

# Sistema de Geofencing com ESP32 e GPS para Controle de Aproximação de Embarcações à Áreas Marinhas Protegidas

Celso Maciel da Costa<sup>†</sup>  
Unidade da Uergs em Guaíba  
Universidade Estadual do RS  
Guaíba RS Brasil  
celso-costa@uergs.edu.br

Leticia Vieira Guimaraes  
Unidade da Uergs em Guaíba  
Universidade Estadual do RS  
Guaíba RS Brasil  
leticia-guimaraes@uergs.edu.br

Luis Vitor Vaz de Mattos  
Unidade da Uergs em Guaíba  
Universidade Estadual do RS  
Guaíba RS Brasil  
luis-mattos@uergs.edu.br

Federico Sucunza Perez  
Grupo de Estudos de Mamíferos  
Aquáticos do Rio Grande do Sul  
Torres RS Brasil  
fsucunza@gmail.com

Gabriel Larré  
Grupo de Estudos de Mamíferos  
Aquáticos do Rio Grande do Sul  
Torres RS Brasil  
gglarre@gmail.com

Paulo Henrique Ott  
Unidade da Uergs em Osório,  
Universidade Estadual do RS  
Osório RS Brasil  
paulo-ott@uergs.edu.br

## ABSTRACT

This paper presents an embedded geofencing system for monitoring vessel approach to the protected area surrounding Ilha dos Lobos (Torres, RS). The platform integrates an ESP32-based data logger, a GPS receiver and an on-board Haversine distance calculation to detect vessel proximity relative to a configurable protection radius. Position fixes and computed distances are persistently recorded to on-board flash (LittleFS) and events of entrance/exit are timestamped for later analysis. In laboratory and on-land trials, the system proved robust: GPS decoding, real-time distance computation and local logging operated reliably under continuous readout, and the onboard alert (buzzer) correctly signaled state changes. Limitations observed in controlled tests, including the need for field trials to evaluate GPS degradation and communication loss. A responsive web platform was developed to support remote visualization, alerting, and historical data analysis. Finally, are presented implementation details to facilitate replication and deployment on small craft for control and environmental monitoring.

## CCS CONCEPTS

Computer Systems Organization. Embedded and cyber-physical systems Embedded Systems. Embedded Software.

## KEYWORDS

Geofencing, Sistemas embarcados, GPS, Fórmula de Haversine, Unidade de Conservação, IoT

## 1. INTRODUÇÃO

O Refúgio de Vida Silvestre da Ilha dos Lobos (REVIS) é uma unidade de conservação (UC) federal localizada no litoral norte do Rio Grande do Sul (-29.3470; -49.7044), em frente ao município de Torres. A UC constitui um importante local de refúgio, descanso e alimentação para diversas espécies da fauna residentes e migratórias [1,2,3]. O REVIS é,

particularmente, conhecido pela presença sazonal de lobos-marinhos-sul-americanos (*Arctocephalus australis*) e leões-marinhos-sul-americanos (*Otaria flavescens*), representado o ponto mais setentrional de concentração dessas espécies no Atlântico Sul Ocidental [4].

A UC inclui, além da parte rochosa emersa da ilha, uma área marinha de 500 m no seu entorno, totalizando 1,44 [5] (Fig. 1). Do ponto de vista territorial, a região da UC é também caracterizada pela existência de uma importante comunidade pesqueira, sediada às margens do rio Mampituba. Embora, historicamente, a Ilha dos Lobos tenha sido um importante local de pesca para esta comunidade, desde a criação da UC, em 1983, esta atividade não é mais permitida, em conformidade com a legislação nacional que proíbe o uso direto de recursos em UCs de proteção integral [6].



**Fig. 1:** Mapa com a localização do REVIS Ilha dos Lobos e seus limites (quadrado branco) e indicação do rio Mampituba, onde fica localizada a comunidade pesqueira.

Apesar da existência de regulamentação legal e de seu conhecimento por parte da comunidade, pescadores artesanais frequentemente não dispõem de instrumentos eletrônicos capazes de indicar com precisão os limites da UC, especialmente em condições de baixa visibilidade, períodos noturnos ou mar adverso. Em contraste com as UCs terrestres, a sinalização dos limites de áreas protegidas

marinhas é geralmente mais complexa. No caso específico do REVIS, não há marcos que permitam identificar visualmente os limites da UC. Essas limitações contribuem para incursões acidentais na zona de proteção, criando conflitos com órgãos fiscalizadores e aumentando o risco de impactos ambientais involuntários [7], bem como de suas correspondentes implicações legais.

Nesse contexto, justifica-se o desenvolvimento de um Sistema de Controle e Alerta de Aproximação baseado em tecnologias de Internet das Coisas (IoT). Dispositivos IoT aplicados ao monitoramento costeiro têm apresentado alto desempenho em aplicações que exigem baixo consumo energético, comunicação estável e coleta contínua de dados ambientais ou geográficos [8,9]. O ESP32, microcontrolador amplamente utilizado em aplicações distribuídas, integra conectividade Wi-Fi/Bluetooth, capacidade de processamento adequada e baixo custo, o que o torna adequado para sistemas embarcados dedicados à geolocalização e telemetria [10,11].

Ao empregar o ESP32 em conjunto com um módulo GPS, torna-se possível implementar geofencing embarcado, isto é, a delimitação digital de fronteiras geográficas com detecção local de violações [12]. Assim, o próprio equipamento na embarcação pode emitir alertas imediatos — sonoros, luminosos ou via aplicativo — quando o barco se aproximar da zona de exclusão ao redor da Ilha dos Lobos. Além disso, a integração opcional com LoRa ou GSM permite o envio periódico de coordenadas a um servidor central, viabilizando monitoramento remoto, registro histórico e apoio à fiscalização ambiental.

Essa solução alinha-se às diretrizes contemporâneas de conservação ambiental, que defendem o uso de ferramentas tecnológicas de baixo custo e alta escalabilidade para monitoramento de áreas sensíveis [13,14]. Ao mesmo tempo, contribui para a segurança e autonomia dos pescadores, reduzindo infrações involuntárias e promovendo uma convivência mais sustentável com os limites impostos pela Unidade de Conservação. Portanto, a implantação de um sistema IoT baseado em ESP32 e GPS para controle e alerta de aproximação constitui uma estratégia cientificamente fundamentada, de alta relevância ambiental e social, e compatível com os princípios atuais de manejo adaptativo e monitoramento inteligente de ecossistemas costeiros.

## 2. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema desenvolvido, denominado SIG-REVIS (Sistema de Informações Geográficas do REVIS), é composto por uma placa PCB perfurada, uma ESP32, um módulo GPS GY-NEO6MV2, um regulador de tensão DC-DC, um buzzer, um conector plug e play e uma chave liga/desliga. A montagem foi realizada sobre uma placa padrão com dimensões de 5cm x 10 cm, onde todas as conexões foram planejadas e isoladas Figura 2.

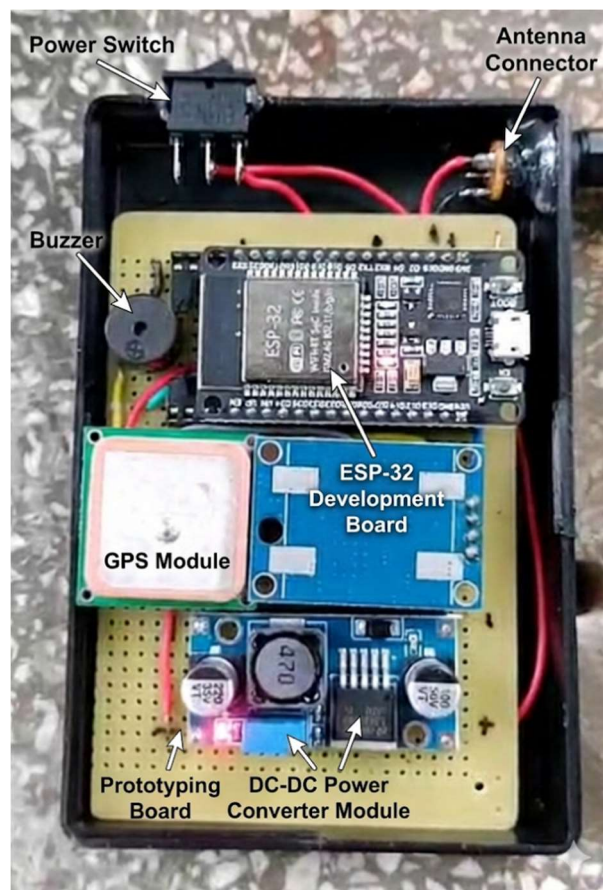


Fig. 2: Sistema Desenvolvido.

Inicialmente, foi instalado um conector para a ESP32, permitindo que o microcontrolador seja facilmente removido ou substituído em caso de falha, sem a necessidade de dessoldagem ou retrabalho na placa. A ESP32 atua como o elemento central do sistema, sendo responsável por todas as conexões e processamento de dados.

O pino 13 da ESP32 é utilizado para o controle do buzzer.. Quando o microcontrolador envia um sinal a esse pino, o buzzer é acionado. A alimentação principal da ESP32 é feita através do pino VIN, conectado à saída do regulador de tensão externo. Esse regulador possui capacidade para operar com tensões de entrada entre 2 V e 34 V, oferecendo proteção e estabilidade ao sistema. Trata-se de um conversor DC-DC boost, caracterizado por sua alta eficiência.

Entretanto, é importante destacar que o regulador interno da placa ESP32 apresenta limitações de operação: em tensões abaixo de 6 V. O funcionamento torna-se instável, e tensões acima de 9 V podem reduzir sua vida útil. Com base em testes laboratoriais realizados, entende-se que 6 V é a tensão ideal de alimentação, garantindo desempenho adequado mesmo durante o uso intensivo dos módulos Wi-Fi ou Bluetooth.

Essa configuração permite ainda a utilização de diferentes fontes de alimentação, o que traz flexibilidade ao sistema e se mostra vantajoso diante das restrições orçamentárias do projeto, assim como da perspectiva de sua aplicação em maior escala em comunidades pesqueiras artesanais.

A alimentação do módulo GPS é fornecida pelo pino 3.3 V da ESP32. As conexões de comunicação são feitas pelos pinos 16 (RX) e 17 (TX) da ESP32, interligados aos pinos TX e RX do módulo GPS, respectivamente. O sistema também possui uma chave interruptora, responsável por ligar e desligar o circuito, e um conector que permite a entrada de fontes externas variando entre 6 V e 34 V.

Embora se trate de um sistema relativamente simples, composto principalmente pela ESP32 e pelo módulo GPS NEO6MV2, o processo de montagem da PCB apresentou desafios significativos. Como as conexões foram realizadas manualmente, fio a fio, foi necessário realizar testes de continuidade após cada soldagem, a fim de evitar curtos-circuitos e garantir a integridade elétrica do sistema. Além disso, questões mecânicas, como o posicionamento e fixação dos componentes, exigiram atenção especial para assegurar a confiabilidade e robustez do conjunto.

Após a montagem e os testes de funcionamento, todos os componentes foram fixados de forma segura, evitando deslocamentos que pudessem causar falhas de conexão, especialmente entre o módulo GPS e a ESP32. Por fim, o sistema foi instalado em uma caixa patola, de modo a proteger o circuito e facilitar o uso pelo operador. Assim, o usuário final precisa apenas conectar a fonte de alimentação e acionar a chave liga/desliga para iniciar o funcionamento. Até o momento, foram fabricadas três unidades do sistema.

### 3. CÁLCULO DA APROXIMAÇÃO A ÁREA MARÍTIMA RESTRITA.

A aproximação da embarcação à área de pesca proibida da Ilha dos Lobos (Fig 3), é determinada por meio do cálculo da distância geodésica entre a posição atual da embarcação e o ponto central da área de proteção marinha. Para esse cálculo é utilizada a fórmula de Haversine [15], que considera a curvatura terrestre e fornece alta precisão para distâncias curtas, como em zonas costeiras.



**Fig. 3:** Representação da zona de proteção da Ilha dos Lobos e posição relativa da embarcação

A cada ciclo de coleta do GPS, são obtidas as coordenadas da embarcação (latitude e longitude). Essas coordenadas são comparadas com a coordenada de referência da Ilha dos Lobos.

A fórmula de Haversine tem suas raízes na trigonometria e foi utilizada historicamente em navegação para calcular o ângulo central entre dois pontos na superfície de uma esfera. Define-se inicialmente a função haversine conforme a Eq. (1):

$$(1) \text{hav}(\theta) = \sin^2(\theta/2),$$

onde  $\theta$  é um ângulo em radianos.

Considerando dois pontos na superfície terrestre, com latitudes  $\varphi_1, \varphi_2$  e longitudes  $\lambda_1, \lambda_2$  (em radianos), o haversine do ângulo central  $c$  que separa os pontos pode ser calculado conforme a Eq. (2):

$$(2) \text{hav}(c) = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1).$$

Para simplificação computacional, define-se o termo auxiliar  $a$ , apresentado na Eq. (3):

$$(3) a = \text{hav}(\varphi_2 - \varphi_1) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \text{hav}(\lambda_2 - \lambda_1).$$

A partir do valor de  $a$ , o ângulo central  $c$  é obtido por meio da Eq. (4):

$$(4) c = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{a}).$$

Entretanto, visando maior estabilidade numérica, especialmente para valores próximos de 0 ou 1, recomenda-se a utilização da forma equivalente apresentada na Eq. (5):

$$(5) c = 2 \cdot \text{atan2}(\sqrt{a}, \sqrt{1-a}).$$

Por fim, a distância geodésica  $d$  entre os dois pontos, medida ao longo do círculo máximo, é calculada conforme a Eq. (6):

$$(6) d = R \cdot c,$$

onde  $R$  representa o raio da Terra, adotado neste trabalho como  $R = 6\,378\,137$  m, correspondente ao raio equatorial do elipsóide WGS84.

A partir da Eq. (6), torna-se possível determinar a proximidade da embarcação em relação à área de proteção da Ilha dos Lobos, permitindo a verificação automática do atendimento aos limites espaciais definidos para a zona protegida.

Observações de implementação em um programa de computador: (i) converter coordenadas de graus para radianos antes de aplicar as fórmulas; (ii) normalizar  $\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$  para o intervalo  $[-\pi, \pi]$  para evitar saltos ao atravessar a linha de mudança de data; (iii) usar a forma com  $\text{atan2}$  para estabilidade numérica quando  $a$  é próximo de 0 ou 1 onde:

$a$  é a "quantidade haversine" ( combina as diferenças angulares e as latitudes.

$c$  é o ângulo central (em radianos) subtendido entre os dois pontos na esfera.

$d$  é a distância geodésica ao longo da superfície (mesma unidade de R).

$R$  é o raio da Terra: usado aqui  $R=6378137\text{m}$  (valor do elipsóide/raio equatorial em metros)

A fórmula de Haversine é precisa para distâncias curtas e média. Para maior precisão em grandes distâncias, ou aplicações com necessidades de altíssima precisão, deve ser usada elipsóide (Vincenty). Haversine é suficientemente preciso para zonas litorâneas, portanto, adequada ao presente sistema (1000 m),

### 3.1 EXEMPLO NUMÉRICO PASSO A PASSO.

A seguir apresenta-se a aplicação da fórmula de Haversine para o cálculo da distância geodésica, conforme descrito nas Eqs. (1) a (6), utilizando como referência as coordenadas da Ilha dos Lobos.

Centro da Ilha dos Lobos (referência):

$$\varphi_1 = -29.32550^\circ, \quad \lambda_1 = -49.79050^\circ$$

Posição da embarcação (exemplo):

$$\varphi_2 = -29.32000^\circ, \quad \lambda_2 = -49.77500^\circ$$

Inicialmente, realiza-se a conversão das coordenadas de graus para radianos, conforme o fator de conversão apresentado na Eq. (7):

$$(7) \text{ fator} = \pi / 180 \approx 0.01745329252.$$

Aplicando a Eq. (7), obtêm-se:

$$(8) \quad \varphi_1 = -29.32550 \times 0.01745329252 = -0.5118265298 \text{ rad,}$$

$$(9) \quad \lambda_1 = -49.79050 \times 0.01745329252 = -0.8690081612 \text{ rad,}$$

$$(10) \quad \varphi_2 = -29.32000 \times 0.01745329252 = -0.5117305367 \text{ rad,}$$

$$(11) \quad \lambda_2 = -49.77500 \times 0.01745329252 = -0.8687376352 \text{ rad.}$$

As diferenças angulares são calculadas conforme as Eqs. (12) e (13):

$$(12) \quad \Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 0.0000959931 \text{ rad,}$$

$$(13) \quad \Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = 0.0002705260 \text{ rad.}$$

O cálculo do termo  $a$ , definido na Eq. (3), é realizado a partir dos termos intermediários apresentados nas Eqs. (14) a (16):

$$(14) \quad \sin^2(\Delta\varphi / 2) \approx 2.30369 \times 10^{-9},$$

$$(15) \quad \sin^2(\Delta\lambda / 2) \approx 1.82990 \times 10^{-8},$$

$$(16) \quad \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \approx 0.760.$$

Substituindo os valores obtidos na Eq. (3), resulta:

$$(17) \quad a = 1.62117 \times 10^{-8}.$$

O ângulo central  $c$  é então determinado pela Eq. (4):

$$(18) \quad c = 2 \cdot \arcsin(\sqrt{a}) \approx 0.0002546506 \text{ rad.}$$

Por fim, a distância geodésica é calculada conforme a Eq. (6), adotando-se  $R = 6\,378\,137 \text{ m}$ :

$$(19) \quad d = R \cdot c \approx 1624.20 \text{ m.}$$

Assim, conclui-se que a embarcação encontra-se a aproximadamente 1624.20 m do centro da Ilha dos Lobos.

Considerando uma zona de proteção circular de raio  $R_{\text{prot}} = 1000 \text{ m}$ , a distância até a borda da área protegida é obtida conforme a Eq. (20):

$$(20) \quad \Delta_{\text{borda}} = d - R_{\text{prot}}.$$

Substituindo os valores:

$$(21) \quad \Delta_{\text{borda}} = 1624.20 - 1000 = 624.20 \text{ m.}$$

Como o valor obtido na Eq. (21) é superior a 500 m, conclui-se que a embarcação não se encontra dentro do limite crítico de 500 m da borda da zona protegida.

## 4. DETALHES DA IMPLEMENTAÇÃO.

O sistema foi implementado na ESP32, usando a IDE Arduino. O objetivo é verificar se a localização atual, obtida via GPS, está dentro de uma zona de alerta definida em torno de uma área central (a "Ilha dos Lobos" no exemplo principal, mas configurável).

Foram implementadas funções de conversão matemática, essenciais para realizar cálculos de distância precisos em uma esfera (o modelo da Terra). A função `toRad`, Fig. 4 a seguir

```
double toRad(double deg) {
    return deg * M_PI / 180.0;
}
```

Fig. 4 – Função que converte graus para radianos

Converte um valor de ângulo de graus para radianos. A maioria das funções trigonométricas (como `sin`, `cos`, `atan2`) espera que os ângulos, incluindo as coordenadas de latitude e longitude, sejam fornecidos em radianos. Esta função utiliza a constante matemática `M_PI` (o valor de  $\pi$ ) para realizar a conversão de graus para radianos, considerando que 180 graus correspondem a  $\pi$  radianos.

A função a seguir, Fig. 5, calcula a distância de grande círculo (a menor distância entre dois pontos na superfície de uma esfera) em metros, usando a Fórmula de Haversine.

Parâmetros:

- lat1, lon1: Coordenadas (Latitude e Longitude) do primeiro ponto (geralmente a posição atual do GPS).
- lat2, lon2: Coordenadas do segundo ponto (geralmente o centro da zona, LOBOS\_LAT, LOBOS\_LON).

A constante R (6,371,000.0) é o raio médio da Terra em metros. A função primeiro calcula a diferença de latitude (dLat) e longitude (dLon) e as converte para radianos. A variável a representa a parte central da fórmula de Haversine, que se relaciona com a distância angular.

A variável c indica a distância angular em radianos usando o arco tangente de dois argumentos (atan2).

O retorno é a distância final em metros. Esta é a distância do ponto atual até o centro da zona.

```
double haversine(double lat1, double lon1, double lat2,
double lon2) {
    const double R = 6371000.0;
    double dLat = toRad(lat2 - lat1);
    double dLon = toRad(lon2 - lon1);
    double a = sin(dLat / 2) * sin(dLat / 2) +
        cos(toRad(lat1)) * cos(toRad(lat2)) *
        sin(dLon / 2) * sin(dLon / 2);
    double c = 2 * atan2(sqrt(a), sqrt(1 - a));
    return R * c;
}
```

Fig. 5 – Implementação da fórmula de Haversine

A função a seguir, Fig. 6 é responsável por gravar os dados no sistema de arquivos, para que possam ser consultados posteriormente.

```
void salvarLog(const char *evento, double lat, double lon,
double dist) {
    File file = LittleFS.open("/log.txt", FILE_APPEND);
    if (!file) {
        Serial.println("Erro ao abrir log.txt");
        return;
    }
    file.printf("%s, %.6f, %.6f, Distância: %.1f m,
%02d/%02d/%04d %02d:%02d:%02d\n",
        evento lat, lon, dist,
        gps.date.day(), gps.date.month(), gps.date.year(),
        gps.time.hour(), gps.time.minute(),
        gps.time.second());

    file.close();
    Serial.println("Log salvo!");
}
```

Fig. 6 – Gravação de dados no arquivo de Log

A função da Fig. 6 grava uma linha formatada de log no arquivo /log.txt utilizando o sistema de arquivos LittleFS (Flash File System) do ESP32.

Parâmetros:

- evento: Uma string de texto que descreve o que aconteceu (ex: "ENTROU" ou "SAIU").
- lat, lon: Latitude e Longitude da posição onde o evento ocorreu.
- dist: A distância calculada da borda da zona no momento do evento.

O comando LittleFS.open("/log.txt", FILE\_APPEND) tenta abrir o arquivo para adição (append), garantindo que novos registros sejam adicionados ao final, sem sobrescrever os existentes.

file.printf(...): Utiliza a função printf para formatar a string de log com:

- O nome do evento.
- As coordenadas (com 6 casas decimais).
- A distância da borda em metros (com 1 casa decimal).
- A data e hora obtidas do objeto gps (do fix do GPS), formatadas para legibilidade.

A função file.close() garante que os dados sejam gravados no flash e os recursos do arquivo sejam liberados.

As funções setup e loop controlam a inicialização do hardware e a lógica principal do programa.

Setup configura o ambiente de execução, incluindo as comunicações seriais e o sistema de arquivos.

- Serial.begin(9600): Inicializa a comunicação serial USB para debug (monitor serial).
- GPSSerial.begin(9600, SERIAL\_8N1, 12, 14): Inicializa a comunicação HardwareSerial 2 do ESP32, dedicada à leitura dos dados do módulo GPS. Os pinos RX (12) e TX (14) são configurados.
- Configura o pino do BUZZER como saída e o desliga inicialmente.
- LittleFS.begin(): Tenta montar o sistema de arquivos. É crucial para o funcionamento da função salvarLog.

A função principal do programa, loop, é apresentada na Fig. 7.

```

void loop() {
  while (GPSSerial.available()) {
    gps.encode(GPSSerial.read());
  }
  if (gps.location.isValid() && gps.date.isValid() &&
gps.time.isValid()) {
    double lat = gps.location.lat();
    double lon = gps.location.lng();

    double distCenter = haversine(lat, lon, LOBOS_LAT,
LOBOS_LON);
    double distBorder = distCenter - ISLAND_RADIUS;
    if (distBorder < 0) distBorder = 0;

    Serial.printf("Pos: %.6f , %.6f | Distância borda: %.1f
m\n", lat, lon, distBorder);

    bool newInside = (distBorder <= ALERT_RADIUS);

    // Se houve mudança de estado, salvar log
    if (newInside != insideZone) {
      insideZone = newInside;
      if (insideZone) {
        digitalWrite(BUZZER_PIN, HIGH);
        Serial.println("ENTROU na zona proibida!");
        salvarLog("ENTROU", lat, lon, distBorder);
      } else {
        digitalWrite(BUZZER_PIN, LOW);
        Serial.println("SAIU da zona proibida!");
        salvarLog("SAIU", lat, lon, distBorder);
      }
    } else {
      // manter buzzer ligado/desligado
      digitalWrite(BUZZER_PIN, insideZone ? HIGH : LOW);
    }

    } else {
      Serial.println("Aguardando fix do GPS...");
    }
    delay(1000);
  }
}

```

Fig. 7 – Loop principal do programa

A cada ciclo de execução é realizada a leitura do GPS, cálculo de distância e verificação de geofence. Os principais comandos são:

```

while (GPSSerial.available()) {
  Gps.encode(GPSSerial.read());
};

```

Esta seção lê todos os dados recebidos do GPS via Serial e os alimenta à biblioteca TinyGPSPlus, que decodifica as mensagens.

if (gps.location.isValid() ...): Verifica se o módulo GPS tem um dados válidos (posição, data e hora). A lógica principal só é executada se houver dados válidos.

#### Cálculo da Distância:

distCenter: Calcula a distância Haversine do ponto GPS até o centro da zona (LOBOS\_LAT, LOBOS\_LON).

distBorder: Calcula a distância da posição atual até a borda da ilha:  $D_{borda} = D_{centro} - R_{ilha}$ . Se a distância for negativa (ou seja, dentro do ISLAND\_RADIUS), ela é forçada a 0.

#### Verificação do Geofence:

bool newInside = (distBorder <= ALERT\_RADIUS): Define o novo estado lógico. O ponto está dentro da zona de alerta se a distância da borda for menor ou igual ao ALERT\_RADIUS (ex: 1 km da borda da ilha).

#### Emissão de Alerta:

if (newInside != insideZone): Esta é a lógica de transição. Se o estado atual (insideZone) for diferente do novo estado (newInside), um evento de entrada ou saída acaba de ocorrer.

Ação de ENTROU: O buzzer é ligado (HIGH), uma mensagem é impressa, e o evento é registrado via salvarLog("ENTROU", ...).

Ação de SAIU: O buzzer é desligado (LOW), uma mensagem é impressa, e o evento é registrado via salvarLog("SAIU", ...).

## 5. TRANSMISSÃO DOS DADOS E VISUALIZAÇÃO EM PLATAFORMA WEB.

Os dados de navegação coletados pelo sistema embarcado são transmitidos para um banco de dados em nuvem sempre que houver disponibilidade de conectividade sem fio. O microcontrolador ESP32 monitora periodicamente o estado da conexão wireless e, ao identificar acesso à rede, inicia o processo de envio das informações previamente armazenadas localmente, bem como dos novos registros gerados em tempo real. O armazenamento local é realizado utilizando o sistema de arquivos LittleFS, projetado para dispositivos embarcados com memória flash [16].

Essa abordagem garante que a ausência temporária de conectividade não comprometa a coleta dos dados, assegurando sua posterior sincronização com a infraestrutura remota.

O banco de dados utilizado para armazenamento remoto é o Firebase [17], escolhido por oferecer suporte nativo a aplicações em tempo real, escalabilidade e integração facilitada com dispositivos IoT e aplicações web. Cada registro transmitido contém informações georreferenciadas da navegação, incluindo latitude, longitude, data e hora da coleta, além da distância calculada em relação à área de proteção da Ilha dos Lobos. Os dados são organizados de forma estruturada no banco, permitindo consultas eficientes, filtragem temporal e recuperação histórica das trajetórias monitoradas.

A partir dos dados armazenados no Firebase, uma interface Web responsiva foi desenvolvida para permitir a visualização e análise das informações coletadas. Essa interface possibilita o acompanhamento georreferenciado dos trajetos das embarcações, a consulta ao histórico de deslocamentos e a identificação de eventos de aproximação ou violação dos limites da área protegida. Por ser responsiva, a plataforma pode ser acessada tanto em computadores quanto em dispositivos móveis, ampliando a flexibilidade de uso por agentes de fiscalização e gestores ambientais.

Dessa forma, a integração entre o sistema embarcado, o banco de dados em nuvem e a interface Web constitui uma solução completa de monitoramento ambiental. Essa arquitetura contribui para o fortalecimento das ações de fiscalização, transparência dos dados e suporte às atividades de gestão e conservação em áreas marinhas protegidas.

## 6. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o sistema apresenta desempenho consistente e capacidade adequada para monitorar a aproximação de embarcações à área de proteção da Ilha dos Lobos. Os testes realizados em terra permitiram validar o cálculo de distância geodésica, mostrando que a aplicação da fórmula de Haversine é suficiente para estimar a posição relativa entre dois pontos geográficos, conforme os requisitos deste tipo de fiscalização ambiental.

Embora os testes em terra tenham demonstrado a correta execução dos cálculos de distância, o sistema ainda necessita de validação em uma embarcação em operação real. A Ilha dos Lobos possui formato irregular, o que implica variações significativas no raio efetivo da área protegida ao longo de seu contorno. Dessa forma, apenas medições realizadas em campo, com deslocamento real da embarcação ao redor da ilha, poderão confirmar a precisão dos cálculos de aproximação e a adequação dos limiares de alerta utilizados pelo sistema.

Também se observou que o sistema embarcado operou de forma estável, mesmo com leituras frequentes de GPS e processamento contínuo de dados. Um aspecto particularmente relevante é a capacidade de armazenar localmente, na memória flash do microprocessador ESP32, tanto os registros de deslocamento da embarcação quanto os valores calculados de distância em relação à Ilha dos Lobos. Essa estratégia de armazenamento interno garante que as informações permaneçam disponíveis mesmo em ambientes com ausência de conectividade, permitindo a posterior recuperação e exibição dos dados, seja para análise histórica ou integração com sistemas externos. Trata-se de uma solução de baixo custo e elevada confiabilidade, especialmente importante para cenários de monitoramento ambiental.

Apesar dos resultados positivos em ambiente controlado, ainda é necessário avaliar o comportamento do sistema em condições marítimas reais, onde fatores como instabilidade

de sinal, movimentação irregular da embarcação, interferências eletromagnéticas e condições climáticas podem influenciar o desempenho. Outro ponto relevante identificado durante o desenvolvimento é a necessidade de ampliar o escopo da solução para permitir não apenas o funcionamento embarcado, mas também a disponibilização remota das informações. Nesse sentido, a evolução para uma plataforma web responsiva surge como um caminho natural, oferecendo visualização georreferenciada dos trajetos, acesso ao histórico de navegação, emissão automática de alertas e suporte às atividades de fiscalização e conservação ambiental.

Além dos aspectos técnicos avaliados, a adoção de um sistema de monitoramento automático como o proposto traz benefícios diretos para a gestão ambiental da área de proteção da Ilha dos Lobos. A possibilidade de acompanhar, de forma contínua e objetiva, a aproximação de embarcações contribui para o fortalecimento das ações de fiscalização, reduzindo a dependência exclusiva de patrulhamento presencial e ampliando a cobertura de monitoramento com menor custo operacional. O registro histórico dos deslocamentos e das violações potenciais à zona protegida fornece subsídios relevantes para análises ambientais, elaboração de relatórios técnicos e apoio à tomada de decisão por órgãos gestores. Dessa forma, a solução proposta não apenas auxilia na prevenção de impactos ambientais, como também se configura como uma ferramenta estratégica para a conservação da biodiversidade, o planejamento de políticas públicas e o aprimoramento das práticas de gestão sustentável em áreas marinhas protegidas.

## 7. CONCLUSÃO.

O sistema desenvolvido mostrou-se operacional e eficaz nos testes realizados em terra, demonstrando que a utilização da fórmula de Haversine é adequada para determinar a distância entre uma embarcação e a área de proteção da Ilha dos Lobos. A implementação no microcontrolador ESP32 apresentou desempenho consistente, incluindo a capacidade de registrar os deslocamentos e os cálculos de distância diretamente na memória flash, por meio do sistema de arquivos LittleFS. Esse mecanismo de armazenamento local garante a preservação dos dados mesmo na ausência de conectividade, permitindo sua posterior recuperação, sincronização e análise, aspecto especialmente relevante em aplicações de monitoramento ambiental.

Adicionalmente, foi desenvolvida uma interface Web responsiva, integrada à conectividade wireless do sistema embarcado e ao banco de dados em nuvem Firebase, possibilitando a transmissão e disponibilização remota das informações coletadas. A plataforma permite a visualização georreferenciada das rotas de navegação, o acesso ao histórico de aproximações à zona protegida e a emissão de alertas automáticos, ampliando significativamente a utilidade da solução. Embora a validação completa em ambiente marítimo ainda seja necessária, os resultados iniciais indicam que o sistema possui elevado potencial para apoiar ações de fiscalização, gestão e conservação da área protegida da Ilha dos Lobos, oferecendo subsídios técnicos consistentes para a tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- [1] DANILEWICZ, D.; MORENO, I. B.; TAVARES, M.; SUCUNZA, F. Southern Right Whales (*Eubalaena australis*) off Torres, Brazil: Group Characteristics, Movements, and Insights into the Role of the Brazilian-Uruguayan Wintering Ground. *Mammalia*, v. 81, n. 3, p. 225–234, 2017.
- [2] LINHARES, B. A.; NUNES, G. T.; ROSSO, F. M.; FARIA, F. A.; BUGONI, L.; OTT, P. H. American Oystercatcher benefits from a heterogeneous landscape to breed in an urbanized area in southern Brazil. *Urban Ecosystems*, v. 25, p. 87–100, 2022. DOI: 10.1007/s11252-021-01123-5.
- [3] PROCKSCH, N.; BERCHIERI, N. B.; HOROTA, R. K.; SALES, V.; OTT, P. H.; DANILEWICZ, D.; GUIMARÃES, T. T.; GUIMARÃES, M.; VERONEZ, M. R.; OLIVEIRA, L. R. Habitat use by South American fur seals (*Arctocephalus australis*) and sea lions (*Otaria flavescens*) in a marine protected area in southern Brazil. *Marine Policy*, v. 155, 105693, 2023.
- [4] PROCKSCH, N.; GRANDI, M. F.; OTT, P. H.; GROCH, K.; FLORES, P. A. C.; ZAGONEL, M.; CRESPO, E. A.; MACHADO, R.; PAVEZ, G.; GUIMARÃES, M.; VERONEZ, M.; OLIVEIRA, L. R. The northernmost haulout site of South American sea lions and fur seals in the western South Atlantic. *Scientific Reports*, v. 10, 20008, 2020. DOI: 10.1038/s41598-020-76755-2.
- [5] BRASIL. Decreto de 4 de julho de 2005. Altera a categoria da unidade de conservação Reserva Ecológica Ilha dos Lobos para Refúgio de Vida Silvestre da Ilha dos Lobos, no litoral do Município de Torres, Estado do Rio Grande do Sul, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2005. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Ato2004006/2005/Dnn/Dnn10578.htm#art6](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2004006/2005/Dnn/Dnn10578.htm#art6). Acesso em: 04 dez. 2025.
- [6] BRASIL. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. Regulamenta o art. 225, §1º, incisos I, II, III e VII da Constituição Federal, institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm). Acesso em: 04 dez. 2025.
- [7] SACRAMENTO, I. C. C.; FERNANDES, V. O.; FERREIRA, E. A. M. Integração IoT e GIS: uma revisão sistemática de suas aplicações. *Caminhos de Geografia*, v. 21, n. 78, p. 93–116, 2020.
- [8] IDRIS, A. S.; MALIK, H.; TOHA, S. F. Geofencing location tracking system using IoT and LoRa LPWAN for COVID-19 mandatory self-quarantine monitoring. *PERINTIS eJournal*, v. 12, n. 2, p. 56–68, 2022.
- [9] PEŠIĆ, S. et al. GEMAT – Internet of Things solution for indoor security geofencing. In: *9th Balkan Conference on Informatics (BCI 2019)*. Sofia: ACM, 2019.
- [10] PANGESTU, A. et al. Pet tracking system using GPS with Android-based geofencing method. In: *2023 8th International Conference on Information Technology and Digital Applications (ICITDA)*, 2023.
- [11] JOHN, P. J. et al. Kalman-powered tracking and geofencing. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, v. 10, n. 8, 2025.
- [12] VEDANTHAM, A. K. Geofencing in IoT: enhancing location-based services. *International Journal of Computer Engineering & Technology*, v. 15, n. 6, p. 687–700, 2024.
- [13] COHEN, A. Current research on Internet of Things (IoT) security protocols: a survey. *Computers & Security*, v. 151, 2025.
- [14] ZHUO, W. et al. Semi-supervised learning with network embedding on ambient RF signals for geofencing services. *arXiv preprint*, 2022.
- [15] SINNOTT, R. W. Virtues of the Haversine. *Sky and Telescope*, v. 68, n. 2, p. 159, 1984.
- [16] ARM MBED. LittleFS: A Fail-Safe Filesystem for Microcontrollers. Disponível em: <https://github.com/littlefs-project/littlefs>.
- [17] GOOGLE. Firebase Documentation. Disponível em: <https://firebase.google.com/docs>.