www.revistaft.com.br

Revista FT | ISSN 1678-0817 | v. 30, n. 164, 2026 | DOI: 10.69849/ks4rh957

Sistemas eletroeletrônicos embarcados aplicados à segurança da navegação fluvial

Onboard electrical and electronic systems applied to inland navigation safety

Messias Lagos de Carvalho[1]

Layse Oliveira Bastista[2]

Jonathan Cavalcante Dias[3]

Resumo

Este artigo analisa a contribuição dos sistemas eletroeletrônicos embarcados para a segurança da navegação fluvial amazônica, com ênfase na alimentação elétrica, na integração de dados e na continuidade das funções de bordo. Adota pesquisa bibliográfica e documental associada a um estudo técnico hipotético, sem ensaios em embarcação real. São examinados posicionamento por satélite, radar, identificação automática, rádio, medição de profundidade, orientação e monitoramento, relacionando suas funções às variações hidrológicas e operacionais da Amazônia. O dimensionamento diferencia um inventário básico de consumo de um cenário ampliado e considera perdas, capacidade remanescente e limites de descarga do armazenamento. A análise mostra que o banco inicialmente considerado não atende à autonomia pretendida quando esses fatores são incorporados. A alternativa revisada atende ao cenário central com margem reduzida, enquanto a geração fotovoltaica apresenta resultados dependentes da disponibilidade solar e da recuperação após contingências. Os cenários de falha evidenciam que a multiplicação de equipamentos ou telas não assegura independência quando há fontes comuns de energia ou informação. Conclui-se que a contribuição dos sistemas depende da adequação da instalação, da manutenção, da capacitação e da interpretação conjunta dos dados. Os resultados quantitativos permanecem condicionados às hipóteses adotadas e requerem validação antes de aplicação em uma embarcação específica.

Palavras-chave: navegação fluvial; Amazônia; sistemas eletroeletrônicos; alimentação elétrica; confiabilidade.

Abstract

This article examines the contribution of onboard electrical and electronic systems to inland navigation safety in the Amazon, focusing on power supply, data integration and continuity of onboard functions. Bibliographic and documentary research is combined with a hypothetical engineering study, without tests on an actual vessel. Satellite positioning, radar, automatic identification, radio, depth measurement, heading references and monitoring are examined in relation to Amazonian hydrological and operational variability. The calculations distinguish a basic load inventory from an expanded scenario and account for losses, remaining capacity and discharge limits. The analysis shows that the initially considered battery bank does not meet the intended autonomy when these factors are included. The revised alternative meets the central scenario with a limited margin, while photovoltaic generation depends on solar availability and recovery after contingencies. Failure scenarios show that additional equipment or displays do not ensure independence when they share power or information sources. System benefits depend on appropriate installation, maintenance, training and combined interpretation of data. Quantitative results remain conditional on the adopted assumptions and require validation before application to a specific vessel.

Keywords: inland navigation; Amazon; onboard electronic systems; electrical supply; reliability.

1 Introdução

A navegação fluvial permite o deslocamento de passageiros e cargas e integra localidades da região amazônica. A extensão da rede hidrográfica, as distâncias entre centros de apoio e a variabilidade das condições dos rios tornam necessário acompanhar posição, profundidade, tráfego e comunicação durante a operação. Nesse ambiente, os equipamentos eletroeletrônicos fornecem informações que apoiam a condução da embarcação, desde que sua instalação, alimentação e utilização sejam compatíveis com as funções previstas.

A informação eletrônica participa de uma cadeia que começa na medição e termina na interpretação pelo operador. O receptor de navegação por satélite fornece posição; o radar

apresenta ecos de alvos detectáveis; o Sistema de Identificação Automática acrescenta dados transmitidos por estações equipadas; o rádio possibilita comunicação; e o ecobatímetro acompanha a profundidade no seu campo de medição. Essas funções são complementares. Sua contribuição depende da validade dos dados e do conhecimento das limitações de cada sistema.

A infraestrutura elétrica conecta essas funções. Um defeito no banco de baterias, em um conversor ou em um circuito comum pode interromper simultaneamente informações distintas. Por esse motivo, a segurança da navegação precisa ser relacionada à disponibilidade das fontes, à distribuição e proteção dos circuitos, à qualidade das conexões e à possibilidade de preservar referências independentes. A Engenharia Elétrica oferece instrumentos para analisar essa relação por meio de inventários, cálculos e verificação de dependências.

A variabilidade ambiental amplia a importância da análise integrada. O clima amazônico apresenta diferenças espaciais e temporais, enquanto secas e cheias alteram condições dos rios e necessidades de acompanhamento (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998; MARENGO et al., 2024). A erosão das margens, a redução da visibilidade e as dificuldades de apoio também precisam ser consideradas na definição de requisitos. O equipamento deve ser associado à informação que efetivamente produz, evitando atribuir ao posicionamento a função de detecção ou ao radar a capacidade de prever instabilidade geotécnica.

O problema de pesquisa consiste em compreender de que maneira os sistemas eletroeletrônicos contribuem para a segurança da navegação e quais consequências podem decorrer de falhas de energia, comunicação, instrumentação e monitoramento. O objetivo geral é analisar essa contribuição, destacando alimentação, integração e confiabilidade. Os objetivos específicos abrangem identificar funções e limitações dos principais equipamentos, organizar requisitos de implantação, examinar o dimensionamento elétrico e relacionar as condições amazônicas aos cenários de falha.

A hipótese de trabalho é que a integração adequada, associada à manutenção e a referências independentes, pode ampliar a disponibilidade das informações utilizadas nas decisões operacionais. A pesquisa examina mecanismos de contribuição e fragilidades de projeto; não estima percentuais de redução de acidentes. O modelo quantitativo é hipotético e utiliza parâmetros explicitados para demonstrar o método de dimensionamento e a sensibilidade dos resultados.

O enquadramento brasileiro tem como referências a Lei nº 9.537/1997 e os documentos da Autoridade Marítima aplicáveis ao escopo da pesquisa (BRASIL, 1997; MARINHA DO BRASIL, 2025; MARINHA DO BRASIL, 2026). As orientações internacionais e os documentos técnicos são utilizados conforme suas funções específicas. A ausência de identificação de uma embarcação impede estabelecer dotação obrigatória completa ou emitir conclusão de conformidade.

O artigo reúne a discussão teórica dos equipamentos, os procedimentos de análise e os resultados do estudo técnico. Os cálculos diferenciam o inventário básico de 933,6 Wh/dia do cenário ampliado de 2.510 Wh/dia e preservam as condições da revisão da autonomia. A discussão ambiental relaciona os fenômenos regionais às informações necessárias e aos limites dos sistemas, mantendo a distinção entre resultado calculado, evidência documental e proposta de verificação.

2 Revisão da literatura

2.1 Arquitetura e funções dos sistemas embarcados

Os sistemas eletroeletrônicos embarcados formam uma infraestrutura integrada de aquisição, processamento, comunicação e apresentação de informações. Em uma embarcação fluvial, diferentes equipamentos podem compartilhar energia e dados, mas devem manter condições de operação compatíveis com o ambiente. A presença de água, umidade, vibração, variação térmica, interferência eletromagnética e oscilações de tensão impõe requisitos adicionais ao projeto.

Os sensores representam a interface entre o fenômeno físico e o sistema eletrônico. A qualidade do sinal obtido influencia diretamente a qualidade da informação apresentada ao operador. Por isso, devem ser considerados faixa de medição, resolução, precisão, tempo de resposta, estabilidade e necessidade de calibração.

Os sistemas de posicionamento e orientação fornecem referência espacial para a navegação. O GNSS, quando integrado a um plotter ou sistema de apresentação cartográfica, pode mostrar a posição da embarcação em relação à rota planejada. A bússola oferece uma referência de direção que pode ser usada como informação independente para conferência.

Os sistemas de medição e controle são componentes fundamentais dos sistemas eletroeletrônicos embarcados, pois permitem acompanhar, registrar e controlar diferentes parâmetros relacionados ao funcionamento da embarcação. Esses sistemas utilizam sensores, instrumentos eletrônicos, unidades de processamento e dispositivos de atuação para coletar informações e realizar ajustes necessários durante a operação, na navegação fluvial, os sistemas de medição podem monitorar parâmetros como velocidade da embarcação, rotação do motor, temperatura, pressão, nível de combustível, tensão e corrente elétrica, além de outras grandezas relacionadas aos equipamentos de bordo. As informações obtidas pelos sensores são processadas e apresentadas ao operador, possibilitando o acompanhamento das condições de funcionamento dos sistemas, os sistemas de controle, por sua vez, utilizam essas informações para executar ações de forma automática ou auxiliar o operador na tomada de decisões. Por exemplo, podem controlar determinados parâmetros do motor, sistemas elétricos, bombas, equipamentos de propulsão e outros dispositivos presentes na embarcação.

A integração entre medição e controle contribui para aumentar a segurança, eficiência e confiabilidade da navegação, uma vez que permite identificar alterações no funcionamento dos equipamentos e possibilita a adoção de medidas corretivas. Dessa maneira, esses sistemas constituem uma parte importante da automação embarcada e da segurança operacional das embarcações utilizadas na navegação fluvial.

Os sistemas de segurança e emergência são conjuntos de equipamentos e dispositivos destinados a proteger a embarcação, a tripulação, os passageiros e a carga, contribuindo para a prevenção, identificação e resposta a situações de risco durante a navegação fluvial.

As funções são organizadas por sua finalidade operacional: posicionamento e orientação, detecção, identificação, comunicação, medição e controle. Um mesmo equipamento pode compartilhar dados com outros, mas essa integração não transforma as funções em equivalentes. A análise de segurança precisa identificar o que é observado, de onde a informação provém e qual consequência acompanha sua perda.

2.2 Posicionamento por satélite e referências de orientação

O GNSS utiliza sinais de constelações de satélites para determinar posição e outras grandezas de navegação. Na prática, o equipamento receptor apresenta coordenadas, velocidade e dados complementares conforme sua configuração.

O receptor GNSS é selecionado considerando qualidade da solução, integridade, atualização, interfaces, condições ambientais, consumo e assistência técnica. Precisão de posição e referência de rumo são grandezas distintas: curso sobre o fundo não equivale necessariamente à direção da proa. As entradas de dados compartilhadas devem ser identificadas para evitar que vários displays sejam interpretados como fontes independentes.

A bússola magnética é um instrumento de navegação destinado à determinação do rumo da embarcação a partir da orientação fornecida pelo campo magnético terrestre. Seu princípio de funcionamento baseia-se na ação desse campo sobre um elemento magnetizado, possibilitando a identificação do norte magnético e, consequentemente, das demais direções utilizadas para a orientação durante a navegação.

Uma de suas principais características é a independência em relação à alimentação elétrica. Essa condição constitui uma vantagem operacional, uma vez que permite a utilização do instrumento mesmo diante de falhas ou indisponibilidade dos sistemas elétricos e eletrônicos da embarcação. Dessa forma, a bússola magnética pode atuar como uma referência independente e auxiliar nos procedimentos de navegação em situações de emergência.

No contexto da navegação fluvial, a bússola magnética pode ser empregada para auxiliar na manutenção do rumo planejado e na orientação da embarcação ao longo do trajeto. Entretanto, a indicação fornecida pelo instrumento pode sofrer influência de fatores magnéticos presentes na própria embarcação e no ambiente de instalação.

Uma das principais vantagens da bússola eletrônica é a possibilidade de fornecer continuamente informações de rumo em formato digital, facilitando sua utilização por outros equipamentos embarcados. Em sistemas integrados, essas informações podem ser empregadas para correções de rumo e para auxiliar o operador na manutenção da trajetória planejada. Estudos sobre sistemas embarcados também destacam a comunicação da bússola eletrônica com equipamentos de posicionamento como recurso para melhorar a determinação do rumo da embarcação.

Bússolas eletrônicas que utilizam referência magnética podem sofrer interferências de materiais ferromagnéticos e campos produzidos por equipamentos elétricos. Sua instalação e calibração precisam considerar essas fontes. O princípio do sensor deve ser identificado no manual, pois as limitações dependem da tecnologia empregada.

No contexto dos sistemas eletroeletrônicos embarcados, diferentes equipamentos podem fornecer informações relacionadas ao rumo da embarcação, como a bússola magnética, a bússola eletrônica, o sistema de posicionamento por satélite (GNSS) e sensores de rumo. A utilização conjunta dessas fontes permite comparar informações e identificar possíveis divergências, contribuindo para a tomada de decisões pelo operador.

Além da disponibilidade de equipamentos alternativos, a redundância deve considerar a independência das fontes de informação. A simples existência de dois equipamentos não garante necessariamente redundância se ambos dependerem da mesma fonte de alimentação, do mesmo sensor ou do mesmo sistema de processamento. Por isso, uma arquitetura adequada deve buscar reduzir os pontos únicos de falha e manter referências alternativas capazes de continuar fornecendo informações essenciais à navegação.

2.3 Radar e identificação automática do tráfego

O radar (Radio Detection and Ranging) é um sistema eletrônico utilizado para detectar, localizar e acompanhar objetos a determinada distância, mesmo em condições de baixa visibilidade. Seu funcionamento baseia-se na transmissão de ondas eletromagnéticas e na análise dos sinais que retornam após serem refletidos por objetos presentes no ambiente. Na navegação fluvial, o radar pode contribuir para a segurança da embarcação, permitindo identificar obstáculos, outras embarcações, margens, ilhas e estruturas presentes no percurso. Essa capacidade é especialmente importante durante períodos de chuva intensa, neblina, à noite ou em situações nas quais a visibilidade visual do condutor esteja limitada, o sistema é composto, de forma geral, por uma antena, transmissor, receptor, processador de sinais e unidade de apresentação. A antena transmite ondas de rádio e recebe os sinais refletidos. A partir do tempo necessário para o retorno do sinal e de outras características do eco recebido, o equipamento calcula informações relacionadas à distância e à direção dos alvos.

O funcionamento do AIS utiliza sinais de VHF (Very High Frequency) para transmitir informações da embarcação. Entre os dados normalmente disponibilizados estão a identificação da embarcação, posição, velocidade, rumo e outras informações de navegação. Esses dados podem ser apresentados em equipamentos eletrônicos de bordo, possibilitando ao operador acompanhar outras embarcações equipadas com AIS,na navegação fluvial, o AIS pode contribuir para o aumento da segurança ao proporcionar maior conhecimento sobre o tráfego existente nas

proximidades. A visualização das informações de outras embarcações pode auxiliar na avaliação de situações de encontro, ultrapassagem e cruzamento, especialmente em trechos com tráfego intenso. O AIS também pode trabalhar de forma integrada com outros sistemas eletroeletrônicos embarcados, como GPS, radar e sistemas de cartas eletrônicas. Essa integração permite reunir diferentes fontes de informação e melhorar a percepção do ambiente de navegação.

Entretanto, o AIS não substitui o radar, a observação visual ou os procedimentos de navegação. Isso ocorre porque nem todas as embarcações podem estar equipadas com AIS, além de existirem situações em que as informações transmitidas podem estar ausentes, incorretas ou desatualizadas.

A integração do Sistema de Identificação Automática (AIS) com outros sistemas eletroeletrônicos embarcados constitui um importante recurso para o aprimoramento da segurança da navegação fluvial. Quando os dados do AIS são combinados com informações provenientes de equipamentos como GPS, radar, ecobatímetro e sistemas de cartas eletrônicas, é possível obter uma representação mais completa das condições de navegação ao redor da embarcação.

O GPS fornece informações precisas sobre a posição da embarcação, enquanto o AIS possibilita a identificação e o acompanhamento de outras embarcações equipadas com o sistema. Já o radar permite detectar alvos por meio da reflexão de ondas eletromagnéticas, podendo identificar objetos que não estejam transmitindo informações pelo AIS. A combinação dessas tecnologias permite comparar diferentes fontes de informação e auxiliar o operador na identificação de possíveis riscos, a integração com o ecobatímetro também apresenta relevância para a navegação fluvial, principalmente devido às variações de profundidade encontradas nos rios. O equipamento fornece informações sobre a profundidade abaixo da embarcação, contribuindo para a prevenção de situações relacionadas ao encalhe.

Além disso, quando integrado a cartas eletrônicas e sistemas de navegação, o AIS pode apresentar informações de identificação, posição, rumo e velocidade de outras embarcações diretamente na interface utilizada pelo operador. Dessa maneira, diferentes dados podem ser visualizados de forma conjunta, facilitando o acompanhamento do tráfego aquaviário.

As diretrizes de uso do AIS destacam suas limitações e sua função complementar na consciência situacional (IMO, 2015). Os padrões de radar tratam da apresentação e detecção dentro do escopo correspondente (IMO, 2004). Para a análise fluvial, importa manter a diferença

entre a informação transmitida pelo alvo e o eco produzido por reflexão, pois cada mecanismo pode permanecer disponível ou falhar de maneira distinta.

2.4 Comunicação por rádio e conectividade externa

O rádio VHF permite comunicação de voz entre embarcações e estações em terra nas faixas destinadas ao serviço correspondente. A instalação compreende antena, cabo coaxial, conectores e alimentação. O alcance depende da propagação, da potência, da altura das antenas e do ambiente. Na navegação fluvial, o sistema apoia comunicação operacional, coordenação de tráfego e solicitação de auxílio, conforme os canais e procedimentos aplicáveis.

Durante a navegação, o VHF pode ser utilizado para informar a posição da embarcação, comunicar intenções de manobra, coordenar passagens em trechos estreitos, alertar sobre obstáculos ou condições adversas e solicitar auxílio em situações de emergência. Em rios com grande movimentação de embarcações, a comunicação por rádio pode contribuir para reduzir ambiguidades e melhorar a coordenação entre os navegantes.

O rádio VHF também pode ser integrado a outros sistemas eletroeletrônicos embarcados, como o AIS e o GPS. Essa integração possibilita que determinadas informações de navegação sejam utilizadas em conjunto com os recursos de comunicação, aumentando a disponibilidade de dados para o operador.Outro aspecto importante é a utilização de canais específicos para diferentes finalidades, conforme as normas e procedimentos aplicáveis à navegação. A utilização correta dos canais, a clareza das mensagens e o conhecimento dos procedimentos de comunicação são fundamentais para que o sistema cumpra adequadamente sua função.

As aplicações do rádio VHF incluem comunicação operacional, coordenação de tráfego e comunicação de segurança, de acordo com os procedimentos e regulamentações aplicáveis. Em situações de emergência, o sistema também pode ser utilizado para transmitir informações relacionadas a acidentes, avarias, riscos à navegação ou necessidade de assistência.

Além da comunicação por voz, determinados equipamentos VHF podem integrar recursos digitais, como o DSC (Digital Selective Calling), que permite o envio de chamadas digitais, inclusive chamadas de socorro. Quando integrado a outros sistemas eletrônicos embarcados, o VHF pode contribuir para ampliar a disponibilidade e a confiabilidade das informações utilizadas pela tripulação na tomada de decisões.

O VHF e a conectividade por satélite são analisados como recursos de funções distintas. O primeiro pode permitir comunicação direta com estações alcançáveis; a segunda oferece acesso externo conforme equipamento, serviço e cobertura. A presença de internet não cria, por si só, equivalência com sistemas de socorro e comunicação exigidos. No modelo proposto, os recursos de segurança são mantidos conforme enquadramento, independentemente da conveniência de aplicações de dados.

Uma arquitetura que utiliza acesso externo para monitoramento deve verificar o que permanece disponível quando o enlace cai. Posição local, profundidade, detecção e comunicação por rádio não devem ser presumidas como dependentes de um aplicativo remoto. Se a integração real estabelecer essa dependência, ela precisa ser reconhecida e testada. O estudo propõe registrar a origem local ou externa de cada informação.

O cenário energético inclui um terminal satelital hipotético de 70 W por oito horas e uma rede auxiliar de 8 W por vinte e quatro horas. Esses valores não representam especificações de um produto identificado. O consumo efetivo depende do modelo e das condições de operação e deve ser obtido no manual e confirmado por medições.

Na gestão de contingência, cargas de conectividade podem ser priorizadas ou reduzidas conforme a necessidade de comunicação e de apoio. Não se define que o acesso à internet é sempre secundário: em determinado contexto, um canal externo pode ter importância operacional. O procedimento proposto exige decisão prévia sobre funções e períodos, evitando desligamentos automáticos que retirem o único meio de apoio efetivamente disponível.

2.5 Ecobatímetro e interpretação da profundidade

O ecobatímetro estima a profundidade pela emissão de sinal acústico e pela medição do tempo de retorno do eco do fundo. Seus componentes incluem transdutor, processamento e apresentação. A leitura pode ser associada à posição GNSS para documentar variações locais do leito. Bolhas, turbulência, características do fundo e instalação influenciam a qualidade do sinal. A informação corresponde ao campo de medição do equipamento e precisa ser interpretada com referência conhecida e em conjunto com as demais informações da hidrovia.

A indicação do ecobatímetro depende da posição do transdutor e da configuração de referência. O operador precisa distinguir distância abaixo do sensor, profundidade corrigida para a superfície e folga sob a quilha. Turbulência, bolhas, vegetação, sedimentos e reflexão do fundo

podem produzir leituras instáveis. Instalação, configuração e manutenção devem ser verificadas antes de interpretar a leitura como condição de passagem. A medida local complementa cartas, sinalização, nível do rio e conhecimento do trecho.

O plotter de navegação, também conhecido como chartplotter, é um equipamento destinado à apresentação visual de informações relacionadas à navegação. Dependendo da configuração do sistema, pode apresentar a posição da embarcação sobre cartas eletrônicas, sua rota planejada, trajetória percorrida, pontos de interesse, marcações e outras informações provenientes dos sensores conectados ao sistema.

A integração entre GNSS, plotter e ecobatímetro permite associar uma determinada profundidade à posição geográfica em que essa medição foi realizada. Dessa maneira, o operador pode obter uma representação mais completa das condições encontradas ao longo da rota. Em operações de navegação fluvial, essa característica pode ser particularmente útil para o acompanhamento de regiões sujeitas a alterações no leito do rio.

A comunicação entre os equipamentos depende das interfaces e dos protocolos disponibilizados pelos fabricantes. Sistemas embarcados podem utilizar diferentes formas de comunicação para transmitir dados entre sensores, displays e unidades de processamento. Por isso, antes da instalação, devem ser verificadas a compatibilidade dos equipamentos, as interfaces disponíveis, os formatos de dados e as configurações necessárias para que as informações sejam corretamente recebidas e interpretadas.

O transdutor deve ser instalado em um local que permita o contato adequado com a água e que seja protegido contra turbulências excessivas, bolhas de ar e interferências provocadas pelo fluxo da água. A presença de bolhas ou de água excessivamente turbulenta na região do transdutor pode prejudicar a propagação e a recepção dos sinais acústicos, provocando leituras instáveis ou incorretas.

Em embarcações fluviais, a escolha do local de instalação deve considerar também o formato do casco, a posição dos motores, hélices, propulsores e demais componentes que possam gerar turbulência ou ruído. Equipamentos que produzam vibrações ou interferências acústicas devem ser considerados durante o planejamento da instalação.

2.6 Distribuição de energia e proteção elétrica

A alimentação elétrica deve ser dimensionada de modo a atender às cargas contínuas e transitórias existentes na embarcação. As cargas contínuas correspondem aos equipamentos que permanecem em funcionamento durante determinado período de operação, enquanto as cargas transitórias podem apresentar variações momentâneas de corrente, principalmente durante a partida de motores e equipamentos de maior potência. O dimensionamento inadequado da fonte de alimentação pode ocasionar sobrecargas, aquecimento dos condutores, instabilidade da tensão e interrupções no funcionamento dos equipamentos.

Os disjuntores e fusíveis são dispositivos destinados à proteção dos circuitos elétricos contra condições de sobrecorrente, contribuindo para a segurança e a confiabilidade das instalações eletroeletrônicas embarcadas. Sua utilização adequada permite limitar os efeitos de falhas elétricas, reduzindo a possibilidade de danos aos condutores, equipamentos e demais componentes do sistema de alimentação.

Os disjuntores possuem a característica de interromper automaticamente o circuito quando a corrente ultrapassa determinados valores estabelecidos para sua operação. Além da proteção contra sobrecorrentes, sua utilização facilita a interrupção manual da alimentação para procedimentos de manutenção e inspeção. A seleção do dispositivo deve considerar, entre outros fatores, a corrente de operação do circuito e sua capacidade de interrupção diante de possíveis correntes de curto-circuito.

Em sistemas eletroeletrônicos embarcados, a correta aplicação desses dispositivos é particularmente importante devido à presença de equipamentos destinados à navegação, comunicação, posicionamento e monitoramento. Uma proteção inadequadamente dimensionada pode resultar em interrupções desnecessárias ou, em sentido contrário, não atuar de forma eficiente diante de uma falha.

O dimensionamento dos condutores deve considerar a corrente elétrica da carga, o comprimento do circuito, a seção do condutor, a queda de tensão admissível, a temperatura de operação e as condições de instalação. O comprimento do circuito influencia diretamente a resistência elétrica dos condutores e, consequentemente, a queda de tensão ao longo da instalação.

2.7 Geração e armazenamento de energia

A geração de energia pode ser realizada por meio de alternadores associados ao sistema de propulsão ou a motores auxiliares, enquanto o armazenamento é realizado principalmente por bancos de baterias. Os alternadores permitem a reposição da energia consumida durante a operação, enquanto as baterias fornecem energia aos equipamentos quando a geração não está disponível ou quando há necessidade de suprir variações momentâneas de demanda.

Os carregadores de bateria também desempenham papel importante no sistema, sendo responsáveis pelo controle do processo de recarga e pela manutenção das baterias em condições adequadas de operação. A seleção desses equipamentos deve considerar a tensão do sistema, a capacidade das baterias e as características das cargas alimentadas.

Os carregadores de baterias têm a função de fornecer energia elétrica de forma controlada para a reposição da carga das baterias. Esses equipamentos devem ser compatíveis com a tensão nominal, a capacidade e as características do banco de baterias utilizado, além de apresentar condições adequadas de operação para o ambiente embarcado.

O banco de baterias constitui um dos principais elementos do sistema de armazenamento de energia elétrica da embarcação, sendo responsável por disponibilizar energia aos equipamentos durante os períodos em que a geração elétrica não é suficiente ou não está disponível. Sua utilização contribui para a continuidade de funcionamento dos sistemas eletroeletrônicos embarcados, especialmente aqueles relacionados à navegação, comunicação e segurança.

A instalação das baterias deve considerar aspectos relacionados à ventilação, temperatura, proteção contra impactos, umidade e fixação adequada, de modo a reduzir riscos durante a operação da embarcação. Também devem ser observados os procedimentos recomendados pelo fabricante quanto à instalação, manutenção, carregamento e utilização.

O sistema fotovoltaico off-grid caracteriza-se pela geração de energia elétrica de forma independente da rede elétrica convencional. Em embarcações, pode ser empregado como fonte complementar de energia para alimentação de cargas elétricas e manutenção da carga do banco de baterias.

Esse sistema é constituído, de modo geral, por módulos fotovoltaicos, controlador de carga e banco de baterias, podendo incluir inversor de tensão quando houver necessidade de alimentação de cargas em corrente alternada. Os módulos fotovoltaicos realizam a conversão da

energia solar em energia elétrica, enquanto o controlador de carga regula a energia destinada ao armazenamento.

O dimensionamento deve considerar a demanda energética das cargas, a potência instalada dos módulos, a capacidade do banco de baterias, o período de autonomia e as condições de disponibilidade de radiação solar. Também devem ser consideradas as características físicas da embarcação, como espaço disponível para instalação dos módulos, exposição às condições ambientais e limitações estruturais.

A avaliação do estado de carga pode utilizar parâmetros como tensão, corrente, tempo de operação e histórico de carga e descarga. Em sistemas mais completos, dispositivos de monitoramento podem realizar a medição contínua desses parâmetros e disponibilizar informações ao operador por meio de instrumentos ou sistemas de gerenciamento.

O acompanhamento adequado do estado de carga contribui para evitar condições de descarga excessiva e sobrecarga, situações que podem comprometer o desempenho e a vida útil das baterias. Além disso, permite identificar alterações no comportamento do sistema e auxiliar na programação dos processos de recarga.

Para sistemas que utilizam baterias, devem ser avaliadas a capacidade de armazenamento, a tecnologia empregada, o regime de carga e descarga e a compatibilidade com os equipamentos de carregamento. No caso de sistemas fotovoltaicos, devem ser considerados a potência dos módulos, a disponibilidade de radiação solar e a capacidade de armazenamento associada.

2.8 Monitoramento alarmes e limites da automação

O monitoramento pode abranger parâmetros elétricos, mecânicos e operacionais, como tensão, corrente, temperatura, nível de combustível, rotação do motor, pressão, estado das baterias e funcionamento de equipamentos. As informações obtidas por meio de sensores e dispositivos de medição podem ser encaminhadas a unidades de processamento e apresentadas ao operador por meio de instrumentos, displays ou sistemas de supervisão.

A integração com sistemas de posicionamento, como GNSS, e com outros equipamentos de navegação pode permitir o acompanhamento de uma rota previamente definida. Entretanto, seu funcionamento depende da disponibilidade e da confiabilidade dos sensores e dos sistemas associados, sendo necessária a supervisão do operador durante a navegação.

Entre os parâmetros monitorados podem estar tensão, corrente, temperatura, pressão, nível de combustível, rotação do motor, estado de carga das baterias e funcionamento de equipamentos de navegação e comunicação. Os valores obtidos pelos sensores são processados pelo sistema de monitoramento e comparados com limites previamente estabelecidos.

Um alarme precisa informar a condição detectada, sua relevância e a ação esperada. A simples emissão de som não garante resposta adequada. No modelo proposto, alarmes de perda de posição, profundidade insuficiente, subtensão e falha de comunicação são diferenciados de avisos de manutenção e mensagens administrativas. A distinção visa impedir que uma ocorrência operacional relevante desapareça em uma sequência de notificações sem prioridade.

É necessário distinguir reconhecimento, silenciamento e resolução. Reconhecer um alarme significa que o operador tomou conhecimento; silenciar limita o aviso acústico; resolver implica eliminar ou controlar a condição que o originou. O sistema não deve sugerir que a anormalidade desapareceu apenas porque o som foi interrompido. Propõe-se manter indicação visual persistente enquanto a variável permanecer fora da condição aceita ou o sensor estiver indisponível.

Os limites precisam ser coerentes com a aplicação. Um valor de profundidade, por exemplo, só pode ser convertido em alarme de folga após considerar a referência do transdutor e o calado. A análise deste artigo não fixa um limite universal, porque a folga requerida depende da operação, da embarcação e da incerteza. Um teste deve confirmar também se o limite permanece armazenado após interrupção de energia e se a alteração é acessível apenas aos responsáveis definidos.

O projeto da interface deve facilitar leitura diurna e noturna, seleção de unidades e identificação de dados vencidos. A circular MSC.1/Circ.1609 aborda padronização de interfaces de equipamentos de navegação (IMO, 2019). Como aplicação analítica, recomenda-se uma ficha de configuração com unidades, referências, limites e fontes de dados. Tal ficha reduz a ambiguidade em trocas de turno e em substituições de equipamentos.

2.9 Qualidade dos dados e independência das referências

A utilidade de um dado de navegação depende de sua origem, atualidade, unidade, referência espacial e indicação de validade. Uma coordenada correta recebida com atraso pode representar uma posição que a embarcação já deixou. Uma profundidade sem indicação de

referência pode ser interpretada como folga sob a quilha quando, na realidade, corresponde à distância entre transdutor e fundo. Por isso, o projeto deve tratar a informação como um produto composto, e não somente como um número em uma tela.

Propõe-se registrar, para cada variável crítica, o sensor de origem, o caminho de transmissão, a frequência de atualização esperada e o comportamento em caso de interrupção. Esse cadastro permite distinguir falha do sensor, falha de comunicação e falha da apresentação. O procedimento também torna visível uma dependência frequentemente omitida: dois equipamentos podem exibir a mesma informação produzida por um único receptor. Nesse caso, a duplicação das telas melhora o acesso, mas não cria independência da medição.

Uma arquitetura é mais robusta quando reúne referências baseadas em fenômenos diferentes. A comparação entre observação visual, distância radar, posição GNSS e profundidade acústica permite perceber incoerências. Entretanto, o desacordo não informa automaticamente qual instrumento está correto. A tripulação precisa conhecer as condições de obtenção de cada dado, sua referência e suas limitações. Para este trabalho, a ação diante de divergência é definida como investigação e redução da dependência da informação contestada, sob decisão do responsável pela navegação.

A circular MSC.1/Circ.1575 trata do processamento de dados de posição, navegação e tempo a bordo (IMO, 2017). A aplicação proposta nesta artigo é uma matriz de origem e validade, apresentada nos quadros de síntese. Essa matriz é um instrumento de projeto: não constitui demonstração de que determinada embarcação possui arquitetura conforme ou solução certificada.

A presença de conectores aparentemente semelhantes não demonstra compatibilidade elétrica nem equivalência de protocolo. Interfaces podem diferir em níveis de tensão, identificação de pinos, terminação, taxa de transmissão, isolamento e conteúdo das mensagens. Um sistema integrado precisa estabelecer quais dados são produzidos, consumidos e eventualmente convertidos por cada componente. A integração não deve ser reduzida à possibilidade de ligar fisicamente um cabo.

Neste estudo, propõe-se uma lista de interfaces com os seguintes campos: equipamento de origem, equipamento de destino, padrão declarado pelo fabricante, variável transportada, direção do fluxo, alimentação da interface, requisito de isolamento e indicação de falha. A lista será preenchida no projeto executivo a partir dos manuais dos modelos selecionados. Como não há

inventário real de equipamentos, não são atribuídos endereços, mensagens proprietárias ou topologia definitiva à instalação hipotética.

Conversores e gateways podem ampliar a interoperabilidade, mas também acrescentam dependências. Uma falha no equipamento que concentra as mensagens pode retirar simultaneamente posição, profundidade e identificação de uma tela integrada. Propõe-se, portanto, avaliar se alguma função crítica continua acessível localmente quando o concentrador é desligado. Essa verificação difere do ensaio de perda do sensor: um receptor funcional pode estar invisível para o operador por defeito no caminho de comunicação.

A disponibilidade de internet deve ser analisada separadamente da rede de navegação. O acesso externo serve à consulta e ao suporte, enquanto a operação local deve manter as funções previstas para uma interrupção de conectividade. A separação funcional sugerida inclui limitar intervenções remotas e registrar alterações de configuração. As diretrizes de instalação do AIS e do radar exemplificam a necessidade de considerar interfaces, posicionamento e interação entre equipamentos, segundo o escopo dos documentos (IMO, 2003; IMO, 2008).

A automação pode executar uma ação corretamente segundo seus parâmetros e, ainda assim, ser inadequada ao contexto. Manter um rumo programado não equivale a reconhecer obstáculos, avaliar profundidade disponível ou decidir uma passagem em canal restrito. O piloto automático precisa ser compreendido como controlador de uma função delimitada. A responsabilidade de analisar a situação e determinar a condição de uso permanece na organização operacional da embarcação.

A possibilidade de intervenção manual é examinada junto com sua acessibilidade. Não basta existir uma função de desativação se o operador não consegue reconhecê-la, alcançá-la ou utilizá-la durante uma anormalidade. Propõe-se testar o retorno ao controle manual em ambiente controlado, preservando supervisão e evitando simulações perigosas em navegação real. O resultado esperado é a comprovação da função e o registro de sua sequência, sem inferir experiência ou desempenho da tripulação.

3 Metodologia

3.1 Delineamento e limites da pesquisa

A pesquisa tem natureza aplicada, abordagem qualitativa e caráter exploratório e descritivo, complementados por cálculos determinísticos. Os procedimentos compreendem revisão bibliográfica e documental, organização das funções dos equipamentos e desenvolvimento de um estudo técnico hipotético. Não foram realizados ensaios embarcados, entrevistas, medições de consumo ou análise estatística de acidentes. O modelo permite avaliar coerência e dependências, preservando a necessidade de posterior validação.

As fontes foram organizadas segundo o tipo de argumento que sustentam. A literatura ambiental contextualiza clima, secas, erosão e condições regionais. Os documentos normativos ajudam a examinar responsabilidades, requisitos e escopos. As orientações de equipamentos apoiam a discussão de instalação e funcionamento. Os resultados quantitativos decorrem das premissas do modelo, enquanto as conclusões qualitativas decorrem da relação entre funções, limitações e cenários de falha.

O procedimento de síntese conserva as distinções entre função, equipamento, dado e decisão. A instalação física de um dispositivo é analisada separadamente da validade da informação que ele fornece. A existência de uma segunda tela é diferenciada da existência de uma fonte independente. A energia nominal do banco é diferenciada da energia entregue às cargas. Essas distinções orientam os critérios de análise apresentados nas seções seguintes.

3.2 Definição dos requisitos e rastreabilidade

As condições ambientais devem ser consideradas devido à exposição dos equipamentos à umidade, variações de temperatura, vibrações, impactos e possíveis interferências eletromagnéticas. Esses fatores podem influenciar diretamente o desempenho e a durabilidade dos componentes instalados na embarcação, sendo necessário selecionar equipamentos compatíveis com o ambiente de operação.

A especificação também deve estabelecer os requisitos de integração entre os diferentes sistemas embarcados, permitindo o compartilhamento adequado de informações entre equipamentos de navegação, comunicação, identificação, monitoramento e segurança. A

compatibilidade das interfaces deve ser verificada durante o planejamento, de modo a reduzir possíveis falhas de comunicação e garantir o correto funcionamento do conjunto.

A implantação deve começar por requisitos formulados de maneira verificável. Expressões como “sistema seguro” ou “alta confiabilidade” descrevem intenções, mas não definem um teste. Neste trabalho, cada intenção é decomposta em função, condição de operação, critério de avaliação e evidência necessária. Um requisito de comunicação, por exemplo, identifica o equipamento utilizado, a fonte de energia disponível e o procedimento de conferência da comunicação em condições autorizadas.

A matriz proposta associa posicionamento a receptor e referência alternativa; profundidade a transdutor, indicação e configuração de referência; comunicação a rádio, antena e alimentação; continuidade elétrica a banco, proteção e transferência. Não se afirma que esses componentes bastam para cumprir todas as exigências de uma embarcação. O enquadramento depende da classificação, porte, serviço, área de operação e regras aplicáveis, a serem definidos em projeto real.

Cada requisito deve manter ligação com sua origem. Quando decorre de documento normativo, registra-se documento, versão e condição de aplicabilidade; quando decorre de premissa de projeto, identifica-se como proposta; quando decorre de fabricante, registra-se modelo e manual. A separação permite que alterações futuras sejam avaliadas sem tratar uma escolha acadêmica como obrigação legal. Também impede que um cálculo correto seja apresentado como prova de conformidade de todo o sistema.

3.3 Instalação física e integração dos equipamentos

A integração dos equipamentos consiste na interligação dos diferentes sistemas por meio de redes, interfaces e conexões compatíveis, permitindo o compartilhamento de informações entre os dispositivos. Essa integração possibilita, por exemplo, que dados de posicionamento provenientes do GNSS sejam utilizados pelo plotter e por outros sistemas de navegação, enquanto informações do AIS, radar e ecobatímetro podem ser apresentadas de forma integrada.

Os sensores e dispositivos de navegação devem possuir posicionamento compatível com sua finalidade. Antenas GNSS e AIS, por exemplo, devem ser instaladas em locais que proporcionem condições adequadas de recepção e transmissão dos sinais. O radar deve possuir posicionamento que favoreça a cobertura da área de interesse, enquanto o transdutor do

ecobatímetro deve ser instalado em local adequado, com menor exposição a turbulências e interferências provocadas pelo deslocamento da embarcação.

A fixação dos equipamentos deve ser realizada de maneira segura e compatível com as características estruturais do local de instalação. Os cabos e conexões devem ser organizados e protegidos contra esforços mecânicos, umidade e possíveis danos durante a operação ou manutenção.

Os conectores devem ser compatíveis com os equipamentos e adequados às condições do ambiente embarcado. As conexões devem apresentar boa fixação e proteção contra umidade e corrosão, reduzindo a possibilidade de mau contato, interrupção de sinais ou falhas na alimentação elétrica.

Também devem ser consideradas as características específicas dos equipamentos de navegação e comunicação, uma vez que conexões inadequadas, cabos mal instalados ou problemas de aterramento podem provocar interferências e comprometer a transmissão de sinais. Dessa forma, a instalação deve seguir as orientações dos fabricantes e os critérios técnicos aplicáveis.

3.4 Inventário de cargas e fronteiras do dimensionamento

O dimensionamento diferencia inventário de equipamentos, demanda das cargas, energia retirada do armazenamento e energia necessária à recarga. Misturar essas fronteiras pode duplicar perdas ou omiti-las. A tabela básica descreve consumo nos terminais de oito grupos de cargas de 12 V. O cenário ampliado acrescenta hipóteses de monitoramento, referência de rumo, rede e conectividade, além de uma provisão energética. A demanda de 2.510 Wh/dia é utilizada como envelope de projeto nas análises seguintes.

Para a geração fotovoltaica, utiliza-se fator efetivo de 80% entre potência-pico, HSP e energia disponibilizada ao atendimento diário. Esse fator agrega perdas da via solar como hipótese simplificadora. Não é aplicado novamente sobre o resultado quando se calcula a diferença entre geração e demanda. Um projeto detalhado deve separar controladores, conversores, baterias, temperatura e sombreamento em modelos compatíveis.

O cálculo utiliza potência como produto de tensão e corrente e energia como produto de potência pelo tempo de funcionamento. A soma das potências define uma referência de demanda simultânea, enquanto a soma das energias define o consumo no período. A seleção de fontes,

condutores e proteção exige ainda verificar picos, condições térmicas e limites dos equipamentos. Por isso, consumo diário e corrente máxima não são tratados como grandezas intercambiáveis.

3.5 Modelagem da autonomia e da geração complementar

A energia nominal do banco é calculada por $E_{nom} = V \times C$. A energia entregue às cargas é representada por $E_{ent} = V \times C \times DoD \times \eta \times f_{cap}$, em que DoD representa a profundidade de descarga, η a eficiência equivalente de entrega e f_{cap} a capacidade remanescente. A autonomia resulta de $T = E_{ent} / E_d$, com demanda diária E_d. A capacidade mínima para N dias é $C_{min} = E_d \times N / (V \times DoD \times \eta \times f_{cap})$.

Para o cenário ampliado, adotam-se 24 V, demanda de 2.510 Wh/dia, dois dias de autonomia, profundidade de descarga de 50%, eficiência de 90% e capacidade remanescente de 80%. Os fatores expressam hipóteses diferentes: capacidade remanescente descreve a fração de capacidade considerada disponível, enquanto eficiência descreve a entrega energética no caminho até a carga. A separação impede que reduções de natureza distinta sejam confundidas.

A geração fotovoltaica é estimada por $E_{FV} = P_{inst} \times HSP \times \eta_{FV}$, com potência instalada de 1.100 Wp e fator efetivo de 80%. As horas de sol pleno são utilizadas como cenários de sensibilidade. O saldo diário é a diferença entre geração estimada e demanda. A recuperação após contingência é analisada pelo saldo disponível, sem atribuir ao modelo agregado a precisão de uma curva real de carga.

A análise de condutores utiliza a queda de tensão no percurso de ida e retorno, considerando comprimento, corrente, resistividade e seção. As conexões são examinadas como resistência adicional. A aceitação depende das condições reais de instalação e da faixa de alimentação do equipamento, não de um percentual universal adotado sem referência ao projeto.

3.6 Cenários qualitativos e critérios de verificação

A análise de modos e efeitos de falha organiza condições iniciadoras, consequências e medidas de detecção. Neste estudo, a FMEA é qualitativa. Não são atribuídas taxas de falha, probabilidades, frequência de ocorrência ou números de prioridade de risco sem base empírica. As classes utilizadas expressam relevância funcional no cenário hipotético, e não uma distribuição estatística de acidentes.

O modelo distingue falha de energia, falha de informação e falha de uso. A primeira pode retirar o equipamento ou causar reinicialização; a segunda pode gerar dado ausente, vencido ou incoerente; a terceira envolve interpretação, configuração ou resposta inadequada. A separação ajuda a definir controles diferentes. Inspecionar terminais não corrige necessariamente unidade de profundidade configurada de forma errada; treinar interpretação não corrige uma proteção elétrica incompatível.

O efeito local é relacionado ao sistema onde a falha ocorre, enquanto o efeito funcional considera a informação ou ação perdida. Um defeito em conversor tem efeito local elétrico e pode causar perda funcional simultânea de comunicação e posicionamento. Esse encadeamento é o principal foco da análise. As medidas propostas devem atuar sobre a causa ou sobre a preservação da função, deixando claro o alcance de cada uma.

Os quadros de síntese reúnem modos de falha, efeitos e verificações propostas. Não se registra aprovação de equipamento ou de instalação. A FMEA permite explicitar dependências que o inventário de cargas não revela, orientando uma futura avaliação de projeto e manutenção.

3.7 Comissionamento manutenção e gestão de alterações

Inicialmente, devem ser realizadas inspeções visuais e verificações das conexões elétricas, cabos, conectores, dispositivos de proteção, aterramento e fixação dos equipamentos. Também devem ser verificadas as condições de alimentação elétrica, observando-se os níveis de tensão, a continuidade dos circuitos e a correta atuação dos dispositivos de proteção.

Posteriormente, devem ser realizados testes individuais dos equipamentos e, em seguida, testes de integração entre os diferentes sistemas. Equipamentos como GNSS, radar, AIS, rádio VHF, ecobatímetro e plotter devem ser avaliados quanto ao funcionamento, comunicação e transmissão adequada das informações.

O comissionamento compreende a verificação final do sistema em condições próximas às de operação, permitindo confirmar o desempenho dos equipamentos e a estabilidade da instalação. Eventuais falhas identificadas durante os testes devem ser registradas, analisadas e corrigidas antes da entrada definitiva do sistema em funcionamento.

A manutenção é organizada neste estudo segundo a função preservada e o tipo de evidência obtida. A inspeção de um conector não comprova, isoladamente, comunicação adequada; a comunicação adequada não comprova ausência de degradação mecânica. O plano

combina inspeção física, verificação elétrica, teste funcional e conferência documental. As atividades são propostas para adaptação aos manuais e à operação, sem periodicidades universais.

Para a alimentação, os registros incluem tensão na fonte e na carga, condição de terminais, identificação das proteções e estado do carregamento. Para a navegação, incluem validação das fontes de posição e rumo, configuração do ecobatímetro, atualização dos dados cartográficos e observação de mensagens de erro. Para a comunicação, incluem integridade da antena, cabos, conectores e ensaio permitido de transmissão e recepção. O responsável deve registrar o contexto do teste, porque resultados obtidos em repouso não representam necessariamente funcionamento sob carga.

Defeitos intermitentes exigem atenção particular. Uma conexão que falha apenas com vibração ou aquecimento pode apresentar condição normal no momento da inspeção. Propõe-se correlacionar registros de tensão, horário, carga e comportamento do equipamento antes de substituir componentes. O diagnóstico deve preservar segurança elétrica e seguir procedimentos do fabricante; não se recomenda produzir falhas intencionalmente em circuitos ativos de uma embarcação em operação.

Uma manutenção concluída precisa deixar evidência de recuperação da função. O registro deve informar defeito identificado, intervenção, componente substituído, configuração alterada e verificação final. A organização desses dados permite relacionar a ação executada à condição observada e acompanhar a configuração da instalação.

Alterar um equipamento pode modificar consumo, faixa de tensão, interfaces e requisitos de instalação. Mesmo uma substituição considerada equivalente precisa ser conferida. Um novo radar com maior demanda pode aumentar a queda de tensão; um conversor diferente pode introduzir limitação de corrente; uma alteração de rede pode mudar a origem do dado utilizado pelo AIS. A gestão de alterações busca identificar essas consequências antes da entrada em operação.

O procedimento proposto inicia com descrição da alteração e de sua justificativa. Em seguida, compara-se o componente novo com os requisitos do sistema, atualizam-se inventário de cargas e diagramas e definem-se testes de regressão das funções afetadas. A aprovação técnica não deve ser inferida apenas pela ausência de mensagens de erro. Ela depende de critérios definidos e de evidências compatíveis com o alcance da mudança.

Diagramas “como instalado” devem representar a instalação efetiva, incluindo identificação dos circuitos, dispositivos de proteção, fontes, conversores e interfaces. Neste trabalho, os diagramas são conceituais. A autora não dispõe de levantamento que autorize denominá-los documentação “como instalado” de uma embarcação real. Essa distinção é necessária para evitar que um recurso didático seja usado como base de manutenção sem conferência física.

4 Resultados e discussão

4.1 Configuração funcional do estudo técnico

O estudo considera uma embarcação genérica de navegação interior com equipamentos de posicionamento, detecção, identificação, comunicação, profundidade e monitoramento. Não são definidos casco, comprimento, número de passageiros, arqueação ou rota real, pois esses dados não foram fornecidos. Portanto, não se produz seleção normativa definitiva nem conclusão de conformidade. O objetivo é demonstrar como os subsistemas se relacionam na avaliação de disponibilidade.

A arquitetura elétrica utiliza banco principal de 24 V, conversão para cargas de 12 V quando necessária e geração complementar de 1.100 Wp. A recarga por outras fontes é prevista conceitualmente, sem capacidade quantificada. O banco didático de 600 Ah é avaliado para dois dias de demanda ampliada, com profundidade de descarga de 50%, eficiência de entrega de 90% e capacidade remanescente de 80%. As premissas são repetidas aqui para delimitar a interpretação do estudo.

A arquitetura de informação permite acesso às variáveis locais, identifica dependências de fontes comuns e propõe referências alternativas. Nenhum desenho é denominado instalação executada. Circuitos, proteções e conversores permanecem sujeitos à seleção de equipamentos e ao projeto executivo. A representação indica funções e pontos de atenção, e não uma lista de materiais pronta para montagem.

O estudo é desenvolvido por cenários. Cada cenário descreve condição iniciadora, informação afetada, consequência plausível, resposta de projeto e evidência de teste. Não se atribuem probabilidades sem dados. A classificação de prioridade é qualitativa e depende do

contexto. Os quadros de síntese permitem revisar as premissas e reproduzir os cálculos apresentados, preservando a distinção entre proposta analítica e resultado de ensaio.

A arquitetura é decomposta em energia, aquisição, transmissão e apresentação. Na camada de energia, fontes e armazenamento sustentam as cargas. Na aquisição, sensores produzem posição, rumo, profundidade e detecção. Na transmissão, interfaces encaminham dados. Na apresentação, o operador visualiza, compara e reconhece condições. A divisão ajuda a identificar onde uma falha pode ocorrer sem presumir que todos os equipamentos compartilham a mesma topologia.

O primeiro ponto de análise é a possibilidade de falha comum. Um banco único pode afetar vários sistemas; um conversor único pode retirar diversas cargas de 12 V; uma única fonte GNSS pode fornecer posição a mais de um equipamento; uma tela única pode concentrar apresentação. A independência precisa ser demonstrada por caminho de energia e caminho de informação. Duplicar componentes sem analisar esses caminhos pode produzir redundância apenas aparente.

A proposta conceitual inclui proteção por circuitos, identificação de cargas e preservação de referências locais. Um receptor com indicação própria pode continuar útil se a rede falhar, desde que sua alimentação e o acesso ao operador sejam preservados. Uma bússola magnética oferece referência baseada em mecanismo diferente, mas requer instalação e interpretação adequadas. A complementação de fontes não permite considerar qualquer instrumento como substituto completo de outro.

A configuração final precisa demonstrar o comportamento de transferência e de falha. Um banco auxiliar não cria continuidade automática se a transferência for inacessível ou se ambos os caminhos dependem do mesmo componente defeituoso. A análise dessas dependências orienta o projeto e seus testes; sua descrição conceitual não comprova a existência de alimentação de emergência regulamentar.

4.2 Consolidação do inventário e da demanda

O inventário básico contempla oito grupos de cargas. As potências e tempos de uso são didáticos e resultam em 123,6 W de potência instalada e 933,6 Wh/dia de consumo. Essa base é preservada para demonstrar o levantamento inicial, mas não é utilizada como se produzisse

automaticamente o consumo de 2.510 Wh/dia empregado no cenário ampliado. A diferença é explicitada pelas cargas e pela provisão acrescentadas.

A demanda ampliada inclui bússola eletrônica, monitoramento, terminal satelital hipotético e rede auxiliar. As parcelas adicionais somam 1.376 Wh/dia e levam o subtotal a 2.309,6 Wh/dia. A provisão de projeto de 200,4 Wh/dia corresponde a aproximadamente 8,68% desse subtotal e completa a demanda de 2.510 Wh/dia. A provisão é uma escolha de dimensionamento, não uma carga medida, e não deve ser aplicada novamente como perda de conversão.

Tabela 1 Inventário básico de cargas

Carga	Potência em W	Uso em h por dia	Energia em Wh por dia
GNSS	12,0	8	96,0
Plotter	18,0	8	144,0
Radar	36,0	6	216,0
AIS	9,6	8	76,8
Rádio VHF	24,0	6	144,0
Ecobatímetro	8,4	6	50,4
Iluminação de navegação	12,0	10	120,0
Sistema de alarme	3,6	24	86,4
Total	123,6	Variável	933,6

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

Tabela 2 Reconciliação da demanda ampliada

Parcela	Critério	Energia em Wh por dia
Inventário básico	Oito grupos	933,6
Bússola eletrônica	6 W durante 24 h	144,0
Monitoramento	20 W durante 24 h	480,0
Terminal satelital hipotético	70 W durante 8 h	560,0
Rede auxiliar	8 W durante 24 h	192,0
Subtotal	Antes da provisão	2.309,6
Provisão	8,68% do subtotal	200,4
Demanda de projeto	Subtotal e provisão	2.510,0

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

O consumo diário não dimensiona sozinho o conversor, a proteção ou os cabos. Esses elementos também precisam suportar as correntes instantâneas previstas. O rádio VHF ilustra a diferença: o tempo de transmissão pode ser pequeno, mas a corrente durante a transmissão pode superar a corrente de recepção. A corrente média simplificada do inventário não é suficiente para especificar a proteção definitiva do equipamento.

Propõe-se calcular separadamente os regimes de espera, recepção e transmissão, utilizando $E_{VHF} = P_{espera} \times t_{espera} + P_{recepção} \times t_{recepção} + P_{transmissão} \times t_{transmissão}$. Os tempos devem somar o período analisado. Se o manual apresentar correntes em vez de potências, utiliza-se a tensão de alimentação correspondente. O levantamento precisa registrar se o valor informado é típico, máximo, medido ou estimado.

4.3 Barramento de alimentação e continuidade elétrica

Adota-se barramento principal de 24 Vcc com conversores DC-DC adequados às cargas de 12 Vcc do inventário básico. A tensão de saída e a faixa de entrada serão definidas pelos equipamentos selecionados. Não se admite ligação direta de carga exclusivamente de 12 V a banco de 24 V. A tensão maior no barramento reduz a corrente para a mesma potência, sem eliminar a necessidade de proteção e análise de perdas.

A distribuição da energia deve ser realizada por meio de um barramento de corrente contínua, a partir do qual as cargas são alimentadas individualmente ou por grupos de circuitos. Cada circuito deverá possuir proteção compatível com a corrente prevista e com a capacidade dos condutores utilizados. Essa configuração facilita a manutenção, a identificação de falhas e o isolamento de determinados equipamentos sem necessariamente interromper a alimentação de todo o sistema.

A definição da arquitetura de alimentação também deve considerar a necessidade de separar, quando aplicável, cargas essenciais e cargas não essenciais. Os equipamentos diretamente relacionados à segurança da navegação, comunicação e monitoramento devem possuir prioridade no fornecimento de energia. Essa organização permite estabelecer critérios de continuidade de funcionamento e contribui para evitar que cargas secundárias comprometam a disponibilidade energética dos sistemas essenciais.

4.4 Dimensionamento revisado do banco de baterias

A energia necessária para dois dias no cenário ampliado é de 5.020 Wh. O banco inicial de 24 V e 420 Ah possui energia nominal de 10.080 Wh. Limitando a descarga a 50%, o resultado ideal é de 5.040 Wh, apenas 20 Wh acima da demanda. Essa comparação considera capacidade integral e ausência de perdas; por isso, não basta para concluir que a instalação atenderá à autonomia pretendida.

Aplicando eficiência equivalente de 90% e capacidade remanescente de 80%, a energia entregue por esse banco torna-se 10.080 × 0,50 × 0,90 × 0,80 = 3.628,8 Wh. A autonomia cai para aproximadamente 1,45 dia. O resultado altera a conclusão da avaliação ideal: a alternativa de 420 Ah deixa de atender à meta de dois dias nas condições revisadas.

A capacidade mínima calculada é de 581,02 Ah. Adota-se 600 Ah como arredondamento didático, resultando em energia nominal de 14.400 Wh e energia entregue de 5.184 Wh. A autonomia é de aproximadamente 2,07 dias. A margem sobre a demanda de dois dias é de 164 Wh, equivalente a 3,27% dessa demanda. A alternativa atende aritmeticamente ao cenário central, mas apresenta tolerância limitada a mudanças de consumo, estado inicial ou capacidade.

A seleção real de baterias precisa considerar tecnologia, curvas de descarga, corrente, temperatura, ventilação, estado de carga e condições de instalação. A organização das unidades e dos percursos também deve ser verificada, pois a associação física não garante distribuição

adequada de correntes (VICTRON ENERGY, s.d.b). O cálculo de energia não substitui a análise de potência de entrega nem a proteção do banco.

Tabela 3 Comparação da autonomia sob as hipóteses revisadas

Banco em Ah	Energia entregue em Wh	Dias com 933,6 Wh	Dias com 2.510 Wh
420	3.628,8	3,89	1,45
500	4.320,0	4,63	1,72
600	5.184,0	5,55	2,07
700	6.048,0	6,48	2,41
800	6.912,0	7,40	2,75

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

Para o banco de 600 Ah, a autonomia é $T = V \times C \times DoD \times \eta \times f_{cap} / E_d$. Com as premissas de projeto, T = 2,065 dias. A margem em relação aos dois dias é de 164 Wh. Esse valor representa aproximadamente 6,53% da energia de um dia, mas apenas 3,27% da demanda de dois dias. A comparação correta da margem exige declarar o denominador utilizado.

Se a demanda aumentar 20%, passando a 3.012 Wh/dia, a autonomia cai para 1,72 dia. Se a capacidade remanescente diminuir para 70%, mantendo os demais parâmetros, a energia disponível passa a 4.536 Wh e a autonomia cai para 1,81 dia. Os cálculos demonstram que o arredondamento para 600 Ah não cria grande tolerância a alterações simultâneas do cenário.

A análise também deve verificar a condição inicial. O modelo básico supõe disponibilidade de toda a faixa de descarga adotada. Se o banco iniciar a viagem com estado de carga inferior ao pressuposto, a energia utilizável será menor. Por exemplo, partir de 90% e limitar a descarga em 50% do estado de carga deixa uma faixa de 40 pontos percentuais, e não 50. O modelo de autonomia precisa utilizar essa diferença.

Não se deduz, desses exemplos, uma capacidade mínima universal. A conclusão é metodológica: a autonomia deve ser comprovada para demanda, estado inicial e estado de saúde definidos. As variáveis são mantidas separadas para permitir a revisão das hipóteses e a reprodução dos cálculos.

4.5 Geração fotovoltaica e recuperação após contingência

A instalação dos módulos fotovoltaicos em uma embarcação requer atenção especial devido às características do ambiente de operação. O posicionamento deve buscar reduzir a ocorrência de sombreamentos provocados por mastros, estruturas, equipamentos e demais componentes da embarcação. Também devem ser consideradas as condições de vibração, umidade, exposição à água, temperatura e possíveis impactos mecânicos.

Com demanda de 2.510 Wh/dia e fator efetivo de 80%, a energia de referência antes das perdas é de 3.137,5 Wh/dia. Para cinco horas de sol pleno, a potência simplificada de equilíbrio é de 627,5 Wp. A proposta utiliza dois módulos hipotéticos de 550 Wp, totalizando 1.100 Wp. A diferença entre potência de equilíbrio e potência instalada amplia a produção potencial no cenário central, mas não assegura suficiência em qualquer sequência de dias.

O ponto de equilíbrio do conjunto de 1.100 Wp é de aproximadamente 2,85 horas de sol pleno. Acima dele, o modelo apresenta saldo positivo; abaixo, a energia disponível do banco tende a diminuir se não houver outra fonte. Próximo ao equilíbrio, sobra pouca energia para repor a reserva usada durante uma contingência. Essa distinção impede interpretar atendimento médio e recuperação como o mesmo requisito.

Tabela 4 Geração e saldo diário do cenário solar

HSP	Geração em Wh	Saldo em Wh	Dias para repor 5.020 Wh
2,0	1.760	−750	Não recupera
2,5	2.200	−310	Não recupera
3,0	2.640	130	38,62
3,5	3.080	570	8,81
4,0	3.520	1.010	4,97
4,5	3.960	1.450	3,46
5,0	4.400	1.890	2,66

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

Manter o sistema por dois dias sem recarga não resolve a etapa seguinte. O banco precisa recuperar a energia retirada enquanto continua alimentando as cargas. Com 1.100 Wp, cinco HSP

e fator efetivo de 80%, a geração diária estimada é de 4.400 Wh. Subtraindo 2.510 Wh de atendimento diário, o saldo idealizado é de 1.890 Wh/dia para recuperação, na fronteira energética definida.

Para repor o equivalente a 5.020 Wh consumidos durante dois dias, seriam necessários aproximadamente 2,66 dias com esse saldo constante. A estimativa simplifica o processo de carga e não representa a curva real de aceitação da bateria. Ela já mostra, contudo, que retornar a um dia com boa insolação não significa recuperar imediatamente a reserva operacional.

Com três HSP, a geração estimada é de 2.640 Wh/dia, deixando saldo de apenas 130 Wh/dia. A reposição de 5.020 Wh exigiria aproximadamente 38,62 dias nesse modelo, tornando essa condição inadequada como estratégia prática de recuperação isolada. Com duas HSP, a geração cai para 1.760 Wh/dia e surge déficit de 750 Wh/dia. Nessa condição, a reserva continua diminuindo.

A fonte solar é, portanto, tratada como complementar. Alternador e carregamento externo podem participar da recuperação, desde que tecnicamente compatíveis e incluídos no balanço. Os cálculos não atribuem rendimento garantido à instalação. Devem ser substituídos por dados locais e curvas reais em projeto executivo. O resultado reforça a necessidade de planejar contingência e recuperação como etapas distintas.

A estimativa de corrente de 1.100 W divididos por 24 V resulta em 45,83 A e serve apenas como aproximação de saída. A escolha do controlador exige verificar a tensão de circuito aberto do arranjo, corrente de curto, faixa de rastreamento, tensão de carga e limites de entrada e saída. A capacidade de 600 Ah não informa, isoladamente, a corrente adequada de carregamento. O projeto também deve considerar a aceitação de carga da tecnologia escolhida e o atendimento simultâneo das cargas.

4.6 Condutores proteção e resistência das conexões

A definição dos dispositivos de proteção deve considerar as características elétricas dos circuitos, tais como tensão nominal, corrente de operação, potência das cargas, capacidade de condução dos condutores e características das fontes de alimentação. No presente estudo, são considerados circuitos alimentados pelo banco de baterias de 24 V, pelo sistema fotovoltaico e pelos equipamentos eletroeletrônicos empregados na navegação e na segurança da embarcação.

A partir da corrente calculada, deve-se selecionar o dispositivo de proteção considerando também a capacidade de condução de corrente do condutor. Dessa forma, o dispositivo de proteção deve apresentar características compatíveis com o circuito, evitando tanto atuações indevidas durante a operação normal quanto a ausência de proteção adequada em situações de falha.

O dimensionamento da proteção dos circuitos deve ser realizado individualmente, considerando a corrente de cada carga, a tensão de alimentação, a seção dos condutores, a corrente de curto-circuito disponível e as características dos equipamentos.

A escolha dos condutores deve considerar a corrente elétrica do circuito, a tensão de alimentação, o comprimento do circuito, a capacidade de condução de corrente do cabo, a queda de tensão admissível e as condições ambientais de instalação. Também devem ser consideradas as características específicas do ambiente embarcado, como vibração, umidade, temperatura e possibilidade de exposição à água.

Além da capacidade de condução de corrente, o dimensionamento dos condutores deve considerar a queda de tensão. Esse fator é especialmente relevante em sistemas de baixa tensão, como os circuitos de 12 V e 24 V, utilizados em sistemas eletroeletrônicos embarcados.

Para reduzir as perdas, deve-se evitar percursos desnecessariamente longos e utilizar uma seção adequada ao comprimento do circuito e à corrente transportada,os cabos conectados ao banco de baterias requerem atenção especial, pois podem ser submetidos a correntes elevadas. O dimensionamento deve considerar a corrente máxima esperada, o comprimento dos cabos e a capacidade de condução do condutor.

A relação de coordenação adotada é $I_b \leq I_n \leq I_z$, em que I_b representa a corrente de projeto, I_n a corrente nominal da proteção e I_z a capacidade de condução do condutor. A verificação deve ser complementada por tensão de utilização, capacidade de interrupção, características da fonte e condições de instalação. Um dispositivo adequado para determinada aplicação não pode ser considerado equivalente apenas por possuir a mesma corrente nominal.

Para corrente contínua, a queda de tensão é calculada por $\Delta V = 2 \times L \times I \times \rho / S$, utilizando comprimento de ida L, corrente I, resistividade ρ e seção S. No exemplo de 10 A, 10 m de ida, cobre com resistividade de 0,0175 $\Omega \cdot mm^2/m$ e seção de 4 mm^2, a queda é de 0,875 V. Em um circuito nominal de 24 V, corresponde a aproximadamente 3,65%, sem incluir conexões e ajuste de resistividade por temperatura.

O exemplo de 10 A, percurso de ida de 10 m, seção de 4 mm² e resistividade de 0,0175 Ω·mm²/m resulta em 0,875 V de queda no par de condutores. Essa estimativa não inclui conexões nem aumento de resistividade por temperatura. Portanto, o cálculo deve ser entendido como parcela da queda total, e não como previsão completa da tensão nos terminais.

Se forem acrescentados 20 mΩ de resistência equivalente nas conexões, a queda adicional será I × R = 10 × 0,020 = 0,20 V. A queda total passará a 1,075 V. Em 24 V, isso corresponde a 4,48%; em 12 V, a 8,96%, para o mesmo valor absoluto de corrente e resistência. A comparação mostra a sensibilidade de circuitos de baixa tensão, mas não significa que a corrente permanece igual quando se mantém a potência e se altera a tensão.

Para a mesma carga de 120 W e percurso, a corrente ideal em 12 V é 10 A; em 24 V é 5 A. A queda no cabo de 4 mm² cai de 0,875 V para 0,4375 V, e a perda Joule diminui de 8,75 W para 2,1875 W. O benefício depende de compatibilidade das cargas e perdas de conversão. A adoção de 24 V não autoriza eliminar o conversor para um equipamento de 12 V.

A literatura técnica de fabricantes apresenta relações entre resistência, dimensionamento e organização de circuitos em corrente contínua (VICTRON ENERGY, s.d.a). A aplicação numérica acima é um cálculo próprio, com parâmetros didáticos. Não se fixa um percentual admissível universal; a aceitação deve utilizar faixa de tensão do equipamento, projeto e regras aplicáveis.

Tabela 5 Efeito da seção no exemplo de 10 A e 10 m de ida

Seção em mm²	Queda em V	Queda em 24 V	Perda em W
2,5	1,400	5,83%	14,00
4,0	0,875	3,65%	8,75
6,0	0,583	2,43%	5,83
10,0	0,350	1,46%	3,50
16,0	0,219	0,91%	2,19

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

4.7 Redundância e dependências comuns

Para a função de posicionamento, o sistema GNSS constitui uma das principais fontes de informação de localização da embarcação. Como recurso complementar, podem ser utilizados

equipamentos ou instrumentos independentes, tais como outro receptor GNSS, bússola eletrônica, bússola magnética e cartas de navegação. A utilização de diferentes fontes de informação permite comparar os dados disponíveis e disponibilizar uma referência alternativa em caso de falha de determinado equipamento.

Na função de identificação e acompanhamento do tráfego, o AIS e o radar apresentam características complementares. O AIS fornece informações de identificação e dados transmitidos por embarcações equipadas com o sistema, enquanto o radar permite a detecção de alvos por meio da reflexão de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, a utilização conjunta desses equipamentos proporciona maior disponibilidade de informações para o acompanhamento do ambiente de navegação.

No sistema de comunicação, o rádio VHF representa um equipamento fundamental para a comunicação operacional e de segurança. A disponibilidade de uma fonte alternativa de alimentação, circuito independente ou equipamento de reserva pode contribuir para a continuidade das comunicações em situações de falha do sistema principal. A definição desses recursos deve considerar a criticidade da operação e os requisitos aplicáveis ao tipo de embarcação.

A redundância também deve ser considerada na alimentação elétrica dos equipamentos. O sistema deve ser organizado de forma que os equipamentos essenciais não dependam exclusivamente de um único circuito ou dispositivo. A utilização de circuitos independentes, dispositivos de proteção individualizados e banco de baterias adequadamente dimensionado reduz a possibilidade de que uma falha localizada provoque a interrupção simultânea de diversos equipamentos.

As referências alternativas devem ser avaliadas pelo que efetivamente preservam. Um segundo GNSS pode manter o posicionamento se possuir caminho adequado e não compartilhar a mesma falha. A bússola magnética oferece orientação por mecanismo distinto, mas não substitui a posição. O radar pode manter a detecção de alvos sem fornecer a identificação transmitida pelo AIS. Essa separação evita apresentar complementaridade como equivalência integral.

4.8 Condições hidroclimáticas e planejamento da navegação

A navegação amazônica ocorre em uma rede de rios cuja condição operacional varia no espaço e no tempo. A revisão de Fisch, Marengo e Nobre (1998) descreve características

climáticas e sistemas atmosféricos que atuam na região. Marengo et al. (2024) discutem variabilidade de longo prazo e extremos de temperatura e hidrometeorologia. Essas fontes sustentam a necessidade de considerar o ambiente como variável do planejamento, e não como condição invariável de uma rota.

Para a Engenharia Elétrica, a relevância desse contexto está na tradução de condições ambientais em requisitos de informação e disponibilidade. Variações de profundidade exigem acompanhamento e interpretação da referência de medição; visibilidade reduzida aumenta a importância de dados complementares de detecção e posicionamento; grandes distâncias de apoio tornam mais relevante a continuidade das comunicações e da energia. A ligação entre fenômeno e equipamento constitui a análise desenvolvida nesta seção, sem atribuir aos estudos climáticos testes de desempenho de sistemas embarcados.

A cheia e a vazante alteram a geometria operacional percebida pelo navegante. Uma rota utilizada em uma estação não deve ser presumida como equivalente em outra. A profundidade disponível, o acesso a locais de embarque e a visibilidade de referências físicas precisam ser avaliados no contexto da viagem. A literatura hidroclimática evidencia a variabilidade, mas não fornece, por si só, um mapa operacional válido para todos os trechos amazônicos (MARENGO et al., 2024).

O GNSS contribui ao indicar a posição e permitir o registro da trajetória. O ecobatímetro acrescenta a observação local da profundidade sob seu campo de medição. A associação entre as duas informações é útil para documentar o local e o horário de uma leitura, mas não transforma automaticamente o registro em levantamento hidrográfico. Cobertura, calibração, referência vertical e controle de qualidade seriam necessários para esse uso.

As secas extremas afetam a disponibilidade de água e produzem consequências para transporte e comunidades. Nobre, Arieira e Brandão (2025) discutem eventos recentes e seus impactos sobre níveis de rios amazônicos. O relatório do Sistema de Alerta Hidrológico da Bacia do Amazonas referente a 2024 reúne informações de monitoramento de cheia e vazante e constitui uma referência institucional para contextualização hidrológica (MACIEL et al., 2024).

O mecanismo operacional relevante para esta análise é a diminuição da margem disponível para decisões de passagem. Quando a profundidade se aproxima do calado e das folgas definidas pela operação, pequenos erros de interpretação passam a ser mais importantes. A seleção de escala, a referência do transdutor, a atualidade da carta e o registro da posição

tornam-se variáveis críticas. A conclusão decorre da análise funcional, e não de ensaio realizado durante uma seca.

Neste trabalho, propõe-se classificar os trechos segundo a confiança da informação disponível. Trechos com referência recente e consistente são diferenciados daqueles com dados antigos, conflitantes ou ausentes. A classificação não cria um índice universal nem substitui a decisão de navegação. Ela serve para registrar incertezas e identificar onde a coleta de informação e a revisão do planejamento precisam ser intensificadas.

A coletânea organizada por Borma e Nobre (2013) também reúne temas relacionados às causas e consequências das secas amazônicas. Sua apresentação e seu sumário situam eventos extremos e impactos nos recursos hídricos. Essa contextualização não fornece profundidade operacional para uma rota específica; ela reforça a necessidade de acompanhar condições atuais e reconhecer a escala de cada informação utilizada.

4.9 Cota profundidade e folga sob a quilha

Cota, profundidade e folga sob a quilha são grandezas distintas. A cota expressa nível em relação à referência de uma estação ou sistema. A profundidade refere-se à distância vertical entre uma superfície ou sensor e o fundo. A folga relaciona a posição da quilha ao fundo, considerando calado e condições da embarcação. Confundir essas grandezas pode produzir interpretação inadequada mesmo quando o instrumento funciona corretamente.

No exemplo didático, um ecobatímetro indica 3,20 m abaixo do transdutor. Se o transdutor estiver 0,60 m abaixo da superfície, a profundidade geométrica estimada será 3,80 m. Para calado de 2,30 m, a folga geométrica será 1,50 m. Esse cálculo depende de referência confirmada e não considera todos os efeitos dinâmicos, erros ou margens da operação. Se o equipamento já apresentar profundidade corrigida, acrescentar novamente 0,60 m produzirá erro.

A referência precisa estar documentada e ser conferida após instalação, manutenção ou alteração de configuração. Propõe-se que a ficha registre posição vertical do transdutor, convenção da indicação e método de verificação. O operador deve conseguir identificar se a tela apresenta profundidade abaixo do sensor, abaixo da superfície ou abaixo da quilha. Essa informação deve permanecer compreensível em trocas de turno.

O exemplo não estabelece uma folga segura. A folga mínima depende da embarcação, condição dinâmica, confiança no fundo, regras e planejamento. O papel do sistema eletrônico é

fornecer medida interpretável e indicar suas limitações. A margem operacional é uma decisão técnica que deve ser fundamentada fora do cálculo simplificado.

A integração com GNSS permite associar profundidade a posição e horário, favorecendo registros comparáveis. Para o modelo deste artigo, o registro contém leitura, referência, posição, validade do receptor e identificação de configuração. Caso a posição esteja indisponível, o valor de profundidade pode continuar sendo útil localmente, mas deixa de ter a mesma qualidade para a documentação espacial. A perda de uma informação deve ser indicada separadamente da perda da outra.

4.10 Terras caídas sedimentos e obstáculos

As “terras caídas” constituem expressão regional associada à erosão e ao deslocamento de material das margens. Bandeira et al. (2021) analisaram áreas sujeitas a erosão fluvial em comunidades amazônicas, considerando perigo e vulnerabilidade. Carvalho e Cunha (2012) discutem consequências sociais da erosão na Costa do Miracauera. As fontes mostram que a margem não pode ser tratada como referência física permanentemente estável.

No contexto deste estudo, a consequência operacional examinada é a necessidade de reconhecer alterações de referências e reavaliar trechos próximos a áreas instáveis. O deslocamento de material pode modificar localmente a relação entre margem, superfície e leito. A profundidade e a posição precisam ser interpretadas em conjunto, mantendo atenção a informações recentes sobre a hidrovia. Não se deduz dos estudos uma previsão de deslizamento feita por equipamentos comuns de bordo.

Radar, GNSS e ecobatímetro cumprem funções complementares. O radar pode mostrar ecos de margens e alvos detectáveis; o GNSS indica posição; o ecobatímetro acompanha a profundidade local. Nenhum desses recursos, isoladamente, caracteriza resistência do solo, estabilidade geotécnica ou probabilidade de ruptura da margem. A integração amplia referências disponíveis, mas não equivale a um sistema de alerta de terras caídas.

A análise de bancos e obstáculos deve distinguir o que cada sensor pode observar. Um banco submerso pode não produzir eco útil no radar de superfície. Um tronco parcialmente submerso pode apresentar detecção variável, e um alvo sem transmissor não produzirá símbolo AIS. Assim, a inexistência de indicação eletrônica não comprova a inexistência de risco. O conjunto precisa ser interpretado segundo cobertura e limitações.

Neste artigo, propõe-se uma matriz com três categorias: alvo cooperativo, alvo não cooperativo acima da superfície e condição submersa. O AIS é relacionado à primeira categoria; radar e observação visual à segunda, conforme detectabilidade; ecobatímetro à leitura localizada da terceira. A matriz não prevê detecção perfeita nem desempenho universal. Seu objetivo é impedir substituições indevidas de funções na concepção da arquitetura.

Um erro recorrente de raciocínio consiste em considerar o AIS como alternativa equivalente ao radar. O AIS depende de informação transmitida por estações equipadas; o radar utiliza retorno eletromagnético. Esses mecanismos não cobrem exatamente os mesmos alvos. A duplicidade de símbolos de uma embarcação equipada pode aumentar a capacidade de confronto, mas não elimina a necessidade de procurar outros alvos.

4.11 Chuvas fumaça e navegação noturna

A climatologia amazônica envolve variação espacial e temporal da precipitação e atuação de diferentes sistemas atmosféricos (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998). Para a navegação, o tema é analisado em termos de redução de observação visual, alteração da carga de trabalho e exposição dos equipamentos. O mesmo fenômeno pode afetar a percepção do ambiente e a infraestrutura que produz os dados utilizados como apoio.

A chuva não torna o radar imune às condições meteorológicas. Ecos de precipitação e ajustes de supressão podem influenciar a apresentação de alvos. O operador precisa entender que uma imagem aparentemente limpa pode resultar de configuração que também limita ecos úteis. A resolução MSC.192(79) apresenta padrões de desempenho e requisitos para radar em seu escopo internacional (IMO, 2004). A discussão operacional desta pesquisa não transforma esses requisitos em desempenho comprovado de equipamento não identificado.

Episódios de fumaça constituem uma condição adicional para a percepção do ambiente. A FAPEAM (2018) divulgou pesquisa sobre o impacto das queimadas na qualidade do ar de Manaus e registrou um contexto de dificuldade de visualização. Essa fonte institucional contextualiza a discussão sobre visibilidade, sem medir desempenho de equipamentos embarcados.

Signori et al. (2023) analisaram variabilidade de monóxido de carbono na Região Metropolitana de Manaus e relações com queimadas. O estudo oferece evidência atmosférica, mas não mede desempenho de radar, probabilidade de colisão ou alcance visual de uma

embarcação. Por isso, a ligação com navegação é apresentada como análise operacional deste artigo, sem atribuir aos autores conclusão que não testaram.

Na hipótese de redução da observação visual, aumenta a relevância de informações complementares e de comunicação. Essa relevância não significa que o radar detectará qualquer objeto ou que o GNSS poderá substituir a vigilância. O primeiro depende da detectabilidade dos alvos e de sua configuração; o segundo fornece posição, não imagem do ambiente. A combinação precisa ser associada à avaliação das condições e a procedimentos definidos.

Propõe-se que a verificação de iluminação seja tratada como parte do inventário crítico, conforme a aplicação. O balanço da tabela básica inclui uma carga de iluminação de navegação durante dez horas. Esse tempo é hipótese de cálculo e pode ser insuficiente ou excessivo para uma viagem real. O inventário executivo deverá separar sinalização obrigatória, iluminação de trabalho e iluminação de conforto, porque as funções e prioridades diferem.

Pontos de apoio também exigem avaliação de comunicação e capacidade de manutenção. Um local acessível não significa disponibilidade de peças, carregamento compatível ou assistência técnica. O modelo propõe registrar alternativas de apoio, características de alimentação externa e meios de contato previamente verificados. Esses dados precisam ser atuais e não são preenchidos com nomes ou contatos fictícios neste artigo.

A passagem do regime de navegação para espera ou atracação modifica a demanda energética. Certos sistemas permanecem necessários, enquanto outros podem ser utilizados de maneira diferente. A definição do regime deve partir da operação e dos manuais. O planejamento da reserva não deve pressupor que todos os equipamentos serão desligados durante a espera. Comunicação, alarmes e monitoramento podem continuar consumindo energia por períodos relevantes.

4.12 Acidentes fatores humanos e segurança situacional

Fontes et al. (2023) discutem problemas e desafios da prevenção de acidentes com embarcações de passageiros na Amazônia brasileira, considerando condições regionais e dificuldades de assistência. A pesquisa oferece base científica para relacionar prevenção, contexto operacional e necessidades de informação.

Para relacionar essa literatura ao objeto do estudo, distinguem-se disponibilidade de equipamento, uso adequado e resultado de segurança. Um sistema pode estar instalado e não ser

utilizado; pode ser utilizado e fornecer dado inadequado; pode fornecer dado correto e ter sua informação interpretada de maneira imprópria. A cadeia de contribuição inclui instalação, alimentação, configuração, treinamento, interpretação e resposta. A análise não reduz as causas dos acidentes à ausência de tecnologia.

A Secretaria de Segurança Pública do Amazonas registra ações de enfrentamento a crimes praticados em ambientes fluviais, incluindo pirataria nos rios (AMAZONAS, 2025). Esses registros demonstram a presença do tema no contexto institucional. Não constituem, isoladamente, base para calcular frequência de ataques, classificar toda a Amazônia como área homogênea de risco ou estabelecer eficácia de equipamento eletrônico contra criminalidade.

Neste artigo, o assunto é delimitado à consciência situacional e à comunicação. A embarcação pode precisar informar posição, condição e necessidade de apoio por meios disponíveis e previamente definidos. GNSS, VHF e conectividade de maior alcance podem contribuir para essa transmissão. O AIS possui finalidade e limitações próprias e não deve ser tratado como dispositivo de proteção contra abordagens ou ferramenta de reconhecimento de intenção de um alvo.

A proposta técnica inclui disponibilidade de meios de comunicação, registro de contatos oficiais pertinentes e controle de acesso às informações do sistema. Decisões sobre compartilhamento de rotas e dados precisam considerar o contexto e as regras aplicáveis. A pesquisa não recomenda desligar equipamentos exigidos, ocultar informações obrigatórias ou adotar procedimentos policiais. A atuação das autoridades e os planos de segurança permanecem fora da arquitetura elétrica didática.

4.13 Interação do ambiente com a demanda elétrica

O ambiente pode modificar tanto a necessidade de uso quanto a condição física da instalação. Maior tempo de acompanhamento aumenta consumo; umidade e vibração exigem instalação adequada; períodos de baixa geração exigem planejamento de energia. A análise desses efeitos deve manter variáveis separadas. Não se utiliza a expressão genérica “condição amazônica” como substituto para temperatura, umidade, insolação, distância e regime de cargas.

Para a demanda, propõe-se levantar três regimes: viagem planejada, operação intensificada e contingência. O primeiro descreve uso habitual; o segundo aumenta tempo ou simultaneidade de equipamentos necessários; o terceiro considera manutenção de funções

definidas após falha de recarga. O regime de contingência não autoriza a supressão de equipamento obrigatório ou necessário. Seu conteúdo deve ser aprovado no contexto operacional.

O projeto deve considerar também alterações acumuladas. Instalar um novo terminal, acrescentar iluminação e ampliar monitoramento pode elevar a demanda sem atualização do banco e do carregamento. O estudo demonstra essa diferença ao separar 933,6 Wh/dia do envelope de 2.510 Wh/dia. A comparação torna evidente que a autonomia depende do inventário definido, e não apenas da capacidade nominal indicada na bateria.

4.14 Cenários de perda de informação e de energia

Profundidade reduzida com posição disponível

Neste cenário, o GNSS permanece funcional e o ecobatímetro indica redução progressiva de profundidade. O ambiente é hipotético, sem associação a um trecho real. A análise começa pela confirmação da referência apresentada e da coerência dos dados, evitando interpretar a simples permanência da posição como prova de navegabilidade. A informação espacial localiza a ocorrência; a leitura acústica acompanha a condição sob o sensor.

O efeito sobre a arquitetura é a maior importância da continuidade desses dados e da possibilidade de registro. A proposta mantém alimentação de posição, profundidade e comunicação conforme avaliação operacional. O operador precisa conhecer configurações, intervalos e limites adotados. A tripulação não deve receber uma sequência de alarmes ambíguos que dificulte distinguir profundidade, perda de eco e falha de alimentação.

Visibilidade reduzida com alvo sem AIS

Neste cenário, a observação visual está limitada e existe um alvo não cooperativo que não transmite AIS. A ausência de símbolo no sistema de identificação é compatível com essa hipótese. O radar poderá apresentar eco se o alvo for detectável nas condições existentes. A análise não assume detecção garantida, pois tamanho, material, posição, configuração e ambiente influenciam a informação disponível.

A arquitetura deve apresentar radar e AIS de maneira que a tripulação compreenda suas diferenças. A associação automática de símbolos não pode induzir o operador a procurar apenas embarcações identificadas. A função do radar é analisada pela informação efetivamente

disponível, e não pela quantidade de transmissores próximos. A comunicação por VHF pode auxiliar na coordenação, mas uma chamada sem resposta não prova ausência de alvo.

Perda de recarga e reserva limitada

Neste cenário, o sistema de recarga fica indisponível, mas o banco permanece funcional. A energia disponível precisa sustentar as cargas até a recuperação ou apoio. O cálculo utiliza 5.184 Wh entregues pelo banco de 600 Ah nas premissas definidas. Com demanda ampliada de 2.510 Wh/dia, a autonomia teórica é de 2,07 dias, sem geração complementar durante o intervalo.

Esse resultado não significa que a embarcação pode operar por dois dias em qualquer condição. O estado inicial do banco, o consumo real, as limitações de descarga e a necessidade das funções permanecem condicionantes. A autonomia calculada é uma propriedade do cenário e do modelo. A indisponibilidade da recarga pode ainda estar associada a defeito comum que afete a distribuição ou monitoramento, caso em que a energia nominal não resolverá a falha.

Falha no conversor de alimentação

Neste cenário, o banco de 24 V continua disponível, mas o conversor que alimenta determinado conjunto de 12 V falha. A situação distingue o armazenamento de distribuição: pode haver energia suficiente e, simultaneamente, indisponibilidade dos equipamentos. O efeito depende de quais cargas compartilham o componente e de quais referências permanecem independentes.

A análise propõe mapear todas as saídas afetadas. Se GNSS, AIS e rádio dependerem do mesmo conversor, a falha retira funções distintas por uma causa comum. Uma segunda bateria ligada ao mesmo conversor defeituoso não resolveria a condição. A redundância deve contemplar o caminho completo, incluindo dispositivos de seleção, proteção e distribuição.

Posição aparentemente coerente e desatualizada

Neste cenário, um equipamento continua exibindo a última posição recebida depois de interrompida a comunicação com o receptor. A tela permanece aparentemente normal, mas a informação perdeu atualidade. A falha não é necessariamente do GNSS; pode ocorrer na interface, no cabo ou no processamento. A distinção permite diagnóstico mais preciso e evita trocar o sensor sem identificar o problema.

O requisito proposto é indicação de dado vencido após intervalo definido pelo projeto e compatível com atualização e operação. Não se fixa aqui um tempo universal. Esse intervalo precisa considerar o equipamento, a aplicação e os limites de sua interface. Também deve ser diferenciada a posição estimada de uma posição efetivamente recebida e válida, quando o sistema oferecer essas funções.

Condições simultâneas e prioridade operacional

Neste cenário, considera-se combinação hipotética de visibilidade reduzida, geração limitada e comunicação externa intermitente. O objetivo não é representar um evento observado, mas examinar se a arquitetura mantém funções necessárias sob mais de uma condição desfavorável. Combinações desse tipo tornam inadequada a análise em que cada equipamento é considerado isoladamente e sempre plenamente disponível.

A prioridade deve partir das funções do momento. Detecção pode ser essencial em um encontro; profundidade pode ser determinante em passagem restrita; comunicação pode ser necessária para apoio. Uma classificação rígida que sempre desligue a mesma carga pode falhar em reconhecer o contexto. Propõe-se uma política com regimes previamente definidos e possibilidade de avaliação pelo responsável, respeitando requisitos obrigatórios.

Os cenários são hipóteses de investigação e não registros de viagens ou de ocorrências. As verificações devem ser executadas em ambiente controlado, segundo manuais e procedimentos aplicáveis, preservando as funções críticas de uma operação real. O resultado esperado de cada teste é evidência sobre a função e sua indicação de falha, sem converter uma simulação em prova de desempenho de toda a instalação.

4.15 Verificação dos modos de falha e dos controles propostos

O plano de verificação traduz requisitos em evidências. Para cada função, propõe-se identificar configuração inicial, procedimento, resultado esperado e condição de encerramento. O teste deve ser executado em ambiente compatível com a segurança e segundo manual e regras aplicáveis. A pesquisa não relata execução de ensaios; apresenta especificações para orientar uma futura validação.

Os testes elétricos incluem medição na fonte e na carga, verificação de polaridade, conferência de proteção e observação durante regime previsto de maior consumo. Os testes de

dados incluem perda de enlace, indicação de validade e recuperação. Os testes funcionais incluem leitura de referência, comunicação permitida e acesso a funções de controle manual quando aplicável. Nenhum desses testes isoladamente comprova toda a instalação.

Os critérios de aceitação não devem utilizar valores inventados como se fossem especificações do fabricante. O artigo estabelece o tipo de critério: faixa de alimentação, comportamento previsto, identificação clara e manutenção da função definida. Valores definitivos ficam vinculados ao modelo e ao projeto. Os exemplos numéricos de cálculo servem para verificar coerência aritmética, não para substituir documentação de produto.

O registro inclui instrumento utilizado, condição da instalação, configuração, resultado observado e responsável. No estudo hipotético, esses campos são tratados como evidências requeridas e não preenchidos com acontecimentos fictícios. O plano permite distinguir o que já foi calculado do que ainda precisaria ser demonstrado por ensaio, fortalecendo a interpretação correta dos resultados acadêmicos.

Quadro 1 Modos de falha e verificações de continuidade

Condição	Efeito funcional	Verificação proposta
Banco sem reserva	Perda de múltiplas funções	Estado do banco e energia efetivamente entregue
Conversor indisponível	Perda conjunta das cargas de 12 V	Caminho alternativo com tensão e proteção compatíveis
Conexão resistiva	Subtensão e aquecimento	Medição localizada sob carga e inspeção
Posição vencida	Informação espacial desatualizada	Status de validade e interrupção controlada do enlace
Referência acústica incorreta	Interpretação equivocada da folga	Conferência de offset e convenção da indicação
Gateway sem comunicação	Perda de variáveis na tela integrada	Acesso às indicações locais e identificação de dependências
Alarme apenas silenciado	Persistência da condição anormal	Separação entre reconhecimento e resolução

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

4.16 Discussão integrada e alcance dos resultados

O resultado central é a identificação de que a disponibilidade das funções depende de caminhos de energia e de informação completos. A tabela de cargas permite estimar energia; o

exame das dependências identifica pontos comuns; e a FMEA organiza possíveis consequências. A análise integrada reúne esses instrumentos, sem converter hipótese de falha em ocorrência comprovada ou cálculo em resultado experimental.

O banco inicial de 420 Ah é suficiente apenas no modelo ideal sem perdas e com capacidade integral, em que entrega 5.040 Wh para demanda de 5.020 Wh em dois dias. Nas hipóteses revisadas, entrega 3.628,8 Wh, ficando abaixo da meta. O banco de 600 Ah entrega 5.184 Wh e atende aritmeticamente à condição adotada, com pequena margem. A conclusão não se estende a condições distintas sem recalcular os fatores.

A geração solar de 1.100 Wp oferece saldo positivo no cenário de cinco HSP e praticamente equilíbrio no de três HSP. Com duas HSP, não atende ao envelope diário. O sistema deve ser analisado com recarga e recuperação, e não apenas com um valor de potência-pico. A análise de sensibilidade evidencia a dependência de condições solares e demanda, sem prever a produção real de uma embarcação amazônica.

Na discussão ambiental, os fenômenos examinados reforçam necessidades de monitoramento, atualização, comunicação e interpretação. Os equipamentos contribuem por funções delimitadas. Não há demonstração de prevenção automática de terras caídas, detecção universal de obstáculos ou proteção contra crimes. A contribuição da Engenharia Elétrica reside em sustentar informações e meios disponíveis, com limites reconhecidos e procedimentos coerentes.

4.17 Rastreabilidade das informações e critérios de manutenção

A síntese das análises permite organizar a verificação em torno da função preservada. Para cada variável crítica, devem ser identificados origem, referência, caminho de transmissão, alimentação e indicação de validade. Esse cadastro permite distinguir a ausência do fenômeno observado, perda do sensor e perda de comunicação. No ecobatímetro, por exemplo, ausência de leitura pode decorrer de condições acústicas ou de falha elétrica; no posicionamento, a apresentação pode manter um dado antigo depois da interrupção do enlace.

A informação precisa ser comparável ao longo do tempo. Um registro de profundidade sem referência do transdutor não oferece a mesma utilidade de um registro acompanhado de posição, horário e configuração. Do mesmo modo, uma tensão medida sem identificar o regime do equipamento não representa necessariamente o comportamento durante transmissão ou outra

condição de maior demanda. A rastreabilidade consiste em conservar os elementos que permitem interpretar o valor, reproduzir o cálculo e compreender a condição de sua obtenção.

A independência também exige evidência. Dois equipamentos podem possuir indicações locais diferentes e receber dados do mesmo sensor. Podem utilizar sensores distintos e depender do mesmo conversor. Podem ter alimentação separada e compartilhar um gateway indispensável à apresentação. A redundância deve ser avaliada por esses caminhos completos, incluindo o acesso do operador à alternativa. Essa análise explica por que o número de telas ou de baterias não é medida suficiente de disponibilidade.

A manutenção deve reunir inspeção, verificação elétrica, teste funcional e revisão de configuração, conforme a função e o manual. A inspeção identifica condição física; a medição sob carga verifica a entrega de energia; o teste de dados observa validade e recuperação; e a revisão documental verifica se inventário e diagrama ainda correspondem à instalação. A periodicidade depende das características do equipamento e da operação. O estudo não estabelece calendário universal para todas as embarcações.

Um registro de manutenção precisa separar evidência e diagnóstico. A observação de tensão insuficiente na carga descreve um resultado; atribuir a causa à bateria exige verificar o percurso e as conexões. A substituição de componente sem identificação da causa pode deixar a anormalidade em outro ponto do sistema. A recuperação deve ser demonstrada pela função e pela configuração final, e não apenas pelo desaparecimento de uma mensagem de erro.

Quadro 2 Origem das informações e dependências a verificar

Função	Origem da informação	Dependência ou referência
Posicionamento	Receptor GNSS	Antena, validade da solução e caminho de dados
Orientação	Sensor de rumo ou bússola	Princípio fisico, instalação e interferências
Detecção de superficie	Ecos radar	Antena, configuração, alvo e apresentação
Identificação de tráfego	Mensagens AIS	Transmissor remoto, recepção e campos manuais
Profundidade	Transdutor acústico	Referência vertical, eco e configuração
Comunicação	Rádio e meios externos disponíveis	Energia, antena, enlace e estação alcançável
Reserva energética	Tensão e corrente do banco	Sensor, estado inicial e capacidade efetiva

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

A introdução de novo equipamento exige revisar os mesmos elementos. O consumo diário deve ser recalculado com seu regime de uso, e a fonte deve ser verificada para potência simultânea e picos. O percurso dos cabos, a proteção e a instalação da antena podem afetar outros equipamentos. A alteração deve atualizar inventário, diagrama e configuração antes da avaliação final. Esse procedimento conserva o vínculo entre o modelo elétrico e o sistema efetivamente utilizado.

No estudo hipotético, a documentação permanece conceitual. Um diagrama só poderá ser denominado como instalado depois de confrontado com levantamento físico e configurações reais. A existência de uma representação didática não autoriza sua utilização como instrução de manutenção de uma embarcação desconhecida. A contribuição do artigo é apresentar a lógica de verificação e os dados necessários para transformar a proposta em avaliação verificável.

4.18 Evidências necessárias para validação do modelo

Os resultados calculados mostram coerência sob as hipóteses adotadas, mas a validação requer dados adicionais. O inventário deve identificar modelos e regimes reais; o banco precisa de avaliação de capacidade, estado inicial e condições de operação; e a geração exige informação sobre produção efetiva e sombreamento. O confronto entre previsão e observação deve utilizar a mesma fronteira energética, evitando comparar energia nominal armazenada com energia entregue aos equipamentos.

A verificação elétrica começa por identificar circuitos e pontos de medição. A tensão deve ser conferida na fonte e na carga, em regime compatível com o maior consumo previsto. A comparação ajuda a localizar perdas em condutores e conexões. A seleção de proteção precisa considerar características da fonte e do dispositivo, enquanto a avaliação de recarga deve registrar tanto o atendimento das cargas quanto a energia destinada ao armazenamento.

A verificação de informação deve confirmar fonte, unidade, referência, validade e recuperação. A interrupção controlada de um enlace permite avaliar se o destino indica a perda ou continua apresentando o último valor. A restauração deve restabelecer uma condição coerente e distinguir dados antigos de dados atuais. O procedimento deve ser adaptado ao equipamento e executado em ambiente que preserve a segurança da operação.

A validação operacional exige relacionar esses testes ao contexto de uso. A profundidade precisa ser interpretada com referência conhecida e condição de calado. A detecção radar deve ser analisada conforme alvos e ambiente, sem atribuir à ausência de eco a ausência de obstáculo. A comunicação depende de alcance efetivo e disponibilidade da estação. O teste de um componente isolado não demonstra que todas as funções permanecem disponíveis na mesma contingência.

Quadro 3 Evidências de verificação e alcance da avaliação

Objeto	Registro necessário	Resultado que pode sustentar
Inventário de cargas	Modelos, potência, regime e tempo	Demanda compatível com os equipamentos levantados
Alimentação	Tensão na fonte e nos terminais sob carga	Entrega dentro da faixa do equipamento no teste
Banco	Estado inicial, capacidade e condições	Autonomia compatível com o regime observado
Geração solar	Produção, consumo e sequência de dias	Saldo e recuperação nas condições registradas
Dados integrados	Fonte, unidade, referência e validade	Informação rastreável na configuração testada
Contingência	Falha simulada e funções preservadas	Continuidade do caminho efetivamente verificado

Fonte: elaboração da autora a partir do estudo técnico hipotético desenvolvido no TCC.

O registro final deve identificar equipamento, configuração, instrumentos, procedimento, observação e responsável pela avaliação. Quando houver correção, o reteste precisa confirmar a

recuperação da função afetada e verificar consequências nos sistemas integrados. Esse conjunto permite distinguir requisito, execução e resultado. Na presente pesquisa, os procedimentos são propostos e não recebem aprovação fictícia.

A análise ambiental e a análise de equipamentos permanecem complementares nesse processo. As fontes sobre clima, hidrologia e erosão sustentam a descrição dos fenômenos, enquanto os testes sustentariam afirmações sobre o sistema instalado. A pesquisa de acidentes oferece contexto preventivo, mas não permite atribuir ao projeto didático uma redução quantitativa de ocorrências. A metodologia preserva essa separação para que os resultados sejam utilizados com o alcance adequado.

5 Considerações finais

O trabalho analisou a relação entre sistemas eletroeletrônicos embarcados e segurança da navegação fluvial, enfatizando alimentação, integração e qualidade da informação. A análise mostrou que a contribuição dos equipamentos não se resume à presença física a bordo. A função precisa permanecer disponível, produzir dados interpretáveis e ser utilizada em conjunto com procedimentos e outras referências. A Engenharia Elétrica participa dessa cadeia ao organizar fontes, armazenamento, distribuição, proteção e interfaces.

O objetivo geral foi atendido no âmbito bibliográfico, documental e de modelagem técnica. Não houve ensaio em embarcação real, levantamento de campo ou avaliação estatística de acidentes. Assim, a conclusão se refere aos mecanismos de contribuição e aos requisitos identificados, sem afirmar eficácia quantitativa comprovada. Essa delimitação é coerente com os dados disponíveis e com a natureza do estudo desenvolvido.

A identificação dos equipamentos permitiu diferenciar posicionamento, orientação, detecção, identificação, comunicação, profundidade, monitoramento e automação. Essa distinção evitou tratar AIS e radar como equivalentes ou GNSS como detector de obstáculos. Também destacou que uma bússola magnética oferece referência de mecanismo diferente, sem substituir todas as informações do posicionamento por satélite.

A análise da alimentação mostrou que energia nominal, energia utilizável e energia entregue às cargas são grandezas distintas. O inventário básico de 933,6 Wh/dia foi separado do cenário ampliado de 2.510 Wh/dia. A revisão das premissas corrigiu a ausência de ligação entre

esses valores e explicitou as hipóteses adicionais. O dimensionamento tornou-se rastreável e passível de reprodução, embora permaneça dependente de validação real.

A identificação de falhas destacou pontos comuns de energia e dados, resistência de conexões, incompatibilidade de tensão, perda de referência e informação desatualizada. A análise qualitativa organizou efeitos e medidas de verificação, sem atribuir taxas não observadas. A manutenção foi vinculada à evidência de recuperação da função, e a redundância foi examinada pelo caminho completo até o operador.

Para o cenário ampliado, dois dias de atendimento exigem 5.020 Wh entregues às cargas. O banco de 24 V e 420 Ah, considerado inicialmente, fornece 5.040 Wh apenas no modelo ideal com profundidade de descarga de 50%. Quando são incluídas eficiência de 90% e capacidade remanescente de 80%, a energia cai para 3.628,8 Wh. A autonomia calculada passa a aproximadamente 1,45 dia, não atendendo à meta adotada.

A capacidade mínima calculada sob as premissas revisadas é de 581,02 Ah. O arredondamento didático para 600 Ah resulta em 5.184 Wh entregues e autonomia de aproximadamente 2,07 dias. A margem em relação à demanda de dois dias é de 164 Wh. A análise de sensibilidade mostrou que aumento da demanda ou redução adicional da capacidade pode retirar o atendimento à meta. Portanto, o valor não deve ser usado sem confirmação das hipóteses.

A geração complementar de 1.100 Wp foi analisada com fator efetivo de 80%. Cinco HSP resultam em 4.400 Wh/dia e saldo idealizado de 1.890 Wh/dia; três HSP resultam em 2.640 Wh/dia e saldo de 130 Wh/dia; duas HSP resultam em 1.760 Wh/dia e déficit de 750 Wh/dia. Esses resultados mostram a importância de avaliar recuperação após contingência e disponibilidade de outras fontes.

A análise das condições amazônicas conectou a variabilidade amazônica às necessidades de informação e continuidade. Secas e alterações de nível reforçam a importância de profundidade, referência vertical e planejamento atualizado. Terras caídas evidenciam a instabilidade das margens, mas os equipamentos estudados não constituem sistema geotécnico de previsão. Chuva, noite e fumaça reforçam o uso de referências complementares, sem tornar qualquer sensor livre de limitações.

A contribuição consiste em explicitar o encadeamento entre condição ambiental, informação necessária, equipamento, limitação e requisito de disponibilidade. Esse encadeamento

pode orientar um levantamento real e reduzir ambiguidades de projeto. Sua utilidade depende de atualização de fontes e adaptação às características da embarcação, sem converter análise geral em recomendação operacional específica.

As limitações principais são ausência de identificação de embarcação real, inventário de modelos, medições, curvas de bateria e dados locais de geração solar. Também não foram disponibilizadas fotografias técnicas ou registros de viagem que sustentassem um estudo de caso empírico. Por isso, todos os cenários e testes foram apresentados como hipóteses e propostas, mantendo distinção entre cálculo e observação.

O balanço energético utiliza fatores agregados. Um projeto executivo deverá detalhar conversão, carregamento, temperatura, sombreamento, degradação e regimes de funcionamento. A modelagem não calcula seletividade completa de proteções, capacidade de interrupção, desempenho eletromagnético ou conformidade de instalação. Esses aspectos foram identificados como requisitos a verificar, e não como propriedades já demonstradas.

As referências normativas foram usadas segundo sua função documental. A ausência de classificação da embarcação impede determinar sua dotação obrigatória completa. A interpretação de aplicabilidade deverá utilizar versões vigentes, características reais e avaliação competente. Nenhuma conclusão desta pesquisa equivale a autorização de navegação, homologação de equipamento ou parecer de vistoria.

Recomenda-se desenvolver um levantamento em embarcação identificada, com autorização e planejamento próprios, registrando inventário, topologia, tensões e regimes de consumo. As medições devem distinguir condição de repouso, operação e demanda elevada. A comparação com o cenário didático permitirá avaliar quais premissas se aproximam da realidade e quais precisam ser substituídas.

Também se recomenda testar indicação de dados vencidos, perda de interfaces, acessibilidade da referência alternativa e comportamento da transferência de energia. Os ensaios devem ocorrer em ambiente controlado e sem comprometer funções críticas de uma operação real. A coleta de evidências permitirá passar de uma arquitetura conceitual para avaliação técnica verificável.

Referências

AMAZONAS. Secretaria de Segurança Pública. Operação Tentáculos: em Coari, PC-AM prende 25 pessoas ligadas ao crime organizado e por financiar pirataria no rio. Manaus, 13 jun. 2025. Disponível em: https://www.ssp.am.gov.br/operacao-tentaculos-em-coari-pc-am-prende-25-pessoas-ligadas-ao-crime-organizado-e-por-financiar-pirataria-no-rio/. Acesso em: 6 out. 2026.

BANDEIRA, Iris Celeste Nascimento et al. Fluvial erosion risk analysis: an Amazon study case. Revista Geonorte, v. 12, n. 39, p. 1-25, 2021. DOI: 10.21170/geonorte.2021.V.12.N.39.01.25. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22591. Acesso em: 6 out. 2026.

BORMA, Laura De Simone; NOBRE, Carlos Afonso (org.). Secas na Amazônia: causas e consequências. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Consulta à apresentação e ao sumário disponibilizados pela editora. Disponível em: https://www.ofitexto.com.br/secas-na-amazonia-causas-e-consequencias/p. Acesso em: 6 out. 2026.

BRASIL. Lei nº 9.537, de 11 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a segurança do tráfego aquaviário em águas sob jurisdição nacional e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9537.htm. Acesso em: 6 out. 2026.

CARVALHO, José Alberto Lima de; CUNHA, Sandra Baptista da. Terras caídas e consequências sociais na Costa do Miracauera, município de Itacoatiara ; Amazonas, Brasil. Revista Geográfica de América Central, v. 2, n. 47E, 2012. Disponível em: https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/2949. Acesso em: 6 out. 2026.

FAPEAM. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas. Estudo pretende avaliar o impacto das queimadas na qualidade do ar de Manaus. Manaus, 7 dez. 2018. Disponível em: https://www.fapeam.am.gov.br/estudo-pretende-avaliar-o-impacto-das-queimadas-na-qualidade-do-ar-de-manaus/. Acesso em: 9 out. 2026.

FISCH, Gilberto; MARENGO, José A.; NOBRE, Carlos A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. Acta Amazonica, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998. DOI: 10.1590/1809-43921998282126. Disponível em: https://www.scielo.br/j/aa/a/NVRbNSn7P5z4hjtFNmMjLjx/. Acesso em: 9 out. 2026.

FONTES, Jassiel V. H. et al. Marine accidents in the Brazilian Amazon: the problems and challenges in the initiatives for their prevention focused on passenger ships. Sustainability, v. 15, n. 1, art. 328, 2023. DOI: 10.3390/su15010328. Disponível em: https://www.mdpi.com/2071-1050/15/1/328. Acesso em: 11 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Guidelines for the installation of a shipborne Automatic Identification System (AIS). SN/Circ.227, 6 jan. 2003, e emendas. London: IMO, 2003. Disponível em: https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/docs-shipbornerc-navigationequipment.aspx. Acesso em: 11 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Adoption of the revised performance standards for radar equipment. Resolution MSC.192(79), 6 dez. 2004. London: IMO, 2004. Disponível em: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MSCResolutions/MSC.192(79).pdf. Acesso em: 7 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Guidelines for the installation of shipborne radar equipment. SN.1/Circ.271, 22 maio 2008. London: IMO, 2008. Disponível em: https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/docs-shipbornerc-navigationequipment.aspx. Acesso em: 7 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Revised guidelines for the onboard operational use of shipborne Automatic Identification Systems (AIS). Resolution A.1106(29), 2 dez. 2015. London: IMO, 2015. Disponível em: https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.1106(29).pdf. Acesso em: 10 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Guidelines for shipborne position, navigation and timing (PNT) data processing. MSC.1/Circ.1575, 16 jun. 2017. London: IMO, 2017. Disponível em: https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/docs-shipbornerc-navigationequipment.aspx. Acesso em: 8 out. 2026.

IMO. International Maritime Organization. Guidelines for the standardization of user interface design for navigation equipment. MSC.1/Circ.1609, 14 jun. 2019. London: IMO, 2019. Disponível em: https://www.imo.org/en/ourwork/safety/pages/docs-shipbornerc-navigationequipment.aspx. Acesso em: 6 out. 2026.

MACIEL, Jussara Socorro Cury et al. Operação do sistema de alerta hidrológico da bacia do Amazonas: relatório anual 2024. Serviço Geológico do Brasil, 2024. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/items/210c15e5-f29f-4eca-a0d3-653cfea5c2b7. Acesso em: 8 out. 2026.

MARENGO, José Antonio et al. Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: a review. Acta Amazonica, v. 54, número especial 1, e54es22098, 2024. DOI: 10.1590/1809-4392202200980. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980. Acesso em: 12 out. 2026.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Portos e Costas. NORMAM-202/DPC: normas da Autoridade Marítima para embarcações empregadas na navegação interior. Portaria DPC/DGN/MB nº 186/2025, com alteração pela Portaria nº 196, de 19 dez. 2025. Rio de Janeiro: DPC, 2025. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/dpc/normam-202. Acesso em: 12 out. 2026.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Hidrografia e Navegação. NORMAM-511/DHN: normas da Autoridade Marítima para navegação e cartas náuticas. Revisão 1. Portaria DHN/DGN/MB nº 30, de 21 maio 2026. Rio de Janeiro: DHN, 2026. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/sites/default/files/atos-normativos/dhn/Port-N%C2%BA%2030-DHN-DGN-MB-21MAI2026-NORMAM-511-REV1.html. Acesso em: 12 out. 2026.

NOBRE, Carlos Afonso; ARIEIRA, Julia; BRANDÃO, Diego Oliveira. Amazônia em risco e a COP30 como uma oportunidade crítica para evitar o ponto de não retorno. Estudos Avançados, v. 39, n. 114, 2025. Disponível em: https://revistas.usp.br/eav/article/view/240937. Acesso em: 6 out. 2026.

SIGNORI, Renato Trevisan et al. Carbon monoxide profile variability over the Manaus Metropolitan Region and its relations with biomass burning. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 58, n. 1, p. 114-124, 2023. DOI: 10.5327/Z2176-94781534. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/1534. Acesso em: 12 out. 2026.

VICTRON ENERGY. Wiring Unlimited: DC wiring. [S.l.]: Victron Energy, [s.d.a]. Disponível em: https://www.victronenergy.com/media/pg/The_Wiring_Unlimited_book/en/dc-wiring.html. Acesso em: 11 out. 2026.

VICTRON ENERGY. Wiring Unlimited: battery bank wiring. [S.l.]: Victron Energy, [s.d.b]. Disponível em: https://www.victronenergy.com/media/pg/The_Wiring_Unlimited_book/en/battery-bank-wiring.html. Acesso em: 14 out. 2026.