

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE TELEMETRIA APLICADO A UMA EMBARCAÇÃO SOLAR

Adriano Werneck¹, Alex Candido¹, Evelyn Galdino¹, Alexandre Bitencourt¹, Daniel Dias¹

¹Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, Brasil

e-mail: adrianowerneck@id.uff.br, alex_candido@id.uff.br, evelyngaldino@id.uff.br, alexandre_bitencourt@id.uff.br, dhndias@id.uff.br

Resumo – O setor de transporte contribui com 16,5% das emissões de gases do efeito estufa. Uma possível solução para a redução deste índice é o uso de Veículos Elétricos (VEs), que possui baixas emissões. Neste sentido o Desafio Solar Brasil (DSB) promove tecnologias e energias alternativas em embarcações através de uma competição. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do sistema de instrumentação e telemetria da embarcação da Equipe Arariboia, participante do DSB. A placa de instrumentação possui subsistemas de proteção contra conexões indevidas, geração de tensões necessárias e aquisição de dados. Os resultados apresentaram um comportamento linear e confiável durante a calibração dos medidores de corrente. O microcontrolador ESP32 é escolhido devido à sua conectividade e capacidade de processamento, e a tecnologia LoRa é utilizada para a transmissão de dados de telemetria do barco. Um VNA foi utilizado para realizar as medições necessárias. Por fim, uma interface para exibição dos dados transmitidos foi desenvolvida na plataforma .NET.

Palavras Chaves – Veículo Elétrico, Embarcações, Instrumentação, Telemetria.

Abstract – The transportation sector contributes to 16.5% of greenhouse gas emissions. One possible solution for reducing this index is the use of Electric Vehicles (EVs), which have low emissions. In this sense, the Solar Challenge Brazil (DSB) promotes alternative technologies and energies in vessels through a competition. This work presents the development of the instrumentation and telemetry system for the Arariboia Team's vessel, a participant in the DSB. The instrumentation board includes subsystems for protection against improper connections, generation of necessary voltages, and data acquisition. The results showed a linear and reliable behavior during the calibration of current meters. The ESP32 microcontroller was chosen for its connectivity and processing capacity, and LoRa technology is used for transmitting telemetry data from the boat. A VNA was used to perform the necessary measurements. Finally, an interface for displaying transmitted data was developed on the .NET platform.

Keywords – Electric Vehicle, Vessel, Instrumentation, Telemetry.

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, os avanços tecnológicos trouxeram uma variedade de benefícios para a sociedade, especialmente no século XVIII. No entanto, esses avanços têm dependido

fortemente do carvão e do petróleo como principais fontes de energia, resultando na queima excessiva de combustíveis fósseis e em um aumento significativo das emissões de gases de efeito estufa, como o CO₂. O Acordo de Paris de 2015 estabeleceu limites para o aquecimento global, e estima-se que, se as políticas nacionais atuais permanecerem inalteradas, haverá um aumento de 2,8 °C na temperatura atmosférica total em poucos anos [1], o que excede os limites estabelecidos pelo Acordo de Paris [2].

Anualmente, a emissão total de CO₂ é de aproximadamente 50 bilhões de toneladas, sendo cerca de 16,5% originadas do setor de transporte, que depende 95% de fontes de combustíveis fósseis [1], [3]. Para enfrentar esse problema, é crucial considerar novas tecnologias e políticas para reduzir as emissões do setor de transporte.

Uma solução potencial é o Veículo Elétrico (VE), uma tecnologia que é conhecida desde o século XIX. Além de baixas emissões de CO₂, os VE oferecem várias vantagens em relação aos veículos tradicionais com motor de combustão interna, como simplicidade, confiabilidade e eficiência [4], [5]. A adoção de VE tem o potencial de reduzir significativamente as emissões do setor de transporte e contribuir para o cumprimento das metas previamente estabelecidas.

Neste sentido, o Desafio Solar Brasil (DSB) se apresenta como um projeto de extensão universitária, que organiza uma competição de barcos movidos à energia solar visando estimular o desenvolvimento de tecnologias e aplicações das fontes alternativas de energia em embarcações, através do esporte e educação em tecnologia e meio ambiental.

A Equipe Arariboia, fundada em 2011, representa a Universidade Federal Fluminense na busca dos objetivos do DSB, além do desenvolvimento técnico e interpessoal dos membros participantes da equipe em um desenvolvimento contínuo das tecnologias que envolvem a embarcação.

Um dos importantes aspectos ao longo das competições do DSB são as tomadas de decisões estratégicas, que podem permitir um melhor posicionamento da equipe no ranking final. Para se tomar parte dessas decisões é necessário ter em mãos informações em tempo real da operação da embarcação. A transmissão de informações em tempo real é conhecidamente chamada de telemetria.

Além do sistema de transmissão de dados também é necessário um sistema de medição, que irá mensurar dados importantes de tensão e corrente da embarcação a serem transmitidos. Essa medição é comumente executada por um sistema instrumentação.

Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento dos sistemas de instrumentação e telemetria, chamado de sistemas embarcados, da embarcação da Equipe Arariboia. O seguinte capítulo apresenta os conceitos e metodologia envolvidos na

seleção dos componentes e os resultados encontrados, seguido das conclusões.

2. METODOLOGIA E RESULTADOS

2.1. Placa de instrumentação

Para analisarmos a geração e a produção de energia da embarcação, preparamos ao longo do ano um conjunto de testes em bancada, o sucesso dos quais nos levou ao projeto atual da nossa placa de instrumentação. A placa, que tem seu modelo 3D apresentado na Figura 1, possui subsistemas distintos associados à proteção em relação a conexões indevidas, tanto outros associados à geração das tensões necessárias para seu funcionamento, quanto à aquisição de dados.

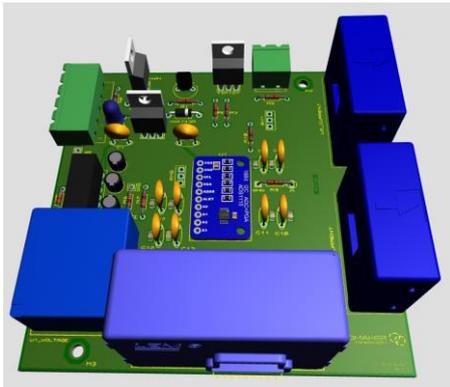


Figura 1 – Modelo 3D da placa de instrumentação

No bloco de proteção, visto na Figura 2, temos um fusível em série com o cabo de alimentação da placa para proteção contra sobrecorrente. Esse fusível foi selecionado de forma que fosse externo à placa para economizar espaço dentro dela para o posicionamento dos demais componentes. Além disso, tem-se um circuito composto de um MOSFET canal P e diodo Zener para oferecer proteção contra polaridade reversa, que funciona usando os princípios de condução elétrica desse tipo de transistor. O diodo Zener na base do transistor serve para limitar a tensão entre *gate* e *source* dentro das especificações permitidas pelo componente. Após isso, um bloco de circuito que usa transistores BJT e diodos Zener é responsável por proteger a placa contra sobretensão, condição que considera a conexão de tensão de alimentação indevida. A tensão de saída desses blocos de proteção é então utilizada pelos demais componentes da PCB. Um LED indicador também é conectado nesse nó para checar se a placa está recebendo a alimentação e se a tensão está tendo flutuações, caso o sistema esteja operando de forma incorreta.

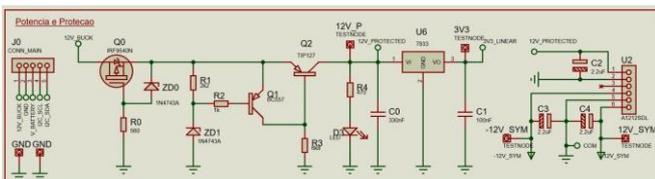


Figura 2 – Circuito elétrico do sistema de proteção e fonte simétrica

O bloco da fonte simétrica recebe a tensão protegida de alimentação e a usa para gerar uma tensão negativa simétrica para a alimentação dos sensores de corrente e de tensão, que precisam de polaridade negativa para seu funcionamento, o

que também foi averiguado experimentalmente, já que eles não aceitaram apenas uma conexão com o terra (do inglês, *ground* – GND) no lugar da tensão negativa. A escolha em usar uma fonte simétrica foi devido às dificuldades encontradas na competição anterior. Foram utilizados componentes discretos, como amplificadores operacionais e capacitores, para gerar uma tensão negativa. Entretanto, apesar do sinal ter sido gerado, a potência fornecida não era capaz de manter a tensão constante para os medidores. Em contrapartida, a fonte simétrica comercial foi capaz de fornecer potência para todos os sensores utilizados simultaneamente em condição de operação nominal em altas correntes por diversas horas.

Após isso os sensores de efeito Hall de tensão (LV20-P), visto na Figura 3, e de corrente (LA55-P), visto na Figura 4, alimentados pela fonte simétrica, são responsáveis pela aferição das medidas elétricas no circuito de potência, entre elas as correntes do motor, da saída do MPPT e da bateria principal. A medição de tensão é feita diretamente no barramento primário de 48 V. Uma ponderação feita, mas ainda não implementada, é que tais sensores deveriam possuir entrada e saída isoladas. Isso seria ideal já que iria separar completamente o circuito de potência do circuito de aquisição. Contudo, como os conversores CC-CC utilizados atualmente não são isolados, não há a possibilidade de implementação desta configuração.

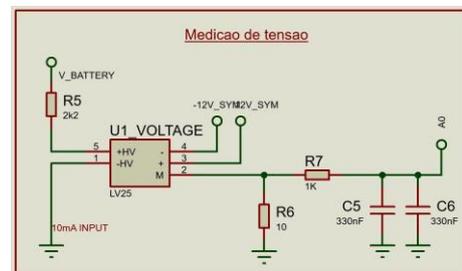


Figura 3 – Circuito elétrico do sistema de medição de tensão

Os sensores de efeito Hall atuam como fontes de corrente controladas por corrente, então necessitam de um resistor *burden* na sua saída, de forma que haja polarização de tensão capaz de ser medida pelo circuito de Conversão Analógica-Digital (do inglês, *Analogue-Digital Converter* - ADC). A escolha do valor desse resistor deve ser feita de forma que o produto da corrente máxima de saída pelo valor de resistência cubra o alcance de medição selecionado do módulo ADC, usando assim toda a resolução disponível para uma dada configuração, garantindo uma melhor leitura dos dados. Um filtro RC passa-baixa foi colocado após a tensão de saída de cada medição, tendo em consideração uma frequência de corte de módulo relativamente pequena para rejeitar ruídos de alta frequência, e valor de resistência seguindo um limite admissível especificado no *datasheet* do módulo ADC.

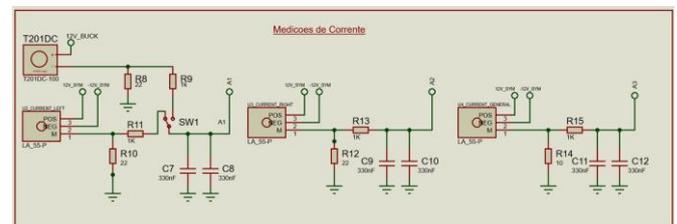


Figura 4 – Circuito elétrico do sistema de medição de corrente

Por fim, tem-se então o bloco principal da placa de instrumentação, que é o conversor analógico-digital ADS1115, visto na Figura 5, que faz a leitura dessas tensões e as converte em códigos digitais que podem ser lidos pelo microcontrolador principal da embarcação. A escolha de usar um módulo ADC externo levou em consideração o fato de que o ADC embutido do nosso microcontrolador possui apenas 12 bits de resolução, comportamento não linear e alcance de medição não configurável. Em contrapartida, esse módulo ADC externo possui 16 bits de resolução, podendo fatiar um alcance de medição, que também é configurável desde 256 mV até 6048 mV, em 65536 fatias, garantindo assim um passo de resolução na ordem de microvolts com alta linearidade ($R^2=0,9993$), conforme seu *datasheet*.

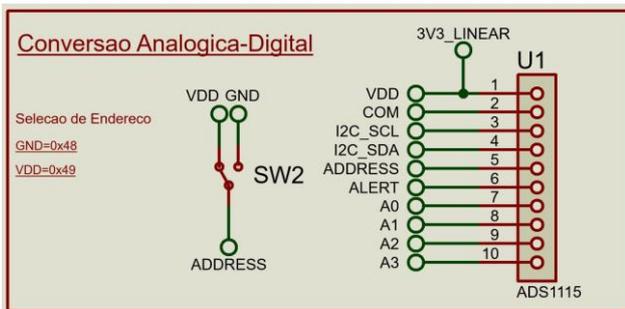


Figura 5 – Circuito elétrico do sistema de conversão AD

Também foi configurado o alcance da resolução do conversor para 1,000 V, de forma que é possível reduzir o valor das resistências *burden* para se chegar a este valor de tensão, reduzindo assim a amplificação de quaisquer ruídos dentro desse sinal. Além desta estratégia reduzir a potência de saída dos sensores, ela também remove a necessidade do uso de amplificadores de instrumentação para dar ganho e offset no sinal para condicioná-lo ao alcance do ADC, já que o ADC em si possui o alcance configurável.

Por fim, os códigos digitais de saída são então enviados ao microcontrolador principal por meio do protocolo I2C, que garante maior robustez que a UART, por exemplo, e permite que múltiplas placas de instrumentação possam ser conectadas no mesmo barramento de comunicação, já que cada uma recebe seu próprio endereço nele, poupando, portanto, o uso de GPIOs adicionais do microcontrolador e garantindo escalabilidade do sistema de aquisição.

A Figura 6 apresenta o resultado da curva de calibração de um dos medidores de corrente da placa de instrumentação. O gráfico, expresso na relação $V \times I$, mostra o comportamento linear com R^2 acima de 0,99, permitindo alta confiabilidade na leitura da medida. Através da equação linear gerada é possível utilizá-la em código para calcular a corrente real através da tensão medida. Os outros dois medidores tiveram resultado semelhante, apresentando uma diferença de até 2%.

2.2. Telemetria de dados

Os dados enviados pela placa de instrumentação precisam ser recebidos por um microprocessador embarcado, que também é responsável por efetuar a transmissão desses dados por rádio e pela rede de internet. A TABELA I apresenta alguns dos microcontroladores mais comuns utilizados em projetos científicos.

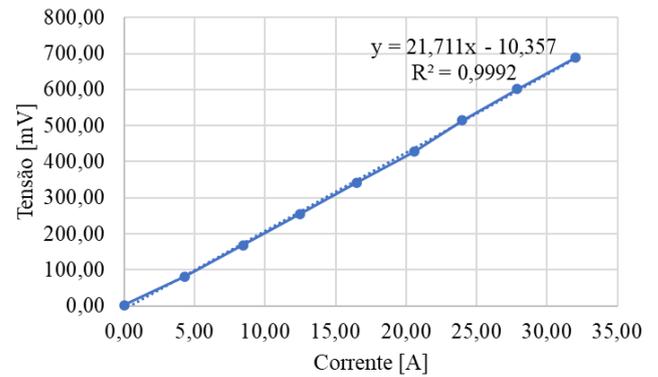


Figura 6 – Calibração do medidor de corrente

TABELA I – Microcontroladores comerciais

Microcontrolador	Descrição	Principais Características
Arduino Uno	Placa de desenvolvimento amplamente usada	ATmega328P, 14 pinos digitais, 6 pinos analógicos, 32 kB de flash
Arduino Mega 2560	Placa de desenvolvimento com mais recursos	ATmega2560, 54 pinos digitais, 16 pinos analógicos, 256 kB de flash
Raspberry Pi	Computador de placa única	Broadcom BCM2835, CPU ARM, GPIOs, Ethernet, USB, HDMI
ESP8266	Microcontrolador Wi-Fi	ESP8266EX, 17 pinos digitais, 1 pino analógico, 4 MB de flash
ESP32	Microcontrolador Wi-Fi e Bluetooth	ESP32-D0WDQ6, dual-core, 34 pinos digitais, 10 pinos analógicos
STM32F4 Discovery	Placa de desenvolvimento baseada em ARM	STM32F407VG, Cortex-M4, 168 MHz, 1 MB de flash
Teensy	Placas de desenvolvimento compactas	Diferentes modelos com vários recursos e tamanhos
BeagleBone Black	Computador de placa única baseado em ARM	AM335x, CPU ARM, GPIOs, Ethernet, USB, HDMI
PIC32MX	Microcontrolador da família PIC32	MIPS32, vários modelos com diferentes recursos e tamanhos
MSP430	Microcontrolador de baixo consumo de energia	Diferentes modelos com diferentes recursos e tamanhos

Uma escolha muito comum é o uso do Arduino, que é amplamente utilizado em projetos devido à sua facilidade de uso, flexibilidade e suporte da comunidade. Ele é particularmente popular em projetos que envolvem automação residencial, robótica, sensores e sistemas de controle. O Arduino também é conhecido por ter uma ampla variedade de placas de desenvolvimento, como o Arduino Uno, Arduino Mega e Arduino Nano, cada qual com diferentes recursos e especificações, permitindo aos usuários escolherem a que melhor se adapta às suas necessidades.

No entanto, quando se trata de conectividade de rede e processamento, o Arduino pode apresentar algumas limitações. As placas Arduino convencionais geralmente não possuem conectividade de rede integrada, o que significa que é necessário adicionar módulos externos para se conectar a redes Wi-Fi ou Ethernet. Além disso, o poder de processamento do Arduino também pode ser limitado em comparação com microcontroladores mais avançados, como o ESP32. O Arduino Uno, por exemplo, possui um processador ATmega328P com uma velocidade de clock de 16 MHz e uma quantidade limitada de memória flash e RAM. Isso pode restringir a capacidade do Arduino de lidar com grandes

volumes de dados ou executar algoritmos complexos de forma eficiente.

Portanto, ao considerar a necessidade de ter que transmitir dados do sistema do barco de forma remota, é vantajoso utilizar o ESP32 em comparação com o Arduino. O ESP32 oferece uma série de benefícios significativos que tornam a tarefa de transmissão e processamento de dados mais eficiente e versátil. Ele possui conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada, o que facilita a comunicação sem fio com outros dispositivos dentro do mesmo sistema ou entre dispositivos conectados a diferentes redes pela internet, como banco de dados remotos responsáveis pelo armazenamento desses dados. Isso torna o ESP32 uma boa escolha para projetos que exigem a transferência de dados em tempo real pela rede. Fora isso, ele foi projetado especificamente para fornecer uma maior capacidade de processamento e recursos de conectividade avançados. O ESP32 possui um processador dual-core Tensilica Xtensa LX6 com velocidades de clock de até 240 MHz, além de uma quantidade maior de memória flash e RAM em comparação com as placas Arduino convencionais.

A grande quantidade de memória do ESP32 proporciona uma base sólida para utilizar recursos modernos do C++. Isso permite a incorporação de bibliotecas mais avançadas, o uso de estruturas de dados complexas e o aproveitamento de recursos de gerenciamento de memória mais flexíveis. Essas capacidades melhoram a eficiência, a funcionalidade e a flexibilidade do código, tornando o ESP32 uma escolha poderosa para projetos que exigem recursos modernos de linguagem de programação.

Já a presença de dois núcleos no processador do ESP32 permite distribuir eficientemente a carga de trabalho entre eles, permitindo que diferentes tarefas sejam executadas em paralelo. Por exemplo, um núcleo pode ser dedicado à aquisição de dados de sensores e ao processamento de sinal em tempo real, garantindo uma resposta imediata a mudanças nas condições medidas. Enquanto isso, o outro núcleo pode ser usado para tarefas de comunicação em rede, como enviar os dados coletados para um servidor remoto ou receber comandos de controle.

Além disso, embora o ESP32 não possua nativamente a funcionalidade *Long Range* (LoRa), que foi uma das tecnologias de comunicação de rádio implementadas no barco, já há módulos comerciais que a implementam, oferecendo tanto o chip modulador quanto a antena apropriada, permitindo comunicação por longas distâncias a uma baixa taxa de dados, geralmente em locais onde não se possui conectividade com a rede de internet. Dados estes fatores, o ESP32 foi selecionado como o microcontrolador mais apropriado para a aplicação.

2.2.1. Tecnologia LoRa

LoRa é uma tecnologia de comunicação sem fio de longo alcance e baixo consumo de energia, projetada especificamente para aplicações de Internet das Coisas (do inglês, *Internet of Things* – IoT) e redes de sensores. A principal característica do LoRa é sua capacidade de alcançar distâncias de comunicação significativas, em geral de vários quilômetros, com consumo de energia muito baixo. Essa combinação torna a tecnologia ideal para aplicações em áreas

amplas, como monitoramento ambiental, agricultura inteligente, gestão de ativos, cidades inteligentes e muitos outros casos.

A tecnologia LoRa opera na faixa de frequência de rádio não licenciada, como 868 MHz na Europa e 915 MHz na América do Norte, o que permite uma implantação mais flexível e menos custosa. Ela utiliza modulação de espectro espalhado (do inglês, *Chirp Spread Spectrum* – CSS) para alcançar maior resistência a interferências e maior sensibilidade de recepção em relação a outras tecnologias de rádio de longo alcance.

Cabe ressaltar que, embora o LoRa seja adequado para aplicações que exigem uma baixa taxa de comunicação de dados e onde a latência não é um fator crítico, ele pode ser uma opção viável. Essa ponderação foi efetuada na escolha de um rádio para a transmissão dos dados de telemetria da embarcação, uma vez que se trata de pequenos pacotes de dados, cuja latência pode ser alta, já que um dos objetivos é garantir máxima distância de transmissão.

2.2.2. Fatores de transmissão

Vários fatores afetam as características da transmissão, incluindo o fator de espalhamento (do inglês, *Spreading Factor*), a largura de banda (do inglês, *Bandwidth*), a potência de transmissão e a taxa de codificação (do inglês, *Coding Rate*). É importante ajustar adequadamente esses parâmetros de acordo com os requisitos específicos da aplicação. A seleção ideal do fator de espalhamento, largura de banda, potência de transmissão e taxa de dados depende do ambiente, das distâncias de comunicação, das restrições regulatórias e dos requisitos de energia da aplicação em questão. Uma otimização cuidadosa desses fatores garante um desempenho eficiente e confiável na transmissão LoRa. A seguir são detalhados os principais fatores de transmissão.

Fator de espalhamento: Determina a eficiência espectral e a sensibilidade de recepção. Quanto maior seu valor, maior é a resistência a interferências e a distância máxima de comunicação. Porém, menor é a taxa de dados. Por exemplo, um fator de 7 oferece uma taxa de dados mais alta do que um fator de 12, mas é mais suscetível a interferências e possui menor distância. A escolha do fator depende das necessidades da aplicação em termos de taxa de dados versus alcance e robustez. A Figura 7 apresenta uma comparação entre diferentes fatores de dispersão.

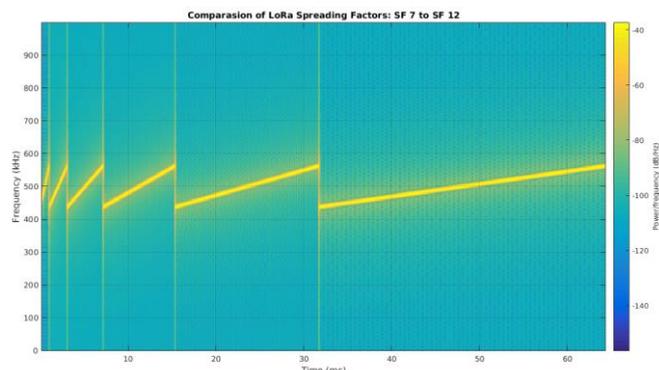


Figura 7 – Comparação entre diferentes fatores de dispersão

Largura de Banda: A largura de banda define a quantidade de espectro de rádio utilizada para a transmissão. No LoRa, a

largura de banda disponível varia de 125 kHz a 500 kHz. Uma largura de banda mais estreita resulta em maior eficiência espectral, mas também em menor taxa de dados. Por outro lado, uma largura de banda mais ampla permite taxas de dados mais altas, mas requer mais energia e é mais suscetível a interferências. A seleção da largura de banda depende das restrições de espectro, das necessidades de taxa de dados e da robustez desejada.

Potência de Transmissão: A potência de transmissão afeta o alcance da comunicação LoRa. Quanto maior a potência de transmissão, maior é o alcance, mas também maior é o consumo de energia. A potência de transmissão deve ser ajustada de acordo com as restrições regulatórias locais e as necessidades específicas da aplicação em termos de alcance e economia de energia.

Taxa de Encodificação: Refere-se à taxa na qual os dados são convertidos em símbolos de transmissão. Essa taxa influencia diretamente a taxa de dados efetiva e a robustez da comunicação no sistema LoRa. Ao utilizar uma taxa de encodificação mais alta, como 4/5, por exemplo, uma quantidade maior de redundância é adicionada aos símbolos transmitidos. Isso resulta em uma maior robustez contra interferências e ruídos, pois a presença de redundância permite a correção de erros. No entanto, essa maior redundância também implica em uma taxa de dados efetiva menor, já que uma porção dos símbolos transmitidos é utilizada para transmitir informações redundantes. Por outro lado, ao utilizar uma taxa de encodificação mais baixa, como 4/7, menos redundância é adicionada aos símbolos transmitidos. Isso resulta em uma maior taxa de dados efetiva, pois mais informações úteis podem ser transmitidas. No entanto, a redução da redundância implica em uma menor robustez contra interferências, uma vez que há menos capacidade para corrigir erros.

2.2.3. Implementação e Perda de Retorno

O microcontrolador utilizado possui o módulo SX1276, um modem LoRa de baixa potência (20 mW) e alta sensibilidade (-148 dBm), comum no mercado. Ele opera em 3 faixas de frequências selecionáveis: 433 MHz, 868 MHz e 915 MHz. Esse modem possui uma série de registradores dedicados à configuração dos parâmetros de transmissão descritos anteriormente, que são acessíveis por meio de uma interface SPI (do inglês, *Serial Peripheral Interface*), permitindo alterá-los de forma flexível e conveniente em tempo real, viabilizando a programação de taxa de dados adaptativa baseada em diferentes condições do sistema.

Para garantir máxima transmissão de sinal, é necessário considerar que haja casamento de impedância entre a saída do amplificador do modem, a antena e a trilha condutora na PCB que conecta o modem à antena, pois, em altas frequências, é necessário considerar esses componentes como sendo uma linha de transmissão.

Em relação à trilha condutora da PCB, há um comprimento crítico de linha de transmissão na qual, caso ela esteja abaixo, podemos desconsiderá-la na questão do casamento. Caso esteja acima, o comprimento da trilha precisa especificamente ser casado com a impedância característica da linha de transmissão sendo utilizada, que é 50 ohms neste caso, pois foi determinada pelo modem em seu datasheet. Tendo em vista

que o modem e o design da placa microcontrolada vieram prontos comercialmente, restou a nós a tarefa de casar a impedância da antena com a do sistema.

A forma de análise para este casamento é feita utilizando o conceito de perda de retorno, ou razão de onda estacionária (do inglês, *Standing Wave Ratio* – SWR), que é uma medida que indica a eficiência da transferência de potência entre um sistema de transmissão e uma carga, como uma antena. Ele é calculado comparando as amplitudes das ondas incidentes e refletidas em uma linha de transmissão. Quando a impedância da linha de transmissão e da carga estão perfeitamente casadas, toda a potência é transferida da fonte para a carga, resultando em uma proporção de SWR de 1:1. Nesse caso, não há reflexão de sinal e a transferência de potência é eficiente.

No entanto, quando há uma má adaptação de impedância entre a fonte e a carga, parte da potência é refletida de volta para a fonte. Isso resulta em um aumento do SWR, indicando uma perda de retorno. Quanto maior o SWR, maior é a perda de potência devido às reflexões. Uma alta perda de retorno pode ter impactos negativos na eficiência do sistema de transmissão, causando perda de potência, menor alcance de transmissão e possíveis danos aos componentes eletrônicos.

Um bom valor de SWR é geralmente considerado abaixo de 2. Isso significa que a relação entre as ondas incidentes e refletidas na linha de transmissão está dentro de limites aceitáveis. Quando o SWR é inferior a 2, a quantidade de potência refletida de volta para a fonte é relativamente baixa.

Um analisador de vetor de redes (do inglês, *Vector Network Analyzer* – VNA) é um instrumento de medição utilizado para analisar as características elétricas de componentes e sistemas de comunicação. Ele é amplamente utilizado para medir parâmetros como impedância, coeficiente de reflexão, perda de inserção e perda de retorno.

O VNA geralmente opera em frequências de radiofrequência (RF) ou micro-ondas e é capaz de medir a magnitude e a fase das ondas incidentes e refletidas em uma linha de transmissão ou em uma antena. Isso permite a análise completa do comportamento do sinal ao longo de uma ampla faixa de frequência.

Um VNA foi utilizado para avaliar o desempenho das antenas fornecidas juntamente com o módulo LoRa. Ao realizar os testes, todas as antenas mostraram um valor de SWR acima de 3, o que indica um desajuste significativo e poderia impactar a distância máxima de transmissão em um ambiente prático.

Com base nessas descobertas, decidiu-se adquirir uma nova antena para substituir as antenas problemáticas. Após a obtenção da nova antena, repetiu-se o teste utilizando o VNA, e desta vez constatou-se que a nova antena atendia aos parâmetros aceitáveis, apresentando um SWR em torno de 1,6.

Essa experiência destaca a importância de utilizar tais ferramentas para realizar análises mais precisas do desempenho das antenas e identificar possíveis problemas de casamento de impedância. Dessa forma, é possível tomar medidas corretivas adequadas, como aquisição de novas antenas, para garantir um sistema de comunicação eficiente e confiável.

2.3. Protocolo de comunicação

A tecnologia LoRa é um protocolo de camada física, o que significa que ela define as especificações físicas para a transmissão e recepção dos dados, mas não inclui um protocolo de camada de enlace ou de rede completo.

Para estabelecer uma comunicação mais efetiva e confiável usando a tecnologia LoRa, é necessário adicionar camadas do protocolo acima da camada física. Assim, decidiu-se implementar o protocolo Mavlink (do inglês, *Micro Air Vehicle Communication Protocol*). O Mavlink é um protocolo de comunicação leve e eficiente, projetado inicialmente para a troca de informações entre sistemas autônomos, como veículos aéreos não tripulados (drones) e estações terrestres. Ao utilizá-lo em conjunto com o LoRa, é possível estabelecer um enlace de dados robusto e confiável. O Mavlink define uma estrutura de mensagens e um conjunto de comandos que permitem a troca de informações entre dispositivos remotos e estações terrestres. Ele oferece recursos como controle de fluxo, verificação de integridade dos dados e gerenciamento de erros, garantindo a confiabilidade na transmissão dos dados.

Sua estrutura de mensagem é composta por diferentes campos que possuem funções específicas dentro do pacote de mensagem, listadas como:

Header: O cabeçalho contém informações como o identificador do sistema e do componente que envia a mensagem, a sequência de mensagens e a contagem de mensagens na sequência. Essas informações ajudam a identificar e organizar as mensagens durante a transmissão.

Payload: A carga útil é onde os dados principais são armazenados. Ele pode variar de tamanho dependendo da mensagem específica e contém as informações que estão sendo transmitidas, como comandos, dados de sensores, status, etc.

Checksum: O cheque de redundância cíclica é um campo utilizado para detecção de erros. Ele é calculado a partir dos dados da mensagem, incluindo o cabeçalho e o *payload*, e é usado para verificar se houve alguma corrupção ou alteração nos dados durante a transmissão. Ele é gerado usando um algoritmo matemático que gera um valor único com base nos dados da mensagem, permitindo a detecção de erros com alta confiabilidade.

Como redundância adicional contra conflitos de interferência nos canais de comunicação usados pelo LoRa durante a competição, decidiu-se adicionar um roteador 4G à embarcação, ao qual o microcontrolador pode se conectar por WiFi para enviar dados para o aplicativo rodando na nossa estação de terra. Entretanto, outros desafios surgiram. Quando dois ou mais dispositivos se encontram numa mesma sub-rede, estabelecer uma comunicação entre eles é relativamente simples, já que a comunicação é mediada pelo gateway (geralmente um roteador), que atribui endereços IP locais para os dispositivos conectados a ele. Nesse caso, basta que o microcontrolador saiba o endereço IP local de um outro dispositivo para poder enviar requisições a ele e receber respostas. Contudo, quando os dispositivos se encontram em diferentes sub-redes, como é o caso do microcontrolador no barco e o aplicativo na estação de terra, estabelecer uma comunicação direta entre eles se torna mais complexo devido à separação das redes.

Nessa situação, é possível utilizar soluções como o encaminhamento de portas (do inglês, *port forwarding*) nos roteadores. O encaminhamento de portas envolve redirecionar as solicitações recebidas em uma porta específica do roteador para um endereço IP e porta correspondentes em uma sub-rede interna. No entanto, o encaminhamento de portas requer acesso direto às configurações do roteador, o que pode ser limitado em certos contextos. Além disso, a configuração manual em cada roteador envolvido pode ser trabalhosa e exigir conhecimento específico do equipamento utilizado.

Ademais, há provedores que utilizam o CGNAT (do inglês, *Carrier-Grade Network Address Translation*), técnica utilizada para lidar com a escassez de endereços IPv4 públicos. Ele permite que vários clientes compartilhem o mesmo endereço IP público. Contudo, isso impossibilita que o encaminhamento de portas seja feito por parte do cliente, já que seu roteador não possui um IP público individual.

Tendo isso em vista, a solução encontrada foi a utilização de uma rede virtual privada (VPN) para criar um túnel seguro entre as sub-redes, permitindo que os dispositivos se comuniquem como se estivessem na mesma rede local. A VPN estabelece uma conexão criptografada entre os dispositivos através da internet, proporcionando uma camada adicional de segurança. Ao configurar a VPN, os dispositivos podem obter endereços IP virtuais da mesma rede, permitindo a comunicação direta e facilitando o envio de requisições e recebimento de respostas entre o microcontrolador no barco e o aplicativo na estação de terra, mesmo que estejam em diferentes sub-redes. Com isso, foi possível conectar o microcontrolador ao roteador 4G portátil e enviar dados para um servidor de banco de dados remoto, ambos conectados de forma virtual em sub-redes distintas.

Para recepção e processamento dos dados, foi desenvolvido um programa em C# usando a plataforma de desenvolvimento .NET, desenvolvida pela Microsoft. Ela fornece um ambiente para criar e executar aplicativos em diferentes linguagens de programação, como C#, VB.NET e F#, além de uma ampla variedade de bibliotecas e frameworks para simplificar o desenvolvimento de aplicativos, abrangendo desde aplicativos de desktop e web até aplicativos móveis e serviços em nuvem. A plataforma também inclui um ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) chamado Visual Studio, que oferece ferramentas para codificação, depuração e gerenciamento de projetos.

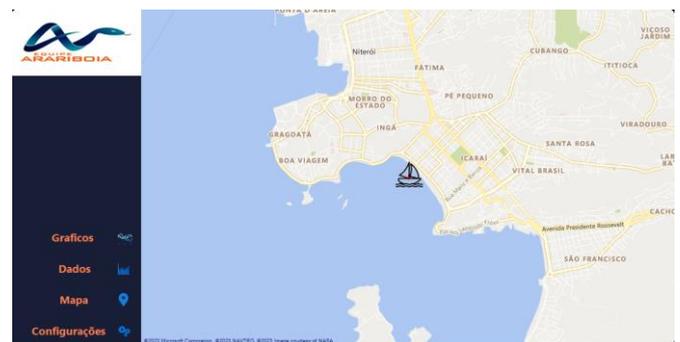


Figura 8 – Interface de software de aquisição desenvolvido

Os dados podem ser recebidos tanto por comunicação serial com o rádio LoRa em terra quanto diretamente por uma conexão de rede pela internet. Após isso eles passam por

processamento para garantir que não houve corrupção da mensagem durante a transmissão, então são exibidos na interface desenvolvida, vista na Figura 8, e gravados no computador para documentar a performance do barco na água.

3. CONCLUSÃO

A crise climática tem aumentado nos últimos anos, tornando necessário o desenvolvimento de soluções imediatas para a sua solução. Neste aspecto, o Desafio Solar Brasil organiza uma competição de barcos movidos à energia solar a fim de estimular a aplicação de fontes alternativas de energia em embarcações. Dentro desse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de telemetria aplicado a embarcação solar, desde a concepção e metodologia de escolhas até alguns resultados, como a linearidade das medições de corrente, a escolha do microcontrolador mais apropriado e a tecnologia de transmissão LoRa.

REFERENCIAS

- [1] H. Ritchie, M. Roser, e P. Rosado, “CO₂ and Greenhouse Gas Emissions”, *Ourworldindata.org*, 2020. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>
- [2] United Nations Climate Change, “The Paris Agreement”, *United Nations Framework Convention on Climate Change*, 2022. <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [3] EPA, “Global Greenhouse Gas Emissions Data”, *United States Environmental Protection Agency*, 2022. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>
- [4] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, e J. M. Marquez-Barja, “A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges”, *Smart Cities*, vol. 4, n° 1, p. 372–404, mar. 2021, doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [5] X. Sun, Z. Li, X. Wang, e C. Li, “Technology Development of Electric Vehicles: A Review”, *Energies*, vol. 13, n° 1, p. 90, dez. 2019, doi: 10.3390/en13010090.