

Sistema de Gerenciamento de Energia em uma Máquina Fora de Estrada

M. F. Ramos* S. B. Moreira** R. A. Pires Jr.*** I. A. Pires****
B. J. Cardoso F† A. Nascimento‡ T. A. C. Maia†

* Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, (e-mail: mfr2015@ufmg.br)

** Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, (e-mail: botelhosarah09@gmail.com)

*** Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, (e-mail: rodrigoalonsopires@ufmg.br)

**** Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, (iap@ufmg.br)

† Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, BH, Brasil, (e-mail: braz.cardoso@ieee.org, e-mail: thalesmaiaufmg@gmail.com)

‡ South America Tractor Backhoe Loaders, CNH Industrial Brasil, Contagem, Brazil, (e-mail: anderson.nascimento@cnhind.com)

Resumo:

O projeto de veículos fora de estrada possui conceitos diferenciados em relação aos veículos rodoviários. As retroescavadeiras, por exemplo, tem como quesito de análise o fornecimento de potência para a operação de seus implementos. O principal foco dos consumidores desse maquinário é, no entanto, a melhoria da eficiência de operação em relação ao consumo de combustível e à emissão de gases durante a operação. A eletrificação é uma melhoria que permite alcançar tais objetivos. O sistema de gerenciamento de energia (EMS - Energy Management System) é um dos que atuam diretamente nesse resultado, uma vez que ele é o responsável por determinar o instante de operação da máquina elétrica, fornecendo energia para os implementos, ou da máquina a combustão em conjunto com o gerador, fornecendo energia elétrica para recarregar as baterias. Este artigo apresenta então uma proposta de um EMS para o controle do fluxo energético de um veículo fora de estrada.

Keywords: Eletrificação; Máquina fora de estrada híbrida; Sistema de Gerenciamento de Energia; Consumo de Combustível; Controle baseado em regras.

1. INTRODUÇÃO

Veículos fora de estrada, como retroescavadeiras, desempenham um papel importante nas sociedades modernas, auxiliando no desenvolvimento de diversos setores, como no setor de construção ou no setor agrícola. A crescente utilização desses veículos agrega a melhoria e o aumento da eficiência dos processos em campo, de acordo com Holt and Edwards (2013), Nishida and Nihei (2013), Inoue (2009). Contudo, em função das restrições de emissões de CO_2 , NO_x e materiais particulados, o fato dessas máquinas terem baixa eficiência energética e serem responsáveis pela alta emissão de gases do efeito estufa (GEE) durante sua operação torna a utilização desvantajosa, conforme apresentado por Ochiai and Ryu (2008). Em Minnesota (EUA), é possível perceber que essa categoria de veículos é responsável pela emissão de 25% de óxidos nitrosos, como apresentado na Figura 1, segundo maior valor, ficando atrás apenas da indústria primária.

A adoção de sistemas híbridos é uma possível solução para alcançar a redução de emissões do veículo e o aumento de eficiência desejados. Conforme apresentado em Mendes et al. (2019), a hibridização do sistema de acionamento hidráulico de uma escavadeira culminou em economias de combustível de até 63%. Outro exemplo é a produção por parte da HUDDIG de uma das primeiras retroescavadeiras híbridas, chamada TIGON 1260T, HUDDIG (2021). Ao operar apenas em seu modo elétrico, com energia da bateria, a retroescavadeira oferece até 2 horas completas de trabalho de escavação ou para percorrer 20 km. Além disso, a hibridização agregou a possibilidade de operar com até 130% da potência nominal para picos instantâneos de demanda, característica de operação do veículo.

As máquinas de construção híbridas (MCH) contam, resumidamente, com a adição de motores elétricos, conversores de potência e um sistema de armazenamento de energia elétrica, além dos componentes convencionais (tanque de combustível e motor à combustão interna - MCI), Zhang et al. (2019). Essa estrutura interna, com variadas fontes

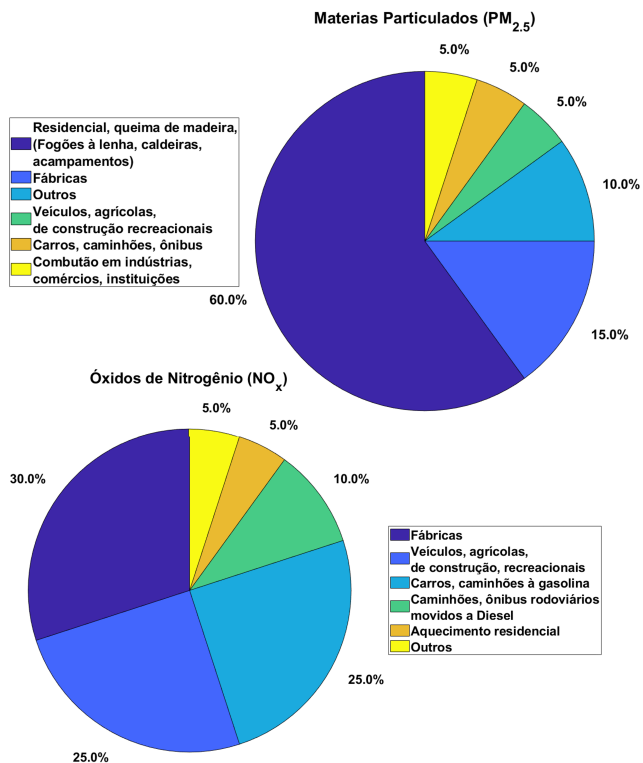


Figura 1. Emissões de gases do efeito estufa em Minnesota, EUA, adaptado de MPCA (2011)

de armazenamento de energia, permite a flexibilidade de operação do veículo, habilitando o fornecimento de energia tanto por eletricidade quanto pela queima do combustível fóssil de acordo com a melhor estratégia. Essa operação culmina em possível redução de consumo de combustíveis fósseis e de emissões.

Os MCHs, assim como os veículos elétricos híbridos (VEHs), podem ser comumente classificados em três topologias: série, paralelo e veículos série-paralelo, Eshani Merhad and Emadi (1981).

Como exemplo de aplicações no mercado, a HB335/HB365-1 foi desenvolvida em 2013 pela Komatsu, como apresentado por Nishida and Nihei (2013). A máquina é da classe de 30 toneladas e foi baseada nas nos modelos PC200-8E0 (2008) e HB205/HB215LC-1(2010) de 20 toneladas, tendo como objetivo principal a redução do consumo de combustível e o atendimento aos novos regulamentos internacionais sobre a emissão de gases poluentes.

Uma peça chave para o desempenho do MCH é o sistema de gerenciamento de energia (EMS). Em uma máquina à combustão, não há necessidade de implementar estratégias de gerenciamento de energia. O motorista decide como será a entrega de potência instantânea usando os pedais de freio e de aceleração. Os comandos do operador são traduzidos em ações pelos controladores de baixo nível como a unidade de controle do motor (ECU) que determina a quantidade de combustível a ser injetada dado o sinal de comando de torque recebido. Outro exemplo é o controlador de transmissão automática no ECU, que decide quando mudar de marcha com base nas condições do motor e velocidade do veículo.

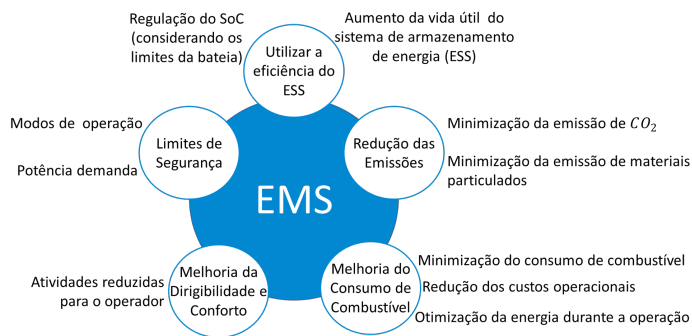


Figura 2. Objetivos do EMS, adaptado de Dai-Duong Tran and Ricardo Barrero (2020)

Para o veículo híbrido, por outro lado, há a necessidade de informar aos sistemas quanta energia deve ser fornecida por cada uma das fontes de energia embarcadas no MCH. Dessa forma, os veículos híbridos incluem um controlador de gerenciamento de energia, interposto entre o operador e os controladores específicos de cada sistema. Como mencionado, o objetivo do sistema de gerenciamento de energia é determinar a divisão ideal de energia entre as fontes de energia a bordo. A decisão sobre o que considerar ótimo depende da aplicação específica: na maioria dos casos, as estratégias tendem a minimizar o consumo de combustível mas os objetivos de otimização também podem incluir a minimização de emissões poluentes, maximização da vida útil da bateria ou um compromisso entre todos os objetivos mencionados, Wang et al. (2016).

Este trabalho visa desenvolver um modelo de simulação do sistema de gerenciamento de energia de uma máquina fora de estrada, indicando como as diferentes estratégias de operação afetam o consumo de combustível do sistema.

A estrutura do artigo está organizada da seguinte forma: A seção II descreve brevemente o estudo da arte desenvolvido até então sobre o gerenciamento de energia em máquinas fora de estrada (MFEs). A seção III apresenta a metodologia proposta de um EMS para uma MFE. A Seção IV mostra os resultados da simulação comparando o modelo convencional e híbrido em termos de sua eficiência de operação. A Seção V conclui este artigo.

2. ESTADO DA ARTE

O objetivo deste é descrever os trabalhos até então desenvolvidos na área de controle do sistema híbrido aplicados aos veículos de construção e agrícolas, de forma a apresentar soluções já adotadas e que podem auxiliar no desenvolvimento do projeto.

2.1 Tipos de EMS para aplicação à Maquinas Fora de Estrada

MFEs são máquinas complexas que, por terem mais de um sistema de armazenamento de energia, contêm variadas conversões de energia para garantir o seu funcionamento. O fluxo de potência, a potencial melhoria da economia de combustível e redução de emissões dependem da seleção da topologia do EMS. Em máquinas fora de estradas, o seu objetivo primário é fornecer energia para a tração e para os sistemas auxiliares com a melhor eficiência. Para

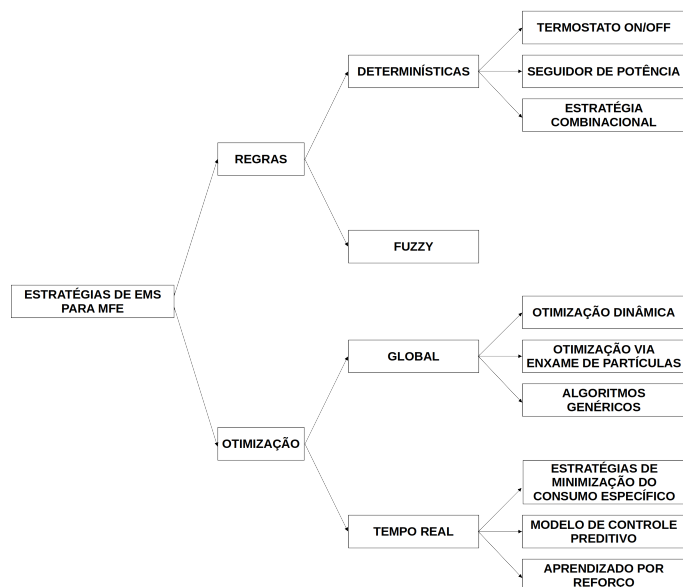


Figura 3. Classificação das estratégias de gestão de energia para MCH, adaptado de Zhang et al. (2019).

isso, o sistema trabalha selecionando os modos de operação mais apropriados para cada condição a qual a máquina é submetida.

Os diferentes modos de operação buscam atingir metas de melhoria de economia de combustível, de redução de emissões, garantia de dirigibilidade e manutenção do estado de carga (SoC) e da vida útil do sistema de armazenamento de energia, considerando suas limitações. A Figura 2 fornece uma visão geral dos objetivos do EMS considerados para VEHs, tanto convencionais, como fora de estrada.

Durante a última década, uma grande variedade de estudos foram publicados sobre o uso de EMSs para aplicações MCHs, Wang et al. (2016), Zhang et al. (2019), Dai-Duong Tran and Ricardo Barrero (2020). Embora várias topologias possam ser encontradas na literatura, as mais comumente aplicadas são de sistemas: baseado em otimização (OB) e em regras (RB). A Figura 3 representa as subdivisões das estratégias, que serão apresentadas nas subseções que se seguem.

Estratégias baseadas em otimização: As estratégias OBs se resumem basicamente em encontrar uma função objetivo e as restrições que representam o sistema de forma a otimizá-la com o intuito de definir os sinais de controle de saída do controlador. No caso de MFEs, o desejo de minimização de combustível é uma das funções objetivo do sistema, podem ser consideradas também as emissões, o SoC para um controle de otimização multi-objetiva.

As estratégias de otimização global visam distribuir dinamicamente a potência de saída do MCI e da ME de acordo com a teoria de controle ótimo sob o determinado ciclo de operação, em uma tentativa de otimizar a economia de combustível e outros indicadores. Como pode ser analisado pela Figura 3, essa metodologia de controle se divide comumente em:

- Programação dinâmica (PD): Esta é uma técnica de otimização numérica baseada no princípio de otimização de Bellman, Bellman (1957), para a solução de problemas que envolvem decisões em diversos estágios. Nesse modelo, o problema de otimização dinâmica não linear é subdividido em subproblemas em um tempo discreto. A função objetivo inicial é então formulada a cada período de amostragem. A mesma política de controle ótimo pode então ser alcançada usando um método recursivo *backward* ou uma técnica de programação dinâmica *forward* para resolver os subproblemas. Como principais pontos negativos para a utilização da PD é possível ressaltar a necessidade de um alto nível computacional devido à quantização dos estados e variáveis de controle e uma dependência do ciclo de operação. Essa desvantagens tornam o PD inviável para implementação em tempo real, conforme exemplificado por Dai-Duong Tran and Ricardo Barrero (2020).
- Otimização via enxame de partículas (PSO): A PSO é baseada no comportamento de organismos sociais que se movem em grupos, como colônias de formigas e pássaros. Os membros de um grupo compartilham informações e interagirão localmente uns com os outros e atualizarão sua última melhor posição e a melhor solução do grupo para alcançar, então, uma solução ideal. Se a posição melhorada for descoberta, o enxame partículas se move para o local identificado. Este processo é iterado para encontrar a solução ótima. Para um VEH, o PSO foi introduzido pela primeira vez por Wang et al. (2006) para otimizar os parâmetros com o intuito de obter menor consumo de combustível e redução de emissões de um VEH série.
- Algoritmos Genéricos (GA): O GA é outro método de busca estocástica inspirado em seleção e evolução genética. O princípio do GA consiste em três fases principais: reprodução, informação de cruzamento e mutação. O GA pode resolver os problemas de otimização não linear, não convexa, multimodal e de tempo descontínuo para buscar os pontos ótimos globais, removendo as armadilhas de pontos ótimos locais. Essa estratégia foi inicialmente aplicada por Piccolo et al. para otimizar o fluxo de energia de VEHs, Piccolo et al. (2001).

As estratégias de otimização em tempo real são modelos que contam com processamento instantâneo de energia de carga para minimizar a função objetivo com base na suposição de equivalência de consumo futuro de energia. Como um todo, as fórmulas matemáticas desses métodos devem atender aos requisitos de computação em tempo real e ser aplicáveis aos recursos de memória. Como apresentado na Figura 3, essa metodologia de controle se divide em:

- Estratégia de minimização de consumo específico (ECMS): com o objetivo de encontrar o valor mínimo da função objetivo (soma do consumo de combustível e consumo de combustível equivalente relacionado à mudança de SoC de cada fonte de energia em cada instante). O ECMS é robusto e adequado para a estrutura complexa que é o MCH, Zhang et al. (2019).
- Modelo de controle preditivo (MPC): Esse método utiliza de modelos do sistema para encontrar a solução

ótima em malha aberta em um intervalo de tempo finito, conforme apresentado em Zhang et al. (2019).

- *Reinforcement Learning* (RL): é um algoritmo de controle ótimo derivado do princípio de otimização de Bellman e pertencente a um ramo da PD. Como um tipo de estratégia sub-ótima, o RL é mais fácil de controlar. Seus controladores calculam todas as combinações possíveis de SoC, resultando em consideráveis iterações, o que torna a eficiência computacional incapaz de atender aos requisitos de controle em tempo real.

Estratégias baseadas em regras: As estratégias RBs tem como função primária garantir virtualmente que o MCI permaneça em um ponto de operação mais eficiente, ao introduzir um sistema elétrico que opere como fonte de energia para suprir as flutuações de potência da carga, na tentativa de economizar energia e reduzir as emissões. Conforme apresentado por Wang et al. (2016), a maioria das estratégias de gerenciamento de máquinas de construção e agrícolas são baseadas em RBs, principalmente pelo fato de terem a capacidade de alternar facilmente os modos de operação e lidar com as restrições e problemas não lineares, Simona Onori (2016). As regras podem ser determinadas e formuladas de acordo com o conhecimento prévio do perfil de operação das máquinas, de acordo com heurísticas ou de acordo com o modelo do sistema. Essa forma de controle é capaz de otimizar o ponto de trabalho em tempo real e determinar o período de trabalho com antecedência, Zhang et al. (2019). Além disso, pode ser dividida em EMSs determinísticos e baseados em lógica *fuzzy*.

Para as lógicas determinísticas, há uma divisão entre as fontes de armazenamento de energia com base no modo de funcionamento do equipamento. Nesta condição, as regras são expressões lógicas correspondentes a cada estado. Conforme apresentado na Figura 3, há ainda a divisão em estratégias de termostato (TCSs), estratégias seguidoras de potência (PFCSs) e estratégias combinatórias (CCSs).

- A primeira estratégia, a TCS, também conhecida como estratégia *on/off* consiste em fazer com que o MCI opere em um ponto de alta eficiência de seu mapa, proporcionando um torque e velocidade constantes para manter o SoC da bateria entre os limites superior e limites inferiores. Isso pode ser alcançado ligando ou desligando o MCI quando necessário. A diferença entre a potência fornecida pelo MCI e a demanda pode ser utilizada tanto para carregar o armazenador de energia quanto para auxiliar a suprir a carga no modo híbrido. Essa estratégia oferece a melhor eficiência para um conjunto MCI-gerador, no entanto, a eficiência geral do sistema do HEV será baixa, visto que só o MCI opera em seu ponto ótimo. Essa estratégia pode ser encontrada principalmente em VEHs série, Eshani Merhdad and Emadi (1981).
- A segunda estratégia, PFCS, possui vários modos de operação, mas os dois principais são: energia fornecida apenas pela bateria e modo seguidor de energia demandada. Em cargas muito baixas, a bateria é usada para acionar o trem de força. Porém, acima de uma carga mínima, o MCI é responsável por atender a carga. Desenvolvimentos posteriores do PFCS incluem um pequeno desvio da potência que é proporci-

onal à mudança no SoC da bateria, Gao et al. (2009). Esse desvio garante que a bateria seja carregada para SoC menores do que o limite inferior e descarregada em valores de SoC mais altos do que o limite superior, tornando assim a estratégia como estratégia de charge sustaining (CS), Chris Mi (2011). O PFCS tem sido usado para HEVs em série, Shabbir (2015).

- A terceira estratégia, por sua vez, consiste em uma combinação das duas anteriores, Zhang et al. (2019). As estratégias TCSs permitem que o MCI opere em condições ótimas, mas contam com diversos ciclos de carga e descarga da bateria, o que é prejudicial a sua eficiência e vida útil. Por outro lado, nas estratégias PFCS, o número de vezes que o MCI é ligado e desligado para manter o SoC, torna-se prejudicial para sua vida útil. Desta forma para a estratégia CS, a área de alta eficiência do motor à combustão e do ESS foram utilizados para melhorar a eficiência global do sistema. Esse comportamento pode ser comprovado em Wang et al. (2017).

Os controladores lógicos fuzzy (FLCs), que aplicam a lógica fuzzy para lidar com diferentes modos de operação, sem que aos limites de operação precisem ser discretos. Isso torna a estratégia de controle mais robusta a distúrbios e menos sensível à entrada de dados imprecisos, Salmasi (2007). Como o PFSs, esses sistemas de controle têm sido historicamente e tipicamente desenvolvidos para HEVs paralelos, mas também foram implementados em HEVs em série, Hajimiri and Salmasi (2006) e Li et al. (2011). Embora as FLCs sejam baseadas em regras, elas não são tão heurísticas quanto as estratégias mencionadas anteriormente.

3. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projeto foi dividido em três partes: caracterização do ciclo de trabalho da retroescavadeira, modelagem do sistema de controle e simulação computacional do sistema, cujos resultados são apresentados na próxima seção.

A caracterização do ciclo de trabalho é realizada com o intuito de conhecer as condições de operação da máquina. Para o sistema de gerenciamento de energia são propostas as malhas de controle e a máquina de estados que contém as regras que definirão o seu funcionamento. Por fim, a máquina de estados proposta foi adicionada à uma simulação computacional para conferir os resultados do sistema híbrido quando comparado ao sistema à combustão. Cada uma dessas etapas é detalhada nas seções que se seguem.

3.1 Ciclo de Operação

Durante a sua operação, as principais atividades da retroescavadeira são: *trenching* (cavar valas), *basement excavation* (escavação de uma base de uma construção) e *loader stockpile* (acúmulo de resíduos em uma pilha), além do deslocamento normal do veículo entre dois pontos. A abertura de valas é uma das mais frequentes operações de uma retroescavadeira, conforme exemplificado por Mendes (2019). A atividade consiste em uma escavação em que a remoção do material forma uma abertura estreita na terra. Neste ciclo de trabalho específico, basicamente todo o fluxo

Potência de acionamento da bomba hidráulica

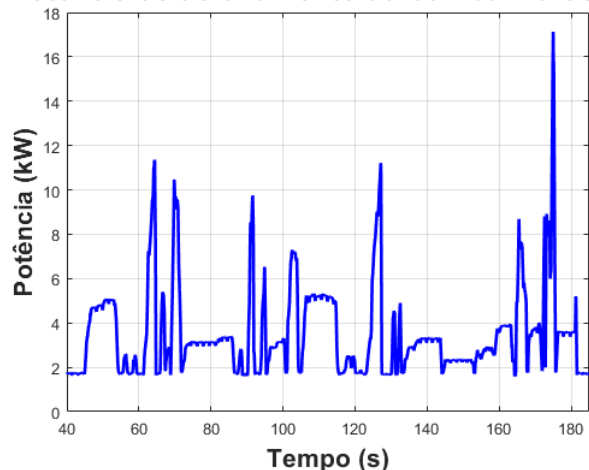


Figura 4. Potência de acionamento da bomba hidráulica para a operação de abertura de vala

de óleo do sistema hidráulico vai da bomba hidráulica para a válvula de controle da retroescavadeira, para acionar os cilindros traseiros. Como essa é a condição mais frequente sob a qual a retroescavadeira está atuando, foi o ciclo de operação escolhido para a realização da análises deste trabalho.

Em Mendes (2019), um estudo de caso de hibridização foi apresentado para uma retroescavadeira, a qual possui um motor Diesel de 59 kW a 2200 rpm (trata-se de uma retroescavadeira de capacidade de levantamento de 3086 kg na altura máxima. Neste estudo, durante um ciclo completo de abertura de vala, foram calculadas a potência e o torque necessários a partir de medições da pressão e vazão na saída da bomba hidráulica.

No presente trabalho, buscando aproximar os resultados simulados com dados reais para aumentar a eficácia da validação do sistema, os valores medidos de torque e potência de acionamento dos implementos como ciclo de operação foram utilizados. O resultado é apresentado na Figura 4. É possível concluir que, durante este ciclo de trabalho, o sistema hidráulico consome aproximadamente 3 kW de potência média e a velocidade de operação do MCI, para entregar a carga demandada, é praticamente constante (2200 rpm) ao longo do período de escavação. A partir desta caracterização, parte-se para a determinação das estratégias de controle do sistema.

3.2 Sistema de Gerenciamento de Energia

Conforme apresentado na seção 2, as metodologias de controle mais comumente aplicadas em veículos fora de estrada dos setores de construção e agrícola são as estratégias baseadas em regras. No presente estudo, deseja-se avaliar os impactos do sistema de gerenciamento de energia na hibridização de uma retroescavadeira. A topologia definida por projeto para esse processo é a topologia série.

O MCI possui uma potência nominal de 72 kW, quando operando em 2200 rpm e entrega seu torque máximo quando operando em 1250 rpm. A ME é uma máquina síncrona de ímãs permanentes (PMSM), com 10 pares de polos, torque máximo igual a 196,66 Nm, velocidade

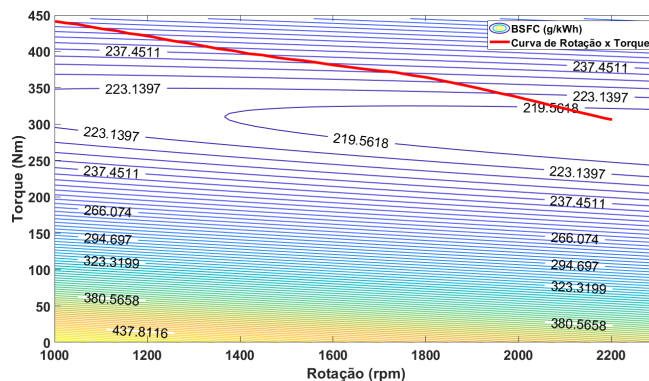


Figura 5. Mapa de consumo específico de combustível em g/kWh do MCI

nominal de 2200 rpm, e potência de aproximadamente 30kW. Por fim, o ESS consiste de um banco de bateria com 72 V de tensão de descarga, 100,8 V de tensão de recarga, potência nominal de 20 kW e potência de carga de 32 kW.

Para determinar o mapa de operação do MCI, foi adotada uma estratégia de estimar a relação entre a eficiência térmica e o regime de carga, levantado-se a relação entre essas variáveis de acordo com o trabalho desenvolvido em Fahd et al. (2013), An et al. (2012) e Raheman and Ghadge (2008). A partir da média obtida, a curva e equação da porcentagem de redução da eficiência térmica em relação ao regime de carga foram determinadas, para então os valores das eficiências térmicas para diferentes cargas serem utilizados como referência para o cálculo dos novos valores de potência, torque e consumo específico para cada faixa de rotação e para cada regime de carga (partindo de 10% a 100%). Em seguidas, a estimativa de desempenho por meio da variação da eficiência térmica, serviram como base para determinar os pontos mínimos exigidos, de acordo com Golverk (1992), para o levantamento dos coeficientes da equação que relaciona a rotação (rps), torque (Nm) e BSFC (g/kWh). A partir da equação 1 de desempenho do motor, determinou-se então o mapa de *break specific fuel consumption* (BSFC) ou consumo específico do MCI, apresentado na Figura 5. Onde z é o BSFC em g/kWh, x é a velocidade nominal do MCI em rps, y é o torque em Nm e k_1 a k_6 são os coeficientes calculados.

$$z = k_1 + k_2 * x + k_3 * y + k_4 * x^2 + k_5 * x * y + k_6 * y^2, \quad (1)$$

A retroescavadeira proposta por HUDDIG (2021) é o primeiro implemento de um sistema híbrido, conforme apresentado na seção 1. Desta forma, para o presente caso será aplicada a estratégia *on/off* apresentada na seção 2.1.2, por aliar uma estratégia de controle robusta com uma boa economia de combustível, e por ser a estratégia de controle mais convencional para HEVs da série, de acordo com o trabalho apresentado em Wang et al. (2016).

O princípio básico da TCS é permitir que a fonte de energia primária (PS) opere em seu ponto ideal, fazendo com que a fonte de energia secundária (SS) atue como um equalizador para instantes em que a potência requerida pela carga exceda a potência ótima da PS. Essa relação é apresentada de acordo com a equação 2.

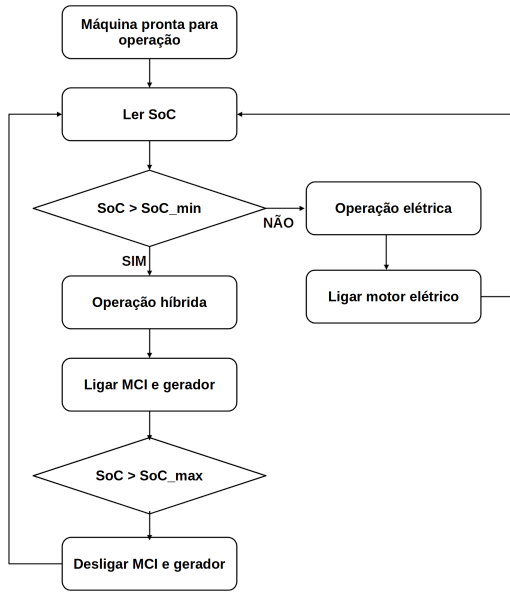


Figura 6. Modos de operação do EMS

$$P_{SS} = P_L - P_{PS_{op}}, \quad (2)$$

Onde $P_{PS_{op}}$ representa o ponto de operação ótimo do MCI (fonte primária), P_L e P_{SS} , as potências demandada pela carga e a da fonte de energia secundária, respectivamente.

A implementação da máquina de estados considera a operação nos modos à combustão (quando seja necessário operar nesse modo) e a operação híbrida. Na operação híbrida, o MCI opera em seu ponto ótimo de forma a carregar o banco de baterias. Esse estado é válido até que o SoC da bateria atinja seu limite superior ($SoC_{max} = 95\%$), nesse ponto o sistema hidráulico passa a ser acionado apenas pela SS e o ESS entra em modo de operação de *charge depleting* (CD), isto é modo de operação do banco de baterias em que o seu SoC pode flutuar, mas na média decresce durante a operação. Assim que o SoC de carga chega em seu limite mínimo ($SoC_{min} = 40\%$), o MCI é ligado novamente para suprir a demanda da carga. Essa lógica é implementada por $S(t)$, eq. 3, que é o estado do MCI. O estado $S(t^-)$ é o estado anterior.

$$S(t) = \begin{cases} 0 & SoC(t) \geq SoC_{max} \\ 1 & SoC(t) \leq SoC_{min} \\ S(t^-) & SoC_{min} < SoC(t) < SoC_{max}, \end{cases} \quad (3)$$

Os modos de operação e regras são apresentados na Figura 6. Por motivos de segurança, é importante acrescentar uma condição limite, durante a recarga, para impedir que o banco seja carregado além de seu limite. Nessa instante, o estado de PS se torna novamente 0.

Analisando a Figura 5, é possível notar que o ponto de maior eficiência do MCI ocorre para velocidades acima de 2000 rpm e para altas cargas, entre 300 e 340 Nm. Desta forma a potência ótima de operação seria em torno de 70kW. No entanto, para a operação de escavação de valas, sabe-se que esse valor é muito elevado, como é possível confirmar pela Figura 4. Logo, para esse caso então, espera-se que o MCI opere fornecendo a potência média do sinal.

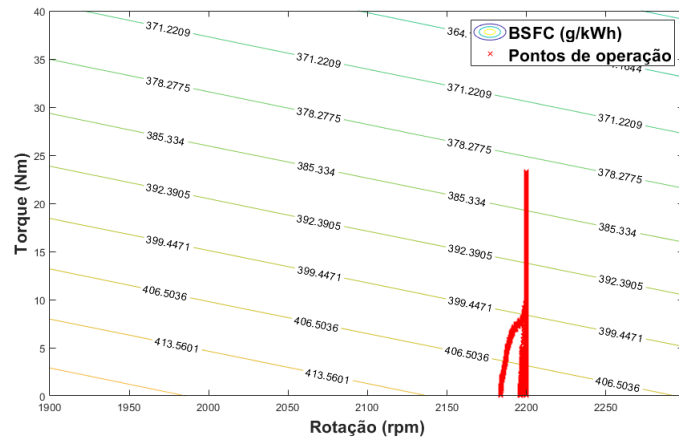


Figura 7. BSFC para operação a 2200rpm e torque experimental

4. RESULTADOS

Neste capítulo, os modelos das arquiteturas a combustão e híbrida da retroscavadeira são simulados sob condições de operação do ciclo de abertura de vala e os resultados de consumo de combustível são obtidos para análise. A seção pode ser dividida em duas etapas que serão apresentadas da seguinte forma, primeiramente apresentase os resultados de consumo do modelo a combustão de uma retroscavadeira, em seguida os resultados de consumo do modelo híbrido.

4.1 Sistema a Combustão

Um modelo da retroscavadeira convencional operando na condição de abertura de vala foi realizado para o levantamento do consumo de combustível no modelo tradicional. Os sinais de entrada da simulação são as medições de demanda hidráulica de operação apresentadas previamente. Nessa condição, como a bomba hidráulica está mecanicamente acoplada ao MCI, toda a demanda é transmitida na forma de torque e potência ao seu eixo. Isso reflete na quantidade de combustível necessária para realizar a operação em questão. O consumo de combustível m_d em g/s é dado pela equação que se segue:

$$m_d = BSFC * P_{MCI}/3600, \quad (4)$$

Onde $BSFC$ é o consumo específico de combustível em g/kWh e P_{MCI} é a potência de carga no eixo do motor em kW.

Realizou-se uma simulação da máquina operando apenas em sua condição à combustão por figura de mérito para se confirmar a efetividade do sistema simulado. Os dados experimentais do ciclo de operação, bem como a velocidade de operação ótima do sistema (2220 rpm) foram utilizados para determinar o perfil de torque desenvolvido. Essa característica foi então utilizada como parâmetro de entrada, juntamente com a velocidade de operação, de uma *lookup table*, contendo os mapas de relação entre carga e torque desenvolvido e o BSFC do MCI, para se determinar o perfil de consumo de combustível nessa condição de operação. As Figuras 7 e 8 representam os resultados obtidos para a simulação do sistema convencional.

Analisando as Figuras 7 e 8, nota-se que o MCI, diante das demandas de potência ao longo da operação de abertura

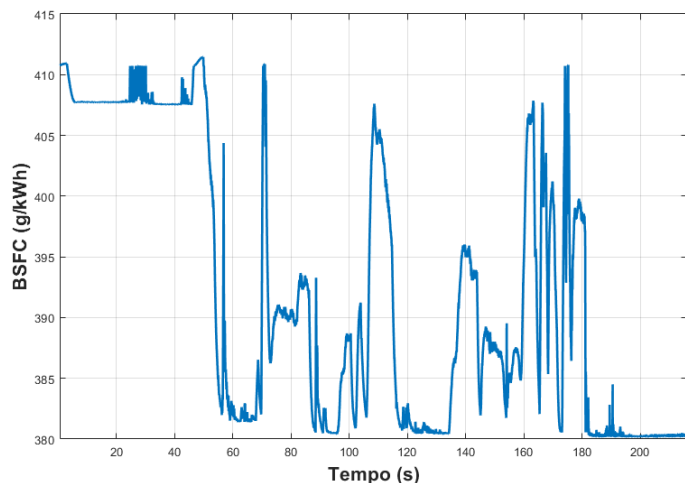


Figura 8. BSFC no tempo para operação tradicional, para operação de abertura de vala

de vala, trabalha em uma região de pior rendimento. O consumo específico médio encontrado foi de 392 g/kWh. Esta condição de operação se deve principalmente ao fato de a carga aplicada ao implemento configura uma condição de baixo torque aplicado e alta rotação, significando uma posição de pouca eficiência no mapa de consumo específico.

4.2 Sistema Híbrido

Um modelo da retroscavadeira híbrida operando na condição de abertura de vala foi realizado para o levantamento do consumo de combustível no modelo híbrido. Os dados de entrada deste modelo são as medições da demanda hidráulica da operação, a condição de trabalho ótima do MCI (rotação de 2200 rpm e carga em torno de 300 Nm a 340 Nm - *full throttle*), os parâmetros e estratégias de controle previamente discutidos na seção 3 e os parâmetros dos demais componentes do sistema hidráulico da retroscavadeira, além das características dos armazenadores de energia, gerador e motor elétrico, apresentados na seção anterior. Este modelo retorna as informações do consumo de combustível da retroscavadeira híbrida e as características de potência demandada durante a operação simulada.

Nesta condição, deseja-se que o MCI opere em seu ponto ótimo de consumo de combustível, isto é, velocidade de 2220 rpm e alta carga. As Figuras 9 e 10 representam o comportamento do sistema perante as condições estabelecidas de acordo com o ciclo de carga. Percebe-se que, diante do mapa de consumo específico, os pontos de operação do MCI passaram para uma região de maior eficiência e, por consequência, menor consumo de combustível, Figura 9.

Analisando a Figura 10, nota-se que o MCI, diante das demandas de potência ao longo do ciclo de carga definido, trabalha em uma região de melhora de rendimento. Na Tabela 1, é apresentada uma comparação dos resultados dos dois modelos simulados. Nota-se que a eletrificação do sistema de acionamento hidráulico possibilitou uma melhor condição de operação do MCI, visto que o consumo específico médio se passou a ser de 330 g/kWh. Essa condição indica uma melhora se comparada ao resultado obtido para a operação puramente com o MCI, na qual o resultado obtido para o BSFC foi de 395g/kWh.

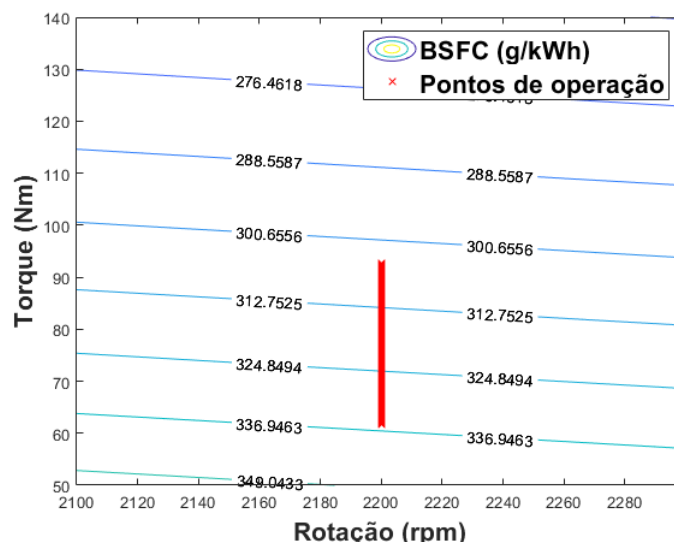


Figura 9. BSFC para operação híbrida, operação de abertura de vala

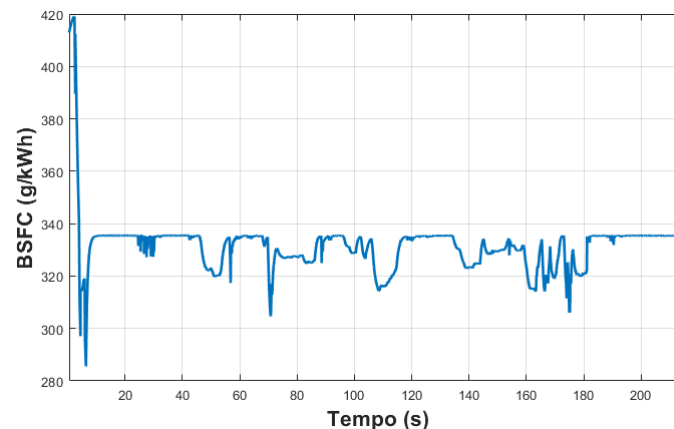


Figura 10. BSFC no tempo para operação híbrida, operação de abertura de vala

Tabela 1. Comparação de consumo específico médio de combustível para os dois modelos da retroscavadeira

Modelo do Veículo	BSFC (g/kWh)
Combustão	395
Híbrido	330

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um método para o gerenciamento de energia capaz controlar de forma adequada o sistema híbrido de um MFE, em que se almeja permitir que o MCI opere em sua região ótima e que o sistema elétrico seja responsável por suprir qualquer disparidade de demanda para esse ponto ótimo.

A partir de uma breve revisão do estado da arte de sistemas de controle para o gerenciamento de energia e sobre as características dos sistemas a serem implementados, os limites de operação foram identificados para um estudo de caso e um método de operação foi proposto. Os resultados da simulação sob condições de experimentais apresentaram uma melhoria, no entanto não a esperada.

Para prosseguir com o desenvolvimento do projeto, como implementações futuras, busca-se aprimorar a máquina de estados aplicada ao EMS e, posteriormente, testá-la em hardware, de forma a validar sua operação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa - Fundep Rota 2030/Linha V 27192.03.01/2020.15-00, pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- An, H., Yang, W., Chou, S., and Chua, K. (2012). Combustion and emissions characteristics of diesel engine fueled by biodiesel at partial load conditions. *Applied Energy*, 99, 363–371.
- Bellman, R. (1957). *Dynamic Programming*. Dover Publications.
- Chris Mi, M. Abul Masrur, D.W.G. (2011). *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. Library of Congress Cataloguing-in-Publication Data. John Wiley & Sons, Ltd., Publication.
- Dai-Duong Tran, Majid Vafaeipour, M.E.B. and Ricardo Barrero, Joeri Van Mierl, O.H. (2020). Thorough state-of-the-art analysis of electric and hybrid vehicle powertrains: Topologies and integrated energy management strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109596.
- Eshani Merhdad, Y.G. and Emadi, A. (1981). *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*. International series of monographs on physics. CRC press.
- Fahd, M.E.A., Wenming, Y., Lee, P., Chou, S., and Yap, C.R. (2013). Experimental investigation of the performance and emission characteristics of direct injection diesel engine by water emulsion diesel under varying engine load condition. *Applied Energy*, 102, 1042–1049.
- Gao, J.P., Zhu, G.M.G., Strangas, E.G., and Sun, F.C. (2009). Equivalent fuel consumption optimal control of a series hybrid electric vehicle. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 223(8), 1003–1018.
- Golverk, A. (1992). Mathematical calculation of the performance map of internal combustion engine. In *International Congress & Exposition*. SAE International.
- Hajimiri, M.H. and Salmasi, F.R. (2006). A fuzzy energy management strategy for series hybrid electric vehicle with predictive control and durability extension of the battery. In *2006 IEEE Conference on Electric and Hybrid Vehicles*, 1–5.
- Holt, G.D. and Edwards, D.J. (2013). Analysis of united kingdom off-highway construction machinery market and its consumers using new-sales data. *Journal of Construction Engineering and Management*, 139(5), 529–537. doi:10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000584.
- HUDDIG (2021). Huddig 1260 t. URL <https://www.huddig.com/products/excavator-loadwangers/tigon/>.
- Inoue, H. (2009). Introduction of pc200-8 hybrid hydraulic excavators. *Technical report, Komatsu, Japan*, vol. 54(no. 161), pp.1–6.
- Li, S.G., Sharkh, S.M., Walsh, F.C., and Zhang, C.N. (2011). Energy and battery management of a plug-in series hybrid electric vehicle using fuzzy logic. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(8), 3571–3585.
- Mendes, F.E.G. (2019). Eletrificação de Máquinas Pesadas Fora de Estrada Basada no Acionamento Elétrico dos Atuadores e Armazenadores de Energia de Baixa Capacidade. *Universidade Federal de Minas Gerais*.
- Mendes, F.E.G., Brandao, D.I., Maia, T., and Braz de Filho, J.C. (2019). Off-Road Vehicle Hybridization Methodology Applied to a Tractor Backhoe Loader. *2019 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*.
- MPCA, M.P.C.A. (2011). Sources of air pollution that most impact health. URL <https://www.pca.state.mn.us/air/sources-air-pollution-most-impact-health>.
- Nishida, Y. and Nihei, T. (2013). Introducing the hb335/hb365-1 hybrid hydraulic excavators.
- Ochiai, M. and Ryu, S. (2008). Hybrid in construction machinery. *Proceedings of the JFPS International Symposium on Fluid Power*, 2008(7-1), 41–44. doi:10.5739/isfp.2008.41.
- Piccolo, A., Ippolito, L., zo Galdi, V., and Vaccaro, A. (2001). Optimisation of energy flow management in hybrid electric vehicles via genetic algorithms. In *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*, volume 1, 434–439 vol.1.
- Raheman, H. and Ghadge, S. (2008). Performance of diesel engine with biodiesel at varying compression ratio and ignition timing. *Fuel*, 87(12), 2659–2666.
- Salmasi, F.R. (2007). Control strategies for hybrid electric vehicles: Evolution, classification, comparison, and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 56(5), 2393–2404.
- Shabbir, W. (2015). *Control Strategies for Series Hybrid Electric Vehicles*. Ph.D. thesis, Control and Power Group Electrical and Electronic Engineering Imperial College London.
- Simona Onori, Lorenzo Serrao, G.R. (2016). *Hybrid Electric Vehicles Energy Man.* Electrical and Computer Engineering: Control, Automation and Robotics. Springer-Verlag London Ltd.
- Wang, J., Yang, Z., Liu, S., Zhang, Q., and Han, Y. (2016). A comprehensive overview of hybrid construction machinery. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(3), p. 1–15.
- Wang, L., Zhao, D., Wang, Y., Wang, L., Li, Y., Du, M., and Chen, H. (2017). Energy management strategy development of a forklift with electric lifting device. *Energy*, 128, 435–446.
- Wang, Z., Huang, B., Li, W., and Xu, Y. (2006). Particle swarm optimization for operational parameters of series hybrid electric vehicle. *2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 682–688.
- Zhang, W., Wang, J., Du, S., Ma, H., Zhao, W., and Li, H. (2019). Energy management strategies for hybrid construction machinery: Evolution, classification, comparison and future trends. *Energies*, 12(10).