

Hibridização de uma Retroescavadeira: Projeto do Sistema de Acionamento Elétrico

Dener A. de L. Brandão* Mariana de F. Ramos*
Thiago M. Parreiras** Thales A. C. Maia*** Igor A. Pires****
Braz de J. Cardoso Filho**** Anderson Nascimento†

* Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais - Av. Antônio Carlos 6627, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil (e-mails: dalbrandao@ufmg.br/mfr@ufmg.br).

** Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá, MG, Brazil (e-mail: thiago.parreiras@unifei.edu.br).

*** Departamento de Engenharia Eletrônica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brazil (e-mail: iap@ufmg.br).

**** Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, Brazil (e-mails: thalesmaiaufmg@gmail.com/braz.cardoso@ieee.org).

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

Resumo:

A eletrificação veicular tem sido bastante discutida e aplicada em todo o mundo. Além da vantagem de reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera, a hibridização de veículos pesados pode trazer redução de custos operacionais, focando numa estratégia de redução do consumo de combustível. Este trabalho aborda o projeto do sistema de acionamento elétrico para hibridização de uma retroescavadeira. São apresentados os dimensionamentos de componentes, respeitando normas acerca do tema e, por fim, o projeto 3D inicial de uma bancada protótipo para posterior validação das estratégias de hibridização.

Palavras-chaves: hibridização, acionamento elétrico, veículos híbridos, maquinário pesado, retroescavadeira.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de veículos elétricos e híbridos tem sido cada vez mais comum em vários países do mundo. Segundo um estudo da empresa de consultoria Deloitte, 32% dos veículos comercializados no mundo em 2030 serão elétricos ou híbridos e, somente em 2030, estima-se que esses veículos serão cerca de 100 milhões dos veículos de passeio comercializados no mundo (Deloitte Insights, 2020). No campo legislativo, a Comissão Europeia, órgão executivo da União Europeia, propõe o fim da venda de veículos particulares a combustão a partir de 2035 (El País - Brasil, 2022), em um movimento para reduzir as emissões de gases poluentes na atmosfera. Apesar de não estarem incluídos nesta proposição, fabricantes de veículos pesados como maquinários voltados para construção e mineração buscam a eletrificação de seus veículos para, por exemplo, otimizar o uso de combustível e, conseqüentemente, reduzirem os custos de operação.

Dentre os veículos pesados voltados para construção e mineração, pode-se citar a retroescavadeira. A retroescavadeira é um trator equipado com uma pá carregadeira montada na frente e uma escavadeira em sua traseira. Em geral, ela é utilizada para terraplanagem, carregamento de materiais, escavação e carregamento de caminhões.

Uma das estratégias para reduzir o consumo de combustível é fazer com que o motor a combustão interna opere no seu ponto de máximo rendimento. Motores Diesel utilizados em retroescavadeiras podem chegar a um rendimento máximo de 40% (Hayes and Goodarzi, 2018) e, portanto, o ideal é trabalhar mais próximo possível desta região para otimizar o uso de combustível. Porém, durante a operação dos implementos da retroescavadeira, o motor trabalha longe deste ponto de operação e, portanto, essa é uma das principais oportunidades de economia de combustível em virtude da hibridização (Wang et al., 2016).

Sendo assim, o projeto do sistema de acionamento elétrico voltado para a hibridização desses veículos é fundamental para que o consumo de combustível seja reduzido da melhor maneira possível. Além dos aspectos técnicos da eletrificação, as normas que regem todo o processo devem ser seguidas para evitar acidentes e manter os componentes em boas condições de operação.

O objetivo deste trabalho consiste em apresentar os principais pontos que devem ser levados em consideração para o projeto do sistema de acionamento elétrico para hibridização de uma retroescavadeira. Para validar a estratégia de hibridização proposta, foi realizado um projeto inicial de uma bancada protótipo que compõe o sistema de aci-

onamento, levando em consideração as principais normas acerca do tema.

O trabalho é dividido nas seguintes seções: após a Introdução, são apresentadas na Seção 2 algumas das principais estratégias de hibridização utilizadas em veículos híbridos e a definição do sistema utilizado para a hibridização da retroescavadeira a partir da potência de trabalho. Na Seção 3 são apresentados os dimensionamentos dos principais componentes de potência, enquanto na Seção 4 são apresentadas as especificações dos principais componentes de proteção. Na Seção 5 é apresentado o projeto 3D da bancada protótipo que será utilizada para validação da metodologia de hibridização proposta e, por fim, as conclusões sobre o trabalho.

2. ESTRATÉGIAS DE HIBRIDIZAÇÃO

Para dimensionar os componentes da eletrificação que compõem o sistema de hibridização da retroescavadeira, é necessário definir primeiro a estratégia de hibridização. Dentre as estratégias de hibridização, podem ser citadas (Wang et al., 2016):

- **Série:** na hibridização série, toda a potência mecânica do motor a combustão interna (*Internal-Combustion Engine* - ICE) é convertida em potência elétrica por meio de um gerador acoplado. A energia é então utilizada para carregar os sistemas de armazenamento e alimentar um motor elétrico que atuará na tração e/ou nos atuadores presentes no veículo pesado. Por possuir um maior número de componentes, é uma configuração de maior custo, porém permite um maior grau de liberdade no gerenciamento de energia. Outra desvantagem é que qualquer problema no acionamento elétrico impede totalmente a operação do maquinário.
- **Paralelo:** na hibridização paralela, a potência de saída mecânica do ICE é conectada a entrada/saída de potência mecânica da máquina elétrica por meio de um divisor de potência (M. Kagoshima and T. Sora and M. Komiyama, 2009). O excedente de potência do motor a combustão pode ser convertido para energia elétrica e, quando necessário, o motor elétrico pode atuar em conjunto com o ICE para fornecimento de potência ao veículo. É uma configuração mais barata que as demais, já que a mesma máquina é utilizada como motor e gerador. Dessa forma, permite uma operação puramente mecânica ou puramente elétrica em caso de problemas ou necessidade técnica.
- **Série-paralela:** na configuração série-paralela o ICE é conectado tanto a um gerador quanto ao divisor de potência acoplado a um motor elétrico (Somà, 2017). Possui as vantagens das duas configurações, porém com preço elevado.

2.1 Potência de Trabalho

Como a operação dos implementos da retroescavadeira é a maior responsável pelo consumo deste tipo de maquinário, tanto pela ordem de grandeza da potência demandada, quanto pelo tempo de operação em um ciclo da máquina (Mendes, 2019), a hibridização da retroescavadeira presente neste trabalho tem como foco o auxílio à operação

deste movimento. Com o objetivo de reduzir os custos de implementação, a configuração paralela foi definida para o projeto de hibridização da retroescavadeira.

A estratégia de hibridização adotada consiste em utilizar o acionamento elétrico para fornecer toda a potência necessária até o estado de carga mínimo estabelecido para a bateria. Após esse momento, a máquina Diesel fornecerá tanto a potência dos implementos quanto a potência para carga das baterias. Dessa forma, o motor a combustão operará em um ponto de operação de maior rendimento.

A Figura 1 mostra a demanda de potência da bomba hidráulica do *backhoe* durante pouco mais de 5 minutos de operação da retroescavadeira para a operação de escavação de vala. Tais dados foram obtidos por meio de medições em campo de uma máquina real em operação.

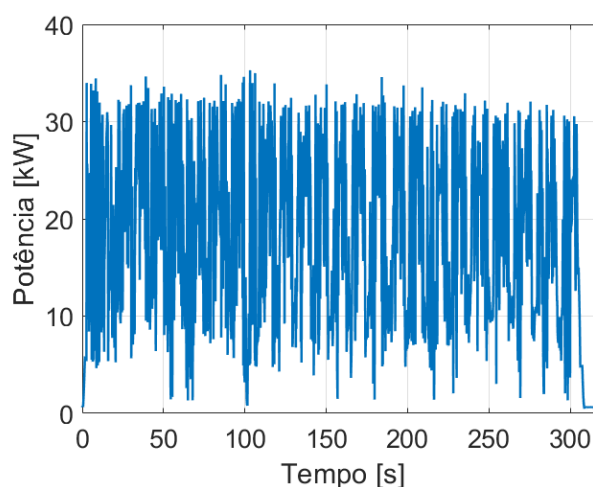


Figura 1. Potência na operação de escavação de vala.

Para avaliar as potências de operação, dividiu-se todo o período de escavação de vala em intervalos de 20 segundos. Para cada intervalo, foi avaliada a potência máxima e média, conforme mostra a Tabela 1, com destaque para a maior potência média obtida no ciclo 2 e a maior potência máxima obtida no ciclo 6.

Tabela 1. Potências durante intervalos de operação da retroescavadeira durante escavação de vala.

Ciclo	P_{max} (kW)	P_{med} (kW)	Ciclo	P_{max} (kW)	P_{med} (kW)
1	34,4	15,3	9	32,8	17,2
2	34,6	20,9	10	34,6	18,6
3	33,6	19,0	11	33,5	17,1
4	32,9	16,6	12	32,9	17,8
5	34,8	19,6	13	32,2	19,6
6	35,3	15,7	14	32,0	16,9
7	32,5	20,1	15	31,7	16,0
8	33,8	17,8	16	30,5	6,9

Como observado na Tabela 1, o motor elétrico deve ser capaz de fornecer potência média de 20,9 kW e potência máxima de 35,3 kW para a bomba hidráulica do *backhoe*.

3. DIMENSIONAMENTO DE COMPONENTES DE POTÊNCIA

3.1 Baterias e BMS

A Figura 2 mostra a estratégia de hibridização paralela associada ao acionamento do sistema óleo-hidráulico que compõe a retroescavadeira.

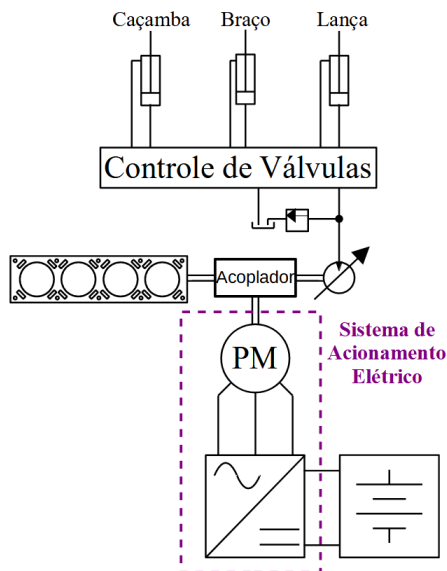


Figura 2. Esquema de configuração paralela de uma retroescavadeira híbrida.

Uma tecnologia chave para a hibridização de máquinas de construção é o elemento de armazenamento de energia. Baterias e capacitores são os mais promissores. O primeiro tem maior capacidade energética, enquanto que o último tem maior capacidade de potência. De qualquer maneira, máquinas de médio e pequeno porte usam, em geral, somente baterias (Wang et al., 2017).

Dentre as tecnologias de baterias comerciais, as baterias de íons de lítio possuem a maior densidade de energia apresentada. Para o projeto do banco de baterias, deve-se levar em consideração a potência, a energia e o volume disponível para alocação das baterias no veículo, além do custo de aquisição. Como o projeto de hibridização da retroescavadeira não visa uma mudança do chassi do modelo atual, o espaço disponível para todo o aparato de hibridização é reduzido. Sendo assim, será priorizada a redução de volume das baterias.

Dessa maneira, o banco de baterias será composto de 5 módulos do *pack* de baterias do Tesla Model S, como mostrado na Figura 3, cujos principais parâmetros podem ser vistos na Tabela 2.

Para que o banco de baterias seja capaz de suprir a demanda de corrente dentro de seus valores nominais e o volume do banco de baterias não seja muito elevado, definiu-se um banco de baterias conforme mostra a Tabela 3.

Além do banco de baterias, é necessário especificar o sistema de gerenciamento de baterias (ou *battery management system* (BMS)). O BMS tem como objetivo gerenciar a energia do banco de baterias para mantê-lo dentro de

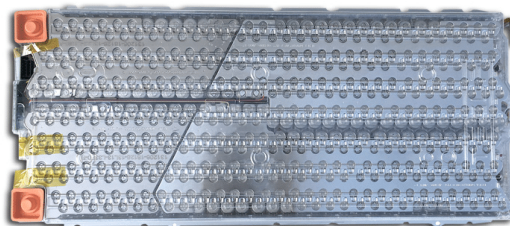


Figura 3. Módulo de bateria do *pack* do TESLA Model S (EV West, 2022).

Tabela 2. Parâmetros do módulo do *pack* de baterias do Tesla Model S.

Capacidade	5,2 kWh
Densidade de energia	198 Wh/kg
Tensão mínima	18 V
Tensão máxima	25,2 V
Tensão nominal	22,2 V
Corrente nominal	233 A
Potência de descarga máxima (3 s)	30 kW
Potência de descarga contínua	5 kW
Potência de carga (10 min.)	8 kW
Potência de carga contínua	5 kW
Corrente de descarga (10 s)	1000 A
Massa	26,3 kg
Dimensões	0,68 x 0,30 x 0,08 m
Volume	16,3 l

Tabela 3. Parâmetros do banco de baterias da retroescavadeira.

Número de módulos em série	5
Capacidade	26 kWh
Tensão nominal	111 V
Corrente nominal	233 A
Potência de descarga contínua	25 kW
Massa	131,5 kg
Volume total	81,5 l

uma região de operação segura, realizando o balanceamento, o monitoramento da temperatura e das correntes de carga e descarga das células durante a operação. Para a aplicação, foi definido o modelo Orion BMS 2 da fabricante Orion (Orion BMS, 2022), que pode ser visto na Figura 4.



Figura 4. Orion BMS 2 (Orion BMS, 2022).

3.2 Motor e Inversor

Motores elétricos de ímãs permanentes são os mais utilizados atualmente em veículos elétricos e híbridos devido a sua elevada eficiência e alta densidade de potência (Dong

et al., 2016; He et al., 2022). Além disso, motores de ímãs permanentes com fluxo axial possuem uma densidade de potência ainda mais elevada (Sitapati and Krishnan, 2001).

Para atender os níveis de tensão e potência estabelecidos, foi definido o motor EMRAX 228 LV (EMRAX Innovative E-Motors, 2022), visto na Figura 5, para compor o sistema de hibridização da retroescavadeira, por possuir potência nominal de 52 kW com massa de 12,4 kg, totalizando uma densidade de potência de 4,2 kW/kg.



Figura 5. Motor EMRAX 228 (EMRAX Innovative E-Motors, 2022).

Uma das características do motor apresentado na Figura 5 que permite a redução do volume é a utilização do arrefecimento líquido, que também é utilizado em inversores para aplicação veicular, como pode ser visto no estudo de Reimers et al. (2019), para redução de volume e consequente aumento da densidade de potência.

Com o objetivo inicial de evitar o uso de transmissão, a velocidade do motor elétrico foi definida em 2200 rpm, mesma velocidade do motor a combustão na condição de trabalho. Entretanto, a utilização do motor EMRAX 228 em 2200 rpm resultaria em uma baixa relação entre tensão no barramento c.c. do inversor ($120 V_{cc}$) e a tensão de linha na máquina ($39 V_{rms}$), o que ocasiona um baixo fator de utilização das chaves (Mohan et al., 2003).

A condição de inversor com baixo índice de modulação faz com que os diodos conduzam mais tempo do que os transistores e, normalmente, os diodos utilizados em módulos de inversores são projetados para uma dissipação muito menor do que os transistores (Semikron, 2015). Já em uma operação como retificador *boost* operando com uma mesma potência de recarga das baterias, quanto menor for a tensão de linha nos terminais da máquina, maiores serão as correntes no estator, elevando as perdas e, consequentemente, a temperatura da máquina. As elevadas correntes também irão aumentar as quedas de tensão nas resistências do estator, o que pode prejudicar a operação *boost* e a recarga das baterias.

Dessa forma, a velocidade do motor elétrico desejada foi elevada para 2750 rpm, resultando em uma relação entre 1,86 e 2,6, dependendo do valor de tensão nas baterias, o qual é uma função do estado de carga delas. A Figura 6 mostra as curvas de potência e torque do motor EMRAX 228 *Low Voltage Liquid Cooled*, enquanto a

Tabela 4 mostra os valores de torque contínuo e máximo na velocidade de 2750 rpm. Os valores de potência observados na Tabela 4 são maiores que os valores necessários obtidos na subseção 2.1 e, portanto, atendem ao necessário para operação.

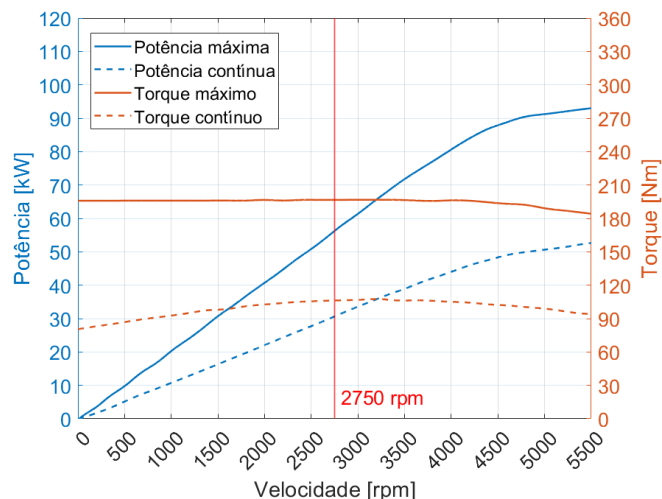


Figura 6. Curvas de torque e potência do motor EMRAX 228 LV LC.

Tabela 4. Características da máquina EMRAX 228 LC em 2750 rpm.

Potência contínua	30,65 kW
Potência máxima	56,26 kW
Torque contínuo	106,2 Nm
Torque máximo	196,7 Nm
Tensão no barramento c.c.	120 V
Tensão de linha eficaz	48,4 V

Normalmente, inversores voltados para tração elétrica trabalham com tensões em torno de 400 V (Hayes and Godarzi, 2018). Portanto, existem poucas soluções no mercado de inversores que trabalhem com tensões próximas a 100 V, como é o caso projetado. Uma dessas soluções é o inversor emDrive 500 (Emsiso, 2022), mostrado na Figura 7, que atende aos níveis de tensão pré-definidos e aos níveis de potência necessários para a operação plena na retroescavadeira.



Figura 7. Inversor emDrive 500 (Emsiso, 2022).

3.3 Cabos de Potência

Os cabos de alta tensão utilizados em aplicações veiculares possuem características especiais. Segundo a UN/ECE 100, define-se como alta tensão sistemas alimentados com tensões acima de $60 V_{dc}$ (Economic Commission for Europe of the United Nations, 2011). Segundo a norma ISO 6722-1 (International Organization for Standardization - ISO, 2011), os cabos de alta tensão em veículos elétricos devem ser predominantemente da cor laranja. Além disso, devem possuir malha de blindagem para reduzir problemas de interferência eletromagnética nos circuitos presentes no veículo.

Com o objetivo de se reduzir a seção dos cabos, é essencial que o isolamento suporte maiores temperaturas de operação. Sendo assim, cabos com isolamento de silicone são os mais recomendados, já que podem trabalhar com temperaturas de até $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Coroflex, 2022).

Desse modo, foi definido um cabo blindado com núcleo de cobre e isolamento de silicone com temperatura de operação de até $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ com seção de 50 mm^2 para atender às demandas de corrente, como os cabos mostrados na Figura 8.

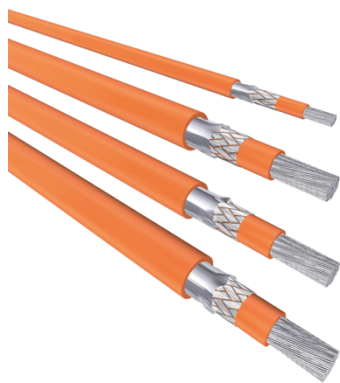


Figura 8. Cabos de potência blindados com isolamento em silicone (Coroflex, 2022).

4. DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES DE MANOBRA E PROTEÇÃO

4.1 High Voltage Interlock Loop - HVIL

O circuito de intertravamento de alta tensão (*High Voltage Interlock Loop* - HVIL) é um recurso de segurança de veículos híbridos e totalmente elétricos que protege os usuários durante a montagem, reparo, manutenção e operação de um veículo. Ele roteia através de cada componente de alta tensão (HV) e conector HV no veículo, verificando se há algum cabo desconectado (seja de forma proposital ou por rompimento), desenergizando o veículo (TESLA, 2013). A Figura 9 mostra um primeiro esboço de um sistema HVIL que será implementado no sistema de acionamento elétrico da retroescavadeira.

4.2 Insulation Monitoring Device - IMD

O *Insulating Monitoring Device* (IMD) é um dispositivo que mede a isolação entre os terminais de alta tensão

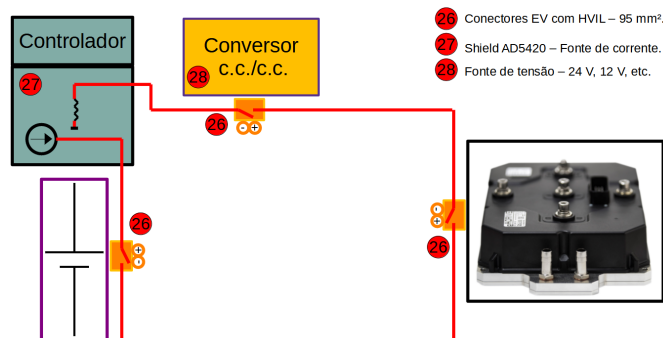


Figura 9. *High Voltage Interlock Loop* - HVIL.

da bateria e o terra do veículo, ou seja, o seu chassi. É um componente de segurança que garante que não haja acidentes com choque elétrico para os usuários do veículo em caso de contato com a carcaça. A Figura 10 mostra uma aplicação típica do IMD em veículos elétricos e híbridos. Uma das principais normas que regem os dispositivos de monitoramento do isolamento é a IEC 61557-8 (International Electrotechnical Commission - IEC, 2014).

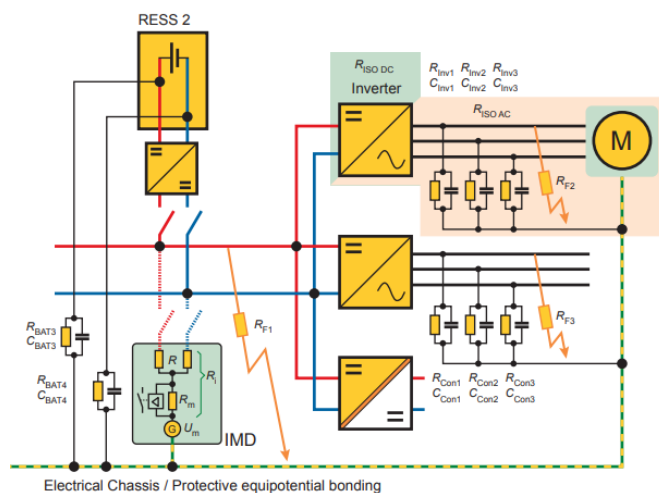


Figura 10. *Insulating Monitoring Device* (IMD) (Bender, 2022).

4.3 Circuito Principal e Pré-Carga

A extinção de arco em corrente contínua é mais difícil devido à ausência da passagem cíclica da corrente por zero, sendo essa a característica de maior impacto para contatores e fusíveis. Dessa forma, os fusíveis voltados para aplicação veicular devem atender a normas como a ISO 8820 (International Organization for Standardization - ISO, 2012) e é desejável que atendam padrões de qualidade como a ISO/TS 16949, uma especificação técnica ISO que rege as normas dos sistemas de qualidade automotiva existentes no mundo, como as normas brasileira, americana, alemã, francesa e italiana dentro da indústria automotiva global. Tal padrão de qualidade também é desejado para os contatores utilizados em aplicações veiculares.

A Figura 11 mostra as principais conexões do sistema de acionamento elétrico. Alguns componentes de proteção para os itens do sistema de acionamento são necessários

para manter a integridade deles em caso de possíveis falhas na operação. Dentre eles, os principais são os contatores, fusíveis e resistores de pré-carga.

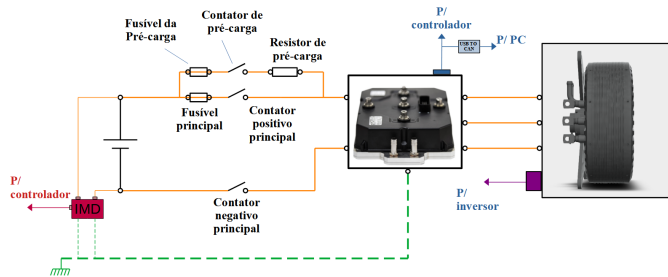


Figura 11. Esquema simplificado do acionamento elétrico.

O manual do emDrive 500 recomenda um fusível de ação rápida para instalação entre o banco de baterias e o inversor que possua corrente máxima de 630 A e tensão mínima de 150 Vdc. Considerando os dados do *pack* de baterias (Tabela 2), pode-se observar que:

- Para análise do processo de carga, o *pack* admite uma corrente de 444,4 A (máx. 10 min.) ou 277,8 A (contínuo) na condição de tensão mínima do módulo (18 V) que condiz com o pior caso em termos de valores de corrente.
- Para o processo de descarga, o *pack* é capaz de valores muito superiores de corrente em intervalos curtos de tempo. Como o fusível é de ação rápida, deve-se ter o cuidado de garantir que não ocorra atuação indevida dentro desses limites.

Entretanto, como a potência do acionamento foi especificada em 20 kW e considerando 5 *packs* de baterias em série com a tensão mínima totalizando 90 V, o valor da corrente de carga em 10 minutos cai para 222,2 A e a corrente máxima de descarga não ultrapassará 500 A. Dessa forma, com a intenção de reduzir custos, optou-se por um fusível de 300 A, semelhante ao mostrado na Figura 12 que permite a condição de carga em sobrecarga por 10 minutos e também não atua na condição de descarga de 500 A e protege a bateria numa condição de descarga de 1000 A por 10 segundos (Adler Electric, 2018). A Figura 13 mostra a curva corrente versus tempo para atuação do fusível, com destaque para os pontos das condições de descarga mencionados.



Figura 12. Fusível principal AE5 EV (Adler Electric, 2018).

Considerando o projeto do fusível principal, o contator principal, mostrado na Figura 14, foi especificado para atender às necessidades de regime contínuo e transitório do projeto, com corrente de condução contínua de 250 A e 600 A em 20 segundos, além da capacidade de interromper 2 kA operando com tensões de até 320 V_{cc} (Littelfuse, 2022a).

O circuito de pré-carga tem como objetivo carregar os capacitores do barramento c.c. do inversor de forma mais

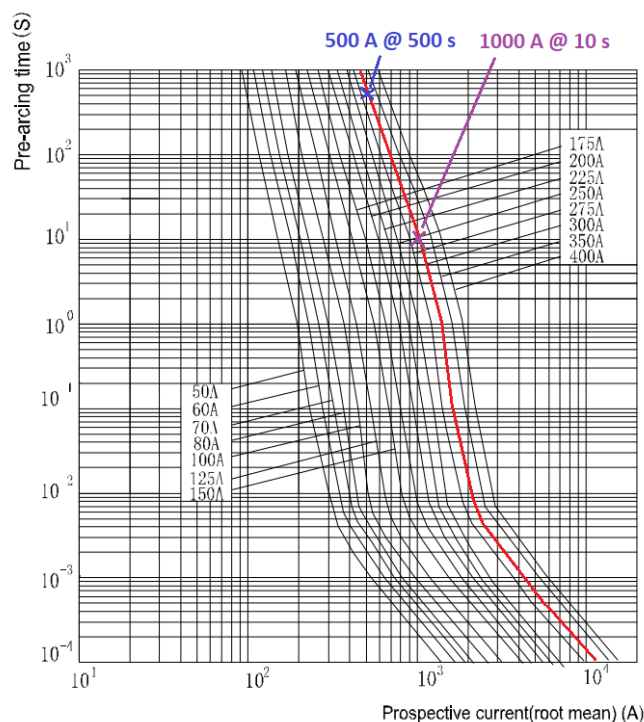


Figura 13. Curva Corrente x Tempo do fusível Adler AE5 EV 300 A (Adler Electric, 2018).



Figura 14. Contator principal (Littelfuse, 2022a).

suave, evitando uma corrente elevada inicial. O circuito de pré-carga é composto por um contator, um fusível e um resistor. Ao conectar as baterias por meio do circuito de pré-carga, o capacitor irá carregar de forma exponencial com a constante de tempo RC.

Para o inversor emDrive 500, foi especificado um fusível de 5 A (Adler Electric, 2022), mostrado na Figura 15, já que o fabricante recomenda a utilização de fusíveis com capacidade máxima de corrente de 7,5 A.

O contator de pré-carga, mostrado na Figura 16, foi especificado com capacidade de interrupção de 30 A em 450 Vdc (Littelfuse, 2022b). O fabricante do inversor recomenda resistores de pré-carga com 27 Ω e 534 W de pico. São recomendados resistores de fio de alta capacidade de pulso (Emsiso, 2022), como a série HS de fabricação Tyco (TE Connectivity, 2022), mostrada na Figura 17.

Entretanto, com o objetivo de não utilizar dissipador no resistor, optou-se por modificar a especificação, utilizando dois resistores em série. Segundo o *datasheet* do fabricante,



Figura 15. Fusível de pré-carga (Adler Electric, 2022).



Figura 16. Contator de pré-carga (Littelfuse, 2022b).

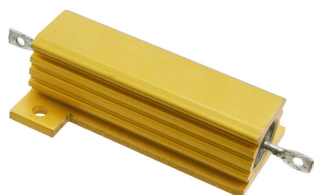


Figura 17. Resistor de pré-carga (TE Connectivity, 2022).

o resistor suporta sobrecarga de potência de 7 vezes a potência nominal de 20 W sem dissipador durante 4 segundos. Os resultados da pré-carga considerando a capacitância do banco do emDrive 500 em 14,25 mF (Emsiso, 2022) podem ser vistos na Figura 18. Observa-se que a potência em cada resistor de 133 W fica abaixo dos 140 W permitidos para sobrecarga em 4 segundos.

5. PROJETO 3D DA BANCADA

Antes da implementação do sistema de acionamento elétrico na retroescavadeira, é necessário realizar uma montagem que possa validar as estratégias de hibridização. Nesse sentido, foi realizado o projeto 3D de uma bancada protótipo, que tem como objetivo implementar e depurar os aspectos de hibridização e o gerenciamento de energia. Além do sistema de acionamento elétrico, a bancada contará com sistemas de arrefecimento e com outro conjunto inversor/motor para emular o comportamento do motor a combustão da retroescavadeira atuando os seus implementos.

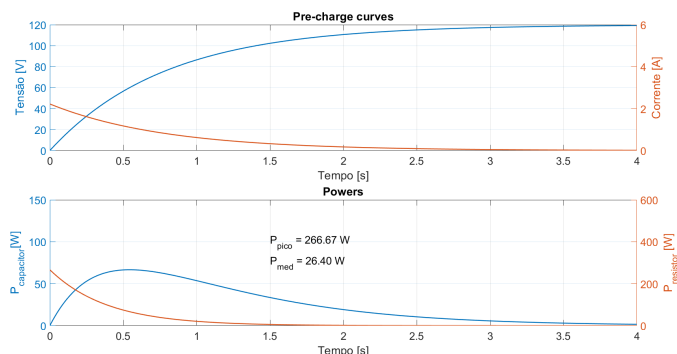


Figura 18. Simulação da pré-carga do emDrive 500 com dois resistores de 27 Ω durante 4 segundos.

Para realizar a comunicação entre os controladores do sistema e componentes como o inversor, IMD e BMS, será utilizado o protocolo CANOpen (CAN in Automation, 2022) por meio de cabos de comunicação blindados e com par trançado para diminuir problemas de interferência eletromagnética.

Na Figura 19 é apresentado o projeto 3D da bancada que será implementado como um protótipo para validar a metodologia de hibridização da retroescavadeira. A Tabela 5 destaca os principais componentes que compõem a bancada protótipo.

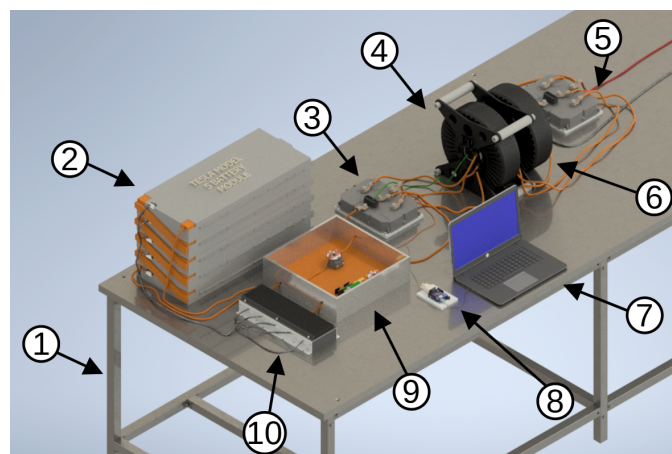


Figura 19. Projeto 3D da bancada de acionamento elétrico para hibridização da retroescavadeira.

Tabela 5. Componentes da bancada do acionamento elétrico.

Número	Componente
1	Estrutura da Bancada
2	Baterias
3	Inversor do Motor 1: emDrive 500
4	Motor 1: EMRAX 228 LV
5	Inversor do Motor 2: emDrive 500
6	Motor 1: EMRAX 228 LV (Emulando motor a combustão)
7	Computador para monitoramento de dados
8	Controlador (comunicação CAN)
9	Unidade de Distribuição de Alta Tensão (contém os contadores, fusíveis e resistores)
10	BMS Externo

6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir deste trabalho, é possível observar os detalhes da especificação do sistema de acionamento elétrico para uma retroescavadeira. Os detalhes técnicos, em alguns casos, devem ser adaptados para reduzir custos e o volume total da aplicação, de forma a tornar o projeto mais atrativo comercialmente.

Os próximos trabalhos consistem na apresentação dos resultados da bancada protótipo em operação, validando a metodologia de hibridização proposta e, após essa etapa, a inserção de todo o sistema de eletrificação na retroescavadeira e a coleta de resultados da redução de consumo.

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

- Adler Electric (2018). AE5 EV Fuse. <https://tinyurl.com/bancada6>.
- Adler Electric (2022). AE2 EV Fuse. <https://tinyurl.com/bancada4>.
- Bender (2022). ISOMETER iso165C, iso165C-1. <https://tinyurl.com/bancada8>.
- CAN in Automation (2022). CANopen – The standardized embedded network. <https://www.can-cia.org/canopen/>.
- Coroflex (2022). COROFLEX 180HV. <https://tinyurl.com/bancada10>.
- Deloitte Insights (2020). Electric vehicles - Setting a course for 2030. <https://tinyurl.com/bancada2>.
- Dong, J., Huang, Y., Jin, L., and Lin, H. (2016). Comparative study of surface-mounted and interior permanent-magnet motors for high-speed applications. *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 26(4), 1–4.
- Economic Commission for Europe of the United Nations (2011). Regulation No 100 of the Economic Commission for Europe of the United Nations (UN/ECE) — Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train. <https://tinyurl.com/bancada11>.
- El País - Brasil (2022). Europa propõe para 2035 o fim da venda de carros a combustão. <https://tinyurl.com/Bancada1>.
- EMRAX Innovative E-Motors (2022). EMRAX 228. <http://emrax.com/e-motors/emrax-228/>.
- Emsiso (2022). emDrive 500. <https://www.emdrive-mobility.com/portfolio/emdrive-500/>.
- EV West (2022). Tesla Model S Lithium Ion Battery 18650 EV Module. <https://tinyurl.com/bancada15>.
- Hayes, J.G. and Goodarzi, G.A. (2018). *Electric powertrain: energy systems, power electronics and drives for hybrid, electric and fuel cell vehicles*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- He, T., Zhu, Z., Eastham, F., Wang, Y., Bin, W., Wu, D., Gong, L., and Chen, J. (2022). Permanent magnet machines for high-speed applications. *World Electr. Veh. J.*, 13(1), 18.
- International Electrotechnical Commission - IEC (2014). IEC 61557-8:2014 - Electrical safety in low voltage distribution systems up to 1 000 V a.c. and 1 500 V d.c. - Equipment for testing, measuring or monitoring of protective measures - Part 8: Insulation monitoring devices for IT systems.
- International Organization for Standardization - ISO (2011). ISO 6722-1 - Road vehicles – 60 V and 600 V single-core cables – Part 1: Dimensions, test methods and requirements for copper conductor cables.
- International Organization for Standardization - ISO (2012). ISO 8820-8:2012: Road vehicles — Fuse-links — Part 8: Fuse-links with bolt-in contacts (Type H and J) with rated voltage of 450 V.
- Littelfuse (2022a). DCNEV250-M - DCNEV250 Series. <https://tinyurl.com/bancada5>.
- Littelfuse (2022b). DCNSEV30-B - DCNSEV30 Series. <https://tinyurl.com/bancada3>.
- M. Kagoshima and T. Sora and M. Komiyama (2009). US Patent 7525206B2.
- Mendes, F. (2019). *Eletrificação de Máquinas Pesadas Fora de Estrada Baseada no Acionamento Elétrico dos Atuadores e Armazenadores de Energia de Baixa Capacidade*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- Mohan, N., Undeland, T.M., and Robbins, W.P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Orion BMS (2022). Orion BMS 2. <https://tinyurl.com/bancada12>.
- Reimers, J., Dorn-Gomba, L., Mak, C., and Emadi, A. (2019). Automotive traction inverters: Current status and future trends. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 68(4), 3337–3350. doi:10.1109/TVT.2019.2897899.
- Semikron (2015). *Application Manual Power Semiconductors 2nd Edition*. <https://tinyurl.com/bancada14>.
- Sitapati, K. and Krishnan, R. (2001). Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 37(5), 1219–1226.
- Somà, A. (2017). Trends and hybridization factor for heavy-duty working vehicles. *Hybrid Electric Vehicles - Intech*, 3–32.
- TE Connectivity (2022). HSA5027RJ Datasheet. <https://www.te.com/usa-en/product-3-1625984-9.html>.
- TESLA (2013). Tech Note: HVIL Diagnostic Guide. <https://tinyurl.com/bancada9>.
- Wang, H., Wang, Q., and Hu, B. (2017). A review of developments in energy storage systems for hybrid excavators. *Autom. Constr.*, 80, 1–10.
- Wang, J., Yang, Z., Liu, S., Zhang, Q., and Han, Y. (2016). A comprehensive overview of hybrid construction machinery. *Adv. Mech. Eng.*, 8(3), 1–15.