

460 – TRANSPORTE ELÉTRICO COLETIVO HIDROVIÁRIO: PROJETO DE UMA ESTAÇÃO DE RECARGA FOTOVOLTAICA PARA BARCO ELÉTRICO DE PASSAGEIROS

Felipe Oliveira Barino ⁽¹⁾

Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Mestre em Engenharia Elétrica pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFJF (PPEE/UFJF). Doutorando em Engenharia Elétrica no PPEE/UFJF. Professor Substituto do Departamento de Circuitos da Universidade Federal de Juiz de Fora.

Mathaus Ferreira da Silva ⁽¹⁾

Engenheiro de Controle e Automação pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Mestre em Engenharia Elétrica pelo PPEE/UFJF. Doutor em Engenharia Elétrica pelo PPEE/UFJF. CEO da startup Robotitech.

Vinicius Ferreira Vidal ⁽¹⁾

Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia da UFJF. Mestre em Engenharia Elétrica pelo PPEE/UFJF. Doutorando em Engenharia Elétrica no PPEE/UFJF.

Matheus Sales Coelho Venerando ⁽²⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Ceará. Engenheiro Mecânico pela Universidade de Fortaleza e pelo Instituto Superior de Engenharia do Porto. Analista de Gestão de Projetos na EDP Brasil.

Leonardo de Mello Honório ⁽¹⁾

Engenheiro Eletricista pela Faculdade de Engenharia da UFJF. Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Doutor em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. Professor do Departamento de Energia da UFJF.

Endereço⁽¹⁾: Faculdade de Engenharia, Campus Universitário, Rua José Lourenço Kelmer, s/n, São Pedro, Juiz de Fora - MG, Brasil, 36036-900. e-mail: felipe.barino@engenharia.ufjf.br

Endereço⁽²⁾: EDP Brasil, Rua Werner Von Siemens, 111, Prédio 22, Bloco A, Lapa de Baixo, São Paulo – SP, Brasil, 05069-900.

RESUMO

Redução das emissões de carbono está entre um dos maiores desafios dos dias atuais. Avanços recentes na área de eletrônica de potência e baterias possibilitaram o surgimento de veículos elétricos como uma solução para a redução da emissão de carbono e transição por meios de transporte mais limpos. Neste trabalho, descreve-se o projeto de uma estação solar de carga para um barco de passageiros elétrico. Este estudo de caso foi conduzido na região norte do Brasil, visando o transporte dos trabalhadores de uma usina hidroelétrica. O transporte hidroviário, nesta região desempenha um papel importante no deslocamento diário dos seus cidadãos e, nos dias atuais, vem sendo desempenhado majoritariamente por barcos a combustão interna. Neste trabalho demonstra-se que a eletrificação de um barco e posterior recarga por meio de energia solar tem grande impacto ambiental, mas também econômico.

PALAVRAS-CHAVE: Veículo elétrico, carregamento solar, hidrovia.

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento dos veículos a combustão interna (ICEVs, do inglês internal combustion engine vehicles) foi um grande marco tecnológico, mas a crescente frota de tais veículos vem criando sérios impactos ambientais. Tais impactos já são de conhecimento geral e já refletem no comportamento dos consumidores. Em [1] os autores demonstram que nas vinte maiores cidades chinesas, há uma alta correlação entre poluição do ar e vendas de veículos elétricos. De fato, pesquisadores apontam os veículos elétricos (EVs, do inglês electric vehicles) como uma forma de mitigar os impactos ambientais dos transportes [2].

Os veículos elétricos atuais são, em geral, mais econômicos e eficientes em termos de consumo de combustível que os veículos a combustão interna [3]. Portanto, além do positivo impacto ambiental, há também um fator

econômico em sua adoção. Por isso, pesquisadores defendem que a eletrificação deve ocorrer quando tecnicamente possível [4].

No Brasil, o setor de transportes é um dos que mais contribui para a emissão de carbono e o setor energético conta com mais de 70% de energia renovável. Além do mais, há um enorme potencial para energia solar, ainda não explorado [5]. Dessa forma, os benefícios da eletrificação dos transportes no Brasil são claros. Simulações apresentadas em [6] demonstram que a eletrificação dos táxis brasileiros reduz a emissão de carbono e apontam a eletrificação dos modais de transporte coletivo/compartilhado como um bom ponto de partida para eletrificação da frota nacional.

Em algumas regiões do Brasil, o paradigma de transporte é diferente dos grandes centros. Na região Norte, por exemplo, o transporte hidroviário é de extrema relevância. Além do mais, a região é beneficiada com um enorme potencial fotovoltaico, com irradiação solar em plano inclinado variando de 4250 a 5500 Wh/m²dia [7], veja a Figura 1. Logo, o desenvolvimento de um transporte hidroviário coletivo, elétrico com recarga solar é uma alternativa extremamente interessante para esta realidade.

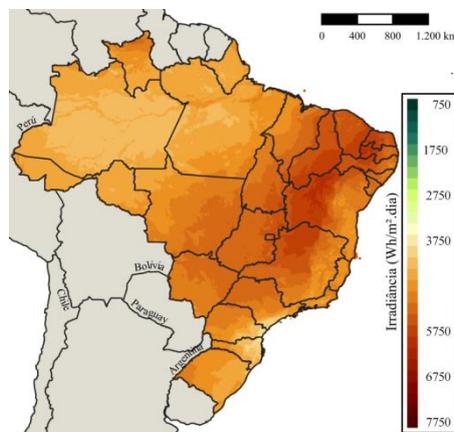


Figura 1: Irradiação solar em plano inclinado [7].

O transporte aquático a propulsão elétrica não é uma tecnologia nova, mas tem sido aprimorada e difundida ao longo das últimas décadas. Segundo [8], os avanços em navios híbridos também podem ser creditados a novas tecnologias em eletrônica de potência. E, ainda mais recentemente, as novas tecnologias de baterias proporcionaram o surgimento de navios híbridos plugados (PHV, do inglês plug-in hybrid), que dispensam o uso de um gerador a combustão interna [9]. Fato marcante, pois um sistema 100% elétrico é responsável por menor custo de manutenção, menor poluição do ar e sonora, além de promover melhor escalabilidade e resiliência, devido à natureza modular deste sistema [10].

Com base nas vantagens de um sistema de motorização elétrica e na viabilidade técnica da eletrificação de um barco de passageiros, este trabalho apresenta o projeto de um barco de passageiros elétrico e uma estação de recarga para o veículo. O barco em si foi projetado para o transporte dos funcionários de uma usina hidrelétrica localizada no Rio Teles Pires, na divisa entre Mato Grosso e Pará. Atualmente, este transporte é realizado por um barco a diesel e propomos sua substituição por um barco elétrico, com recarga solar. Dessa forma, o objetivo deste trabalho é apresentar o projeto do barco elétrico, desenvolvido especificamente para esta aplicação, e de sua estação de recarga.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram traçados os requisitos de projeto a partir do número de tripulantes, peso do sistema de eletrificação (motores, baterias e conversores), logística de carregamento e tempo de percurso. A motorização foi dimensionada com base nas características do casco. As baterias da embarcação foram dimensionadas a partir do tempo de trajeto e, da capacidade de carga delas, pôde-se projetar a estação de recarga fotovoltaica.

Os requisitos gerais levantados foram: duas viagens ao dia, totalizando 160 km (40 km/trajeto); uma única estação de recarga (autonomia mínima de 80 km); capacidade para 21 tripulantes; capacidade de carga total de cinco toneladas; e casco do tipo deslocamento com comprimento de 8 a 10 metros.

O barco foi projetado a partir de um casco comercial, pronto para motorização à combustão, mas adaptado para o sistema elétrico. O sistema de eletrificação utilizado foi fornecido pela Torqueedo [11] e está esquematizado na Figura 2. A numeração desta figura representa, respectivamente: o terminal de conexão BUS, bateria, conexão CAN, controlador de carga, interface TQ-CAN, terminal de conexão BUS, cabo TQ-BUS, controle de aceleração TQ-BUS, motor, chave de potência principal e chave de liga/desliga.

A estação de recarga fotovoltaica foi desenvolvida ao redor de um container, com painéis solares, inversores, carregador, e gerador a diesel para backup. Para dimensionamento da estação de recarga, considerou-se as variáveis ambientais irradiância e temperatura do local de implementação, além das características de nove painéis solares comerciais. Escolheu-se o arranjo mais favorável economicamente. Com relação ao custo total da estação, considerou-se a estimativa apresentada em [12], que aponta que o custo total de uma estação de recarga é o dobro do custo de aquisição das placas solares.

A carga diária necessária para carregar n_{cargas} vezes um total de N_{bat} baterias, cada uma com carga C é:

$$L_{dia} = N_{bat} \cdot C \cdot n_{cargas} \quad (1)$$

e foi utilizada para o dimensionamento do arranjo fotovoltaico.

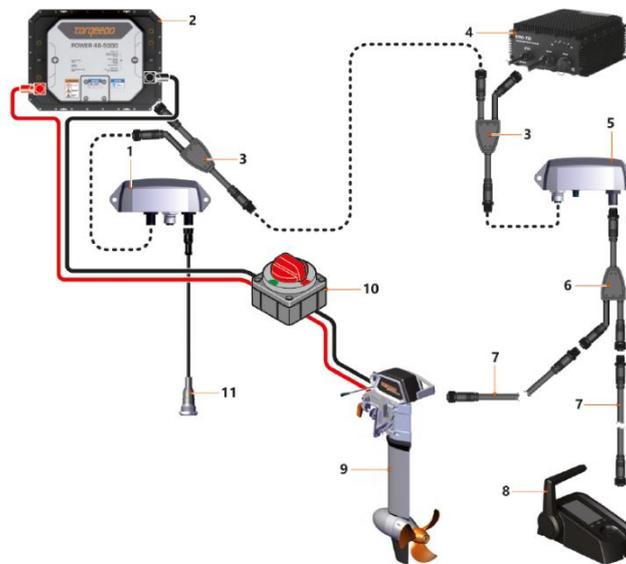


Figura 2: Esquema de motorização elétrica fornecido pela Torqueedo.

Para correto dimensionamento do arranjo fotovoltaico, considerou-se os efeitos das variáveis ambientais em um painel solar. Isto é, a variação da curva característica de corrente/tensão do painel. A Figura 3 mostra os efeitos da variação de temperatura e irradiância em uma curva corrente/tensão de um painel genérico e, consequentemente, como estas variáveis afetam a potência de saída.

Foram utilizados dados ambientais, temperatura e irradiância, para estimar a potência de saída de diversos painéis fotovoltaicos comerciais. Cada modelo foi simulado conforme as especificações do fabricante segundo os modelos apresentados na Figura 4, com os valores calculados por:

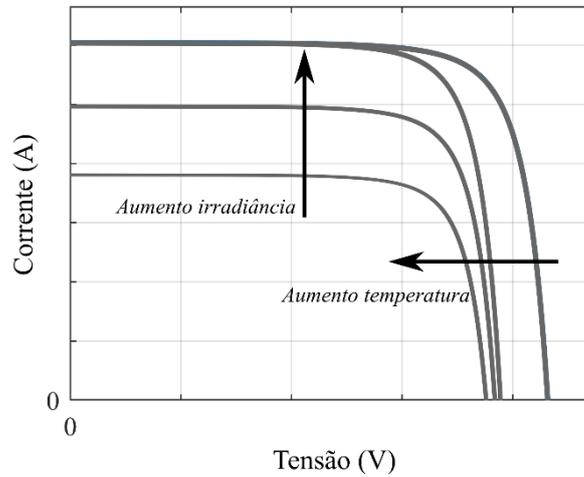


Figura 3: Efeitos ambientais na curva de tensão/corrente de uma célula fotovoltaica

$$R_s = \frac{V_{OC} - V_{mp}}{I_{mp}} \quad (2)$$

$$R_p = \frac{V_{OC}}{I_{SC} - I_{mp}} \quad (3)$$

onde V_{OC} é a tensão de circuito aberto, I_{SC} é a corrente de curto-circuito, V_{mp} e I_{mp} são, respectivamente, a tensão e corrente de máxima potência. Ao passo que as variações na tensão e corrente com relação às variáveis ambientais são dadas por:

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{G_t}{G_{tref}} \right) \Delta T + \left(\frac{G_t}{G_{tref}} - 1 \right) I_{SC} \quad (4)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - R_s \Delta I \quad (5)$$

onde G_t é a radiação incidente, com o subscrito *ref* indicando o valor de referência, α e β são coeficientes de variação da corrente e tensão com relação à temperatura, respectivamente. Estas foram utilizadas para corrigir os valores de tensão de circuito aberto, corrente de circuito fechado, tensão e corrente de máxima potência, que são utilizados para modelar a curva de tensão/corrente por:

$$I = I_{SC} \left(1 - C_3 (e^{C_4 V^m} - 1) \right) \quad (6)$$

onde, $C_3 = 0,01175$, $m = \frac{\ln(C_5/C_6)}{\ln\left(\frac{V_{mp}}{V_{OC}}\right)}$, $C_4 = \frac{C_6}{V_{OC}^m}$, $C_5 = \ln\left(\frac{I_{SC}(1+C_3) - I_{mp}}{C_3 I_{SC}}\right)$, e $C_6 = \ln\left(\frac{1+C_3}{C_3}\right)$.

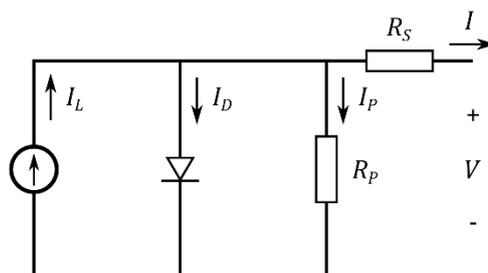


Figura 4: Circuito equivalente de uma célula fotovoltaica.

RESULTADOS DO PROJETO DA ESTAÇÃO

Adotou-se o modelo de casco Charger 900EL, fabricado por Marine Boats, com comprimento de linha d'água de 9 metros, acarretando em uma velocidade máxima teórica de 13,48 km/h e uma potência de 20 hp para carga de 5 toneladas. O equivalente elétrico obtido foi um motor Cruise 10.0 RS TorqLink de 10 kW e um banco de baterias de 132,50 kWh montado a partir de baterias C15-14SYL fornecidas pela BYD. Esta capacidade de carga é suficiente para percorrer 125 km em velocidade de cruzeiro. As dez unidades de bateria que compõe tal banco ocupam 0,74 m³, pesam 970 kg e podem ser instaladas em baixo do banco dos passageiros.

A partir de valores de irradiância média mensal e temperatura ambiente, estimou-se a geração fotovoltaica de diversos modelos de painéis comerciais, como pode ser visto na Figura 5. Determinou-se que o modelo Sunergy SUN340 72P apresenta uma opção mais econômica, com pelo menos 105 painéis para atender à demanda de duas pernas do trajeto (80 km) por dia, conforme ilustra a Figura 6. Estabeleceu-se este número considerando o mês de Março, quando se estimou a menor média diária de geração fotovoltaica na região do estudo.

O custo de implementação da estação de recarga fotovoltaica é estimado em aproximadamente R\$ 162000,00, considerando que a aquisição dos painéis é de aproximadamente R\$ 81000,00 (conforme levantado feito de Janeiro a Abril de 2021) e que o custo total de uma estação de recarga é geralmente o dobro do custo de aquisição das placas solares [12].

O custo da estação de recarga foi comparado com o custo do uso de combustível fóssil, a fim de se estimar o tempo de pagamento do investimento inicial. Consideraram-se apenas os custos operacionais, ou seja, de aquisição de combustíveis e da estação de recarga, note que a manutenção de veículos elétricos tende a ser mais simples e barata ao longo do tempo. Logo esta proposição tende a beneficiar o modelo à combustão.

Considerou-se o valor do combustível fixo no valor mínimo do primeiro semestre de 2022, segundo dados da ANP para a cidade de Alta Floresta, MT, (R\$ 6,88) [13]. Com relação ao modelo à combustão, considerou-se o consumo de um motor a combustão Suzuki 20hp como 4,5 L/h, gerando um custo mensal de R\$ 14861,00. Ou seja, a estação de recarga equivale a menos de um ano de combustível. Evidenciando a vantagem econômica do barco eletrificado ao longo dos anos.

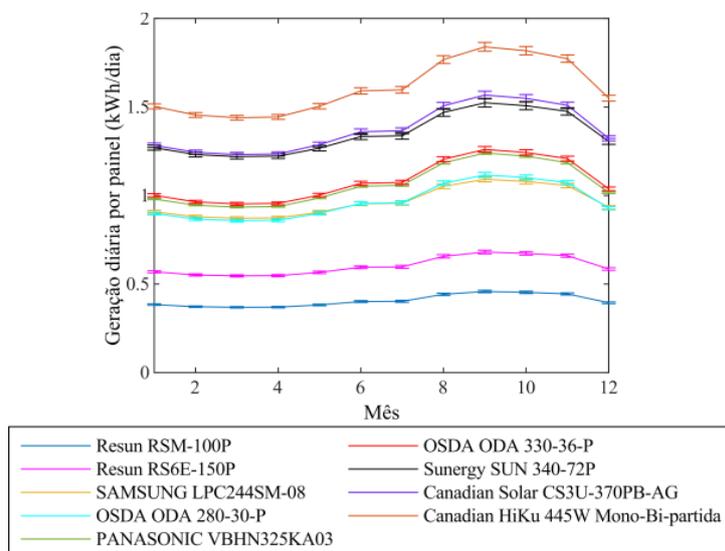


Figura 5: Geração diária média para cada painel analisado.

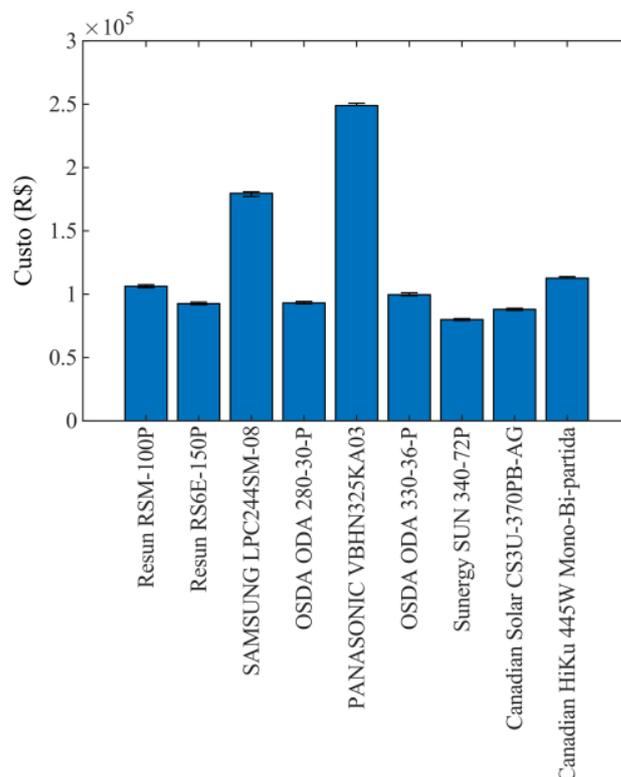


Figura 6: Custo de aquisição dos painéis

CONCLUSÕES

A eletrificação dos meios de transporte está alinhada com a busca por alternativas limpas, sustentáveis e eficientes em gasto energético. Os avanços observados no ramo de eletrônica de potência vêm favorecendo o desenvolvimento de veículos elétricos e colocando estes veículos como uma alternativa para mitigação da emissão de gases que contribuem com o aquecimento global. Neste contexto, soluções elétricas, principalmente locais e de transporte coletivo, necessitam ser adaptadas à realidade da região de implementação. Regiões de alta incidência solar podem ser favorecidas com recarga fotovoltaica, por exemplo.

Neste contexto, apresentou-se o projeto de um barco elétrico de passageiros para o transporte dos funcionários de uma usina hidrelétrica. Demonstrou-se o dimensionamento do casco, motorização, banco de baterias e estação de recarga. Apesar do alto investimento na implementação deste tipo de solução, demonstramos que o custo operacional apenas de combustível é capaz de pagar o investimento na estação de recarga em um tempo muito curto. Isto demonstra que, a eletrificação de modais de transporte é um passo importante em direção ao transporte mais eficiente energeticamente e com grandes vantagens econômicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GUO, J. et al. Does air pollution stimulate electric vehicle sales? Empirical evidence from twenty major cities in China. **Journal of Cleaner Production**, v. 249, p. 119372, mar. 2020.
- [2] EBRAHIMI KAMBIZ M.; EHSANI, M. G. Y. L. S. **Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles**. Third edit ed. [s.l.] CRC Press, 2018.
- [3] POULLIKKAS, A. Sustainable options for electric vehicle technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 41, p. 1277–1287, jan. 2015.
- [4] DOMINKOVIĆ, D. F. et al. The future of transportation in sustainable energy systems: Opportunities and barriers in a clean energy transition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1823–1838, fev. 2018.

- [5] DE SOUZA LIMA, G. C. L.; DA SILVA, G. L. R.; NETO, G. DOS S. A. Mobilidade elétrica: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP-Ano**, v. 41, p. 2º, 2019.
- [6] TEIXEIRA, A. C. R.; SODRÉ, J. R. Simulation of the impacts on carbon dioxide emissions from replacement of a conventional Brazilian taxi fleet by electric vehicles. **Energy**, v. 115, p. 1617–1622, nov. 2016.
- [7] PEREIRA, E. et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. [s.l.] Universidade Federal de São Paulo, 2017.
- [8] MCCOY, T. J. **Trends in ship electric propulsion**. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Anais...IEEE, 2002Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1043247/>>
- [9] HANSEN, J. F.; WENDT, F. History and State of the Art in Commercial Electric Ship Propulsion, Integrated Power Systems, and Future Trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 103, n. 12, p. 2229–2242, dez. 2015.
- [10] REDDY, N. P. et al. Zero-Emission Autonomous Ferries for Urban Water Transport: Cheaper, Cleaner Alternative to Bridges and Manned Vessels. **IEEE Electrification Magazine**, v. 7, n. 4, p. 32–45, dez. 2019.
- [11] **Torqueedo**. Disponível em: <<https://www.torqueedo.com/en>>. Acesso em: 15 jun. 2021.
- [12] YE, B. et al. Feasibility Study of a Solar-Powered Electric Vehicle Charging Station Model. **Energies**, v. 8, n. 11, p. 13265–13283, 23 nov. 2015.
- [13] ANP. **Série Histórica de Preços de Combustíveis**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/serie-historica-de-precos-de-combustiveis>>. Acesso em: 18 nov. 2022.