

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO COM BESS PARA HOSPITAL FLUTUANTE NA AMAZÔNIA

OLIVEIRA, Ana Cristina Marques ¹. SILVA, Romário ¹. LIMA, Marcilon Fonseca de¹.
MEDEIROS, Antônio Marcos de Melo¹. FERREIRA, Bruno Fagundes¹

Escola Politécnica e de Artes
Pontifícia Universidade Católica de Goiás ¹
Goiânia - GO – Brasil

RESUMO: A transição energética e a dependência do diesel em sistemas isolados brasileiros comprometem o suprimento elétrico de comunidades remotas. Nesse cenário, a integração de sistemas fotovoltaicos com armazenamento (BESS) apresenta-se como uma alternativa técnica viável, aproveitando a alta incidência solar e a modularidade tecnológica para garantir energia limpa e contínua. O presente trabalho apresenta o dimensionamento de um sistema híbrido de geração de energia elétrica aplicado a um hospital flutuante destinado ao atendimento de comunidades ribeirinhas da região amazônica. O sistema integra geração solar fotovoltaica *off-grid*, armazenamento de energia por baterias (BESS) e grupo gerador auxiliar a diesel, visando garantir autonomia energética, confiabilidade operacional e redução do consumo de combustíveis fósseis em áreas isoladas. A metodologia fundamenta-se no levantamento e classificação das cargas hospitalares por nível de prioridade, considerando equipamentos médicos, climatização, iluminação e sistemas de comunicação. Para o armazenamento, adotaram-se baterias de fosfato de ferro-lítio (LiFePO₄), devido à elevada vida útil e profundidade de descarga de até 90%. O projeto contemplou um inversor híbrido, dispositivos de proteção elétrica e integração com tecnologias de Internet das Coisas (IoT) para monitoramento remoto e gestão inteligente das cargas críticas. Os resultados indicaram que o sistema fotovoltaico projetado foi capaz de suprir integralmente a demanda energética diária do hospital em condições normais de operação, proporcionando maior autonomia e significativa redução do uso do gerador a diesel. Além disso, a configuração híbrida contribui para a redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e aumento da eficiência energética.

Palavras chaves: Energia Solar; BESS; Baterias LiFePO₄; Hospital Flutuante; Monitoramento IoT.

ABSTRACT: The global energy transition and Brazil's reliance on diesel-powered isolated systems jeopardize electricity supplies in remote communities. In this context, the integration of photovoltaic systems with battery energy storage systems (BESS) emerges as a viable, sustainable technical alternative. It leverages high levels of solar irradiance and technological modularity to ensure a clean and continuous power supply. This work presents the design of a hybrid power generation system applied to a floating hospital intended to serve riverside communities in the Amazon region. The system integrates off-grid photovoltaic solar generation, battery energy storage systems (BESS), and an auxiliary diesel generator, aiming to ensure energy autonomy, operational reliability, and reduced fossil fuel consumption in isolated areas. The methodology is based on the survey and classification of hospital loads according to priority levels, considering medical equipment, air conditioning, lighting, and communication systems. For energy storage, lithium iron phosphate (LiFePO₄) batteries were adopted due to their long service life and depth of discharge of up to 90%. The project also includes a hybrid inverter, electrical protection devices, and integration with Internet of Things (IoT)

technologies for remote monitoring and intelligent management of critical loads. The results indicate that the proposed photovoltaic system is capable of fully supplying the hospital's daily energy demand under normal operating conditions, providing greater autonomy and significant reduction in diesel generator usage. Furthermore, the hybrid configuration contributes to reducing carbon dioxide (CO₂) emissions and increasing energy efficiency, demonstrating the technical and sustainable feasibility of the proposed application.

Keywords: Solar Energy; BESS; LiFePO₄ Batteries; Floating Hospital; IoT Monitoring.

I. INTRODUÇÃO

O cenário energético global atravessa um período de transição impulsionado pela redução da disponibilidade de recursos fósseis e pela crescente demanda por fontes de energia sustentáveis. No Brasil, o óleo diesel ainda possui participação relevante na matriz energética, sendo amplamente utilizado na geração de energia elétrica em sistemas isolados, especialmente em regiões remotas como a Amazônia [1], [2].

Nessas localidades, a limitação da infraestrutura elétrica resulta em instabilidades no fornecimento de energia, o que representa um desafio crítico para unidades de saúde, onde a continuidade do suprimento energético é indispensável para o funcionamento de equipamentos médicos e conservação de insumos essenciais [3], [4]. Neste contexto, a geração fotovoltaica associada a sistemas de armazenamento em baterias (Battery Energy Storage Systems – BESS), que armazenam energia para utilização em períodos sem geração solar, apresenta-se como uma alternativa tecnicamente viável, devido à sua modularidade, baixa manutenção e elevada disponibilidade do recurso solar no território brasileiro [5], [6].

Em aplicações reais, destaca-se o Barco Hospital Papa Francisco (BHPF), projetado para atendimento médico às populações ribeirinhas, cuja infraestrutura energética é baseada predominantemente em grupos geradores a diesel, operando com critérios de redundância para garantir a continuidade do fornecimento [1]. Embora essa abordagem assegure confiabilidade, ela mantém elevada dependência de combustíveis fósseis e limita a eficiência energética do sistema [1].

Além disso, estudos na área de energia fotovoltaica no Brasil concentram-se majoritariamente em aplicações terrestres convencionais e microrredes fixas [2], [3], havendo uma lacuna na literatura científica quanto à integração de sistemas fotovoltaicos

com armazenamento de energia (BESS) em ambientes embarcados de alta complexidade, como unidades de saúde flutuantes. Diferente de estudos voltados apenas para a geração solar isolada, esta proposta diferencia-se ao projetar um sistema híbrido que associa baterias de LiFePO_4 e geradores auxiliares a uma arquitetura de monitoramento e gestão inteligente baseada em Internet das Coisas (IoT) [4], [5]. Essa abordagem visa garantir a segurança de cargas hospitalares críticas sob condições de mobilidade e isolamento geográfico, otimizando o consumo energético em um cenário onde a infraestrutura terrestre é inexistente.

Diante desse cenário, este trabalho propõe o dimensionamento de um sistema híbrido utilizando uma usina fotovoltaica *off-grid* e geradores a diesel com armazenamento em baterias (BESS) aplicado a um hospital flutuante, integrando uma arquitetura baseada em Internet das Coisas (IoT). Essa abordagem possibilita o monitoramento remoto dos sistemas elétricos e mecânicos [8], [9], além da implementação de soluções de telemedicina em tempo real, permitindo suporte especializado à equipe embarcada.

Dessa forma, o projeto diferencia-se do modelo de referência ao promover maior eficiência energética, redução do consumo de combustível [5], [12], e ampliação da capacidade de atendimento médico em regiões remotas, sem comprometer os requisitos de segurança e navegabilidade. O objetivo central é apresentar o dimensionamento técnico do sistema híbrido proposto, considerando as cargas hospitalares críticas e a integração da arquitetura IoT para gestão inteligente.

Na Seção II, descreve-se a metodologia de dimensionamento adotada. Na Seção III, apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos. Por fim, na Seção IV, são apresentadas as conclusões do trabalho.

II. METODOLOGIA

II.1 Caracterização do Hospital Flutuante

O hospital flutuante proposto neste trabalho foi desenvolvido para atendimento médico às populações ribeirinhas da região amazônica, em áreas com dificuldade de acesso à rede elétrica convencional. A embarcação foi baseada em hospitais fluviais reais da Amazônia, com destaque para o Barco Hospital Papa Francisco, sendo adaptada para

fins acadêmicos e integrada a tecnologias de geração distribuída e monitoramento inteligente [9].

O projeto consiste em uma embarcação energeticamente autônoma, equipada com um sistema híbrido de geração elétrica composto por módulos fotovoltaicos, banco de baterias LiFePO_4 e gerador a diesel auxiliar [1], [6]. O sistema foi desenvolvido para garantir continuidade no fornecimento de energia, maior confiabilidade operacional e redução do consumo de combustíveis fósseis [1], [7].

A embarcação possui 32 metros de comprimento e 8 metros de largura, distribuída em dois pavimentos. A sua estrutura contempla consultórios médicos, sala de vacinação, centro cirúrgico de pequeno porte, leitos de observação, sistemas de refrigeração de medicamentos, climatização e setores administrativos.

O sistema elétrico foi projetado para operação contínua em regime de 24 horas, priorizando cargas essenciais, como equipamentos médicos, iluminação, climatização e sistemas de comunicação [10]. A geração principal é realizada por um sistema fotovoltaico *off-grid* instalado na cobertura da embarcação, integrado a um sistema de armazenamento de energia por baterias (BESS), responsável pelo suprimento energético em períodos sem geração solar [3], [6].

Como forma de garantir segurança operacional, o projeto inclui um grupo gerador a diesel operando como fonte auxiliar de emergência [7]. Além disso, foi incorporada uma arquitetura baseada em Internet das Coisas (IoT), destinada ao monitoramento remoto de variáveis elétricas e operacionais, permitindo maior eficiência energética, manutenção preditiva e gerenciamento inteligente do sistema [15], [16].

Dessa forma, o hospital flutuante proposto apresenta-se como uma solução sustentável e tecnologicamente viável para ampliação do atendimento médico em comunidades isoladas da Amazônia.

No Quadro 1 encontram-se as características técnicas do barco.

Quadro 1 – Distribuição de cargas e eficiência energética do hospital flutuante

Parâmetro	Especificação
Comprimento	32 m
Largura	8 m

Parâmetro	Especificação
Pavimentos	2
Capacidade de atendimento	80 pacientes/dia
Número de leitos	8
Consultórios médicos	2
Centro cirúrgico	1
Sala de vacinação	1
Sistema energético	Solar + BESS + Diesel
Tipo de bateria	LiFePO ₄
Operação	24 h

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A partir das especificações técnicas apresentadas na Figura 1, a organização espacial da embarcação foi projetada com base em uma lógica de setorização funcional. O objetivo é otimizar o fluxo de atendimento hospitalar, garantir maior eficiência operacional e aumentar a segurança da embarcação, promovendo o isolamento entre as áreas técnicas como o compartimento do gerador a diesel localizado na popa e as áreas clínicas destinadas ao atendimento médico.

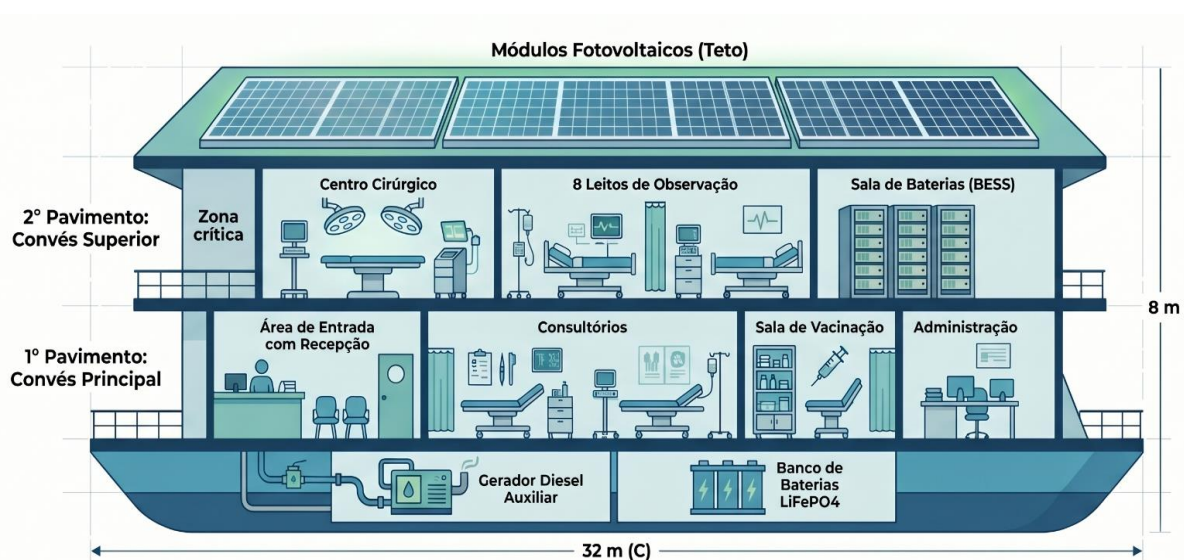


Figura 1. Diagrama organizacional e do hospital flutuante (32m x 8m). Fonte: Elaborado pela autora (2026).

O primeiro pavimento concentra o atendimento de alto fluxo, incluindo a recepção, consultórios e sala de vacinação. Já o segundo pavimento é destinado a procedimentos de maior complexidade e internação, abrigando o centro cirúrgico e os leitos de observação, além da sala de baterias (BESS) para otimização do centro de gravidade e cabeamento elétrico. Na cobertura, está instalada a usina fotovoltaica *off-grid*, dimensionada para aproveitar a área útil total de forma a maximizar a captação solar.

II.II Levantamento de Cargas e Estimativa de Consumo

O levantamento das cargas elétricas do hospital flutuante foi realizado considerando a operação contínua de 24 horas, característica essencial para o atendimento em regiões remotas da Amazônia sem acesso à rede elétrica convencional.

As cargas elétricas da embarcação foram classificadas conforme o nível de prioridade operacional, visando otimizar a gestão energética do banco de baterias LiFePO₄. As cargas críticas (Nível 1) incluem equipamentos indispensáveis à vida e à operação hospitalar, como refrigeração de vacinas, equipamentos cirúrgicos, monitores de sinais vitais e o sistema de climatização em áreas clínicas [1]. Embora a climatização seja frequentemente associada ao conforto, neste projeto ela é tratada como carga crítica em setores como o centro cirúrgico e a sala de vacinas, onde o controle térmico é indispensável para a segurança dos procedimentos e a integridade de insumos médicos. As cargas prioritárias (Nível 2) abrangem iluminação LED, sistemas de comunicação e infraestrutura IoT [1]. Já as cargas de apoio (Nível 3) correspondem ao sistema de climatização das áreas administrativas e iluminação de áreas comuns.

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico, utilizaram-se dados solarimétricos da região de Cametá, representativa do bioma amazônico, obtidos por meio da plataforma SunData do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito [19]. Considerou-se como condição de projeto o mês de maio, correspondente ao período de menor disponibilidade de radiação solar da região, adotando-se uma abordagem conservadora para garantir maior confiabilidade energética ao sistema. Para esse cenário, foi utilizada uma irradiância média diária de 4,51 kWh/m²·dia, equivalente a 4,51 Horas de Sol Pleno (HSP) [19]. O “maior mínimo mensal” foi adotado como critério para garantir maior confiabilidade energética do sistema. O Quadro 2 apresenta as equações utilizadas no dimensionamento da geração fotovoltaica, do banco de baterias (BESS) e do inversor, com base em Villalva [24] e na literatura técnica especializada [2], [3] e [6].

Quadro 2 - Equações utilizadas no dimensionamento

Equação	Fórmula	Descrição
(1)	$EP = I \cdot A \cdot \eta$	EP energia produzida por módulo fotovoltaico, sendo: I irradiância solar média diária. A área do módulo fotovoltaico. η rendimento do módulo fotovoltaico [24].
(2)	$E_{Preal} = EP \cdot \eta_{global}$	E_{Preal} Energia real produzida considerando perdas do sistema, $\eta_{global} = 0,8$ [2], [3], [24].

(3)	$QMF = \frac{EC}{E_{Preal}}$	QMF Quantidade necessária de módulos fotovoltaicos. EC energia consumida diariamente pela embarcação [24].
(4)	$P_{total} = QMF \cdot P_{módulos}$	P_{total} potência total instalada do sistema. P_{módulos} potência nominal de cada módulo fotovoltaico [24].
(5)	$EA = \frac{EC \cdot N}{\eta_{CC/CA} \cdot DoD \cdot Ee}$	EA Energia armazenada necessária no banco de baterias. N número de dias de autonomia. $\eta_{CC/CA}$ eficiência do sistema CC/CA. DoD profundidade máxima de descarga das baterias. Ee eficiência do inversor [24].
(6)	$P_{inv} = P_{cargas} \cdot 1,25$	P_{inv} Potência nominal do inversor. P_{cargas} potência total das cargas conectadas. 1,25 margem de segurança de 25% do inversor [3], [6], [24].
(7)	$CBB = \frac{EA}{V_{banco}}$	CBB Capacidade do banco de baterias em Ah. V_{banco} tensão nominal do banco de baterias [24].
(8)	$NBP = \frac{CBB}{Capacidade_{unit}}$	NBP Número de baterias em paralelo. Capacidade_{unit} capacidade nominal unitária de cada bateria [24].

Fonte: Adaptado de Villalva [24], ANEEL [2], Rosa e Gasparin [3] e Cunha et al. [6].

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o dimensionamento do sistema fotovoltaico do hospital flutuante, foi realizado o levantamento das cargas elétricas essenciais da unidade de saúde, incluindo iluminação, refrigeração, monitoramento hospitalar, climatização e comunicação. O Quadro 3 apresenta o levantamento das cargas estimado especificamente para o dimensionamento do sistema de alimentação do barco, considerando potência, tempo de uso e consumo energético dos equipamentos utilizados na operação contínua da embarcação hospitalar.

Quadro 3 – Consumo diário estimado do hospital flutuante.

Setor	Equipamento	Qtd	Pot. (W)	Uso (h)	Cons. (Wh)	Prioridade
Áreas comuns	Iluminação LED	15	15	12	2.700	Nível 3
Cirurg.	Iluminação LED	5	30	12	1.800	Nível 1
	Foco/Monitores	1	450	4	1.800	Nível 1
Vacina	Geladeira Med.	1	60	24	1.440	Nível 1
Consult.	Computadores	3	120	8	2.880	Nível 2
Leitos	Monit. Sinais	8	40	24	7.680	Nível 1
Climat.	Ar-cond. Inverter	4	1085	10	43.400	Nível 1
IoT	Serv./Gateway	1	100	24	2.400	Nível 2

Setor	Equipamento	Qtd	Pot. (W)	Uso (h)	Cons. (Wh)	Prioridade
TOTAL			6.645		64.100	

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O sistema de climatização apresentou a maior demanda energética do hospital flutuante devido às elevadas temperaturas da região amazônica. Conforme apresentado no Quadro 3, o consumo diário total estimado foi de 64,1 kWh/dia, valor utilizado como base para o dimensionamento do sistema fotovoltaico e do banco de baterias (BESS).

Para o dimensionamento, adotou-se uma irradiância média diária de 4,51 kWh/m²·dia, equivalente a 4,51 Horas de Sol Pleno (HSP), obtida por meio da plataforma SunData do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) para a região de Cametá-PA [19]. Esse valor foi utilizado como parâmetro de projeto para a estimativa da geração fotovoltaica do sistema. O módulo fotovoltaico selecionado foi o Tiger Neo 565 Wp da Jinko Solar, com potência nominal de 565 W, área de 2,5832 m² e rendimento de 21,87%, conforme especificações técnicas do fabricante [25].

Aplicando a Equação 1 do Quadro 2, a energia diária produzida por módulo fotovoltaico foi estimada em: $E_p = 4,51 \cdot 2,5832 \cdot 0,2187 = 2,5479 \text{ kWh/dia}$.

Considerando Perdas Reais (EP_{Real}): Adotou-se um fator de perda de 20% ($N_{geral} = 0,8$) [2] [3], para considerar sujeira, temperatura e perdas ôhmicas, calculado de acordo com a Equação 2 do Quadro 2: $EP_{Real} = 2,5479 \cdot 0,8 = 2,0383 \text{ kWh/dia por módulo}$.

Aplicando a Equação 3 do Quadro 2, a quantidade Total de Módulos (QMF): Em que o consumo diário (EC) de 64,1 kWh/dia: $QMF = \frac{EC}{EP_{Real}} = \frac{64,1}{2,0383} = 31,44$. Arredondou-se, portanto, para uma Quantidade de 32 Módulos.

Dimensionamento do Banco de Baterias (BESS)

Utilizou-se a bateria de lítio LiFePO₄ Dyness A48100, ideal pela segurança e vida útil (>6000 ciclos) [26]. Capacidade Nominal: 100 Ah. Tensão Nominal (V_{banco}): 48 V. Profundidade de Descarga (DoD): 90% (0,9), valor compatível com baterias de lítio LiFePO₄, que permitem elevada utilização da capacidade armazenada sem comprometer

significativamente a vida útil do sistema. Isso significa que até 90% da energia nominal da bateria pode ser utilizada antes da recarga [26].

No cálculo da Energia Armazenada (EA) para o hospital flutuante, foram aplicados coeficientes de eficiência para compensar as perdas intrínsecas do sistema e garantir maior confiabilidade operacional. O índice $\eta_{CC/CA} = 0,9$ representa a eficiência global do sistema entre o banco de baterias em corrente contínua e as cargas em corrente alternada, considerando perdas na descarga das baterias, cabeamento e conversão de energia [3], [5]. Já o parâmetro $E_e = 0,9$ corresponde à eficiência do inversor, valor normalmente adotado em estudos de dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados para representar inversores de alto desempenho [24]. Considerando 1 dia de autonomia ($N=1$) e eficiências de descarga e inversor, calculado de acordo com a Equação 5 do Quadro 2: $EA = \frac{64.100 \cdot 1}{0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9} = 87.928 \text{ Wh}$.

Capacidade em Ampere-hora CBB (Capacidade do Banco de Baterias). Calculado de acordo com a Equação 7 do Quadro 2: $CBB = \frac{87.928}{48} = 1.832 \text{ Ah}$

Como o sistema opera em 48 Vcc, compatível com o inversor e as baterias selecionadas, optou-se pela ligação em paralelo para aumentar a capacidade de armazenamento sem alterar a tensão do banco. O NBP (Número de Baterias em Paralelo) foi calculado de acordo com a Equação 8 do Quadro 2: $NBP = \frac{1.832}{100} = 18,32$. Dessa forma, foram adotadas 19 baterias LiFePO₄ de 48 V e 100 Ah em paralelo, totalizando aproximadamente 1.900 Ah.

Dimensionamento do Inversor e Dispositivos de Proteção.

O inversor é responsável pela conversão da corrente contínua (CC) dos módulos fotovoltaicos e do banco de baterias em corrente alternada (CA) para alimentação das cargas da embarcação [24]. Para o hospital flutuante, foi selecionado um inversor híbrido *off-grid* da série SPF Growatt, por integrar o controlador MPPT, responsável por maximizar a extração de energia dos módulos fotovoltaicos, além do gerenciamento das baterias e da conexão com o gerador auxiliar, aumentando a confiabilidade do sistema

[24]. Além disso, foram especificados DPS, fusíveis e disjuntores para proteção contra surtos, sobrecorrentes e curtos-circuitos, garantindo maior segurança operacional [24].

Controlador de Carga MPPT Interno: Foi adotado o controlador MPPT integrado ao inversor híbrido Growatt SPF 10000T DVM, selecionado por maximizar o aproveitamento da energia solar por meio do rastreamento contínuo do ponto de máxima potência dos módulos fotovoltaicos. A solução integrada reduz a complexidade da instalação, simplifica o cabeamento e aumenta a confiabilidade operacional do sistema.

Entrada CA para Gerador: Permite a integração automática do grupo gerador a diesel, funcionando como bypass ou suporte para o carregamento das baterias em períodos de baixa irradiância solar prolongada.

O dimensionamento da potência nominal do inversor, P_{inv} , deve garantir o suprimento da demanda máxima simultânea, acrescida de uma margem de segurança para suportar picos de partida de motores elétricos presentes nos sistemas de climatização. Neste trabalho, adotou-se uma margem de 25%, conforme recomendações utilizadas no dimensionamento de sistemas fotovoltaicos isolados, visando aumentar a confiabilidade operacional e evitar sobrecargas no inversor [3], [6]. calculado de acordo com a Equação 6 do Quadro 2: $P_{inv} = 6.645\text{ W} \cdot 1,25 = 8.306,25\text{ W}$.

Consideraram-se as potências comerciais disponíveis e a demanda máxima calculada, adotou-se a utilização de um inversor de 10 kW para operação em barramento de 48 Vcc, que garante uma margem de segurança para picos de carga e maior confiabilidade operacional. Além disso, devido à operação da embarcação na região amazônica, sujeita a elevadas incidências de descargas atmosféricas e surtos elétricos, foram especificados dispositivos de proteção adequados para preservar os equipamentos e assegurar a continuidade do fornecimento de energia.

Proteção contra Surtos (DPS): Foram especificados DPS Classe II nos lados CC e CA do sistema fotovoltaico, conforme recomendado para instalações sujeitas a surtos atmosféricos e de manobra [24]. No lado CC, adotou-se DPS de 600 Vcc, compatível com a tensão máxima do arranjo fotovoltaico e da entrada MPPT do inversor. No lado CA, foi especificado DPS de 175 Vac e capacidade de descarga de 60 kA para proteção da rede interna e dos equipamentos eletrônicos contra surtos transitórios [24].

Proteção contra Sobrecorrente: Os dispositivos de proteção foram especificados com base nas correntes nominais do sistema e nas recomendações para instalações fotovoltaicas [24], incluindo fusíveis gPV, disjuntores CC e CA, além de aterramento e equipotencialização. O Quadro 4 apresenta as especificações técnicas dos principais equipamentos e dispositivos de proteção do sistema fotovoltaico híbrido do hospital flutuante, visando garantir segurança e confiabilidade no fornecimento de energia.

Quadro 4 – Especificações técnicas do sistema fotovoltaico e proteções.

Item	Descrição / Especificação Técnica	Qtd.
Módulos FV	Jinko Solar Tiger Neo 565 Wp (Monocristalino N-type),	32
Baterias	Dyness A48100 LiFePO4 (48V / 100Ah / 4,8kWh),	19
Inversor	Híbrido <i>Off-grid</i> Interativo 48V / 127V (Mín. 10kW),	01
DPS CC	Classe II, $U_c > 250V$, $I_{máx}$ 60kA,	02
DPS CA	Classe II, U_c 175V, $I_{máx}$ 60kA,	02
Fusíveis FV	Tipo gPV 25A / 1000Vcc (Proteção das strings)	02
Disjuntor CC	Bipolar para baterias de Lítio (125A / 48Vdc)	01
Disjuntor CA	Proteção termomagnética de saída (25A / 127Vac)	01
String Box	Quadros de proteção com invólucro IP65.	02

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Integração do Sistema IoT e Gerenciamento Inteligente.

A confiabilidade operacional do sistema baseia-se na integração entre geração fotovoltaica, banco de baterias LiFePO₄ e monitoramento remoto em tempo real. O sistema utiliza um inversor híbrido *off-grid* de 10 kW (48 Vcc / 127 Vca) como núcleo de gerenciamento energético, integrando módulos fotovoltaicos, banco de baterias e grupo gerador a diesel auxiliar. A Figura 2 apresenta a arquitetura de integração e monitoramento remoto da microrrede do hospital flutuante.

Os módulos fotovoltaicos alimentam o barramento CC do inversor por meio de conexão elétrica em corrente contínua (CC) associada ao controlador MPPT interno. O banco de baterias LiFePO₄ comunica-se com o inversor através do BMS (Battery Management System) utilizando protocolo CAN/RS485 (Controller Area Network/Recommended Standard 485), permitindo o monitoramento do estado de carga (SoC), tensão, corrente e temperatura das baterias. O grupo gerador a diesel atua como fonte auxiliar de contingência, conectado à entrada CA do inversor através do controlador Deif (DEIF AGC 150 Hybrid) [21], realizando comunicação de status e sincronismo

operacional. Todas as variáveis elétricas do sistema são disponibilizadas pelo inversor por meio da interface de comunicação Modbus TCP (porta 502) [23].

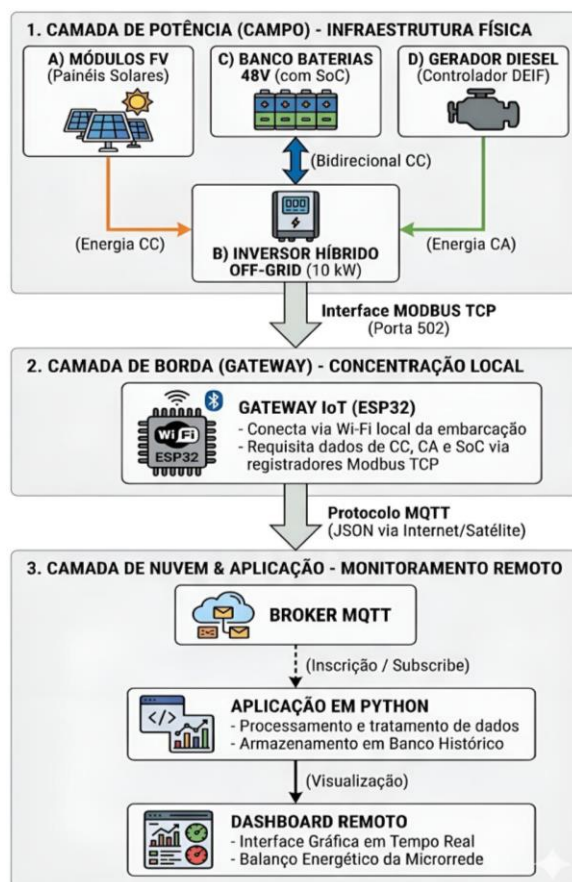


Figura 2 Arquitetura de integração e monitoramento

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A aquisição e transmissão dos dados são realizadas por um gateway IoT baseado em ESP32 [22], conectado via Wi-Fi à rede local da embarcação. O dispositivo opera como mestre Modbus TCP, realizando leituras cíclicas de parâmetros como tensão, corrente, potência, estado de carga (SoC) das baterias e condição operacional do gerador.

Após a coleta, os dados são convertidos para formato JSON (JavaScript Object Notation) e enviados via protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) para um broker em nuvem, devido à sua alta eficiência e baixo consumo de banda, características importantes para regiões remotas da Amazônia.

O sistema supervisorio foi desenvolvido em Python, permitindo armazenamento histórico, monitoramento remoto, análise energética e tratamento de alarmes críticos. As informações são exibidas em dashboards em tempo real, possibilitando gerenciamento

inteligente, priorização de cargas críticas e manutenção preditiva do sistema energético do hospital flutuante.

A plataforma IoT permite monitoramento preditivo em tempo real, evidenciando que as baterias LiFePO_4 possuem maior eficiência energética e vida útil superior a 15 anos, com mais de 6.000 ciclos de carga.

Desempenho e Balanço Energético

O sistema fotovoltaico, composto por 32 módulos de 565 *Wp* (18,08 *kWp*), foi projetado para gerar aproximadamente 65,22 *kWh*/dia, considerando o índice de irradiação crítica de Cametá-PA (4,51 HSP) e um fator global de desempenho de 80% ($\text{PR} = 0,80$), equivalente a perdas de 20%. Esse valor foi adotado para representar perdas típicas por temperatura, sujeira, cabeamento, conversão de energia e demais fatores operacionais do sistema fotovoltaico [2], [3], [24]. Comparando este valor com o levantamento de carga realizado no Quadro 3 (64,1 *kWh*/dia), observa-se que a geração solar é capaz de suprir 100% da demanda diária do hospital em condições normais de operação.

Autonomia do Sistema de Armazenamento (BESS)

O banco de baterias LiFePO_4 , com capacidade total de 1.832 Ah (87,9 kWh), garante a continuidade dos serviços durante o período noturno e em momentos de baixa irradiância. Com profundidade de descarga (DoD) de 90%, o sistema garante 1 dia de autonomia total para o consumo de 64,1 kWh sem geração solar ou uso do gerador. Em emergências, a gestão inteligente via IoT prioriza cargas essenciais, ampliando a autonomia das cargas críticas.

Economia de combustível e Impacto Ambiental

A análise da economia de combustível deste projeto fundamenta-se no contraste entre a demanda energética de 64,1 kWh/dia [1], e o modelo de operação do Barco Hospital Papa Francisco (BHPF). Conforme o estudo de Sousa Junior et al. (2020), o BHPF utiliza uma infraestrutura baseada predominantemente em grupos geradores a diesel operando em regime de redundância para garantir a continuidade hospitalar [2]. Em sistemas exclusivamente a diesel, a geração desses mesmos 64,1 kWh diários exigiria o funcionamento ininterrupto dos motores, resultando em um consumo elevado e constante de combustível fóssil para manter as cargas críticas.

Ao integrar a usina fotovoltaica de 18,08 kWp e o banco de baterias LiFePO₄, o sistema proposto passa a suprir integralmente essa demanda energética em condições normais de operação [4], [5]. Dessa forma, a redução de até 36% no consumo de diesel citada na literatura científica [6], traduz-se, neste projeto, na desativação do gerador durante os períodos de sol pleno e na autonomia das baterias durante a noite [7]. Essa abordagem não apenas atende aos requisitos de segurança e confiabilidade para um hospital flutuante, mas também otimiza o balanço energético ao utilizar o diesel apenas como fonte auxiliar de emergência ou para recarga em períodos de baixa irradiância prolongada, promovendo uma redução direta nas emissões de CO₂ e nos custos logísticos de combustível na região amazônica.

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o dimensionamento de um sistema híbrido de geração de energia aplicado a um hospital flutuante destinado ao atendimento de comunidades ribeirinhas da Amazônia. A solução proposta integrou geração fotovoltaica *off-grid*, banco de baterias LiFePO₄ (BESS), gerador a diesel auxiliar e arquitetura IoT para monitoramento remoto e gestão inteligente da microrrede.

Os resultados mostram que o sistema fotovoltaico de 18,08 kWp foi capaz de suprir integralmente a demanda energética diária estimada de 64,1 kWh/dia, garantindo autonomia operacional e maior confiabilidade no fornecimento de energia para cargas hospitalares críticas. O banco de baterias projetado permitiu autonomia de até um dia completo sem geração solar, para cargas essenciais em situações emergenciais.

Além disso, a integração IoT possibilitou supervisão em tempo real, manutenção preditiva e priorização automática de cargas críticas, aumentando a segurança operacional da embarcação. A redução do uso do gerador a diesel evidencia o potencial da solução para promover maior eficiência energética e sustentabilidade em sistemas hospitalares isolados. Embora os resultados indiquem a viabilidade técnica da proposta, o estudo foi desenvolvido com base em dados de dimensionamento e especificações de projeto, não contemplando o estudo de uma implementação prática do sistema numa embarcação real. Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de análises econômicas detalhadas, estudos de desempenho considerando diferentes condições climáticas da Amazônia e a validação experimental da arquitetura IoT em operação. Adicionalmente, futuras pesquisas podem avaliar estratégias avançadas de gerenciamento energético e a

integração de outras fontes renováveis (como gerador a etanol combustível), contribuindo para o aprimoramento da confiabilidade e da sustentabilidade de hospitais flutuantes destinados ao atendimento de comunidades ribeirinhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EPE – Empresa de Pesquisa Energética: *Balanco Energético Nacional 2024*. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*. 3. ed. Brasília (2019). Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/atlas-de-energia-eletrica-do-brasil>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [3] Rosa, A.R.O., Gasparin, F.P.: *Panorama da energia solar fotovoltaica no Brasil*. Revista Brasileira de Energia Solar (2016). Disponível em: <https://rbens.emnuvens.com.br/rbens/article/view/157>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [4] Oliveira, E.A.F.: *Perspectivas da geração e aplicação da energia solar fotovoltaica no Brasil*. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais (2021). Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/358407520>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [5] Lana, L.T.C. et al.: *Energia solar fotovoltaica: revisão bibliográfica*. Revista Engenharias On-line (2016). Disponível em: <https://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [6] Cunha, D.C. et al.: *Energia solar fotovoltaica no Brasil*. Revista Científica Núcleo do Conhecimento (2018). Disponível em: <https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-eletrica/energia-solar>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [7] Luiz, B.S., Silva, T.S.: *Energia fotovoltaica: um retrato da realidade brasileira*. Revista INOVAE (2017). Disponível em: <https://revistaseletronicas.fmu.br/index.php/inovac/article/view/1670>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [8] Carvalho, R.A.S. et al.: *Análise comparativa da produtividade real de sistemas de microgeração fotovoltaica no Brasil*. Congresso Brasileiro de Energia Solar (2016). Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1323>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [9] Sousa Junior, E.A., Silva, F.J.R., Costa, D.A.C.: *Instalação elétrica para o hospital naval Papa Francisco: desenvolvimento do projeto elétrico de um barco hospital para atendimento de populações ribeirinhas na Amazônia*. Brazilian Journal of Development (2020). Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/9123>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [10] PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica: *Eficiência Energética em Edificações* (2011). Disponível em: <https://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [11] ELETROBRAS: *Manual de Eficiência Energética em Sistemas Hospitalares* (2018). Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Eficiencia-Energetica.aspx>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [12] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica: *Eficiência Energética – Guia do Consumidor* (2020). Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/eficiencia-energetica>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [13] INMETRO: *Programa Brasileiro de Etiquetagem – Iluminação LED* (2022). Disponível em: <https://www.gov.br/inmetro>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [14] PROCEL: *Eficiência Energética em Sistemas de Climatização* (2019). Disponível em: <https://www.procelinfo.com.br>. Acesso em: 21 abr. 2026.

- [15] Weyrich, M., Ebert, C.: *Reference architectures for the Internet of Things*. IEEE Software (2016). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7474381>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [16] Zanella, A. et al.: *Internet of Things for Smart Cities*. IEEE Internet of Things Journal (2014). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6740844>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [17] Ministério da Saúde (Brasil): *Telessaúde Brasil Redes* (2020). Disponível em: <https://aps.saude.gov.br/ape/telessaude>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [18] CFM – Conselho Federal de Medicina: *Resolução nº 2.314/2022 – Telemedicina* (2022). Disponível em: <https://portal.cfm.org.br>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [19] CRESESB – Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito: *SunData – Banco de Dados de Irradiação Solar*. Disponível em: <https://cresesb.cepel.br>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [20] INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: *Atlas Brasileiro de Energia Solar*. 2. ed. São José dos Campos (2017). Disponível em: http://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [21] DEIF: AGC-150 Hybrid Controller Documentation. Disponível em: <https://www.deif.com/documentation/agc-150-hybrid/>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [22] Espressif Systems: ESP32 Series Datasheet. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [23] WEG: PLC500 – Modbus TCP Application Note. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/he8/h02/WEG-PLC500-Modbus-tcp-ApplicantionNote-10010166008-pt.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [24] VILLALVA, M. G. Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações – Sistemas Isolados e Conectados à Rede. 2. ed. São Paulo: Érica/Saraiva, 2015.
- [25] JINKO SOLAR. Tiger Neo 565 Wp – Datasheet. Disponível em: <https://www.jinkosolar.com>. Acesso em: 21 abr. 2026.
- [26] DYNESS. A48100 Lithium Battery – Datasheet. Disponível em: <https://www.dyness.com>. Acesso em: 21 abr. 2026.

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

Os estudantes Romário Silva e Ana Cristina Marques Oliveira do Curso de Engenharia Elétrica, matrículas: 2021/2.0038.0006-2 e 2022/2.0038.0007-8, telefone: (62) 99218-2050 e (62) 92526-2718 e-mail: romariolgrbd@gmail.com e anacristst@hotmail.com, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado: Integração de sistemas fotovoltaicos com BESS em regiões remotas, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 17 de Março de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br ROMARIO SILVA
Data: 17/03/2026 09:10:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Documento assinado digitalmente
gov.br ANA CRISTINA MARQUES OLIVEIRA
Data: 17/03/2026 09:18:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura dos autores: _____

Nome completo dos autores: Romário Silva e Ana Cristina Marques Oliveira

Documento assinado digitalmente
gov.br MARCILON FONSECA DE LIMA
Data: 25/03/2026 16:44:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: _____