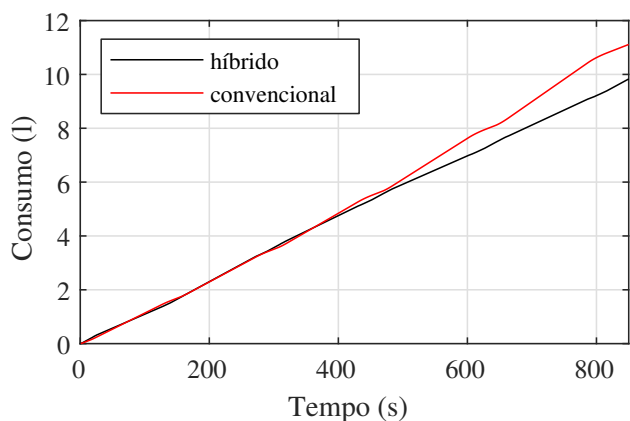


Figura 11. Consumo de combustível do ICE de um trator convencional e do híbrido projetado.

ponto de operação a ser definido do motor à combustão, foi possível a determinação quantitativa das máquinas responsáveis pela produção de tração, onde o conjunto resultante pode ser comparado com um sistema convencional, apresentando uma significativa redução no consumo de combustível do trator. Além deste fator, a topologia híbrida estudada neste trabalho apresenta mais possibilidades para otimização e estudo quando comparada aos tratores convencionais. Desta forma, pode-se afirmar que é possível, através do modelo preditivo supracitado, efetuar o projeto do mecanismo em questão capaz de cumprir com o propósito descrito. Recomenda-se como extensão deste trabalho a aplicação de algoritmos de otimização com o objetivo de melhorar a utilização do motor à combustão, buscando reduzir o consumo de combustível e melhorar o aproveitamento de energia proveniente do mesmo.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1) pelo apoio financeiro fornecido para esta pesquisa na forma da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS

- ASABE (1999). D497.4 MAR99: Agricultural machinery management. in: *Asae standards: standards engineering practices data*. st. joseph. American Society Of Agricultural and Biological Engineers.
- Fao (2020). The contribution of agriculture to greenhouse gas emissions. Disponível em: <http://www.fao.org/economic/ess/environment/data/emission-shares/ir/>. Acesso em março de 2022.
- GVRResearch (2020). Agricultural tractor market size, share and trends analysis report by engine power, by region and segment forecasts, 2020 - 2027. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/agricultural-tractors-market>. Acesso em março de 2022.
- Karner, J., Baldinger, M., and Reichl, B. (2014). Prospects of hybrid systems on agricultural machinery. *GSTF Journal on Agricultural Engineering*, 1. doi:10.5176/2345-7848.1.1.4.

- Kim, K., Bae, J., Kim, W.H., Ham, S.H., Cho, S., and Lee, J. (2010). Design and comparison between im and pmsm for hybrid electrical vehicles. 1-1. doi:10.1109/CEFC.2010.5481798.
- Liu, J. and Peng, H. (2008). Modeling and control of a power-split hybrid vehicle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 16(6), 1242-1251.
- MATLAB (2010). *version 7.10.0 (R2010a)*. The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts.
- Melo, R.R., Antunes, F.L.M., Daher, S., Vogt, H.H., Albiro, D., and Tofoli, F.L. (2019). Conception of an electric propulsion system for a 9 kw electric tractor suitable for family farming. *IET Electric Power Applications*.
- Moreda, G., Muñoz-García, M., and Barreiro, P. (2016). High voltage electrification of tractor and agricultural machinery – a review. *Energy Conversion and Management*, 115, 117-131. doi:10.1016/j.enconman.2016.02.018.
- Scolaro, E., Alberti, L., and Barater, D. (2021). Electric drives for hybrid electric agricultural tractors. 331-336. doi:10.1109/WEMDCD51469.2021.9425671.
- Virk, S., Fulton, J., Porter, W., and Pate, G. (2020). Row-crop planter performance to support variable-rate seeding of maize. *Precision Agriculture*. doi:10.1007/s11119-019-09685-3.
- Wipke, K., Cuddy, M., Bharathan, D., Burch, S., Johnson, V., Markel, A., and Sprik, S. (1999). Advisor 2.0: Advanced vehicle simulator for systems analysis. URL <http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>.
- Yanai, K., Silveira, G., Lanças, K., Corrêa, I., and Maziero, J. (1999). Desempenho operacional de trator com e sem o acionamento da tração dianteira auxiliar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira - PAB*, 34. doi:10.1590/S0100-204X1999000800015.
- Zhang, X., Peng, H., and Sun, J. (2015). A near-optimal power management strategy for rapid component sizing of multimode power split hybrid vehicles. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 23(2), 609-618. doi:10.1109/TCST.2014.2335060.