

**INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR**

**EDSON DE ALMEIDA COELHO**

**UMA FERRAMENTA TECNOLÓGICA PARA SEGURANÇA NUCLEAR NO  
RASTREAMENTO DE RADIOFÁRMACOS**

Rio de Janeiro

**2026**

EDSON DE ALMEIDA COELHO

**UMA FERRAMENTA TECNOLÓGICA PARA SEGURANÇA NUCLEAR NO  
RASTREAMENTO DE RADIOFÁRMACOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências e Tecnologias Nucleares.

Orientadores: Prof. Dr. Cláudio Henrique dos Santos Grecco  
Prof. Dr. Cláudio Márcio Nascimento Abreu Pereira

Rio de Janeiro

**2026**

COELHO, Edson de Almeida

Uma ferramenta tecnológica para segurança nuclear no rastreamento de radiofármacos / Edson de Almeida Coelho. Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2026.

111fl.; il. 17, 31 cm.

Orientadores: Cláudio Henrique dos Santos Grecco  
Cláudio Márcio Nascimento Abreu Pereira

Dissertação (Mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2024.

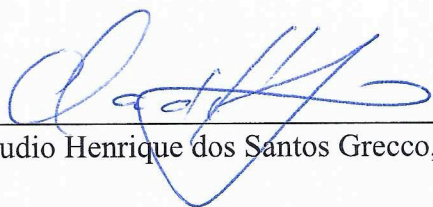
1. Segurança Nuclear. 2. Cibersegurança. 3. Rastreamento de Radiofármacos. 4. Arduino.

UMA FERRAMENTA TECNOLÓGICA PARA SEGURANÇA NUCLEAR NO  
RASTREAMENTO DE RADIOFÁRMACOS

Edson de Almeida Coelho

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR COMO REQUISITO PARCIAL NECESSÁRIO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E TECNOLOGIA NUCLEARES.

Aprovada por:



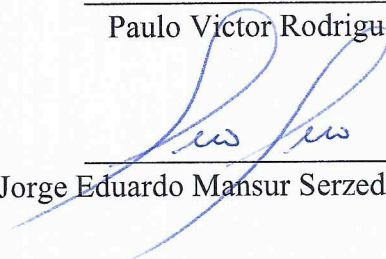
Cláudio Henrique dos Santos Grecco, D. Sc. - IEN/CNEN



Cláudio Márcio do Nascimento Abreu Pereira, D. Sc. - IEN/ CNEN



Paulo Victor Rodrigues de Carvalho, D.Sc. - IEN/CNEN



Jorge Eduardo Mansur Serzedello, D.Sc. - Observatório Nacional  
(ON)

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2026

## DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a meu pai e mãe, meus tios Bira e Vera; à minha linda esposa Thayná e meu filho Théo.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meu orientador, Professor Cláudio Grecco, sempre, pela paciência e apoio desde o projeto de mestrado até a dissertação.

E também agradeço a meu orientador, Professor Cláudio Pereira, pelos ensinamentos de inteligência artificial, como uma indispensável contribuição para o desenvolvimento do projeto.

Além disso, minha profunda gratidão ao Professor Zelmo, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear, especialmente pela confiança a mim depositada e compreensão em relação à incompatibilidade da biblioteca do software, fatores fundamentais para que o protótipo pudesse sair do papel.

À minha família, pai, mãe, tio Bira e tia Vera, minha linda esposa Thayná e meu filho Théo pelos momentos justificáveis de ausências injustificáveis.

Espero que a ferramenta tecnológica desenvolvida seja utilizada no setor nuclear para o bem, em favor da nação brasileira para o desenvolvimento e melhoria da sociedade.

“A liberação da energia atômica não criou um problema novo; apenas tornou mais urgente a necessidade de resolver um problema já existente: o da coexistência pacífica entre nações.”

- Einstein

## RESUMO

A segurança no transporte de materiais nucleares representa um desafio crítico para a sociedade contemporânea. Esses materiais são indispensáveis para diversas aplicações para a melhoria de vida, como: energia, medicina e saúde, mudanças climáticas, meio ambiente, alimentação e agricultura, indústria, ciência nuclear, segurança, entre outras aplicações e utilidades. Desta forma, existe o risco de desvio, roubo ou uso indevido com o potencial para fins bélicos, armas de destruição em massa, terrorismo ou contaminação ambiental. Neste contexto, a garantia de segurança física e cibernética ao longo da cadeia logística torna-se imperativa, devido às consequências sociais, políticas, ambientais e científicas, por representar mais que uma necessidade. Esta dissertação apresenta uma proposta de desenvolvimento e implementação de uma ferramenta tecnológica, acessível e eficaz, utilizando componentes de baixo custo para o rastreamento em tempo real de contêineres com radiofármacos, podendo ser utilizada futuramente para a monitoração do transporte dos materiais nucleares críticos. O sistema integra tecnologia de geolocalização e comunicação sem fio para monitorar a localização das remessas desde origem até o destino, assegurando um rastreamento constante e detecção para evitar quaisquer desvios de rotas, materiais ou tentativas de violação, com o aviso imediato às autoridades competentes. A abordagem adotada acrescenta a proteção dos dados transmitidos por meio de protocolos de cibersegurança, mitigando riscos de interceptação ou manipulação criminosa. Os resultados demonstram a viabilidade de um protótipo para fornecer um rastreamento confiável e viável, que oferece uma camada de segurança adicional complementar para os protocolos existentes. A solução desenvolvida contribui para a robustez dos sistemas de segurança nuclear e uma prova de conceito para a aplicação de tecnologias abertas e acessíveis em contextos de alta criticidade, como o descrito anteriormente, promovendo maior confiança na utilização segura dos benefícios da tecnologia nuclear.

**Palavras-chave:** Segurança Nuclear; Cibersegurança; Rastreamento de Radiofármacos; Arduino.

## ABSTRACT

The security of nuclear material transportation represents a critical challenge for contemporary society. These materials are indispensable for various life-enhancing improvements, such as: energy, medicine and healthcare, climate change, environment, food and agriculture, industry, nuclear science, security, among other applications and utilities. Consequently, in this way, there is a risk of diversion, theft, or misuse with the potential for military purposes, weapons of mass destruction, terrorism, or environmental contamination. In this context, ensuring the guarantee of physical and cyber security throughout the logistics chain becomes imperative, due to the social, political, environmental, and scientific consequences, as it represents because its more than just a necessity. This dissertation presents a proposal for the development and implementation of an accessible and effective technological tool, using off-the-shelf Arduino low-cost components for the real-time tracking of containers with radiopharmaceuticals, which could potentially be used in the future for monitoring the transportation of critical nuclear materials. The system integrates geolocation and wireless communication technology to monitor the location of shipments from origin to destination, ensuring continuous tracking and detection to prevent any route deviations, material diversion, or attempted breaches, with immediate notification to the competent authorities. The adopted approach includes the protection of transmitted data through cybersecurity protocols, mitigating the risks of interception or malicious tampering criminal manipulation. The results demonstrate the feasibility of a prototype to provide reliable and viable tracking, offering an additional complementary security layer for existing protocols. The developed solution contributes to the robustness of nuclear security systems and serves as a proof of concept for the application of open and accessible technologies in high-criticality contexts, promoting greater confidence in the secure use of the benefits of nuclear technology.

**Keywords:** Nuclear Security; Cybersecurity; Radiopharmaceutical Tracking; Arduino.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arduino Uno R4 WiFi - (Fonte: Autor, 2026).....	51
Figura 2 - Módulo SIM808 - (Fonte: Autor, 2026) .....	52
Figura 3 - Página Web “Live Tracker” - (Fonte: Autor, 2026) .....	74
Figura 4 - Obtenção de Coordenadas do GPS - (Fonte: Autor, 2026).....	75
Figura 5 - Formação de Rotas pelas Coordenadas - (Fonte: Autor, 2026).....	75
Figura 6 - Desenho dos Saltos da Rota em Numeração Crescente - (Fonte: Autor, 2026) .....	75
Figura 7 - Aplicabilidade da Ferramenta Tecnológica - (Fonte: Autor, 2026).....	77
Figura 8 - Validação da Ferramenta Tecnológica - (Fonte: Autor, 2026).....	78

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Mapeamento da Conexão Arduino-Módulo SIM808.....	53
Quadro 2: Comandos Utilizados no Firmware .....	62
Quadro 3: Principais Problemas da Ferramenta Tecnológica.....	108

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear

ANSN - Autoridade Nacional de Segurança Nuclear

IEN - Instituto de Engenharia Nuclear

IME - Instituto Militar de Engenharia

MCTI - Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

AIEA - Agência Internacional de Energia Atômica

IDE - Ambiente de Desenvolvimento Integrado

GPS - Sistema de Posicionamento Global

UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

GPRS - General Packet Radio Service

GSM - Global System for Mobile Communications

AT - Attention

HTTP - Hypertext Transfer Protocol

HTTPS - HyperText Transfer Protocol Secure

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

TLS - Transport Layer Security

BLE - Bluetooth Low Energy

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1.1. JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>18</b>
<b>1.2. OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>19</b>
<b>1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>19</b>
<b>1.4. METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
<b>1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>21</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>22</b>
<b>2.1. RADIOFÁRMACOS: CONCEITO, PRODUÇÃO E CADEIA LOGÍSTICA</b> .....	<b>23</b>
2.1.1. Conceito e Aplicações.....	23
2.1.2. Ciclotron e Produção de Radiofármacos.....	24
2.1.3. Etapa de Transporte - Elo Crítico da Cadeia Logística .....	24
<b>2.2. PLATAFORMA ARDUINO: SISTEMA EMBARCADO DE BAIXO CUSTO</b> .....	<b>25</b>
2.2.1. Conceito e Arquitetura.....	25
2.2.2 Aplicações em Sistemas de Monitoração e Rastreamento .....	26
<b>2.3. GEOLOCALIZAÇÃO POR GPS</b> .....	<b>27</b>
2.3.1. Sistema de Posicionamento Global.....	27
2.3.2 Módulos GPS para Sistemas Embarcados .....	27
<b>2.4. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS DE RASTREAMENTO</b> .....	<b>28</b>
2.4.1. Panorama das Tecnologias Disponíveis.....	28
2.4.2. Comunicação via Redes Celulares (GPRS/5G).....	29
2.4.3. Segurança Cibernética na Transmissão de Dados.....	29
<b>2.5. TECNOLOGIA BLOCKCHAIN NA CADEIA NUCLEAR</b> .....	<b>30</b>
2.5.1. Conceitos e Princípios Fundamentais .....	30
2.5.2. Tipos de Blockchain e Contratos Inteligentes.....	31
2.5.3. Blockchain na Gestão das Cadeias de Suprimentos Críticas.....	32
<b>3. ARCABOUÇO JURÍDICO-NORMATIVO DA SEGURANÇA NUCLEAR</b> .....	<b>33</b>
<b>3.1. FUNDAMENTO CONSTITUCIONAL</b> .....	<b>34</b>
<b>3.2. LEGISLAÇÃO FEDERAL INFRACONSTITUCIONAL</b> .....	<b>37</b>
3.2.1. Lei 4.118/1962.....	37
3.2.2. Lei 6.453/1977.....	38
3.2.3. Lei 19.308/2001 .....	39
3.2.4. Lei 14.222/2021 .....	40
3.2.5. Decreto 9.600/2018.....	41
<b>3.3. SISTEMA DE NORMAS TÉCNICAS DA CNEN</b> .....	<b>42</b>
3.3.1. Proteção Radiológica e Licenciamento de Instalações.....	42
3.3.2. Norma de Transporte e Rastreamento de Materiais Radioativos .....	45
<b>3.4. INTERFACES COM O MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL</b> .....	<b>47</b>
3.4.1. Sistema de Normas de Segurança da Agência Internacional de Energia Atômica.....	47
3.4.2. Código de Conduta de Segurança e Proteção das Fontes Radioativas .....	48
3.4.3. Lacunas Normativas e Desafios de Implementação .....	48

<b>4. FERRAMENTA TECNOLÓGICA DESENVOLVIDA .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2. COMPONENTES DE HARDWARE .....</b>	<b>50</b>
4.2.1. Arduino Uno R4 WiFi .....	50
4.2.2. Módulo SIM 808.....	51
4.2.3. Pinagem e Conexões .....	53
<b>4.3. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>54</b>
4.3.1. Arduino IDE 2.3.8.....	54
4.3.2. Bibliotecas Utilizadas .....	54
<b>4.4. CONCEITOS TECNOLÓGICOS FUNDAMENTAIS.....</b>	<b>55</b>
4.4.1. Comandos AT .....	56
4.4.2. Barramento SPI.....	56
4.4.3. Bibliotecas de Software .....	57
4.4.4. Web Serial API .....	58
4.4.5. Web Bluetooth API.....	58
4.4.6. UART e Comunicação Serial.....	59
4.4.7. GPS e Posicionamento via Satélite .....	59
4.4.8. Bluetooth Low Energy e GATT.....	60
4.4.9. Protocolos de Cibersegurança da Ferramenta Tecnológica.....	60
<b>4.5. DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE .....</b>	<b>61</b>
4.5.1. Estrutura Geral e Fluxo de Inicialização .....	61
4.5.2. Lógica de Alternância USB / Bluetooth.....	61
4.5.3. Controle do GPS via Comandos AT .....	62
4.5.4. Comandos do Firmware .....	62
<b>4.6. INTERFACE DE MONITORAMENTO WEB .....</b>	<b>63</b>
<b>4.7. CONSIDERAÇÕES E DIFICULDADES INICIAIS DE DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>63</b>
4.7.1. Proposta Original de Conectividade.....	63
4.7.2. Incompatibilidade da Biblioteca e Primeiros Obstáculos.....	64
4.7.3. Decisão de Implementação dia Wi-Fi .....	65
4.7.4. Adaptação do Envio de Comandos AT .....	66
<b>4.8. TESTES PRELIMINARES .....</b>	<b>68</b>
<b>5. RESULTADOS: A SIMULAÇÃO DA FERRAMENTA.....</b>	<b>69</b>
<b>5.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>73</b>
<b>5.2. PLATAFORMA WEB LIVE TRACKER .....</b>	<b>73</b>
<b>5.3. REFLEXÕES DO DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>76</b>
<b>5.4. ORGANOGRAMA DE APLICABILIDADE DA SOLUÇÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>78</b>
<b>6.1. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>78</b>
<b>6.2. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS.....</b>	<b>81</b>
<b>6.3. MELHORIAS E IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS.....</b>	<b>83</b>
6.3.1. Ativação da Conectividade Celular no SIM808.....	83
6.3.2. Rastreamento em Tempo Real com Controle de Usuários.....	83
6.3.3. Implementação via Blockchain para Auditoria e Imutabilidade .....	84
6.3.4. Rotulamento via Tags RFID e Integração com Supply Chain .....	85

6.3.5. Considerações Finais e Perspectivas Futuras .....	86
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>101</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, cabe destacar as questões relacionadas à segurança do material nuclear, englobando os processos desde a extração de matérias-primas até o transporte e utilização nas usinas nucleares, em especial ao considerar o aumento da incidência de crimes internacionais de contrabando, desvio de materiais para fins bélicos, a construção de armas de destruição em massa, além da prática do terrorismo e seus atos correlatos (Teixeira, 2014).

Conforme definição do Glossário do Setor Nuclear Radiológico Brasileiro da Comissão Nacional de Energia Nuclear, material nuclear é aquele que compreende os elementos nucleares ou seus subprodutos. Nesse sentido, os materiais nucleares possuem inúmeras utilidades, como: energia, medicina e saúde, mudanças climáticas, meio ambiente, alimentação e agricultura, indústria, ciência nuclear, segurança, entre outras, as quais apresentam grande importância para a humanidade (CNEN, 2021).

Adiante, nos termos da Agência Internacional de Energia Atômica, radiofármacos são medicamentos que contêm, entre outros ingredientes, formas radioativas de elementos químicos chamados radioisótopos, e, dependendo do tipo de radiação que produzem, podem ser utilizados para diagnosticar ou tratar diversas condições médicas (IAEA, 2025).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear fornece esses insumos em parceria com o Instituto de Engenharia Nuclear, se destacando como um de seus principais centros de pesquisa e produção, sendo responsável por viabilizar aproximadamente um milhão e meio de insumos utilizados anualmente para realizar tratamentos na área da medicina nuclear. Contudo, a crescente demanda por esses materiais, impulsionada pelo envelhecimento populacional e dos avanços tecnológicos, tem ocasionado uma pressão sobre a segurança e proteção da cadeia de suprimentos, tornando crítica a questão do transporte (CNEN, 2022).

Além do mais, questões como a segurança internacional, tem gerado uma preocupação com desvios de materiais nucleares, devido ao potencial risco de desvio, roubo ou uso indevido com o potencial para fins bélicos, armas de destruição em massa, terrorismo ou contaminação ambiental. Por tal razão, a garantia de segurança física e cibernética ao longo da cadeia logística como fundamental para a proteção contra qualquer espécie de ameaça.

Nesse sentido, verifica-se ainda que, dentro do contexto nuclear, alguns processos como a extração de matérias-primas, o enriquecimento, a manufatura, a expedição até o transporte do combustível encontram-se vulneráveis a desvios de material, no sentido mais amplo da palavra, apresentando riscos de violação, integridade e o comprometimento da segurança, em razão da dependência do fator humano (Santos, 2019). Portanto, mostra-se possível utilizar a tecnologia

para realizar um controle estrito do material nuclear, abrangendo desde os processos simples até os mais complexos no setor nuclear (Tavares, 2018).

Portanto, propõe-se a utilização de ferramentas tecnológicas com a finalidade de efetuar um controle rígido, transparente e auditável da cadeia de suprimentos para evitar problemas de segurança, como os crimes acima descritos, e a dependência do fator humano, sempre passível de vulnerabilidades. Nesse sentido, destaca-se o Blockchain (Nakamoto, 2008) surgido a partir de um contexto de crise financeira e da ausência de informações no setor bancário no ano de 2008, o que levantou diversos questionamentos a respeito da transparência das informações e a necessidade de uma auditoria confiável e íntegra, guardando aplicação no âmbito da segurança da área nuclear.

Antigamente, havia um receio de informatização dos componentes e migração para o ambiente on-line devido às ciberameaças, mas nos dias presentes, a digitalização dos processos mostra-se uma tendência inevitável (Pavlenko; Petrov, 2020). Ainda assim, afigura-se como possível aplicar mecanismos de segurança para os processos de expedição de radiofármacos e dos elementos nucleares, viabilizando sua operação e segurança no ambiente on-line.

Ressalta-se que a aplicação pretendida poderia ser desenvolvida inclusive na etapa de transporte do combustível nuclear, desde a saída do material das Indústrias Nucleares do Brasil até as plantas nucleares, de responsabilidade da Eletronuclear (INB, 2020). Devido a questões burocráticas e que envolvem segurança nacional, o presente trabalho será aplicado e validado a partir de um estudo de uma cadeia simplificada de produção de radioisótopos do Instituto de Engenharia Nuclear (FAPESP, 2000), fato que não inviabiliza a sua adaptação e replicação nos processos maiores e complexos.

Conforme destacado por Grecco (2012), a adoção de ações preventivas na gestão da segurança contribui para antecipar vulnerabilidades e fortalecer a capacidade de resposta das organizações que lidam com tecnologias perigosas, como na expedição dos radiofármacos.

Desta forma, muito embora o ciclotron do Instituto de Engenharia Nuclear encontre-se desativado, para a aplicação, foi realizado um breve estudo de caso no departamento da Divisão de Radiofármacos (DIRAD) do Instituto de Engenharia Nuclear, baseando-se na aplicação da tecnologia de baixo custo no processo de expedição do Flúor-18, visando a sua digitalização para aumentar o controle e monitoramento no transporte dos radiofármacos.

Por fim, essas tecnologias possibilitam a administração em tempo real do radiofármaco enquanto transportado, desde sua expedição até o destino, a partir do controle de datas, horários, pessoal, além de eventuais informações sobre qualquer tentativa ou violação da integridade do dispositivo desde a origem na expedição até o destino final.

## 1.1. JUSTIFICATIVA

Atualmente, considerando a crescente importância dos radiofármacos para a medicina nuclear brasileira, em especial, os produzidos no Instituto de Engenharia Nuclear, a partir de um cenário de elevada relevância e criticidade, necessária a proteção dos radiofármacos, além das normativas da Comissão Nacional de Energia Nuclear, por desempenhar um papel essencial no controle dos insumos essenciais para a rede pública e privada de saúde do país.

Este cenário de elevada demanda convive com desafios estruturais profundos, além de ameaças à segurança, pois, no presente estudo de caso, ainda que as instalações do Instituto de Engenharia Nuclear possuam processos de produção de radioisótopos e também aplicações no campo da medicina, pesquisa e aplicações industriais, destaca-se a importância no controle do transporte dos materiais como um componente essencial na cadeia logística.

A etapa de transporte desses materiais radioativos apresenta fragilidades identificadas, devido à questão da segurança e proteção, a partir dos riscos de desvio, roubo ou uso indevido dos radiofármacos, com possíveis consequências para a segurança pública e o meio ambiente, o que demanda uma camada adicional de salvaguarda.

Portanto, justifica-se o desenvolvimento de uma ferramenta tecnológica de baixo custo, baseada na plataforma Arduino, para realizar o rastreamento em tempo real de contêineres de radiofármacos. Por tais motivos, esta dissertação propõe uma solução acessível e eficaz que integra tecnologias de geolocalização e de comunicação segura, visando melhorar a segurança física e cibernética dos materiais, para garantir a integridade das remessas, desde a saída do Instituto de Engenharia Nuclear até o destino final, prevenindo e detectando desvios de rota ou violações de contentores, além de complementar os protocolos de segurança existentes, através da oferta de uma camada de vigilância complementar e tecnológica para os procedimentos de segurança estabelecidos, aumentando a robustez da cadeia logística e garantindo a eficácia do rastreio eficaz, de forma que a localização e o status dos materiais possam ser obtidos em tempo real, permitindo uma resposta rápida e coordenada em caso de incidentes de segurança.

Desta forma, a pesquisa responde a uma lacuna crítica de segurança na cadeia logística nuclear nacional, propondo uma solução tecnológica para uma vulnerabilidade específica, que garante a segurança integral do transporte, viabilizando o investimento na eficiência produtiva, assegurando que os radiofármacos sejam entregues no destino, além de contribuir ativamente para a consolidação de um parque produtor de radiofármacos brasileiro, moderno e eficiente, que utiliza tecnologias de fácil acesso.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

Desenvolver e validar um protótipo de baixo custo para rastreamento em tempo real das remessas de radiofármacos durante o transporte, integrando geolocalização, comunicação sem fio e interface web para contribuir no fortalecimento da segurança física e cibernética da cadeia logística nuclear nacional, além de suprir as lacunas normativas de rastreo, estabelecendo uma arquitetura modular expansível a partir da utilização da plataforma de baixo custo Arduino.

## 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Projetar a arquitetura do sistema de rastreamento de radiofármacos, integrando módulos de geolocalização (GPS) e comunicação sem fio à plataforma Arduino, definindo os componentes necessários para uma operação segura e eficaz.
- Implementar um protótipo funcional que monitore e transmita em tempo real a localização e o status de contêineres com radiofármacos, assegurando um rastreo constante desde a origem até o destino final.
- Desenvolver e integrar protocolos de cibersegurança aos dados transmitidos pelo sistema, mitigando riscos de interceptação, manipulação maliciosa ou de violação da integridade dos contêineres e das informações.
- Validar o desempenho do protótipo em cenários controlados, avaliando sua confiabilidade no rastreamento, a precisão na detecção das rotas de transporte e a eficácia do sistema para fins de alerta às autoridades competentes em caso de desvio, violação ou comprometimento.
- Analisar a contribuição da ferramenta para o ecossistema de segurança nuclear atual, de forma a avaliar a capacidade de servir como uma camada adicional de proteção, complementarmente aos protocolos convencionais, além de sua viabilidade como prova de conceito para aplicações em contextos de alta criticidade.

## 1.4. METODOLOGIA

A metodologia adotada para o desenvolvimento da presente dissertação estrutura-se em quatro fases sequenciais e interdependentes. Nesse contexto, inicia-se uma abordagem geral de pesquisa aplicada e desenvolvimento experimental, visando a compreensão do problema, além da criação e validação de uma solução tecnológica tangível a partir de um protótipo.

A primeira fase, de natureza qualitativa e exploratória, compreende a revisão conceitual e especificação de requisitos, fundamentando tecnicamente o desenvolvimento, a partir de uma breve revisão da literatura em bases científicas e em documentos de agências reguladoras, com foco nos protocolos de segurança física e cibernética para o transporte de materiais nucleares e a adoção de uma arquitetura de segurança de dados, utilizando um sistema de baixo custo para o rastreamento e monitoramento logístico, visando aprimorar seu controle.

Conforme esta revisão, serão definidos os requisitos técnicos do sistema, estabelecendo parâmetros claros de precisão no rastreamento, autonomia, protocolos de comunicação, além das medidas de segurança cibernética a serem implementadas em caso de problemas.

A segunda fase, de natureza experimental e técnica, corresponderá ao ciclo de protótipo, a partir do projeto da arquitetura do sistema, com a definição dos componentes de hardware e do fluxo de dados para a captação da localização em tempo real, implementação do hardware, com a montagem do circuito eletrônico, integração física dos módulos e a realização de testes preliminares de funcionamento da ferramenta, desenvolvimento do software programação do microcontrolador Arduino para gerenciar os módulos, implementar a lógica de rastreamento e protocolos de cibersegurança, integração e prototipagem, de forma a consolidar o hardware e software em um protótipo funcional, até a realização de testes em campo.

A terceira fase adotará uma abordagem quantitativa no sentido de validação do protótipo através meio dos testes e validação em cenário controlado, por meio da simulação de rotas de transporte dos radiofármacos para mensuração do rastreamento GPS.

A fase final será a análise de impacto e contribuição, a partir da coleta de dados da fase 3 e a comparação com os requisitos da fase 1, com a análise crítica dos elementos da ferramenta, como a confiabilidade e limitações, custo-benefício e viabilidade como prova de conceito.

A estrutura metodológica assegura um desenvolvimento sistemático, transparente e que seja passível de validação, com o alinhamento do rigor acadêmico e a praticidade exigida por uma pesquisa de natureza tecnológica e aplicada.

## 1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação estrutura-se ao longo de seis capítulos, sendo que a introdução, juntamente com os demais capítulos, encontra-se brevemente descrita nesta seção.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica da dissertação, a qual sustenta a proposta, organizada em cinco eixos temáticos. O primeiro trata dos radiofármacos, enquanto insumos críticos da medicina nuclear, abordando seu conceito, aplicações, além dos processos de produção via acelerador cíclotron e a caracterização do transporte como elo mais vulnerável da cadeia logística. O segundo descreve a plataforma Arduino como um ambiente consolidado para o desenvolvimento de sistemas embarcados de baixo custo, com ênfase em suas aplicações em sistemas de monitoramento e rastreamento. O terceiro apresenta os princípios de geolocalização por GPS, além dos módulos aplicáveis a sistemas embarcados. O quarto aborda os protocolos de comunicação sem fio disponíveis para sistemas de rastreamento, incluindo redes celulares e os requisitos de segurança cibernética na transmissão de dados. O quinto introduz a tecnologia Blockchain e sua aplicabilidade à gestão de cadeias de suprimentos críticos no setor nuclear.

No terceiro capítulo realiza-se uma análise do arcabouço jurídico-normativo brasileiro relacionado à segurança nuclear sobre o rastreamento de radiofármacos, através do fundamento constitucional do monopólio nuclear da União, além das Emendas Constitucionais 49/2006 e 118/2022, a legislação federal relevante, a partir das Leis 4.118/1962, 6.453/1977, 10.308/2001 e 14.222/2021, o Decreto 9.600/2018, e o sistema de normas técnicas da Comissão Nacional de Energia Nuclear aplicáveis à proteção radiológica, licenciamento de instalações e ao transporte e rastreamento de materiais radioativos, estabelecendo um panorama com as normas da Agência Internacional de Energia Atômica, sem contudo, esgotá-las. Após, o capítulo encerra-se com a identificação das lacunas normativas as quais comprometem a efetividade da cadeia de controle dos radiofármacos, as quais a presente pesquisa se propõe a endereçar.

O quarto capítulo descreve a ferramenta tecnológica desenvolvida, com o detalhamento dos componentes de hardware, Arduino Uno R4 WiFi e Módulo SIM808, assim como o ambiente de desenvolvimento, a arquitetura do firmware com a lógica de alternância USB/Bluetooth e o controle do GPS via comandos AT, a interface de monitoramento web, os resultados dos testes e validação, as considerações sobre as dificuldades enfrentadas durante o desenvolvimento, por exemplo, a incompatibilidade das bibliotecas de alto nível, a decisão pela conectividade WiFi e a adaptação para comunicação direta por comandos AT.

O quinto capítulo destaca as considerações sobre a simulação da ferramenta tecnológica a partir dos resultados obtidos nos logs, para corroborar a viabilidade da solução de baixo custo no rastreamento e controle dos materiais nucleares.

O sexto e último capítulo descreve as melhorias e visualiza as inúmeras possibilidades de implementações futuras, identificadas ao longo do desenvolvimento, compreendendo desde a ativação da conectividade celular GSM/GPRS do Módulo SIM808, o módulo de rastreamento em tempo real, o controle de usuários por perfis de acesso, o Blockchain permissionado para permitir a auditoria e imutabilidade dos registros de custódia e a integração com *Tags RFID*, e rastreabilidade nos eventos de transição de custódia, extensões que, em conjunto delineiam o caminho de evolução do protótipo rumo a uma plataforma operacional para o cumprimento dos requisitos regulatórios da Comissão Nacional de Energia Nuclear, de maneira a proporcionar uma melhor proteção e segurança no transporte dos radioisótopos. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros encerram o capítulo, consolidando diversas contribuições para a pesquisa e apontando as direções de continuidade promissoras.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O referencial teórico da presente dissertação encontra-se organizado em torno de cinco eixos, quais sejam: Radiofármacos; Plataforma Arduino; Geolocalização por GPS; Protocolos de Comunicação Sem Fio para Sistemas de Rastreamento e Tecnologia Blockchain.

Todos esses eixos, quando analisados em conjunto, contribuem para a compreensão do problema investigado, assim como para a avaliação de pertinência da solução proposta.

Nesse contexto, a partir de uma interconexão temática, desde a farmácia nuclear até o desenvolvimento de sistemas distribuídos, surge o questionamento a respeito de uma solução viável de rastreamento segura e auditável para os materiais radioativos.

Desta forma, o primeiro eixo trata dos radiofármacos enquanto um insumo crítico, por sua natureza, além dos processos de produção até a cadeia logística, apresentando a proposta da Plataforma Arduino como um ambiente consolidado e simplificado para o desenvolvimento de sistemas embarcados de baixo custo e facilidade de implementação. Adiante, o segundo eixo apresenta o arcabouço jurídico-normativo da segurança nuclear e seu panorama com as normas internacionais. A seguir, o terceiro eixo apresenta os conceitos da ferramenta tecnológica, do hardware, ambiente de desenvolvimento da ferramenta, conceitos tecnológicos fundamentais, firmware, interface de monitoramento web. O quarto eixo analisa os resultados da simulação

da ferramenta, testes preliminares, discussão dos resultados. Por último, o quinto eixo apresenta as conclusões e sugestões para os trabalhos futuros em continuidade às potenciais aplicações da ferramenta tecnológica no sentido de viabilizar o gerenciamento seguro e auditável da cadeia de suprimentos de materiais nucleares.

## 2.1. RADIOFÁRMACOS: CONCEITO, PRODUÇÃO E CADEIA LOGÍSTICA

### 2.1.1. Conceito e Aplicações

De acordo com a definição adotada pela Agência Internacional de Energia Atômica, os radiofármacos são medicamentos que contêm, entre outros ingredientes, formas radioativas de elementos químicos chamados de radioisótopos, que podem ser utilizados para diagnosticar ou tratar diversas condições médicas (IAEA, 2025). Portanto, de acordo com Feitosa *et al.* (2023) o conjunto das características de radioatividade e da seletividade biológica dos radiofármacos apresentam uma utilidade diagnóstica e terapêutica singular no campo da medicina nuclear.

Do ponto de vista funcional de Fernandes (2022), os radioisótopos se dividem em duas categorias: a primeira, os radiofármacos diagnósticos empregam emissores de radiação gama ou pósitrons, detectáveis por equipamentos externos ao corpo e, na segunda, os radiofármacos terapêuticos recorrem a emissores de partículas alfa ou beta negativo, de forma que o alcance tecidual limitado permita a irradiação seletiva de células-alvo, em geral tumorais, com menor comprometimento de tecidos adjacentes.

Desta forma, o desenvolvimento de técnicas de imageamento molecular por Tomografia de Emissão de Pósitrons (PET-SCAN) e Tomografia Computadorizada por Emissão de Fóton Único (SPECT) representaram um avanço na medicina, de acordo com Alqahtani (2023). Estas tecnologias permitem a obtenção de informações funcionais e metabólicas as quais possibilitam detectar alterações morfológicas visíveis por métodos convencionais, como a Tomografia por Raio-X ou Ressonância Magnética, de acordo com Carreiro *et al.* (2022).

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear responde pela principal oferta de radiofármacos tanto para a rede pública, quanto para a privada (CNEN, 2022). E, nesse âmbito, o Instituto de Engenharia Nuclear no Rio de Janeiro viabiliza os radiofármacos para a utilização nos procedimentos de medicina nuclear, determinando a importância estratégica da instituição para o sistema de saúde nacional (Santos-Oliveira *et al.*, 2009).

### 2.1.2. Cíclotron e Produção de Radiofármacos

A produção dos radioisótopos para a composição dos radiofármacos ocorre a partir dos reatores nucleares de pesquisa e aceleradores de partículas tipo cíclotron (Almeida *et al.*, 2023). Enquanto os reatores constituem a fonte predominante de radioisótopos de meia-vida longa, os cíclotrons resultam indispensáveis para a produção de radioisótopos de meia-vida curta (IAEA, 2022).

O princípio de funcionamento do cíclotron resulta de uma propriedade física onde as partículas eletricamente carregadas se submetem à ação de um campo magnético perpendicular à trajetória, e também a um campo elétrico alternado de radiofrequência, por meio de espirais de raio crescente, acumulando energia a cada ciclo. Ao atingir a energia desejada, extrai-se o feixe de prótons ou dêutrons, direcionando-o a um alvo específico, o que provoca as reações nucleares que geram o radioisótopo de interesse (IEN, 2021).

A meia-vida curta dos radioisótopos produzidos no cíclotron impõe desafios e restrições severas à cadeia logística. Por exemplo, o Flúor-18 possui meia-vida de 110 minutos e perde a metade de sua atividade em menos de duas horas, e após dez meias-vidas, pouco mais de 18 horas, decai para o Oxigênio-18. Esta breve característica torna o monitoramento não somente desejável, mas imprescindível na cadeia de produção, controle de qualidade, fracionamento das doses, transporte, inventário do radionuclídeo e administração ao paciente, os quais precisam ocorrer de forma encadeada e sob rígido controle logístico e de tempo (FAPESP, 2000).

### 2.1.3. Etapa de Transporte - Elo Crítico da Cadeia Logística

O transporte de radiofármacos atualmente representa uma questão crítica por ocupar a posição mais vulnerável na cadeia logística nuclear (ANSN, 2026). Existem três dimensões de risco superpostas: a temporal, associada à meia-vida dos radioisótopos e necessidade do tempo de entrega eficaz; a física, relacionada à integridade dos contentores blindados; e, por último, a de humana, relacionada à segurança e proteção do material, devido ao risco de desvio, roubo ou uso indevido durante o transporte (Silva; Godoi; Santos, 2021; Jaime et al., 2024).

No plano regulatório, o transporte de materiais radioativos no Brasil deve obedecer à Norma CNEN-NN-5.01 (CNEN, 2021), a qual determina os requisitos de segurança e proteção

radiológica em todos os modais, e também à Norma CNEN 5.04 (CNEN, 2013), que especifica o rastreamento obrigatório de veículos de transporte de materiais radioativos, os quais devem utilizar um sistema de geolocalização para o monitoramento.

No âmbito internacional, o SSR-6 da Agência Internacional de Energia Atômica dispõe sobre os padrões de classificação dos materiais nucleares, controle de transporte, tipologia das embalagens, procedimentos de teste, assim como os requisitos operacionais que orientam as legislações nacionais dos países membros (IAEA, 2018).

Apesar do arcabouço regulatório existente, a implementação tecnológica dos sistemas de rastreamento guarda desafios (Poletto Filho; Francisco, 2023). A cobertura da cadeia interna das instalações, isto é, desde o intervalo de saída do radiofármaco até o embarque no veículo e a integração dos dados dos operadores em uma plataforma integrada para o monitoramento são pontos que não encontram uma regulamentação suficiente para a proteção e segurança (Silva; Morais; Monteiro, 2025). Esta lacuna ocupa o espaço que a presente dissertação busca suprir.

## 2.2. PLATAFORMA ARDUINO: SISTEMA EMBARCADO DE BAIXO CUSTO

### 2.2.1. Conceito e Arquitetura

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto criada no ano de 2005 no Instituto de Design de Interação de Ivrea da Itália (VICTORIA AND ALBERT MUSEUM, 2016). O objetivo primordial da plataforma seria oferecer ao estudante, pesquisador ou entusiasta, sem qualquer formação em engenharia eletrônica, um ambiente de prototipagem rápida para sistemas computacionais físicos (MAKERHERO, 2014).

O Raspberry Pi, por sua vez, constitui um microcomputador completo oferecendo maior capacidade de processamento e suporte à multitarefa. Essas funcionalidades implicam em maior demanda energética, custo elevado e latências não determinísticas, que dificultam o controle em tempo real. Portanto, para aplicações que exigem aquisição de dados de sensores e controle com recursos limitados, da prototipagem acadêmica à eventual migração industrial, o Arduino apresenta-se como uma alternativa tecnicamente mais adequada e versátil. (Blowers, 2022; ARDUINO FORUM, 2018; RASPBERRY PI LTD, [s.d.]; Guse, 2023). Desta maneira, o Arduino funciona como um sistema embarcado dedicado, capaz de interagir de forma direta e determinística com sensores como o GPS. As características do Arduino como o baixo custo de

implementação, a programação simplificada, o consumo energético reduzido e a estabilidade em aplicações de tempo real, o consolidam tanto como uma plataforma ágil para a prototipagem acadêmica e uma alternativa viável para aplicações industriais de menor complexidade.

Do ponto de vista da arquitetura, o Arduino possui um hardware simples, utilizando uma placa com microcontrolador, pinos de entrada e saída, regulador de tensão e interface USB para programação (ARDUINO, 2025). O ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), baseia-se na linguagem de programação C/C++, com uma camada de abstração denominada Wiring, que simplifica a interação com o hardware (ARDUINO, 2026). Além disso, a plataforma possui um ecossistema de bibliotecas (ARDUINO, 2024) e módulos de extensão, conhecidos como *shields* (USINAINFO, 2026), que permitem adicionar diversas funcionalidades ao sistema base, como por exemplo: comunicação sem fio, geolocalização, armazenamento de dados e interface de redes.

Dentre os modelos disponíveis, o Arduino Uno, Arduino Mega 2560 e Arduino MKR GSM 1400 são referências conhecidas em projetos de rastreamento e comunicação em tempo real. A escolha depende das exigências de processamento, consumo energético e protocolo de comunicação de cada aplicação específica (GLOBALWELL PCBA, 2025).

### 2.2.2 Aplicações em Sistemas de Monitoração e Rastreamento

Na literatura científica verifica-se ultimamente uma utilização crescente do Arduino no desenvolvimento de sistemas de monitoramento e rastreamento nas mais diversas áreas, como: logística de medicamentos, monitoramento ambiental, controle de processos industriais, e para segurança pública. Verifica-se que, a combinação de baixo custo, facilidade de programação, módulos de extensão e comunidade ativa de desenvolvimento apresenta-se como uma vantagem em relação às soluções proprietárias de prototipagem rápida (Fontenelle, 2024; Santos, 2022; Eurico, 2023).

No contexto do transporte de materiais, menciona-se o desenvolvimento de um sistema de rastreamento de baixo custo utilizando Arduino Mega, Módulo SIM900 e NEO-6M, através da comunicação via GPRS, com precisão de 2,5 para a localização e latência de transmissão de até 2 segundos, demonstrando confiabilidade para aplicações logísticas em tempo real (Rodgers, 2024).

Desta forma, observa-se a robustez do sistema frente a interferências eletromagnéticas, como uma questão de suma importância no âmbito de materiais radioativos pode ser aprimorada a partir de protocolos de comunicação redundantes, antenas externas e ainda o encapsulamento adequado dos circuitos utilizando blindagem (Jakubiak, 2020).

## 2.3. GEOLOCALIZAÇÃO POR GPS

### 2.3.1. Sistema de Posicionamento Global

GPS significa Sistema de Posicionamento Global, sendo constituído por um sistema de radionavegação por satélite desenvolvido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, utilizado inicialmente para fins militares em 1948, mas disponibilizado progressivamente para o uso civil. Para a operação o sistema utiliza três segmentos: espacial, formado por 24 satélites em órbitas médias a aproximadamente 20.200Km de altitude; controle, a partir de estações terrestres, as quais monitoram os parâmetros orbitais e relógios atômicos; e do usuário, através dos receptores GPS, dispositivos passivos que calculam a posição por trilateração dos sinais recebidos (Souza, 2022).

O princípio de funcionamento do GPS (Aliaga Aliaga, 2010) baseia-se na medição do tempo de propagação dos sinais de rádio transmitidos pelos satélites, onde cada um deles emite um sinal contínuo modulado com um código de pseudo-ruído (PRN) único e as informações sobre sua posição (efemérides) (Alves, 2019) e o estado do sistema (almanaque) (Tsukada, 2023). O receptor mede o intervalo entre a transmissão e recepção, multiplica pela velocidade da luz e obtém a distância pseudoaleatória do satélite, determinando a latitude, longitude expressas em coordenadas, além da altitude e velocidade (GLOBAL GPS SYSTEMS, 2023).

A precisão do posicionamento varia conforme a visibilidade dos satélites, a geometria da constelação, as condições ionosféricas e troposféricas e a presença de obstáculos que causem reflexões (Freitas, 2019). Por exemplo, em campo aberto em condições normais, o Módulo SIM808 (SIMCOM, 2015) proporciona uma precisão horizontal inferior a 5 metros.

### 2.3.2 Módulos GPS para Sistemas Embarcados

Para integração com Plataformas como o Arduino, os módulos mais empregados são receptores compactos baseados em chipsets dedicados. Módulos como o NEO-6M, fabricado

pela u-blox, se tornaram referência em prototipagem acadêmica e industrial pela combinação de sensibilidade de rastreamento e tempo de fixação a frio (U-BLOX AG, 2011). Além disso, o módulo transmite ao microcontrolador as informações de coordenadas, número de satélites, posição, velocidade e curso.

O SIM808 da Simcom constitui uma alternativa de módulo amplamente utilizado em projetos que necessitam de geolocalização e telemetria, integrando ainda as funcionalidades de GSM/GPRS e GPS. Sua arquitetura única elimina a necessidade de módulos separados para a comunicação e geolocalização, reduzindo o custo e a área de circuito nos sistemas embarcados. O módulo opera nas bandas GSM 850/900/1800/1900MHz e possui um receptor interno com sensibilidade de rastreamento de até -165dBm, além de ser compatível com as interfaces seriais UART, o que facilita a integração modular com o Arduino. Além das coordenadas geográficas, o SIM808 fornece dados como velocidade, curso, altitude e indicadores de qualidade do sinal. A capacidade de envio de dados via GPRS permite a transmissão em tempo real de informações de posicionamento, viabilizando aplicações de monitoramento contínuo (SIMCOM, 2014).

Em aplicações urbanas, o desempenho pode sofrer afetação pela reflexão dos sinais nas fachadas dos edifícios, chamado de efeito cânion, com erros de 10 a 50 metros em áreas de alta densidade construtiva (NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 2025). Para mitigação desse efeito, recorre-se a técnicas de fusão sensorial, onde os dados do GPS são combinados com as informações de sensores inerciais do acelerômetro e giroscópio e processados por algoritmos de filtros de estimação de estado, conhecido como Filtro de Kalman (Pereira, 2022).

Desta forma, o SIM808 demonstra adequação ao contexto de monitoramento em tempo real, por se consolidar como solução de baixo custo e alta viabilidade para sistemas embarcados que exigem o monitoramento contínuo e envio de dados em tempo real.

## 2.4. PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS DE RASTREAMENTO

### 2.4.1. Panorama das Tecnologias Disponíveis

A transmissão dos dados de localização ao centro de controle remoto pode ocorrer por meio das tecnologias sem fio, que possuem características próprias de alcance, largura de banda, consumo energético e custo operacional (Oliveira, 2021). A avaliação dos atributos da cobertura

da rota de transporte, frequência de atualização e restrições de consumo energético são fatores essenciais para definir a utilização da melhor tecnologia.

As tecnologias sem-fio podem ser organizadas em três grupos: Alcance Curto, como o Bluetooth (Até 100 metros) e Wi-Fi (Até 300 metros), estas inadequadas para o rastreamento em percursos, mas úteis para a comunicação entre o dispositivo embarcado e uma central; Redes Celulares (GPRS/2G, 3G, 4G/LTE e 5G), com cobertura nacional, sendo a melhor opção para rastreamento; e Satelitais, como Iridium, Globalstar e Inmarsat BGAN, que possuem cobertura global e independência da infraestrutura terrestre, sendo mais indicadas para regiões remotas que não possuem cobertura celular adequada (Infante Cámara, 2025).

#### 2.4.2. Comunicação via Redes Celulares (GPRS/5G)

Para a aplicação específica da presente pesquisa que possui a temática de rastreamento de radiofármacos, as redes celulares de segunda e quarta geração oferecem uma melhor relação entre cobertura, custo e facilidade de integração com a Plataforma Arduino. O Protocolo GPRS estende a transmissão de dados em pacotes sobre a Rede GSM/2G, proporcionando taxas de 56 a 114Kbps, faixa suficiente para a transmissão periódica de pacotes de posicionamento GPS no formato NMEA, que não ultrapassam 1KB por atualização (Peterson; Davie, 2013).

Portanto, a integração do Arduino com redes celulares pode ser realizada por módulos como o NEO-6M, SIM800 ou SIM7600, que se comunicam com o microcontrolador através de bibliotecas ou via UART e respondem a comando AT padronizados.

Quando utilizados pela rede celular, os módulos permitem estabelecer conexões TCP/IP com servidores remotos e enviar dados através de HTTP/HTTPS ou MQTT, sendo este último um protocolo leve de publicação e assinatura de mensagens adequado para aplicações IoT, que possuem restrições de largura de banda e consumo energético (Javed, 2017).

#### 2.4.3. Segurança Cibernética na Transmissão de Dados

A transmissão sobre redes públicas dos dados de localização em tempo real de materiais radioativos, cuja exposição não autorizada representa um risco à segurança pública, demanda

por mecanismos de segurança cibernética que possam garantir a confidencialidade, integridade e autenticidade das informações (Soares de Alexandria, 2009; Teixeira, 2014).

Nesse sentido, a implementação da segurança deve contemplar três camadas, sendo a primeira de criptografia de transporte, por meio do protocolo TLS, o qual estabelece um canal cifrado entre o dispositivo embarcado e o servidor remoto; a segunda, a partir da autenticação mútua, onde o dispositivo e o servidor verificam as identidades antes de iniciar a troca de dados, prevenindo ataques *spoofing* e *man-in-the-middle*; e a terceira, para controle de integridade por meio de funções de *hash* criptográfico, aplicadas aos pacotes antes da transmissão, permitindo ao receptor detectar a adulteração das informações (Silva, 2025; Loli, 2024; Silva, 2022).

A implementação dessas camadas em sistemas embarcados com limitação de recursos, como o Arduino, não se mostra trivial, pois o custo computacional das operações criptográficas pode saturar o microcontrolador (Nwankwo *et al.*, 2025). Nesse sentido, existem soluções como o Módulo ATECC608A, composto por um dispositivo de segurança criptográfica, permitindo implementar algoritmos de curva elíptica, sem impacto sobre o processador principal (Rosa; Teixeira; Júnior, 2022).

## 2.5. TECNOLOGIA BLOCKCHAIN NA CADEIA NUCLEAR

### 2.5.1. Conceitos e Princípios Fundamentais

O Blockchain se constitui de uma “cadeia de blocos”, ou seja, uma estrutura de dados distribuída que armazena informações em blocos encadeados cronologicamente por funções de *hash* criptográfico. Qualquer tentativa de alteração retroativa de um bloco resulta na invalidação de todos os blocos subsequentes, tornando a adulteração dos registros inviável sem o consenso da maioria dos participantes da rede (Nakamoto, 2008). Esse conceito foi introduzido em 2008 no contexto de um sistema de pagamentos digitais descentralizados no artigo Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System de Satoshi Nakamoto. Tais conceitos podem ser utilizados para permitir o rastreo confiável da cadeia logística dos materiais nucleares, devido à característica de imutabilidade dos registros.

A estrutura básica do Blockchain compreende três elementos: Bloco, unidade básica de armazenamento, o qual contém um conjunto de transações, o carimbo de tempo, um número aleatório único, chamado de *nonce* e o *hash* do bloco anterior, que estabelece o encadeamento;

*Hash*, resultado de uma função matemática de mão única, que transforma qualquer conjunto de dados em uma sequência alfanumérica de comprimento fixo, e, onde qualquer alteração mínima nas informações dos registros, resulta em um *hash* completamente diferente; e o Mecanismo de Consenso, protocolo em que os nós chegam a um acordo sobre qual versão da cadeia de blocos possui legitimidade, possuindo diversas variantes, como: *Proof-of-Work* (PoW), *Proof-of-Stake* (PoS) e o *Practical Byzantine Fault Tolerance* (PBFT) (Zhou *et al.*, 2023).

Nessa perspectiva, a imutabilidade dos registros, a transparência em redes públicas e a auditabilidade controlada em redes privadas, somada à eliminação de um terceiro centralizado são características do Blockchain, aplicáveis à gestão de cadeias de suprimentos, exigindo a rastreabilidade e integridade, como na logística, além de rastreamento contínuo, documentação auditável e inalterável para realizar as investigações pós-acidente (OFFICE FOR NUCLEAR REGULATION, 2023; DAMONA, 2025).

#### 2.5.2. Tipos de Blockchain e Contratos Inteligentes

Sobre o Blockchain, do ponto de vista do modelo de governança e do controle de acesso, as implementações são divididas em três tipos: Blockchain Público, como Bitcoin e Ethereum, de maneira que qualquer participante pode auditar, ler dados, submeter transações e participar do consenso, sem credenciamento prévio; Blockchain Privado, que possui controle por uma organização, a qual detém autoridade sobre o credenciamento e validação, oferecendo um maior desempenho e privacidade ao custo da descentralização da base; e o de Consórcio/Federado, que compartilha o controle entre um grupo de organizações credenciadas, sem que nenhuma detenha o controle unilateral, como por exemplo as Plataformas *Hyperledger Fabric*, *R3 Corda* e *Quorum* (AMAZON WEB SERVICES, 2026; JIA; SHAO; BIAN, 2025).

Para a aplicação proposta na presente dissertação, a administração da cadeia logística de radiofármacos seria mantida sob a supervisão regulatória da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Neste contexto, o modelo de Blockchain de consórcio mostra-se como o mais adequado, por permitir a participação de múltiplos atores credenciados, como o Instituto de Engenharia Nuclear, na condição de produtor, e dos serviços de medicina nuclear, como destinatários, sem que nenhum deles detenha controle unilateral sobre a rede (Susnjara; Smalley, 2021). Portanto, o Instituto de Engenharia Nuclear, os transportadores credenciados, os serviços destinatários e a Comissão Nacional de Energia Nuclear participariam como nós validadores, com diferentes

níveis de permissão, preservando a confidencialidade das informações sensíveis e garantindo a auditabilidade regulatória, sem qualquer dependência de uma autoridade central única, além de impossibilitar a alteração dos registros (Chen, 2024).

Em continuidade, os contratos inteligentes são programas autoexecutáveis, que podem ser armazenados na cadeia de blocos, e disparam automaticamente um conjunto predefinido de ações quando determinadas condições são satisfeitas, sem a necessidade de intervenção humana ou intermediários.

No caso da cadeia logística de radiofármacos, os contratos inteligentes podem registrar automaticamente a expedição de um lote pelo Instituto de Engenharia Nuclear, a confirmação de recebimento por cada elo, alertas gerados pelo sistema de rastreamento, desvios de rota, violação de contentores, atrasos e a confirmação de entrega no destino final, proporcionando um registro auditável, cronologicamente ordenado e imutável completo e íntegro da cadeia de custódia do material (Ferré-Queralt *et al.*, 2024; Ahmed, 2026; Elghaish *et al.*, 2023).

Portanto, a combinação de Blockchain com os contratos inteligentes ajuda a estabelecer um ambiente de confiança distribuída e garantia de integridade de imutabilidade da cadeia de custódia, viabilizando a rastreabilidade com a execução automatizada de regras na ocorrência de eventos, como desvios de rota ou violações dos contêineres.

### 2.5.3. Blockchain na Gestão das Cadeias de Suprimentos Críticas

A aplicabilidade do Blockchain na gestão de cadeias de suprimentos tem despertado crescente interesse acadêmico e industrial desde meados da década de 2010, impulsionada pela maturação da tecnologia e devido à disponibilidade de plataformas de código aberto. Os setores farmacêutico, alimentício e logístico foram os primeiros setores a adotar diversas soluções de rastreabilidade baseadas em Blockchain, motivados pela necessidade de combater adulterações, garantir a integridade da cadeia e demonstrar a conformidade regulatória (Lucca, 2022).

Além disso, como parâmetro, no setor farmacêutico, a *Drug Supply Chain Security Act* norte-americana de 2013 e a Diretiva 2011/62/EU, estabeleceram requisitos de rastreabilidade serializada, impulsionando a adoção de soluções tecnológicas inovadoras (Chien *et al.*, 2020; PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2011). Verificou-se que

os sistemas de rastreabilidade farmacêuticos baseados em Blockchain, integrados a dispositivos IoT melhoraram a transparência e rastreabilidade da cadeia de suprimentos, tornando o sistema de saúde mais eficaz e seguro (Parvathy *et al.*, 2025; Parthiban *et al.*, 2021).

Ademais, no contexto nuclear, a aplicabilidade do Blockchain mostra-se vantajosa para o monitoramento da cadeia de suprimentos do combustível nuclear (Dai, Lu e Huang, 2024; Ecemis *et al.*, 2024; Ekinci, 2024; Ekinci *et al.*, 2024; Jing *et al.*, 2025; Poudel *et al.*, 2025; Wang *et al.*, 2025). A tecnologia oferece vantagens substantivas em relação à integridade dos registros, resistência a ataques internos e auditabilidade (Oliveira Neto, 2025). Nesse sentido, o Blockchain guarda aplicabilidade à cadeia de suprimentos dos radiofármacos do Instituto de Engenharia Nuclear, onde a integração entre o rastreamento físico em tempo real e os registros no Blockchain constituem um fundamento tecnológico para a proposta da dissertação.

Por fim, apesar do potencial promissor, ressalta-se que não houve a implementação da tecnologia Blockchain no protótipo. E, a discussão teórica apresentada teve como o objetivo de demonstrar a pertinência conceitual, além de apontar uma direção para fins de trabalhos futuros. A incorporação do Blockchain do tipo permissionado e de contratos inteligentes na plataforma de rastreamento de radiofármacos permanece como uma das principais direções da evolução do sistema, conforme detalhes expostos na seção 6.3.3.

### 3. ARCABOUÇO JURÍDICO-NORMATIVO DA SEGURANÇA NUCLEAR

A discussão sobre o marco regulatório incidente sobre o setor nuclear brasileiro constitui um pressuposto metodológico necessário para realizar a proposta de investigação e os objetivos da presente dissertação.

O rastreamento de radiofármacos não obedece a uma norma isolada, submetendo-se a um sistema normativo de múltiplas camadas, atualmente composto pela Constituição Federal, legislação federal, normas técnicas da Comissão Nacional de Energia Nuclear e regulamentos específicos das agências de transporte modal. Nesta perspectiva, a compreensão dessa estrutura hierárquica ajuda na identificação das lacunas que comprometem a efetividade dos mecanismos de controle da cadeia logística dos materiais nucleares e para o desenvolvimento de uma solução harmônica e coerente.

O capítulo encontra-se organizado em quatro seções, de maneira que a primeira situa o setor nuclear no texto constitucional e examina as transformações havidas a partir das Emendas Constitucionais 49/2006 (BRASIL, 2006) e 118/2022 (BRASIL, 2022), a segunda percorre a legislação federal infraconstitucional sobre o tema, a terceira descreve o sistema de normas técnicas da Comissão Nacional de Energia Nuclear relacionadas à proteção radiológica e do transporte de materiais radioativos (CNEN, 2025), e, por fim, a quarta, discute as interfaces com os organismos internacionais, como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2018).

### 3.1. FUNDAMENTO CONSTITUCIONAL

O texto original do artigo 21, inciso XXIII da Constituição Federal de 1988 reservou à União a competência exclusiva para exploração dos serviços e instalações nucleares de qualquer natureza (BRASIL, 1988), verificando-se o seguinte:

“Art. 21. Compete à União:

XXIII - explorar os serviços e instalações nucleares de qualquer natureza e exercer monopólio estatal sobre a pesquisa, a lavra, o enriquecimento e reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios nucleares e seus derivados, atendidos os seguintes princípios e condições:

- a) toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional;
- b) sob regime de concessão ou permissão, é autorizada a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos medicinais, agrícolas, industriais e atividades análogas;
- c) a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa;”

Destaca-se que, na redação original, a alínea b dispunha sobre a responsabilidade civil por danos nucleares, independente da existência de culpa, anteriormente desenvolvida pela Lei 6.453/1977 (BRASIL, 1977). E a alínea c vedava expressamente a comercialização de material radioativo, implicando na reserva estatal sobre a cadeia produtiva dos radioisótopos, inclusive os de aplicação médica, demonstrando o monopólio estatal no setor nuclear.

O cenário normativo se transformou com a Emenda Constitucional 49 (BRASIL, 2006), após a alteração que excluiu do monopólio estatal a produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida curta, com a modificação da redação do artigo 21 para o seguinte:

- “b) sob regime de permissão, são autorizadas a comercialização e a utilização de radioisótopos para a pesquisa e usos médicos, agrícolas e industriais;
- c) sob regime de permissão, são autorizadas a produção, comercialização e utilização de radioisótopos de meia-vida igual ou inferior a duas horas;
- d) a responsabilidade civil por danos nucleares independe da existência de culpa;”

Essa lógica fundamenta-se no entendimento de que o tempo de meia-vida inferior a duas horas tornaria “nulo” qualquer risco de proliferação, pois o material perderia a radioatividade antes de eventual desvio para finalidades ilícitas. Esta lógica não considera o fato de que o risco não se resume à proliferação, mas sim à contaminação, exposição indevida e danos radiológicos

Em seguida, a Emenda Constitucional 118 (BRASIL, 2022), introduziu a alteração de maior impacto estrutural ao artigo 21, apresentando como texto o seguinte:

- “b) sob regime de permissão, são autorizadas a comercialização e a utilização de radioisótopos para pesquisa e uso agrícolas e industriais;
- c) sob regime de permissão, são autorizadas a produção, a comercialização e a utilização de radioisótopos para pesquisa e uso médicos;”

Essa “abertura” no setor nuclear brasileiro demonstra um movimento gradual que tende a flexibilização do monopólio estatal, acompanhando pela manutenção dos mecanismos rígidos de controle regulatório da segurança radiológica, proteção física, rastreabilidade, em atenção aos Princípios Constitucionais da Finalidade Pacífica e Responsabilidade Objetiva.

A respeito do monopólio nuclear da União, destaca-se ainda o artigo 177 da Constituição Federal (BRASIL, 1988), que em seu texto original, evidencia a reserva estatal, desde a extração até a comercialização dos materiais, independente das flexibilizações do artigo 21, prevendo o seguinte:

- “Art. 177. Constituem monopólio da União:
- I – a pesquisa e a lavra das jazidas de petróleo e gás natural e outros hidrocarbonetos fluidos;
  - II – a refinação do petróleo nacional ou estrangeiro;
  - III – a importação e exportação dos produtos e derivados básicos resultantes das atividades previstas nos incisos anteriores;
  - IV – o transporte marítimo do petróleo bruto de origem nacional ou de derivados básicos de petróleo produzidos no País, bem assim o transporte, por meio de conduto, de petróleo bruto, seus derivados e gás natural de qualquer origem;

V – a pesquisa, a lavra, o enriquecimento, o reprocessamento, a industrialização e o comércio de minérios e minerais nucleares e seus derivados.

§ 1º – O monopólio previsto neste artigo inclui os riscos e resultados decorrentes das atividades nele mencionadas, sendo vedado à União ceder ou conceder qualquer tipo de participação, em espécie ou em valor, na exploração de jazidas de petróleo ou gás natural, ressalvado o disposto no art. 20, § 1º.”

Adiante, a Emenda Constitucional 9 (BRASIL, 1995) alterou o Parágrafo Primeiro do artigo 177, dispondo que: “§ 1º A União poderá contratar com empresas estatais ou privadas a realização das atividades previstas nos incisos I a IV deste artigo observadas as condições estabelecidas em lei.”

Portanto, a Emenda Constitucional 9, representou a flexibilização do monopólio estatal, permitindo a participação da iniciativa privada nas atividades que antigamente eram reservadas exclusivamente à União, criando a necessidade de um arcabouço rígido para a regulação setorial por uma agência independente.

A Emenda Constitucional 118, estendendo a possibilidade de exploração por empresas privadas na produção de radioisótopos da área de saúde, independente do tempo de meia-vida, retirou a reserva de produção dos radioisótopos de meia-vida longa aos institutos estatais, como Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares e o Instituto de Engenharia Nuclear.

Essa abertura normativa impôs a urgência no desenvolvimento de mecanismos mais robustos para o controle e rastreamento dos materiais nucleares, tendo em vista que a cadeia produtiva passou a envolver agentes privados, sujeitos à fiscalização dos órgãos reguladores, e para fins de segurança nacional.

Por fim, o monopólio constitucional permanece como vetor interpretativo da legislação infraconstitucional do setor nuclear. Qualquer lacuna ou conflito normativo na regulamentação do transporte e rastreamento de radiofármacos deve ser solucionado de acordo com o Princípio da Exclusividade do Controle Estatal sobre as atividades nucleares, com implicações diretas a respeito da competência regulatória da Comissão Nacional de Energia Nuclear e da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear.

## 3.2. LEGISLAÇÃO FEDERAL INFRACONSTITUCIONAL

A regulamentação infraconstitucional do setor nuclear brasileiro encontra-se composta por um conjunto normativo estratificado, construído ao longo de décadas, abrangendo desde a estruturação institucional do setor nuclear até a disciplina específica do transporte, manuseio e rastreamento de materiais radioativos, como os radiofármacos. Tais diplomas legais refletem a evolução da compreensão estatal sobre os riscos inerentes às aplicações do campo nuclear, bem como a progressiva adequação do ordenamento jurídico nacional às diretrizes e recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica.

A análise dos principais instrumentos normativos infraconstitucionais demonstra uma trajetória legislativa, a qual parte da criação do marco regulatório fundacional do setor, passa pela definição dos regimes de responsabilidade civil e criminal, disciplina a gestão dos rejeitos radioativos e culmina na reestruturação institucional do setor, com a separação das funções de promoção e fiscalização das atividades nucleares. Deste modo, as normas formam o arcabouço jurídico sobre o qual se assenta a discussão sobre o rastreamento dos radiofármacos no território nacional.

### 3.2.1. Lei 4.118/1962

O setor nuclear brasileiro foi estruturado a partir da Lei 4.118/1962 (BRASIL, 1962), a partir da criação da Comissão Nacional de Energia Nuclear e por estabelecer o regime jurídico das atividades nucleares, de maneira a consolidar a lógica do monopólio estatal, posteriormente constitucionalizada, em 1988. Destaca-se o artigo 4º que dispõe o seguinte:

“Art. 4º Compete à CNEN:

IV - Estabelecer regulamentos e normas de segurança relativas ao uso das radiações e dos materiais nucleares e à instalação e operação dos estabelecimentos destinados a produzir materiais nucleares ou a utilizar a energia nuclear e suas aplicações e fiscalizar o cumprimento dos referidos regulamentos e normas.”

O referido artigo, fora revogado pela Lei 6.189/1974 (BRASIL, 1974), mas sua diretriz permanece vigente até os dias atuais, onde assenta a arquitetura normativa do rastreamento de radiofármacos, de fundamental importância para o setor nuclear brasileiro. Não obstante, esta continuidade normativa evidencia a base sobre a qual se fundamentam os atuais requisitos de controle e fiscalização dos materiais radioativos.

### 3.2.2. Lei 6.453/1977

Outro ponto que merece destaque: a responsabilidade civil e criminal por dano nuclear, disciplinada na Lei 6.453/1977 (BRASIL, 1977). Nesse contexto, a legislação adota a Teoria da Responsabilidade Objetiva, a qual, prescinde a demonstração de culpa para fins do dever de indenizar, além de dispor sobre os crimes na exploração e utilização da energia nuclear, como: produzir, processar, fornecer ou usar material nuclear sem a necessária autorização ou para fim diverso do permitido em lei; permitir o responsável pela instalação nuclear sua operação sem a necessária autorização; possuir, adquirir, transferir, transportar, guardar ou trazer consigo material nuclear, sem a necessária autorização; transmitir ilicitamente informações sigilosas, concernentes à energia nuclear; extrair, beneficiar ou comerciar ilegalmente minério nuclear; exportar ou importar, sem a necessária licença, material nuclear, minérios nucleares e seus concentrados, minérios de interesse para a energia nuclear e minérios e concentrados que contenham elementos nucleares; deixar de observar as normas de segurança ou de proteção relativas à instalação nuclear ou ao uso, transporte, posse e guarda de material nuclear, expondo a perigo a vida, a integridade física ou o patrimônio de outrem; e impedir ou dificultar o funcionamento de instalação nuclear ou o transporte de material nuclear.

No âmbito da responsabilidade criminal, merecem destaque os artigos 20, 22 e 26 da referida lei, cujos tipos penais aplicam-se às condutas irregulares relacionadas ao manuseio, transporte e uso de material nuclear sem a devida autorização regulatória, quais sejam:

“Art. 20 - Produzir, processar, fornecer ou usar material nuclear sem a necessária autorização ou para fim diverso do permitido em lei.

Art. 22 - Possuir, adquirir, transferir, transportar, guardar ou trazer consigo material nuclear, sem a necessária autorização.

Art. 26 - Deixar de observar as normas de segurança ou de proteção relativas à instalação nuclear ou ao uso, transporte, posse e guarda de material nuclear, expondo a perigo a vida, a integridade física ou o patrimônio de outrem.”

Os dispositivos mencionados recobrem as condutas irregulares passíveis de ocorrência no ciclo logístico dos radiofármacos. E, individualmente considerados, cada artigo projeta sua incidência sobre uma etapa distinta da cadeia produtiva e distributiva, desde a fabricação até a entrega ao usuário final, o que confere ao conjunto normativo uma abrangência que alcança as operações envolvendo material nuclear sem a devida autorização regulatória.

E também, os artigos 20 e 22 voltam-se às fases de produção e movimentação logística, enquanto o artigo 26 atua como cláusula de encerramento do sistema protetivo, ao sancionar o descumprimento das normas de segurança, sempre que a conduta irregular expuser a risco bens jurídicos de terceiros, hipótese de especial relevância no transporte de substâncias radioativas em ambiente urbano, devido à probabilidade de danos potenciais à coletividade e saúde pública.

Desta forma, a ausência de autorização da autoridade reguladora em qualquer etapa do ciclo logístico dos radiofármacos não configura como uma mera irregularidade administrativa, mas sim uma conduta com expressa tipificação penal, reforçando a necessidade do rastreamento contínuo e documentado de todas as operações do setor, de maneira a permitir a fiscalização do órgão regulador.

No âmbito legal, a conjugação da responsabilidade civil objetiva com a tipificação penal das condutas irregulares revela a opção legislativa por um regime de proteção jurídica dupla e abrangente, onde a reparação do dano e a repressão criminal ocorrem de modo complementar e simultâneo. Além disso, no contexto específico dos radiofármacos, a arquitetura normativa reforça a necessidade do rastreamento contínuo em todas as etapas do ciclo logístico, tendo em vista que a ausência de autorização da Comissão Nacional de Energia Nuclear ou da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear compromete a conformidade regulatória e expõe os operadores do setor à responsabilização nas esferas cível e criminal. Por fim, a Lei 6.453/1977 permanece como um elemento estruturante no regime jurídico protetor, para o controle estrito dos materiais nucleares no Brasil, e por fundamentar a exigência de supervisão contínua e documentada nas operações que envolvem materiais nucleares no âmbito do território nacional.

### 3.2.3. Lei 19.308/2001

A Lei 19.308/2001 trata da gestão de rejeitos radioativos e relaciona-se diretamente com o ciclo de vida de fármacos, conforme a regulamentação da Lei 10.308/2001 (BRASIL, 2001). De acordo com o artigo 2º, a União, através da Comissão Nacional de Energia Nuclear, possui responsabilidade pelo destino final dos rejeitos radioativos produzidos no território nacional.

Com relação à responsabilidade civil, e, anteriormente à Lei 14.222/2021, a Comissão Nacional de Energia Nuclear se responsabilizava pelo licenciamento, transporte, manuseio e

armazenamento dos rejeitos. A partir de 2021, o artigo 10 dispôs sobre a responsabilidade da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear.

Adiante, destaca-se a responsabilidade do titular da operação da instalação pelos danos radiológicos pessoais, patrimoniais e ambientais causados pelos rejeitos radioativos no decorrer do transporte de rejeitos dos depósitos iniciais para os depósitos intermediários ou de depósitos iniciais para os depósitos finais, de acordo com o artigo 21. Adiante, o artigo 22 dispõe sobre a responsabilidade civil por danos radiológicos pessoais, patrimoniais e ambientais, causados por rejeitos radioativos no transporte dos depósitos intermediários para os depósitos finais como pertencente à Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Por fim, tais definições encontram relevância o rastreamento de radiofármacos, porque abrangem explicitamente o transporte como fase do gerenciamento, fundamentando a aplicação de um regime de controle rígido ainda nas etapas logísticas intermediárias.

#### 3.2.4. Lei 14.222/2021

A Lei 14.222/2021 (BRASIL, 2021) se constituiu como o marco legislativo mais recente do setor nuclear nacional, com a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear, após o desmembramento da Comissão Nacional de Energia Nuclear. A legislação separou as funções de promoção e fiscalização das atividades nucleares, em atenção às recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, de acordo com o Princípio da Independência do Regulador, alinhando o Brasil às práticas dos principais países com programas nucleares civis.

O artigo 3º atribuiu a Autoridade de Segurança Nacional a função de órgão regulador e fiscalizador nas áreas de radioproteção e segurança nuclear, além da fiscalização do transporte dos materiais radioativos. A inclusão expressa dessa competência no texto legal demonstra que o transporte de materiais radioativos representa uma espécie de atividade que requer supervisão regulatória permanente e especializada.

Ressalta-se também que, a transição de competências ainda se encontrava em curso ao tempo da presente dissertação. E, conforme o artigo 44 da legislação, a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear possui um prazo de até quatro anos, a partir da data de sua instalação, para

completar a estruturação organizacional. O período de implementação gera uma sobreposição regulatória que exige a atenção específica dos operadores do setor nuclear.

### 3.2.5. Decreto 9.600/2018

De grande importância para o cenário nacional, o Decreto 9.600/2018 (BRASIL, 2018) estabelece a Política Nuclear Brasileira, com a primeira definição expressa de radiofármaco no ordenamento jurídico, conforme o artigo 2º, inciso XII, sendo conceituado como: “substância radioativa agregada a um fármaco para uso em terapia ou diagnóstico médico”.

Esta definição demonstra uma importância dupla, pois, além de delimitar o objeto da investigação em termos jurídicos precisos, também evidencia que a regulamentação específica chegou tardiamente, ou seja, trinta anos após a promulgação da Constituição Federal, e, através decreto ordinário, o que revela a incompletude do arcabouço normativo do setor nuclear. Como crítica, a legislação poderia ser complementada no sentido do desenvolvimento do setor nuclear em nível nacional.

Nesse contexto, destacam-se os Princípios da Política Nuclear Brasileira:

“Art. 3º São princípios da Política Nuclear Brasileira:

III - a segurança nuclear, a radioproteção e a proteção física;

V - o emprego da tecnologia nuclear como ferramenta para o desenvolvimento nacional e o bem-estar da sociedade.”

E ainda, dentre os objetivos da Política Nuclear Brasileira, importante ressaltar que:

“Art. 7º São objetivos específicos relativos à indústria do setor nuclear:

IV - promover o desenvolvimento da indústria nacional destinada à produção de radioisótopos e de radiofármacos;”

Além disso, mostra-se imprescindível mencionar os aspectos organizacionais do setor nuclear brasileiro na legislação, quais sejam:

“Art. 10. O Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro - Sipron tem as seguintes atribuições:

III - planejar e coordenar as ações, em situações de emergência nuclear, que tenham como objetivo proteger:

a) as pessoas envolvidas na operação das instalações nucleares e na guarda, no manuseio e no transporte dos materiais nucleares;”

Estes princípios e objetivos conferem a base jurídico-política ao esforço de melhoria do sistema de rastreamento proposto pela discussão na presente dissertação, com o posicionamento como componente essencial de uma política pública respaldada pelo Poder Executivo Federal.

### 3.3. SISTEMA DE NORMAS TÉCNICAS DA CNEN

#### 3.3.1. Proteção Radiológica e Licenciamento de Instalações

A totalidade das normas técnicas da Comissão Nacional de Energia Nuclear constitui o núcleo operacional do sistema de controle das atividades com materiais radioativos. Em matéria de proteção radiológica, a CNEN-NN-3.01 (CNEN, 2022) possui grande relevância, dispondo sobre os princípios gerais e requisitos básicos para a radioproteção das pessoas e meio ambiente, além da segurança radiológica das fontes de radiação ionizante.

Adiante, o artigo 19 assume um papel de destaque na estruturação das responsabilidades operacionais no âmbito da radioproteção, de forma a atribuir ao supervisor de radioproteção, na qualidade de figura técnica obrigatória nas instalações que operam com fontes de radiação ionizante, um conjunto de deveres, além da supervisão passiva, impondo ainda a obrigação de estabelecer e garantir a aplicação dos procedimentos em todas as fases do manuseio do material radioativo. A partir da normativa, menciona-se o seguinte: “Art. 19. As responsabilidades dos supervisores de radioproteção são:

X - Estabelecer e garantir a aplicação de procedimentos para recebimento, manuseio, uso, acondicionamento, transporte e armazenamento de fontes de radiação e de rejeitos radioativos;”

O inciso X, mostra-se particularmente relevante para o rastreamento de radiofármacos, tendo em vista que abrange especificamente o transporte e armazenamento como etapas sujeitas a procedimentos formalizados e controlados, além de consolidar, no plano normativo técnico, a exigência de rastreabilidade contínua ao longo do ciclo logístico.

Adiante, destaca-se também a situação de exposição planejada no campo de aplicação:

“Art. 35. As situações de exposição planejada se aplicam às seguintes instalações e atividades para as quais esta Norma estabelece requisitos:  
I - o manuseio, a produção, a posse, a utilização, o transporte, o armazenamento e a deposição de material radioativo ou de rejeito e de dispositivos que contenham material radioativo, incluindo fontes seladas e não seladas e produtos de consumo;”

Além disso, menciona-se a remediação das áreas com material radioativo residual, onde:

“Art. 130. As pessoas físicas ou jurídicas responsáveis pelo planejamento, execução e verificação das ações de remediação devem submeter à CNEN um plano de remediação, para aprovação:

IV - os custos de transporte e gestão de rejeitos radioativos.”

Desta forma, recorda-se que, o Princípio da Otimização, impõe que as doses de radiação ionizante recebidas pelos indivíduos sejam tão baixas como razoavelmente exequíveis, a partir do seguinte:

“Art. 6º Para os fins desta Norma, são adotadas as seguintes definições e siglas:

LXXVI - Otimização da Radioproteção ou Otimização - processo pelo qual se determina o nível de radioproteção que permite que a magnitude das doses individuais, o número de indivíduos submetidos à exposição à radiação ionizante e a probabilidade de ocorrência dessas exposições se mantenham em valor tão baixo quanto racionalmente exequível (ALARA), levando em consideração os fatores econômicos e sociais;”

Para o design de sistemas de rastreamento de radiofármacos os procedimentos logísticos devem ser planejados de modo a minimizar qualquer exposição desnecessária dos trabalhadores nas etapas de carregamento, transporte e descarregamento.

A norma CNEN NN-6.02 trata do licenciamento de instalações radiativas, categoria que abrange as farmácias de radiofármacos e os serviços de medicina nuclear. Destaca-se ainda que a norma em seu artigo 8º determina as fases do processo de licenciamento, aprovação de local, autorização de construção, modificação, comissionamento, operação, retirada de operação e do descomissionamento (CNEN, 2021).

Nesse sentido, verifica-se a autorização para operação, conforme o seguinte:

“Art. 17 O requerimento de Autorização para Operação de instalações do GRUPO 4 e dos SUBGRUPOS 3A e 7A deve abranger os seguintes itens:

e) registros e controles a serem mantidos na instalação, incluindo controle de entrada e saída de fontes de radiação, inventário de fontes de radiação e rejeitos, identificação do responsável pela segurança das fontes, controle de acesso às áreas e identificação das pessoas autorizadas para o uso das fontes;”

A norma CNEN NN 6.02 também dispõe acerca dos requisitos de segurança e proteção radiológica em instalações produtoras de radioisótopos com aceleradores cíclotrons. Portanto, menciona-se ainda o Plano Preliminar de Gerência de Rejeitos Radioativos, a partir do seguinte:

“Art. 16. O Plano Preliminar de Gerência de Rejeitos Radioativos deve estar em consonância com a Norma CNEN NN 8.01 Gerência de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação, indicar o local de armazenamento dos rejeitos e as formas de:

I - registro de inventário;

II - classificação;

III - segregação;

IV - tratamento;

V - acondicionamento;

VI - armazenamento

VII - eliminação; e

VIII - movimentação dos rejeitos radioativos no interior da instalação.”

A norma exige no artigo 23 que o Plano de Proteção Radiológica contemple o controle de transporte de materiais radioativos dentro da instalação e em vias públicas, em conformidade com a Norma CNEN NN 5.01 (CNEN, 2013). Nesse âmbito, o sistema embarcado proposto na presente dissertação, com GPS e comunicação sem fio, atende diretamente a essa exigência, ao prover rastreamento contínuo desde a saída do radiofármaco da célula quente até a chegada ao destinatário.

E ainda, a norma também exige no artigo 23, inciso X, o registro sistemático dos dados operacionais para as seguintes operações: atividades produzidas, vendas e transferências dos radioisótopos para as instalações autorizadas. A dissertação identifica essa lacuna de integração de dados como um dos problemas centrais a se resolver, onde propõe um sistema permissionado de Blockchain para garantir registros imutáveis e auditáveis em toda a cadeia de custódia, o que complementarmente de forma consistente os requisitos de registro previstos na norma.

Por fim, no artigo 24, a norma estabelece que o Plano de Emergência deve contemplar cenários como desvios durante o transporte e acidentes com material radioativo, abordando esse ponto por meio da proposta de protocolos automáticos de alerta por desvio de rota, interrupção da transmissão e atrasos, funcionalidades integradas ao Blockchain e ao módulo de controle de usuários, assim previstos como melhorias futuras, com suporte à implementação dos planos de emergência exigidos pela norma.

### 3.3.2. Norma de Transporte e Rastreamento de Materiais Radioativos

A regulamentação do transporte de materiais radioativos encontra-se disposta na Norma CNEN-NN-5.01, esta que determina os requisitos de segurança e de proteção radiológica para o transporte terrestre, marítimo ou aquático em todas as fases, desde a classificação do material até os procedimentos operacionais durante o percurso (CNEN, 2013), destacando-se o seguinte:

“Art. 2º O objetivo desta Norma é estabelecer requisitos de segurança e proteção radiológica para o transporte de materiais radioativos a fim de garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante, compreendendo:  
§1º Transporte de material radioativo é a expressão que abrange todas as operações e condições que envolvam ou que sejam associadas à movimentação de materiais radioativos externamente à área de propriedade de uma instalação, incluindo projeto, manufatura, manutenção, serviços e reparo de embalagens, bem como a preparação, expedição, carregamento, transporte propriamente dito, armazenamento em trânsito, descarregamento e recebimento no destino final.”

A referida normativa se baseia na IAEA-SSR-6 (IAEA, 2018) da Agência Internacional de Energia Atômica, que determina as Regulamentações para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos.

E ainda, destaca-se o seguinte na normativa CNEN-NN-5.01:

“Art. 5º Esta Norma não especifica controles tais como itinerário ou proteção física que possam ser estabelecidos por razões outras que a segurança radiológica. Tais controles levarão em consideração os riscos radiológicos e não radiológicos e não diminuirão e nem substituirão os padrões de segurança estabelecidos nesta Norma.  
Parágrafo único. Medidas deverão ser tomadas para assegurar que o material radioativo seja mantido em segurança durante o transporte, de forma a evitar roubo ou danos e assegurar que o controle do material não será feito de forma inadequada.”

Adiante, com relação ao Plano de Transporte, deve-se atentar ao seguinte:

“Art. 14. O expedidor deve submeter à CNEN um plano de transporte de materiais radioativos com a especificação dos materiais a serem transportados e descrição das ações de proteção radiológica, segurança e de resposta em situações de emergência a serem aplicadas nas operações de transporte.”

Verifica-se ainda que a norma CNEN-NN-5.01 estabelece um protocolo obrigatório de não conformidade, determinando a adoção de medidas imediatas de mitigação pelo expedidor,

transportador ou destinatário. Estes também devem comunicar à Comissão Nacional de Energia Nuclear, quando identificada qualquer irregularidade durante o transporte. O sistema de alertas automáticos com a notificação das autoridades competentes, automatiza a detecção de eventos anômalos, como desvios de rotas ou tentativas de violação do contêiner, de maneira a acelerar o acionamento das respostas de emergência contidas nos artigos 22 e 23 da norma.

Adiante, importante mencionar o rastreamento de veículos utilizados no transporte dos materiais radioativos, disciplinado na CNEN-NN-5.04 (CNEN, 2017), ao impor o seguinte:

“Art. 1º Instituir obrigatoriedade de instalação de sistema de rastreamento de sinais de posicionamento em veículos utilizados para o transporte de produtos perigosos Classe 7 (materiais radioativos).”

Nesse contexto, a Resolução CNEN NN 2.05 (CNEN, 2022), dispõe sobre a Proteção Física no Transporte de Materiais Nucleares e Outros Materiais Radioativos, especificamente a partir do seguinte:

“Art. 2º Esta norma estabelece os princípios gerais e requisitos básicos exigidos para o projeto, implantação e manutenção de um Sistema de Proteção Física (SisPF) de operações de transporte de materiais nucleares e outros materiais radioativos nos diferentes modais (aeroviário, aquaviário, ferroviário e rodoviário), bem como durante transbordo e armazenamento em trânsito.

§ 1º Define-se Sistema de Proteção Física (SisPF) como um conjunto de elementos tais como medidas, regras, procedimentos, equipamentos, aparelhos e recursos humanos destinados a dissuadir, detectar, retardar e responder a qualquer ato não autorizado contra uma operação de transporte, visando o atendimento aos objetivos constantes no § 4º.

(...)

§ 4º A proteção física de uma OT tem por objetivos:

- I - proteger materiais nucleares e outros materiais radioativos contra roubo, furto ou qualquer outra forma de remoção não autorizada;
- II - contribuir para recuperar material nuclear ou outro material radioativo que porventura tenha sido removido de forma não autorizada ou esteja desaparecido;
- III - proteger a OT de outros atos não autorizados, em especial de sabotagem;
- IV - contribuir para minimizar ou mitigar os efeitos de atos de sabotagem sobre a OT;
- V - contribuir para manter a integridade física do pessoal diretamente envolvido na OT; e
- VI - contribuir para a proteção de pessoas, trabalhadores e meio ambiente contra os efeitos nocivos da radiação ionizante.

§ 5º Define-se sabotagem como todo ato deliberado cometido contra uma operação de transporte, que possa direta ou indiretamente colocar em risco a saúde ou a segurança dos trabalhadores diretamente

envolvidos na OT, do público ou do meio ambiente, por meio da exposição à radiação ou da liberação de substâncias radioativas.

§ 6º A proteção física de uma OT compreende, entre outros, os seguintes elementos: profissionais de segurança e escolta, delimitação de áreas de segurança durante paradas, barreiras físicas, equipamentos de detecção, alarme e certificação (confirmação) de acesso não autorizado, controle de acesso ao material, procedimentos de resposta e de acionamento de forças suplementares de resposta.”

E ainda, ressalta-se que:

“Art. 30. Durante o transporte de material nuclear enquadrado no Nível Elevado, além das medidas já estabelecidas no Nível Padrão, são exigidas medidas suplementares de proteção física, considerando-se a possibilidade de maiores atratividade e riscos, tais como:

I - estabelecimento de um centro de comando e controle, que proporcione o monitoramento remoto da UT durante toda a operação;

II - sistemas de alarme de intrusão nos compartimentos de carga;

III - sistemas de alarme de violação de volumes;

IV - em OT terrestre, contar com dispositivos que possibilitem o bloqueio remoto do(s) veículo(s) transportador(es) do material nuclear;

V - escolta armada, em número proporcional e adequado para resposta à ameaça postulada na declaração de ameaça representativa, na ABP ou na estimativa de ameaça; e

VI – em OT terrestre, contar com um veículo precursor à frente do comboio, atuando na detecção de possíveis ameaças.”

A normativa alinha a segurança radiológica e segurança física, nos moldes do NSS 9-G da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2020), de forma a representar um avanço significativo para a proteção da cadeia logística dos radiofármacos. Ainda assim, as normativas da Comissão Nacional de Energia Nuclear sobre o monitoramento dos materiais nucleares são esparsas e insuficientes para a segurança e proteção no transporte da origem ao destino.

### 3.4. INTERFACES COM O MARCO NORMATIVO INTERNACIONAL

#### 3.4.1. Sistema de Normas de Segurança da Agência Internacional de Energia Atômica

O Brasil integra a Agência Internacional de Energia Atômica desde a sua fundação em 1957, vinculando-se ao Acordo de Salvaguardas, que encontra-se em vigor desde o ano de 1968 (BRASIL, 1968) e também ao Protocolo Adicional ao Acordo de Salvaguardas (IAEA, 1997).

No plano das normas de segurança, destaca-se o Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos SSR-6 de 2018 (IAEA, 2018), o qual integra a referência central de transporte de materiais nucleares, sendo adotado pela norma CNEN-NN-5.01 (CNEN, 2013).

Por esta justificativa que, os radiofármacos em razão de sua meia-vida curta e atividade típica das doses unitárias, possuem um regime de exigências simplificado em comparação com materiais de maior atividade. Ainda assim, impõe-se a rigidez no monitoramento destes.

#### 3.4.2. Código de Conduta de Segurança e Proteção das Fontes Radioativas

Importante destacar também o Código de Conduta de Segurança e Proteção das Fontes Radioativas, da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2004), o qual determina que os Estados devem estabelecer e manter um sistema de controle de fontes radioativas, em relação ao licenciamento, fiscalização e rastreamento, desde a fabricação até o descarte final.

Muito embora o Código de Conduta de Segurança e Proteção das Fontes Radioativas não possua força de tratado internacional, ou seja, não tenha sido incorporado no ordenamento jurídico brasileiro, orienta as boas práticas regulatórias e incentiva a harmonia entre os controles internos. Sua aplicação reforça a necessidade de mecanismos que assegurem a rastreabilidade contínua para a cadeia logística dos radiofármacos, com o objetivo de localização dos materiais em trânsito, guardando alinhamento à proposta de desenvolvimento de uma solução tecnológica de monitoramento em tempo real.

Portanto, este conceito de rastreamento ao longo do ciclo de vida constitui o fundamento teórico-normativo para a implementação pretendida do protótipo do sistema de rastreamento de radiofármacos, ainda que apresente lacunas que o ordenamento nacional não consiga suprir.

#### 3.4.3. Lacunas Normativas e Desafios de Implementação

Uma análise do arcabouço normativo revela que, o Brasil dispõe de um grande sistema regulatório e razoavelmente alinhado com os padrões internacionais, mas ainda existem lacunas em relação ao rastreamento específico de radiofármacos.

Uma das lacunas apontadas relaciona-se à cobertura da cadeia interna das instalações, por exemplo a CNEN-NN-5.04 (CNEN, 2013) que aplica-se aos veículos transportadores, mas não disciplina o rastreamento do volume do radiofármaco no interior das instalações de origem e destino, ou seja, desde a produção na farmácia até o embarque no veículo, e posteriormente, do desembarque até a administração ao paciente. Esta lacuna torna-se especialmente relevante

nos casos de transbordo, em que o volume percorre trechos distintos com diferentes operadores, criando intervalos de tempo e espaço não cobertos pelo sistema de geolocalização.

Outra lacuna se refere à designação de competências da Comissão Nacional de Energia Nuclear e à Autoridade Nacional de Segurança Nuclear. Desta forma, as normas expedidas pela Comissão Nacional de Energia permanecem vigentes até a revisão ou substituição por novas da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear. E isto, como consequência pode gerar incertezas a respeito da interpretação ou atualização das normas de rastreamento. Desta forma, esta situação apresenta uma dificuldade adicional na atuação dos operadores privados, os quais necessitam de regras pacificadas, para investir em sistemas de rastreamento e a fiscalização dos órgãos de controle.

A lacuna final trata da integração dos dados de rastreamento. Recordando que a abertura do mercado dos radioisótopos ocorreu apenas após a Emenda Constitucional 118, mas não foi acompanhada de regulamentação no sentido de obrigar que os operadores privados integrassem os seus sistemas de rastreamento a uma plataforma unificada, com monitoramento acessível em tempo real à Comissão Nacional de Energia Nuclear ou à Autoridade Nacional de Segurança Nuclear. Portanto, a ausência dessa exigência demonstra além de uma fragmentação normativa, assim como da informação disponível sobre a localização e o estado dos radiofármacos que são transportados, de forma a dificultar uma resposta coordenada em situações de emergência.

## 4. FERRAMENTA TECNOLÓGICA DESENVOLVIDA

### 4.1. Visão Geral da Arquitetura do Sistema

O sistema de rastreamento desenvolvido em paralelo à presente dissertação compõe-se de dois subsistemas integrados, quais sejam: firmware embarcado no microcontrolador Arduino Uno R4 WiFi e a interface de monitoramento executada pelo navegador web. Essa arquitetura foi concebida para operar de forma autônoma, em cenários de transporte de radiofármacos, de maneira a prover o rastreamento geoespacial contínuo, a comunicação bidirecional sem fio e o registro histórico de coordenadas com carimbo de tempo.

O firmware gerencia a comunicação serial com o Módulo SIM808, o processamento e a formatação das mensagens de telemetria do GPS e a camada de conectividade, a qual alterna

entre o modo automático entre USB e Bluetooth Low Energy, conforme conexão e presença de um cliente conectado. A interface web recebe os dados via Web Serial API ou Web Bluetooth API, e, após estabelecida a geolocalização, plota as coordenadas em pontos no mapa interativo fornecido pela biblioteca Leaflet, e ainda oferece controles de gravação, exportação dos dados e visualização estatística das coordenadas coletadas. E também, existem controles para realizar testes de funcionamento do GPS via Serial Raw.

Por fim, ressalta-se que, a escolha por componentes de baixo custo, como Arduino Uno R4 WiFi e o Módulo SIM808, visa a criação de uma nova prova de conceito, economicamente acessível, atendendo aos requisitos funcionais de precisão geográfica, latência de comunicação e robustez da operação em campo.

## 4.2. COMPONENTES DE HARDWARE

### 4.2.1. Arduino Uno R4 WiFi

Arduino é uma plataforma popular de prototipagem eletrônica open-source de hardware e software, contendo placas com microcontroladores utilizada para desenvolvedores, educação e também utilizada profissionalmente.

O Arduino Uno R4 WiFi foi selecionado como protótipo para a ferramenta tecnológica devido à sua flexibilidade, em especial por constituir uma plataforma de desenvolvimento que combina dois processadores distintos, os quais operam em uma única placa: o microcontrolador embarcado Renesas RA4M1, baseado na arquitetura ARM Cortex-M4, e o coprocessador de conectividade ESP32-S3. Nesse sentido, a placa possui características específicas para projetos que exigem, simultaneamente, controle preciso de periféricos e comunicação sem fio de alta performance (ARDUINO, 2024).

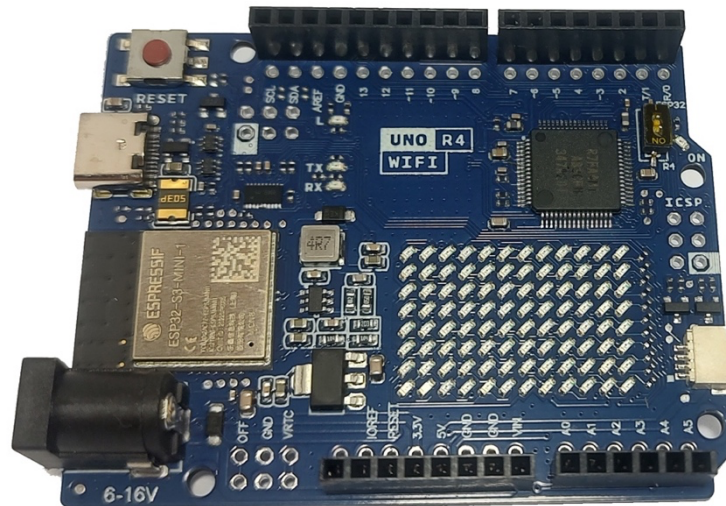
O Renesas RA4M1 opera a 48MHz, possui 256KB de memória flash e 32KB de RAM. Suas interfaces de comunicação incluem UART, I2C, SPI e CAN Bus. A placa também opera com a tensão de 5V, aceitando alimentação entre 6V e 24V, com corrente máxima de 8A por pino.

Por tal justificativa, o microcontrolador embarcado Renesas RA4M1 (ARM Cortex-M4) foi selecionado como plataforma central de desenvolvimento, não apenas por sua simplicidade,

que combina o poder de processamento em aplicações, além da conectividade integrada, mas também pela compatibilidade com o ecossistema Arduino.

O coprocessador ESP32-S3 gerencia a camada de conectividade sem fio, com suporte a WiFi 4 e Bluetooth 5.0, incluindo Bluetooth Low Energy, que transmite pequenos volumes de dados com um baixo consumo de energia. E ainda, a comunicação entre os dois processadores ocorre através do barramento SPI, de forma transparente ao programador.

Além disso, o Arduino possui uma Matriz de LEDs 12x8 na cor vermelha, que podem ser endereçados individualmente e controlados via biblioteca, mas que não podem ser utilizados na execução dos comandos.



*Figura 1 - Arduino Uno R4 WiFi - (Fonte: Autor, 2026)*

#### 4.2.2. Módulo SIM 808

O Módulo GPS SIM808, desenvolvido pela SIMCom Wireless Solutions, apresenta em uma única placa as funcionalidades integradas de comunicação celular GSM/GPRS e receptor GPS (SIMCOM, 2014), permitindo ainda que sejam criados dispositivos para enviar dados de localização via rede celular, recepção de comandos por SMS ou GPRS, mensagens SMS e ainda a realização de chamadas de voz. O módulo dispõe de um slot físico na parte inferior para Chip SIM no padrão micro. E, a presença desse slot constitui um dos principais atrativos do SIM808 em relação a módulos exclusivamente GPS: a possibilidade de transmitir dados de localização

diretamente a um servidor remoto via rede celular dispensando a necessidade de outra placa e a intermediação do computador ou smartphone.

Sua interface opera no padrão *Quad-Band*, cobrindo as frequências de 850, 900, 1800 e 1900MHz, com classe multislots 10/12, *downlink* de até 85,6kbps e *uplink* de até 42,8kbps. O receptor GPS apresenta 22 canais de rastreamento e 66 de aquisição simultânea, com precisão nominal de 2,5 metros no modo estático e TTFF de aproximadamente 30 segundo a céu aberto, podendo fornecer dados de localização, velocidade, direção e tempo.

Importante mencionar que, mesmo com a progressiva descontinuação das redes 2G, a ampla disponibilidade da infraestrutura GSM/GPRS no território nacional aliada ao baixo custo dos módulos compatíveis tornam esta tecnologia adequada para a prova de conceito proposta. A arquitetura modular centrada em comandos AT facilita eventual migração para módulos 4G ou 5G sem alterações significativas no firmware, pois o microcontrolador se comunica através de comando AT pela interface serial UART, simplificando o desenvolvimento, além de garantir a sustentabilidade a longo prazo.

Portanto, o Módulo SIM808 (Fikry *et al.*, 2025) possui as funcionalidades críticas de geolocalização e comunicação celular, indispensáveis para o rastreamento em ambientes sem cobertura Wi-Fi, além da comunicação com suporte a redes GSM/GPRS (2G) para transmissão de dados e SMS, contando com capacidade de rastreamento via satélite através do GPS, que fornece as coordenadas geográficas em tempo real com precisão de 2,5 metros.

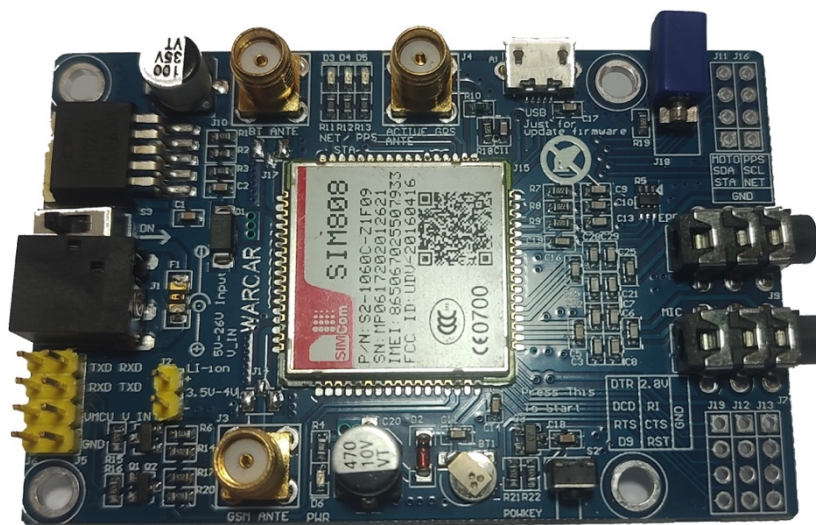


Figura 2 - Módulo SIM808 - (Fonte: Autor, 2026)

Desta forma, o módulo possui ampla aplicação em projetos IoT, rastreamento, sistemas de segurança, comunicação de emergência, telemetria e dispositivos móveis que necessitam de conectividade celular e geolocalização.

A integração entre a plataforma Arduino Uno R4 WiFi e o Módulo SIM808 demonstra a possibilidade-necessidade da solução tecnológica, além da viabilidade e relevância estratégica para o enfrentamento das vulnerabilidades na cadeia logística de materiais nucleares.

Por fim, a arquitetura desenvolvida a partir do Arduino Uno R4 WiFi e Módulo SIM808, combina capacidades de processamento local, conectividade versátil e geolocalização precisa, além de constituir uma camada adicional de segurança física e cibernética para a eficiência no monitoramento do transporte de radiofármacos, ao consolidar um novo paradigma de segurança nuclear adaptável e economicamente acessível, para a proteção de materiais nucleares sensíveis contra usos indevidos ou ações maliciosas.

#### 4.2.3. Pinagem e Conexões

A integração física entre o Arduino Uno R4 WiFi e o Módulo SIM808 ocorre através da interface hardware Serial1, nos pinos 0 (RX1) e 1 (TX1), com a taxa de BAUD configurada para 9600bps.

Mapeamento de Pinos entre o Arduino e o SIM808			
Pino Arduino	Sinal	Pino SIM8080	Descrição
0 (RX1)	RX → TX	TX	Recepção de Dados do SIM808
1 (TX1)	TX → RX	RX	Envio de Comandos ao SIM808
GND	GND	GND	Referência de Tensão Comum
5V / Ext	VCC	VCC	Alimentação do Módulo

Quadro 1: Mapeamento da Conexão Arduino-Módulo SIM808

Conforme orientação do fabricante no *datasheet*, o Módulo SIM808 pode exigir picos de corrente superiores a 2A durante o estabelecimento da conexão com a rede celular. Por isso, existe a recomendação para utilização de uma fonte de alimentação externa com a capacidade adequada, com capacitor de desacoplamento próximo ao pino VCC para evitar instabilidades de tensão.

### 4.3. AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO

#### 4.3.1. Arduino IDE 2.3.8

O desenvolvimento do firmware foi realizado inicialmente no Arduino IDE, versão 2.3.7 (ARDUINO, 2025), atualizada em seguida para a 2.3.8 (ARDUINO, 2026). O Arduino IDE foi construído sobre o *Framework Theia IDE* e o *Runtime Electron*. Destacam-se as operações de *backend*: compilação, upload e gerenciamento de portas seriais, são delegadas a uma instância do arduino-cli em modo *daemon*, o que permite uma maior responsividade à interface e reduz os tempos de compilação em relação às versões anteriores do IDE. O Arduino IDE 2.3.8 possui a licença GNU AGPLv.3 de código aberto. As distribuições executáveis apresentam código de terceiros sob licenças compatíveis, como GPLv2, MIT, BSD-3.

O ambiente incorpora o diagnóstico de erros em tempo de compilação com as indicações precisas sobre a linha problemática e sugestões contextualizadas de correção, mostrando-se um recurso especialmente útil durante as iterações de desenvolvimento do firmware, apresentando a depuração de ponteiros de buffer e da lógica de parsing dos comandos AT do Módulo SIM808 o que exigiu ciclos frequentes de edição e recompilação. Além disso, o ambiente possui uma resposta mais rápida que as versões anteriores, apresentando melhor responsividade.

O framework utiliza uma abstração da linguagem de programação C++ como código base no ambiente, com a utilização da Biblioteca Arduino, a partir de um conjunto de funções e bibliotecas próprias que facilitam o acesso ao hardware, de modo que o núcleo da linguagem possui funções de alto nível implementadas em C++.

#### 4.3.2. Bibliotecas Utilizadas

Para o desenvolvimento do firmware do protótipo foram utilizadas as bibliotecas oficiais no ecossistema do Arduino:

- ArduinoBLE - Versão 2.0.0

A Biblioteca ArduinoBLE provê suporte completo ao Protocolo Bluetooth Low Energy para as placas que incorporam o coprocessador ESP32-S3. No projeto, a Biblioteca foi utilizada para a implementação do serviço NUS (Nordic UART Service), utilizando a emulação de um canal bidirecional serial sobre Bluetooth Low Energy.

E ainda, o serviço NUS conta com reconhecimento nativo pela Web Bluetooth API dos navegadores modernos, dispensando o desenvolvimento de um perfil GATT proprietário. Além disso, o tamanho máximo de cada pacote foi configurado para 128 bytes, com fragmentação automática em segmentos de 20 bytes e com intervalos de 12 ms entre eles. E ainda, o serviço NUS é identificado pelo UUID 6E400001-B5A3-F393-E0A9-E50E24DCCA9E.

#### - WiFiS3

A Biblioteca WiFiS3, encontra-se integrada ao núcleo do Arduino Uno R4, e realiza a intermediação da comunicação entre o RA4M1 e o ESP32-S3 via barramento SPI. No contexto do firmware desenvolvido, não foi utilizada para gerenciar conexões WiFi, mas sua presença como dependência do núcleo revela-se indispensável para o funcionamento da pilha Bluetooth Low Energy gerenciada pelo ArduinoBLE.

Adiante, a Biblioteca WiFiS3.h foi projetada especificamente para placas Arduino que utilizam o chip ESP32-S3 como coprocessador de conectividade sem fio, como o Arduino Uno R4 WiFi. Na placa, o microcontrolador principal (Renesas RA4M1) não opera diretamente com a comunicação WiFi, sendo a função delegada ao ESP32-S3. A Biblioteca WiFiS3 fornece uma interface simples e familiar para que os programas escritos para a parte principal (RA4M1) da placa possam acessar todas as funcionalidades de rede do ESP32-S3.

Nesse sentido, a Biblioteca WiFiS3.h mostra-se como a porta de entrada para projetos IoT utilizando o Arduino Uno R4 WiFi que oferece uma maneira robusta e simples de adicionar conectividade sem fio aos projetos.

#### 4.4. CONCEITOS TECNOLÓGICOS FUNDAMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo apresentar os conceitos tecnológicos fundamentais que permeiam o protótipo desenvolvido. Para pessoas leigas em eletrônica ou desenvolvimento de software, alguns termos como barramento SPI, comandos AT ou WebSerial API podem soar herméticos, dificultando a compreensão do funcionamento da ferramenta.

Para melhor compreensão das definições, as seções a seguir apresentam os conceitos de forma progressiva, utilizando analogias concretas e avançando para as especificidades técnicas relevantes ao contexto do projeto.

#### 4.4.1. Comandos AT

Os comandos AT possuem uma denominação derivada da palavra inglesa *attention*, e, constituem um conjunto padronizado de instruções textuais para realizar o controle dos módulos de comunicação eletrônica, especialmente modems e módulos celulares.

Criados na década de 1980 pela empresa Hayes Microcomputer Products para controlar os modems de discagem, tornaram-se ao longo do tempo padrão de fato adotado pela indústria de telecomunicações, sendo utilizados ainda hoje em módulos GSM 4G, WiFi, GPS e Bluetooth de diversos fabricantes.

O funcionamento pode ser compreendido através da analogia de uma conversa por texto, onde o microcontrolador dialoga com o módulo a partir do envio de frases específicas por meio dos comandos e aguarda uma resposta de confirmação ou os dados solicitados.

Cada comando inicia-se obrigatoriamente com as letras AT, seguidas de uma instrução específica. O envio do texto AT seguido de uma quebra de linha funciona como um “alô”. Se o módulo estiver operacional e a comunicação configurada corretamente, ele responderá com OK. Comandos mais elaborados como AT+CGPSPWR=1 instruem o módulo a executar ações específicas como ligar o receptor GPS interno.

No contexto do projeto, os comandos AT representam a forma pela qual o Arduino Uno R4 WiFi se comunica com o Módulo SIM808. E, a ausência de uma biblioteca de alto nível, devido à incompatibilidade mencionada anteriormente para realizar esta intermediação, tornou esse diálogo explícito e diretamente visível no código de baixo nível do firmware, exigindo o domínio do vocabulário e sintaxe do protocolo pelo desenvolvedor.

#### 4.4.2. Barramento SPI

O barramento SPI (Serial Peripheral Interface) é um protocolo de comunicação digital de curto alcance, desenvolvido pela Motorola na década de 1980 para a troca de dados entre componentes eletrônicos que se encontram no mesmo circuito. O termo barramento remete a uma metáfora do transporte urbano, fazendo uma analogia com o transporte de passageiros pelo ônibus entre pontos distintos através de uma rota. Um barramento eletrônico transporta sinais

digitais entre múltiplos componentes, permitindo que um dispositivo mestre se comunique e controle periféricos de forma organizada.

O SPI opera com quatro sinais principais: MOSI (dados do mestre para o periférico), MISO (dados do periférico para o mestre), SCLK (clock de sincronização) e CS (chip select, que indica o endereçamento do periférico). À diferença do I2C, o SPI permite a transmissão e recepção simultânea de dados (full-duplex), podendo alcançar velocidades que frequentemente superam dezenas de megabits por segundo, mostrando-se mais adequado para as aplicações que demandam um alta taxa de transferência entre componentes próximos.

No Arduino Uno R4 WiFi, o barramento SPI desempenha um papel estrutural essencial, sendo por meio dele que o RA4M1 se comunica com o coprocessador ESP32-S3, responsável pelas funcionalidades WiFi e Bluetooth. E, toda vez que o firmware acessa as funções de rede sem fio, essas operações passam, de forma invisível ao programador, pela interface SPI interna da placa.

#### 4.4.3. Bibliotecas de Software

No contexto do desenvolvimento de software, uma biblioteca é um conjunto de código pré-escrito, testado e organizado que pode ser incorporado a um programa para realizar tarefas específicas sem que o desenvolvedor precise implementá-las do zero. A analogia com biblioteca de livros mostra-se pertinente, pois, como exemplo, um pesquisador consulta obras existentes ao invés de redigir todo o conhecimento necessário, no mesmo sentido, um programador recorre a bibliotecas para aproveitar soluções já desenvolvidas.

No ecossistema Arduino, as bibliotecas traduzem operações complexas de hardware, como a configuração dos registradores internos de um microcontrolador para estabelecer uma conexão Bluetooth em chamadas de função simples e compreensíveis. Ao invés de escrever dezenas de linhas de código de baixo nível para inicializar o protocolo Bluetooth Low Energy, o desenvolvedor inclui a Biblioteca ArduinoBLE para tratar dos detalhes técnicos internamente e chama a função `BLE.begin()`. Consoante as dificuldades descritas anteriormente, a ausência de bibliotecas compatíveis para a integração do SIM808 com o Arduino Uno R4 WiFi causou um obstáculo concreto e relevante ao desenvolvimento do projeto, que foi contornado a partir da utilização de comandos AT ao invés das funções.

#### 4.4.4. Web Serial API

A Web Serial API é uma interface de programação disponibilizada pelos navegadores web modernos que permite a comunicação direta de páginas e aplicações web com dispositivos conectados via porta serial USB ao computador do usuário. Antes de sua introdução, esse tipo de comunicação ocorria exclusivamente por meio de aplicações nativas instaladas no sistema operacional. A Web Serial API eliminou essa barreira, possibilitando o desenvolvimento das interfaces de controle e monitoramento de hardware diretamente no navegador, sem a instalação de qualquer software adicional.

O funcionamento segue um modelo de permissão centrado no usuário, em que a página web solicita acesso à uma porta serial, e o navegador exibe uma janela de seleção para o usuário escolher explicitamente qual dispositivo deseja conectar. Este mecanismo impede que diversos sites mal-intencionados acessem dispositivos conectados sem o conhecimento do usuário. No sistema desenvolvido para a presente dissertação, a Web Serial API é o mecanismo pelo qual a interface web recebe os dados de telemetria do GPS transmitidos pelo Arduino através do cabo USB, bastando um navegador moderno compatível com a API, sem instalação de drivers ou aplicativos adicionais.

#### 4.4.5. Web Bluetooth API

A Web Bluetooth API segue a mesma filosofia da Web Serial API, mas voltada para a comunicação sem fio via Bluetooth Low Energy. Através da interface, aplicações web podem descobrir, conectar-se e trocar dados com dispositivos Bluetooth próximos, diretamente pelo navegador, sem aplicativos nativos. Assim como na Web Serial API, o acesso exige interação explícita do usuário, a página apresenta uma lista de dispositivos disponíveis e a conexão só é estabelecida após a seleção e confirmação pelo usuário.

O Bluetooth Low Energy foi especificamente projetado para dispositivos que precisam transmitir pequenas quantidades de dados utilizando o menor consumo de energia possível, ao contrário do tradicional Bluetooth, sendo otimizado para streaming de áudio e transferências de arquivos. Essa característica torna o BLE especialmente adequado para sistemas embarcados de monitoramento como o do protótipo desenvolvido na presente dissertação.

A integração da Web Bluetooth API inaugura um cenário operacional complementar ao da Serial Web API, pois, ao invés de conectar o computador ao Arduino via cabo, um operador pode monitorar a localização do dispositivo a partir de um smartphone ou tablet, desde que o navegador suporte a API e o Arduino esteja dentro do alcance do sinal Bluetooth.

#### 4.4.6. UART e Comunicação Serial

O UART significa *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* e se consolidou como um dos protocolos de comunicação serial mais antigos e difundidos na eletrônica, utilizado para transmitir dados bit a bit de forma sequencial. Pondera-se que o termo assíncrono indica que os dois dispositivos que se comunicam não precisam compartilhar um sinal de relógio comum, pois ambos são configurados previamente com a mesma velocidade de transferência, o *baud rate*, em bits por segundo, número de bits de dados, paridade e bits de parada. O enquadramento de cada palavra transmitida é realizado por um bit de start, o qual demonstra uma transição do nível lógico alto para baixo, que dispara o temporizador interno do receptor e por um ou mais bits de stop, que restauram a linha ao estado de ocioso. A partir da detecção da borda de descida do bit de start, o receptor determina os instantes de amostragem de cada bit subsequente por divisão do período de bit, realizando a leitura em seu ponto central para maximizar a imunidade a ruídos e variações de temporização.

#### 4.4.7. GPS e Posicionamento via Satélite

O *Global Positioning System* (GPS) é um sistema de navegação via satélite operado pelo governo norte-americano, com a capacidade de determinar a posição geográfica de um receptor em qualquer ponto do planeta com uma precisão de poucos metros. Funciona com base em uma constelação de satélites que transmitem continuamente sinais de rádio que contém informações de tempo e posição orbital. Um receptor GPS, ao captar os sinais de pelo menos quatro satélites simultaneamente, calcula sua própria posição por triangulação, determinando as coordenadas, latitude, longitude e altitude, a partir das diferenças de tempo de chegada dos sinais.

Portanto, os módulos GPS transmitem os dados de posicionamento ao microcontrolador em formatos padronizados. O Protocolo NMEA 0183 define sentenças de texto estruturadas, como GGA (Posição, Altitude e Número de Satélites) e RMC (Posição, Velocidade e Curso), organizadas em campos separadas por vírgulas. O Módulo SIM808, por sua vez, disponibiliza

os dados de localização por meio do comando AT+CGPSINF em um formato proprietário com estrutura similar ao NMEA, o que torna a interpretação das informações uma operação análoga à das sentenças NMEA padrão.

#### 4.4.8. Bluetooth Low Energy e GATT

O Bluetooth Low Energy (BLE) estrutura a comunicação entre dispositivos por meio de um modelo hierárquico denominada GATT (Genetic Attribute Profile). O dispositivo provedor de dados, denominado periférico, expõe serviços, cada um dos quais agrupam as características que representam dados específicos ou funcionalidades para leitura, escrita ou notificação. Por analogia, um serviço pode ser comparado a um departamento de uma empresa, enquanto cada característica corresponde a um recurso ou função bem definida, responsável pelo recebimento de requisições ou de informações.

No protótipo desenvolvido, o Arduino opera como periférico BLE, expondo o Nordic UART Service (NUS), que emula o canal de comunicação serial bidirecional sobre BLE por meio de duas características, sendo uma para receber comandos e outra para o envio dos dados de telemetria. Cada serviço e característica recebe um código numérico de identificação, que assegura a distinção inequívoca de cada elemento mesmo com múltiplos dispositivos Bluetooth, sendo chamado de UUID (Universally Unique Identifier). A adoção do perfil NUS, amplamente reconhecido pela Web Bluetooth API, simplificou a integração entre o firmware do Arduino e a interface web.

#### 4.4.9. Protocolos de Cibersegurança da Ferramenta Tecnológica

Para garantia a confidencialidade e integridade dos dados de rastreamento do protótipo desenvolvido, foram desenvolvidas medidas de segurança centradas no controle de acesso ao dispositivo e na utilização de canais de comunicação nativamente protegidos. A interface web implementa as APIs Web Serial e Web Bluetooth, que exigem interação explícita do usuário para concessão de permissões de acesso ao hardware, prevenindo conexões não autorizadas.

A transmissão via Bluetooth Low Energy utiliza emparelhamento seguro e criptografia inerente ao protocolo, enquanto a comunicação via USB encontra-se restrita ao ambiente físico do computador conectado.

Por fim, não houve a implementação de camadas adicionais de criptografia ou hashing de integridade devido às limitações do controlador e ao escopo da prova de conceito. Entretanto, a arquitetura atual oferece um nível básico de segurança, como a autenticação do usuário, além da contenção do acesso físico, de forma a mitigar os riscos mais imediatos para a interceptação ou manipulação durante os testes controlados. Portanto, a criptografia ponta a ponta e o sistema de chaves assimétricas permanecem como melhorias futuras identificadas.

## 4.5. DESENVOLVIMENTO DO FIRMWARE

### 4.5.1. Estrutura Geral e Fluxo de Inicialização

O desenvolvimento do firmware utiliza uma arquitetura orientada a eventos, a partir da qual o loop principal realiza a varredura cíclica das fontes de entrada, em seguida da porta serial USB e a interface BLE, despachando comandos para as funções de controle do GPS, conforme os dados recebidos. Essa abordagem dispensa o uso de um RTOS e mantém o código compacto e portátil.

A rotina `setup()` executa a abertura da porta serial USB a 9600bps com espera de até 3 segundos, depois realiza a detecção do boot, a inicialização condicional do subsistema BLE, a inicialização da `Serial1` para comunicação com o Módulo SIM808, onde verifica a resposta após cinco tentativas de envio do comando `AT`, com intervalo de 1,2 segundos entre elas. Caso não haja resposta, o firmware opera em modo degradado, mantendo a comunicação USB/BLE funcional e reporta erro, sem interromper a execução.

### 4.5.2. Lógica de Alternância USB / Bluetooth

Um dos aspectos mais relevantes do firmware reside na lógica de exclusão mútua entre os canais de comunicação USB e BLE, sendo possível apenas a utilização de um deles para fins de segurança.

O mecanismo baseia-se em um *watchdog* temporal, onde sempre que um dado chega através da porta serial USB, o timestamp da última execução (`lastUSBRx`) recebe atualização. E, transcorridos 4 segundos sem qualquer transmissão de dados pelo USB, o firmware reativa automaticamente o subsistema BLE. Inversamente, quando o primeiro dado USB chega após inatividade, a função `stopBLE()` interrompe o anúncio BLE, e libera os recursos do ESP32-S3.

Essa abordagem elimina a necessidade de intervenção manual do operador para alternar entre os modos de comunicação, tornando o dispositivo plug-and-play, tanto no cenário do uso com computador, quanto no de campo, com possibilidade de monitoramento via smartphone ou tablet com suporte a Web Bluetooth.

O tempo de 4 segundos escolhido baseou-se na média de transmissão de uma sentença NMEA completa pelo GPS, na ordem de 200 a 400 milissegundos, acrescida de uma margem de segurança para evitar alternâncias indesejadas no envio dos dados e comandos conflitantes.

#### 4.5.3. Controle do GPS via Comandos AT

O controle do GPS do Módulo SIM808 ocorre por meio dos comandos AT, transmitidos pela interface Serial1. O firmware implementado utiliza as funções `gpsOn()`, `gpsOff()`, `gpsScan` e `gpsStatus()`, todas acessíveis por um sistema de dispatch de comandos de um único caractere.

A função `gpsScan()` envia o comando `AT+CGPSINF=0`, por meio da interface Serial1 e solicita ao módulo que retorne uma linha com os dados da última posição fixada. A resposta, por ser recebida como uma string com campos separados por vírgulas, tem seu parsing através do firmware, que percorre os caracteres e identifica os índices, por exemplo: latitude na posição 1, longitude na posição 2, altitude na posição 3 e velocidade em nós na posição 7.

Nesse sentido, as coordenadas são obtidas no formato DDDMM.MMMM, convertidas para graus decimais com sinal negativo para o hemisfério sul.

#### 4.5.4. Comandos do Firmware

Comando	Função	Ação
1	<code>gpsOn()</code>	Liga o Receptor GPS ( <code>AT+CGPSPWR=1</code> )
2	<code>gpsOff()</code>	Desliga o Receptor GPS ( <code>AT+CGPSPWR=0</code> )
3	<code>gpsScan()</code>	Solicita e transmite as coordenadas atuais ( <code>AT+CGPSINF=0</code> )
9	<code>gpsStatus()</code>	Exibe o status do SIM808, GPS, USB e BLE
AT	Passthrough	Encaminha comando AT ao SIM808

Quadro 2: Comandos Utilizados no Firmware

## 4.6. INTERFACE DE MONITORAMENTO WEB

A interface de monitoramento foi desenvolvida como uma Single Page Application em HTML5, CSS3 e Javascript, sem a dependência de frameworks ou bundlers, o que assegura a portabilidade total do sistema e permite a execução local. A visualização cartográfica conta com suporte da biblioteca Leaflet.js, integrada com tiles do OpenStreetMap. As exportações dos logs são suportadas nos formatos TXT, através de campos separados por tabulação, XLSL, por meio da Biblioteca SheetJS e PDF, por meio da janela de impressão HTML, com layout otimizado para A4.

A interface do sistema utiliza a Web Serial API para conexões USB e a Web Bluetooth API para conexões BLE, em que ambas solicitam a interação do usuário para as permissões de acesso ao dispositivo. E ainda, a implementação da Web Serial API aplica filtros de VendorID para restringir a lista de portas a dispositivos compatíveis, como: Arduino (VID 0x2341), WCH (0x1A86), FTDI (VID 0x0403), Silicon Labs (VID 0x10C4) e Raspberry Pi Foundation (VID 0x2E8A). Tal restrição visa obter uma lista de dispositivos que atendam às especificações de compatibilidade com a plataforma de desenvolvimento adotada, evitando que portas seriais de dispositivos conectados ao computador, como impressoras, adaptadores ou equipamentos sejam exibidas ao usuário durante o processo de seleção. Isso reduz o risco de conexão acidental a um dispositivo incorreto e também simplifica a experiência de uso, considerando a multiplicidade de periféricos conectados simultaneamente presentes nos dias atuais.

Para fins de segurança, os dados da sessão são armazenados exclusivamente na memória do navegador, sem persistência em armazenamento local ou envio a servidores externos.

## 4.7. CONSIDERAÇÕES E DIFICULDADES INICIAIS DE DESENVOLVIMENTO

### 4.7.1. Proposta Original de Conectividade

Desde a concepção inicial do projeto, a ideia central seria utilizar todas as capacidades integradas ao Módulo SIM808, não somente o receptor GPS, mas também a interface celular GSM/GPRS.

O protótipo utilizaria um chip SIM da operadora de telefonia, com plano de dados ativo, para que o Arduino pudesse, através de comandos AT estabelecer uma conexão GPRS e abrir

um socket TCP/IP para o envio das coordenadas remotamente, sem depender da infraestrutura WiFi local ou de dispositivo Bluetooth.

E, em situações de emergência, por violação da integridade ou desvio de rotas ou falha de dados, o módulo dispararia um alerta por SMS para números pré-cadastrados informando a última posição conhecida. Esse mecanismo guardaria relevância no contexto do transporte de radiofármacos, onde a continuidade do monitoramento possui caráter de criticidade, mesmo em trechos com cobertura de dados precária.

Entretanto, devido a questões com o prazo para a conclusão e a localização do ambiente de desenvolvimento em mata densa, com dificuldade de sinal de telefonia celular, o foco central do projeto foi centrado no rastreamento, obtenção das coordenadas via GPS e a exportação para o log, com a visualização do trajeto. Esse modelo, aproxima-se dos rastreadores veiculares, de maneira que o dispositivo embarcado se comunica de forma autônoma com um servidor central.

#### 4.7.2. Incompatibilidade da Biblioteca e Primeiros Obstáculos

O primeiro contato com as limitações reais do hardware ocorreu na tentativa de utilizar as Bibliotecas Arduino consolidadas para gerenciar a comunicação com o Módulo SIM808, de forma mais abstrata.

Existem no ecossistema Arduino bibliotecas como TTROBOTIX SIM808 e derivações que encapsulam os comandos AT em métodos de alto nível, além de simplificar algumas tarefas como a inicialização do GPS, abertura de conexões GPRS e o envio de mensagens SMS. Ainda assim, a expectativa inicial seria o desenvolvimento do firmware do protótipo, aproveitando ao máximo seus recursos.

Desta forma, ao tentar compilar as bibliotecas no ambiente para o Arduino Uno R4 WiFi o IDE retornou diversos erros de compilação. A causa identificada foi a incompatibilidade entre as bibliotecas e a arquitetura ARM Cortex M4 do Renesas RA4M1. A maioria das bibliotecas disponíveis para comunicação com o Módulo SIM808 foi originalmente escrita para as gerações anteriores do Arduino, com a Uno baseado no ATmega328P e Mega, ambos com a arquitetura AVR de 8 bits. Desta forma, as estruturas de dados, manipulação de ponteiros e chamadas de

funções de hardware de baixo nível presentes nessas bibliotecas revelaram-se incompatíveis com o compilador ARM-GCC utilizado pelo núcleo do Arduino Uno R4.

Após meses, as tentativas para contornar os erros retornados das bibliotecas a partir da adaptação manual mostraram-se demasiadamente custosas, uma vez que as inconsistências não se limitavam a linhas isoladas, mas sim envolviam dependências de tipos de dados de tamanho definido pela arquitetura, que utilizavam referências a registradores de hardware inexistentes no RA4M1 e macros de temporização calibradas para o clock de 16MHz do ATmega328P, sem compatibilidade com os 48MHz do processador Renesas. Cada correção introduzida tendia a expor um novo conjunto de erros em outros pontos da biblioteca, caracterizando um trabalho extenso de portabilidade que escapava do escopo previsto para o projeto.

A situação foi agravada especialmente pelo fato de que o Arduino Uno R4 WiFi, além de ser uma plataforma lançada em 2023, conta com comunidade de usuários em maturação, e também, possui o acervo de soluções documentadas consideravelmente menor que o disponível para plataformas mais maduras.

Ademais, consultas em comunidades técnicas como o Arduino Forum e Stack Overflow confirmaram que outros desenvolvedores enfrentavam problemas similares, sem que houvesse quaisquer correções disponibilizadas pelos mantenedores originais até o momento. Em razão deste cenário, optou-se pela implementação direta dos comandos AT para o controle do Módulo SIM808 ao invés da adaptação das bibliotecas. Tal decisão, ocasionou um maior controle sobre o fluxo de comunicação Arduino-SIM808, e eliminou a dependência do código incompatível com a arquitetura ARM.

#### 4.7.3. Decisão de Implementação da Wi-Fi

A decisão de implementação do WiFi foi tomada diante da indefinição quanto ao prazo para resolução das incompatibilidades das Bibliotecas do Arduino e inviabilidade para portar o sistema dentro do cronograma do projeto. Por tais razões, optou-se por redirecionar a estratégia da conectividade, com a preocupação na aquisição de coordenadas e registro de trajeto, como o principal objetivo. Portanto, ao invés de insistir na comunicação da rede celular via slot SIM do Módulo SIM808, optou-se por redirecionar a escolha ao recurso do WiFi nativo do Arduino Uno R4 WiFi, disponibilizado pelo coprocessador ESP32-S3.

A decisão apoiou-se em razões técnicas sólidas, porque a Biblioteca WiFiS3, distribuída como parte do núcleo oficial da plataforma Arduino Uno R4 foi desenvolvida especificamente para o hardware, garantindo compatibilidade integral com o compilador ARM-GCC, além de eliminar os riscos que comprometeram a abordagem anterior. A documentação disponível e o suporte da comunidade para as funcionalidades WiFi no Arduino Uno R4 WiFi possuem maior abrangência que os disponíveis para a integração celular via SIM808 na plataforma.

Do ponto de vista do caso de uso, o WiFi mostrou-se tecnicamente suficiente para fins de prova do conceito. Ainda assim, pontua-se que, em ambientes hospitalares e laboratoriais, onde radiofármacos são manuseados e despachados, a infraestrutura de rede WiFi costuma estar presente, inclusive destaca-se uma possível interferência na conectividade de dados celulares devido à operação de equipamentos, fazendo com que o WiFi mostre-se uma escolha razoável e adequada ao contexto indoor. A adoção do WiFi como tecnologia de conectividade principal permitiu avançar no desenvolvimento sem esbarrar no obstáculo de compatibilidade, além de preservar a possibilidade de migração futura para a comunicação celular com a disponibilização das bibliotecas adequadas, modificação da biblioteca incompatível ou até mesmo a substituição do Módulo SIM808.

Registre-se que, a decisão não implicou no abandono do Módulo SIM808, somente pela utilização exclusiva do GPS, demonstrando operacionalidade plena, independente da interface de rede móvel. O slot SIM ficou desocupado durante toda a fase de desenvolvimentos e testes, servindo como recurso latente para a etapa de evolução da plataforma.

#### 4.7.4. Adaptação do Envio de Comandos AT

A necessidade de adaptação ocorreu devido à incompatibilidade das bibliotecas de alto nível, como consequência direta e significativa sobre a arquitetura do firmware, demonstrando a inviabilidade de prosseguir no caminho das abstrações para o gerenciamento da comunicação com o Módulo SIM808 e impondo ao desenvolvimento do projeto a adoção de uma abordagem de baixo nível, baseada no envio direto de comandos AT através da interface serial.

Essa mudança inesperada de paradigma, gerou a percepção inicial de retrocesso acerca do escopo original, mas revelou-se tecnicamente útil, pois ao prescindir da camada de abstração oferecida pelas bibliotecas, o firmware resultante expôs com total transparência os mecanismos

internos de comunicação com o módulo, por exemplo, os tempos de resposta foram explícitos, a estrutura das strings retornadas, além dos requisitos de alimentação e as particularidades do Protocolo AT.

O primeiro desafio na adaptação foi a gestão do tempo de resposta dos comandos, pois, ao contrário de uma chamada de função direta, que retorna um valor imediatamente, o envio de um comando AT via `Serial1.println()` desencadeia um processo assíncrono, fazendo com que o módulo o processe internamente e, após um intervalo variável, com duração de milissegundos ou segundos, que se espera uma resposta pela porta serial. Isso exigiu a programação de rotinas manuais de espera com timeout para que evitassem o bloqueio indefinido do loop principal.

Um segundo desafio foi a linha de comandos AT. Destaque-se que os comandos devem ser precedidos dos caracteres CR e LF, diferentemente da função `Serial1.println()` do Arduino, que insere automaticamente a sequência, o que simplificou a maioria dos envios. Em situações específicas, a exemplo do encadeamento rápido de múltiplos comandos, foi necessário recorrer a `Serial1.write()` ao invés de `println()`, sendo o controle realizado de forma manual.

O parsing das respostas constituiu a tarefa mais trabalhosa desta fase, destacando ainda que as respostas recebidas do Módulo SIM808 ao comando `AT+CGPSINF=0` retornaram como strings de texto misturadas com caracteres de controle, e, eventualmente, com eco dos próprios comandos enviados. Houve a necessidade de implementar uma lógica de acúmulo de bytes em buffer, detecção de fim de linha, filtragem de eco e extração dos campos relevantes por busca de delimitadores de vírgula no firmware. Cada campo extraído precisou ainda de validação do intervalo antes de ser utilizado nos cálculos de conversão das coordenadas.

Outra dificuldade ocorreu nos testes após o envio do comando `AT+CGPSPWR=1`, onde em determinadas condições de alimentação, em especial quando o módulo recebia alimentação direta pelo pino de 5V do Arduino, sem fonte externa, o comando era aceito com resposta OK, mas o receptor GPS não chegava a ser efetivamente inicializado, em razão da insuficiência de energia. Somente após um intervalo de espera de aproximadamente dois segundos e um novo envio de `AT+CGPSSTATUS?` que era possível a confirmação de que o receptor havia iniciado a aquisição de satélites. Esse comportamento não documentado explicitamente no datasheet do Módulo SIM808 foi identificado após sequências de tentativas e erros, exigindo alguns ajustes na sequência de inicialização do firmware.

A experiência evidenciou, ainda, um desafio recorrente no desenvolvimento embarcado, considerando as plataformas de lançamento recente e o descompasso entre a disponibilidade do hardware e a maturidade do ecossistema do software suportado.

Desta forma, este avanço técnico, no momento do desenvolvimento, trouxe uma lacuna de compatibilidade manifestada precisamente nos pontos onde o projeto dependia de soluções consolidadas pela comunidade.

Ainda assim, recorda-se que o Arduino Uno R4 WiFi representa um salto geracional em relação às plataformas anteriores, que a maioria das bibliotecas guardam compatibilidade, pois foram escritas para suportá-las. Até o momento não houve uma disponibilização de bibliotecas compatíveis com a plataforma.

A superação desse obstáculo pela via da implementação direta, resultou em um firmware mais robusto, auditável e independente de dependências externas de manutenção incerta ou da comunidade, características especialmente relevantes para uma aplicação inserida no contexto regulatório exigente do transporte de materiais radioativos. E também, possibilita uma maior transparência ao desenvolvedor, sem dependência de abstrações.

#### 4.8. TESTES PRELIMINARES

A validação do firmware foi conduzida em duas fases. Na primeira, o sistema foi testado indoor com o Módulo SIM808 conectado em bancada, com a antena GPS próxima a uma janela. Por se tratar de ambiente localizado em um vale, composto de mata densa e cobertura térmica, além de visibilidade limitada do céu, houve dificuldade na obtenção das coordenadas pelo GPS.

A solução encontrada foi o reposicionamento da antena para a parte externa do ambiente com visada direta para o céu, onde após novo teste as coordenadas foram obtidas com sucesso.

Outro desafio foi a diferença entre o formato DDDMM.MMMM retornado pelo Módulo SIM808 e o formato de graus decimais esperado pela interface web, resultando em coordenadas plotadas no hemisfério norte, o que foi corrigido a partir da implementação explícita da negação de sinal. E ainda, o índice incorreto do campo de velocidade, na posição 4 ao invés da 7, causava valores absurdos na ordem de  $10^{13}$  Km/h, sendo corrigido após uma análise da resposta bruta

do módulo, a partir da verificação do retorno da velocidade em nós, e ainda a aplicação do fator de conversão em 1.852 para o correto retorno em Km/h.

Os resultados indicaram desvios posicionais médios inferiores a 5 metros em condições favoráveis de recepção, compatíveis com a precisão nominal de 2,5 metros especificada pelo fabricante. Em ambientes com obstrução parcial do céu, os desvios aumentaram para a faixa de 8 a 15 metros, o que, ainda assim, mostra-se aceitável para realizar o rastreamento logístico em escala urbana.

Por fim, outro comportamento registrado foi uma latência de até 2 segundos em alguns navegadores para que o dispositivo se tornasse visível em nova varredura Bluetooth, ocorrido após a desconexão USB. Esse comportamento mostrou-se inerente à implementação da pilha BLE do ESP32-S3. Desta forma, concluiu-se pela robustez da lógica de alternância USB/BLE, devido à implementação do watchdog temporal, o que evita alternâncias desnecessárias durante o fluxo de dados e garantindo uma transição limpa sem a perda de pacotes. A independência da intervenção manual e a compatibilidade com as fontes de dados USB/BLE são demonstrativos da adequação da ferramenta tecnológica como uma solução para aplicações de rastreamento em campo.

## 5. RESULTADOS: A SIMULAÇÃO DA FERRAMENTA

Para fins de demonstração dos resultados da ferramenta tecnológica, foram realizadas três simulações, sendo uma no dia 26 de março de 2026 e duas no dia 31 de março de 2026, as quais se encontram no Apêndice 3. Os testes foram realizados nas dependências do Instituto de Engenharia Nuclear, sendo os dois primeiros no Laboratório de Engenharia do Conhecimento e o último no refeitório. Sobre o teste no refeitório, importante destacar que a proximidade com o edifício do Reator Nuclear Argonauta não influenciou nas leituras do GPS.

Em cada sessão foram registrados 18 pontos de coordenadas geográficas, contendo data, hora, latitude, longitude, altitude e velocidade, totalizando 54 registros ao longo dos três testes. Os dados foram coletados através da interface Web e transmitidos pelo firmware embarcado no Arduino Uno R4 WiFi, a partir do receptor GPS integrado ao Módulo SIM808, e, exportados em formato txt, com links de verificação direta pelo Google Maps.

A interface de monitoramento Web operou de forma estável ao longo de todas as sessões e recebeu os dados através da conexão Bluetooth, plotando os pontos no mapa interativo com atualização em tempo real.

O primeiro log foi realizado no dia 26/03/2026, com o teste iniciando às 9h22, e com o encerramento às 9h27, sendo o protótipo posicionado em bancada interna e a antena direcionada para uma abertura na janela com visibilidade parcial do céu.

As coordenadas registradas apontaram variações nas latitudes e longitudes, resultando em dispersão horizontal da latitude em 6 metros e de 7,5 na longitude. A altitude permaneceu estável entre 52 e 53 metros, com pouca variação. Os registros indicam uma fixação satisfatória do receptor, mesmo em condições de visibilidade limitada do céu. As velocidades registradas apresentaram oscilações entre 0 e 0,1 Km/h, guardando compatibilidade com o estado estático do protótipo, demonstrando a sensibilidade do receptor para velocidades residuais decorrentes do drift do posicionamento do GPS em situação estacionária.

A análise dos pontos plotados no mapa confirma uma dispersão típica de ambientes com obstrução parcial do céu, dentro da faixa esperada de 5 a 10 metros, compatível com os dados do fabricante do Módulo SIM808, que possui precisão nominal de 2,5 metros em céu aberto e até 15 metros em condições degradadas. O resultado valida a operacionalidade do receptor GPS em ambiente indoor próximo à janela, demonstrando uma localização precisa do sistema para fins de rastreamento logístico, ainda que em condições adversas.

O segundo teste foi realizado no dia 31/03/2026, com início às 9h20 e encerramento às 9:22. Em contraste com o primeiro teste, o dispositivo foi conduzido em movimento leve, com a simulação de uma operação de transporte, em escala reduzida, também dentro do Laboratório de Engenharia do Conhecimento, próximo à janela com visada direta para o céu.

As coordenadas registradas mostraram variações de latitudes e longitudes, indicando um deslocamento de 11,7 metros na direção norte e 3 metros na direção oeste. Desta forma, a trajetória resultante descreve um pequeno percurso linear com leve desvio lateral, compatível com um pequeno deslocamento, em área com visibilidade parcial do céu, o que demonstrou a operacionalidade do sistema de rastreamento em movimento leve.

As altitudes registradas variaram entre 85,2 e 89,4 metros, com variação de 4,2 metros ao longo do percurso. O resultado demonstra uma cota altimétrica superior à do primeiro teste, com variação residual atribuída ao receptor GPS em movimento com a maior sensibilidade na estimação da altitude e da geometria da constelação. As velocidades oscilaram entre 0,3 e 1,5 Km/h, correspondendo a uma velocidade de caminhada lenta, condizente com um deslocamento a pé, simulando um transporte manual.

As altitudes variaram entre 85,2 e 98,4 metros, com variação de 4,2 metros ao longo do percurso, o que indica uma área de cota altimétrica superior à do primeiro teste, com a variação residual atribuída ao comportamento do receptor GPS em movimento, com maior sensibilidade à estimação da altitude e a variação da geometria da constelação.

A frequência de atualização de 2 segundos ao longo do percurso mostrou-se elevada, confirmando a capacidade do sistema em fornecer rastreamento quase contínuo nas operações de baixa velocidade. A latência de transmissão entre a captação das coordenadas pelo receptor GPS e o desenho na interface web manteve-se superior a 2 segundos.

O terceiro teste, realizado no dia 31/03/2026, iniciou-se às 10:17 e encerrou-se às 10:18, no refeitório do Instituto de Engenharia Nuclear. Esse teste apresentou os resultados superiores na estabilidade do conjunto, evidenciando a influência direta das condições de recepção do sinal do GPS sobre a qualidade dos dados coletados.

As coordenadas registradas pelo sistema indicaram um deslocamento aproximado de 25 metros na direção norte e 9,4 metros na direção leste. Destaca-se uma trajetória mais extensa e linear dos testes, sugerindo condições favoráveis de recepção do sinal GPS e visibilidade mais ampla do céu no local de realização de testes.

A estabilidade altimétrica manteve-se em 155,5 metros nos 17 pontos registrados, com apenas um registro de 155,6 metros. Essa consistência indica uma fixação estável do receptor a um número suficiente de satélites, com geometria de constelação favorável para a estimação precisa da altitude, sendo o melhor resultado do desempenho nos testes, levando a concluir, que em condições de céu aberto, o receptor GPS do Módulo SIM808 consegue operar dentro dos parâmetros de precisão nominal especificados pelo fabricante.

As velocidades registradas variaram entre 0,2 e 1,3 Km/h, com frequência de atualização de 2 segundos entre os pontos, durante o trecho de movimento ativo, de forma a comprovar que a cadência de aquisição do firmware manteve-se estável ao longo da sessão. Desta forma, em condições adequadas de recepção, o sistema opera de forma contínua e estável.

Uma análise comparativa entre os testes revela uma progressão diretamente relacionada às condições de recepção do sinal GPS com melhora consistente à medida que a visibilidade do céu aumentou entre as sessões.

A respeito da precisão posicional, os testes confirmaram desvios inferiores a 5 metros em condições favoráveis de recepção, conforme verificado no terceiro log, e na faixa de 8 a 15 metros em condições de obstrução parcial, de acordo com o teste indoor. Portanto, os resultados encontram-se dentro dos parâmetros aceitos para aplicações de rastreamento logístico em escala urbana, sendo suficientes para identificar desvios de rota ou mesmo paradas não programadas em operações de transporte de materiais nucleares.

A cadência de atualização de 2 segundos nos trechos em movimento ativo, mostrou-se compatível com os requisitos para o monitoramento em tempo real de operações logísticas em baixa velocidade. Para referência, o transporte urbano de radiofármacos ocorre tipicamente em velocidades entre 20 a 60 Km/h, e, uma atualização do sistema a cada 2 segundos corresponde a uma resolução espacial de 11 a 33 metros por ponto, suficiente para a detecção de desvios de rotas e paradas não autorizadas.

A estabilidade altimétrica observada no último log, demonstrou uma variação inferior a 0,1 metro a longo do percurso, indicando a capacidade para fornecer dados consistentes através do receptor GPS do Módulo SIM808, o que se mostra relevante para as operações de transporte em áreas com variação do perfil altimétrico.

A interface web mostrou-se estável ao longo dos testes, sem quaisquer interrupções de comunicação entre o protótipo e o navegador, validando a arquitetura de comunicação baseada na API Bluetooth e confirmando a adequabilidade de utilização sem infraestrutura adicional de software, além de demonstrar que a plataforma Arduino Uno R4 WiFi opera de forma adequada e estável para a aquisição e transmissão de dados de rastreamento em tempo real.

## 5.1. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados permitiram a avaliação do grau de atendimento aos objetivos específicos do Capítulo 1 da presente dissertação. Desta forma, o objetivo de projetar e implementar um protótipo funcional de rastreamento com módulos de geolocalização e comunicação sem fio foi atendido. Portanto, o sistema demonstrou a capacidade de aquisição e transmissão contínua de coordenadas GPS, com uma precisão compatível com os requisitos de rastreamento logístico em ambiente urbano, operando com hardware de baixo custo e software de código aberto.

O objetivo do desenvolvimento e integração dos protocolos de cibersegurança também foram atendidos nesta fase do protótipo, com a implementação de camadas de autenticação via Web Serial API e Web Bluetooth API, impondo a interação explícita do usuário para autorizar o acesso ao dispositivo. A implementação de camadas adicionais de criptografia TLS e controle de integridade por *hash* criptográfico constitui uma das evoluções futuras previstas, que foram detalhadas no Capítulo 6.

O objetivo de validar o desempenho em cenários controlados foi atendido, com os logs de teste fornecendo dados quantitativos acerca da precisão posicional, cadência de atualização, estabilidade altimétrica e comportamento do sistema em condições de obstrução parcial do sinal GPS. Portanto, os resultados confirmam a viabilidade técnica da solução como uma ferramenta de rastreamento em tempo real de operações logísticas de materiais radioativos.

Por fim, importa destacar que o protótipo como ferramenta tecnológica contribui para o ecossistema de segurança nuclear sustentado pelos resultados experimentais, o que demonstra uma solução utilizando componentes acessíveis no fornecimento de uma camada adicional para o monitoramento complementar aos protocolos convencionais, conforme as lacunas normativas identificadas no Capítulo 3, particularmente a ausência de cobertura tecnológica do elo logístico desde a saída do radiofármaco da instalação produtora a seu destino final.

## 5.2. PLATAFORMA WEB LIVE TRACKER

A Plataforma Web Live Tracker foi implementada como uma *Single Page Application* em HTML5, CSS3 e Javascript, a partir da integração da biblioteca Leaflet.js e OpenStreetMap,

como a interface de monitoramento do protótipo. A interface comunica-se com o Arduino por meio das APIs Web Serial e Web Bluetooth, plotando as coordenadas geográficas obtidas pelo Módulo SIM808 e desenhando o trajeto percorrido em tempo real no mapa de forma sequencial e auditável.

O protótipo registra automaticamente cada coordenada recebida com carimbo de data e hora, permitindo o acompanhamento em tempo real da remessa durante o deslocamento, com a exibição dinâmica do trajeto no mapa a cada nova posição, além da geração do histórico dos pontos percorridos ao final da execução, com possibilidade de exportação nos formatos txt, xlsx ou pdf.

A Plataforma possui uma função de Controle de Comandos, para ligar e desligar o GPS, realizar o escaneamento das coordenadas e testes no Módulo SIM808. Além disso, a Plataforma permite visualizar as coordenadas como pontos no mapa, a gravação dos registros com carimbo de tempo e a exportação dos dados para a auditoria da cadeia de custódia dos radiofármacos.

A interface desenvolvida foi utilizada para monitorar a transmissão das coordenadas do GPS pelo protótipo durante as simulações. As figuras a seguir detalham a ferramenta, sendo a Figura 3 a página principal e as Figuras 4, 5 e 6, respectivamente, a obtenção das coordenadas, a formação das rotas e a numeração sequencial dos pontos coletados.

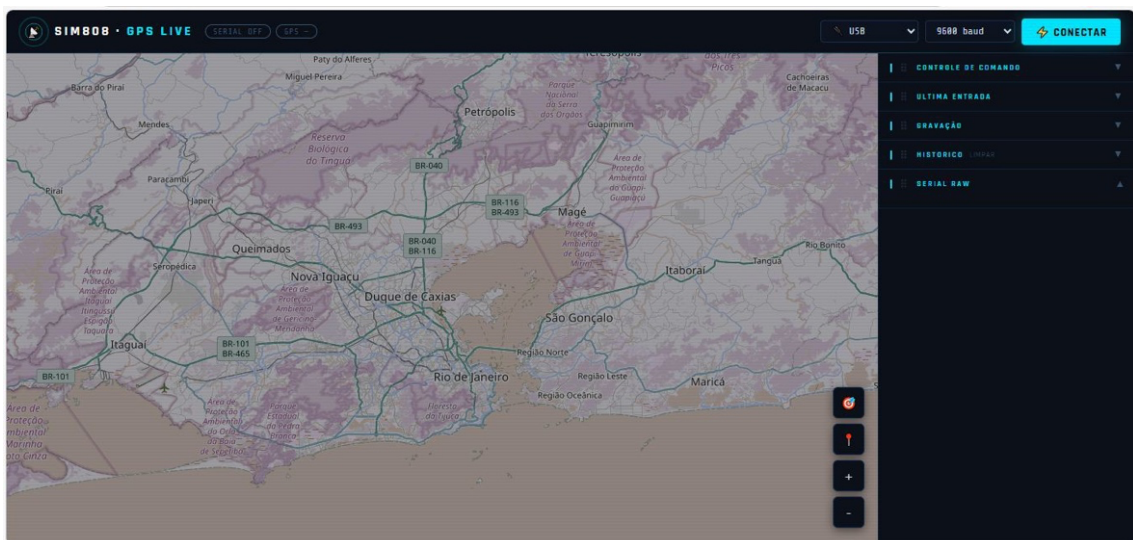


Figura 3 - Página Web “Live Tracker” - (Fonte: Autor, 2026)

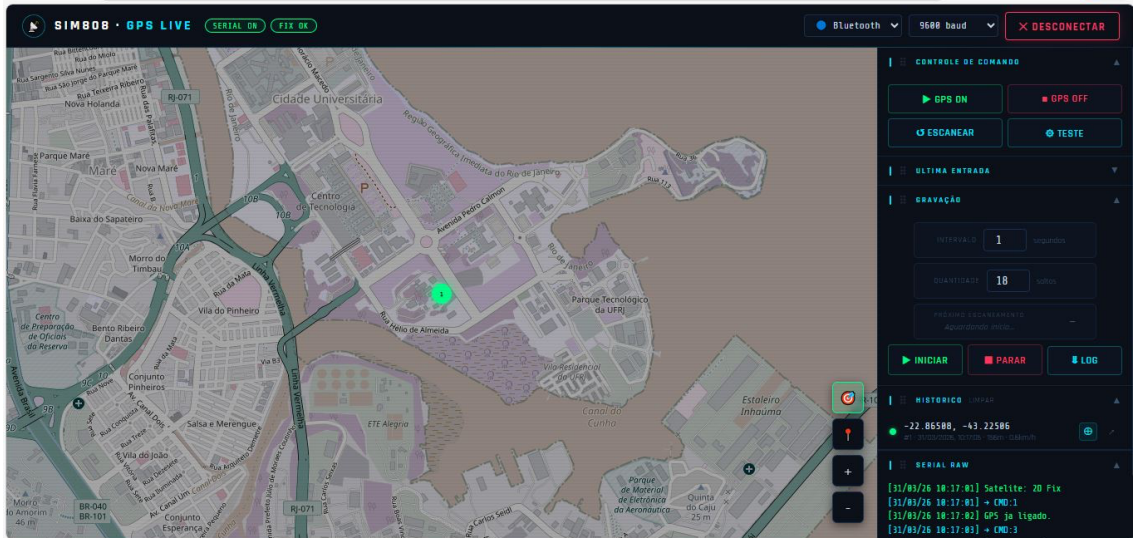


Figura 4 - Obtenção de Coordenadas do GPS - (Fonte: Autor, 2026)

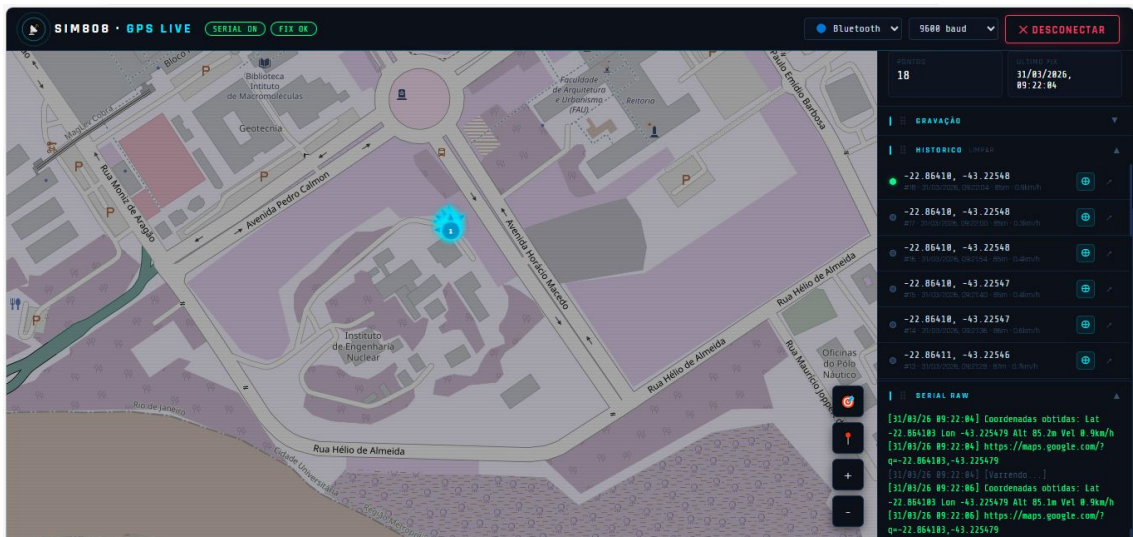


Figura 5 - Formação de Rotas pelas Coordenadas - (Fonte: Autor, 2026)

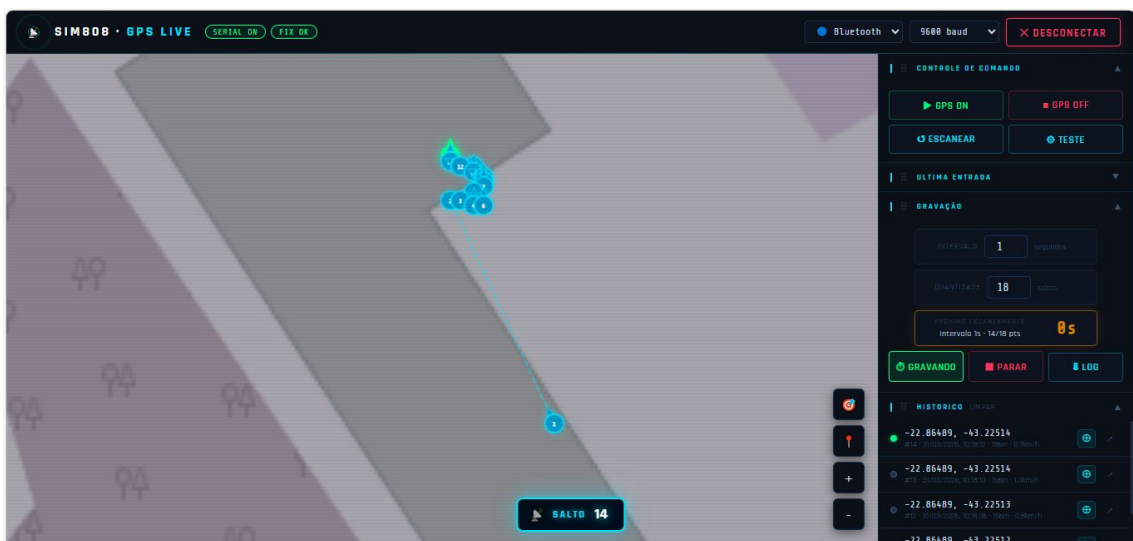


Figura 6 - Desenho dos Saltos da Rota em Numeração Crescente - (Fonte: Autor, 2026)

Conforme ilustrado nas Figuras 3 a 6, a plataforma demonstrou capacidade na obtenção, processamento e exibição das coordenadas do GPS de acordo com as especificações do Módulo SIM808, com representação gráfica dos saltos das rotas em ordem crescente.

### 5.3. REFLEXÕES DO DESENVOLVIMENTO

Para fins de reflexões, as dificuldades na fase inicial proporcionaram aprendizados que transcenderam os aspectos técnicos. Ainda mesmo com as incompatibilidades das bibliotecas, a experiência evidenciou o descompasso entre o ciclo de lançamento de novas plataformas de hardware e o amadurecimento do ecossistema do software que os suporta, como um fenômeno recorrente no desenvolvimento embarcado.

Muito embora o Arduino Uno R4 WiFi possua características técnicas superiores às das gerações anteriores, percebeu-se no desenvolvimento do projeto uma lacuna no ecossistema, a qual se manifestou justamente nos pontos onde a pesquisa dependia de bibliotecas consolidadas.

Paradoxalmente, a necessidade de implementar a comunicação com o Módulo SIM808 diretamente via comandos AT, resultou em um firmware robusto e mais transparente sobre os mecanismos internos dos módulos, gerando uma preocupação sobre o armazenamento interno, que dispõe de 256KB de memória flash. Desta forma, o desenvolvedor foi compelido a estudar e compreender em profundidade o protocolo AT, os tempos de resposta e formatos de saída dos comandos GPS, otimizando o código constantemente por questões de espaço. Caso a biblioteca de alto nível tivesse sido implementada, tais preocupações inexisteriam.

A substituição da conectividade celular pelo WiFi, embora inicialmente percebida como um recuo em relação ao escopo original do projeto, mostrou-se adequada para os objetivos da prova de conceito, mantendo-se congruente com a proposta de investigação, não se descartando inclusive uma implementação futura.

O sistema fora entregue com os recursos WiFi e Bluetooth Low Energy disponíveis da plataforma com todas as funcionalidades essenciais de rastreamento, comunicação e interface web, que constituem o núcleo da proposta, e demonstrou a viabilidade técnica para rastrear os radiofármacos, baseado em hardware de baixo custo e tecnologias web abertas.

As restrições do ecossistema do software ainda em desenvolvimento, foram contornada com programação de baixo nível. Os objetivos centrais da pesquisa permaneceram os mesmos após a substituição da conectividade celular pelo WiFi e Bluetooth.

Ainda que esparsas, o sistema atende às normativas da Comissão Nacional de Energia Nuclear de rastreamento contínuo durante o transporte dos radiofármacos e da manutenção de registro auditáveis, possibilitando a integração de entidades particulares e instituições públicas com os sistemas de controle do órgão regulador para o controle, monitoramento e auditoria.

Por fim, o protótipo entregue demonstra a possibilidade de um sistema modular que seja extensível para a ativação da conectividade celular GSM/GPRS através do slot SIM do Módulo SIM808 ou por de tecnologia mais recente, implementação de Blockchain para a auditabilidade dos registros, módulo de controle de usuários com diferentes níveis de acesso e integração com *tag RFID* para rastreabilidade nos eventos de transição de custódia, desde a célula quente até o destino, sem necessidade do redesenho da arquitetura central.

#### 5.4. ORGANOGRAMA DE APLICABILIDADE DA SOLUÇÃO

A figura abaixo ilustra em nível macro os atores da cadeia logística dos radiofármacos que poderiam se beneficiar da ferramenta tecnológica, a partir do monitoramento contínuo:

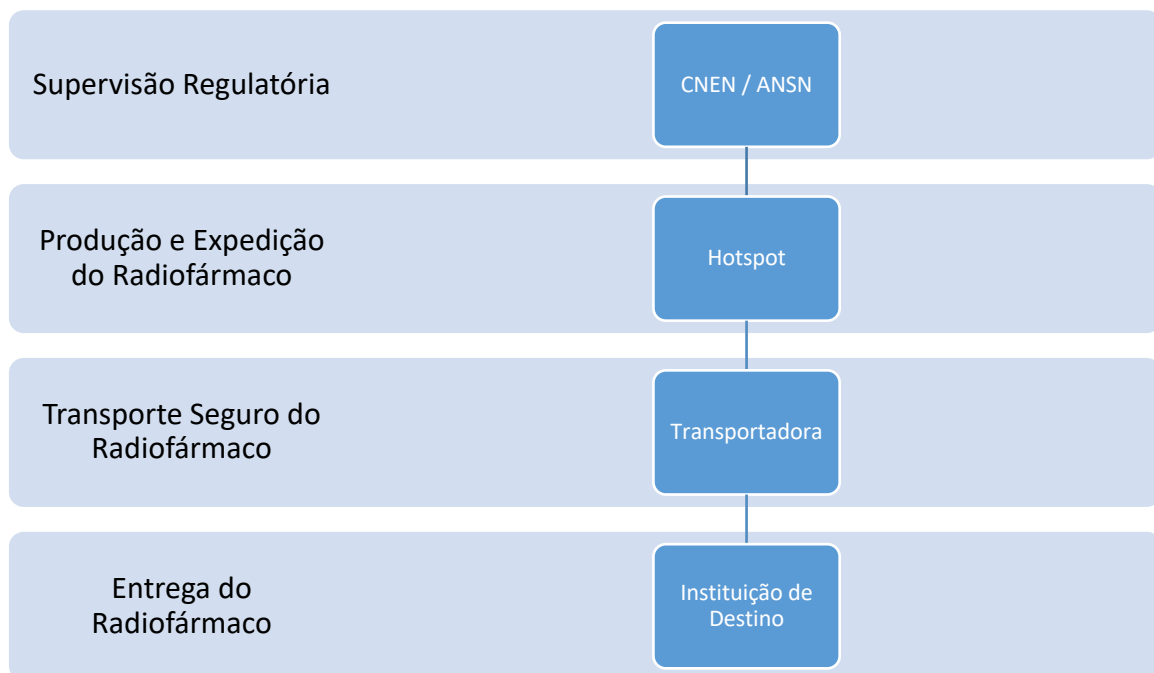


Figura 7 - Aplicabilidade da Ferramenta Tecnológica - (Fonte: Autor, 2026)

A ferramenta tecnológica foi testada e validada em nível micro, dentro do Laboratório de Engenharia do Conhecimento e no Refeitório no Instituto de Engenharia Nuclear, conforme a ilustração a seguir:

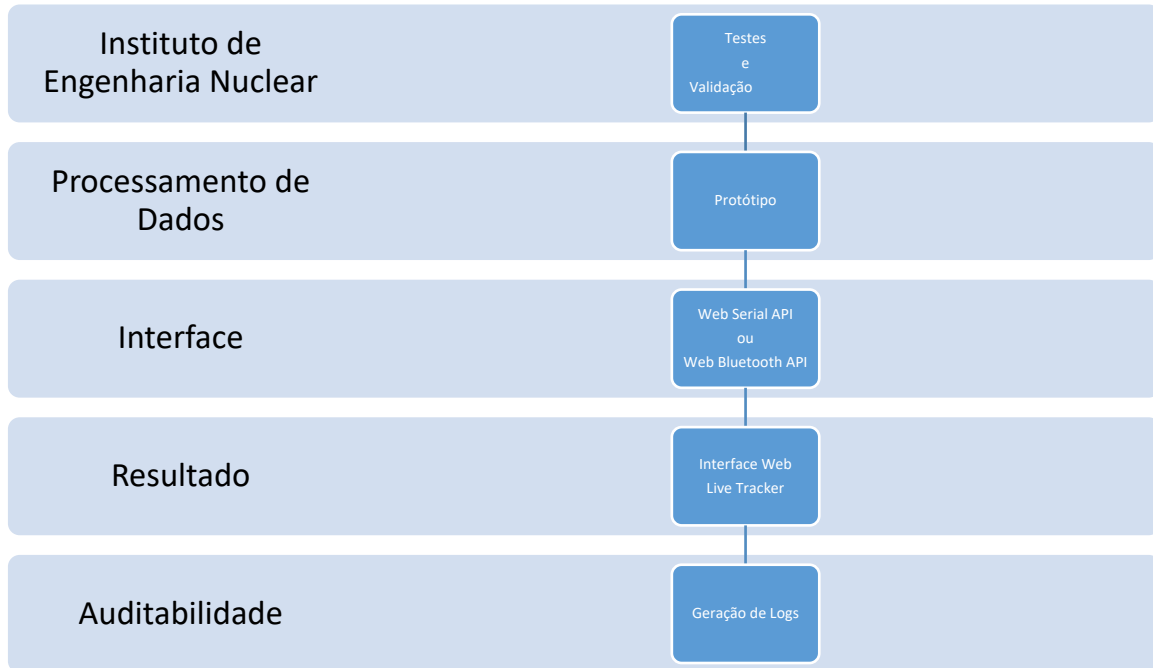


Figura 8 - Validação da Ferramenta Tecnológica - (Fonte: Autor, 2026)

A representação em nível macro da Figura 7 acima demonstra os possíveis participantes da cadeia logística de radiofármacos, desde a autoridade reguladora até a instituição de destino. A validação em nível macro, destilhada na Figura 8, restringiu-se aos testes do protótipo dentro do Instituto de Engenharia Nuclear. Em conjunto, as duas ilustrações evidenciam a abrangência potencial da ferramenta e o recorte efetivamente validado na presente dissertação.

## 6. CONCLUSÕES

### 6.1. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação realizou a investigação, projeto e a validação de um protótipo de ferramenta tecnológica de baixo custo que utiliza o Arduino Uno R4 Wifi e o Módulo SIM808, para rastreamento em tempo real de remessas de radiofármacos durante o transporte, através de uma interface web de monitoramento, com tecnologias abertas. O desenvolvimento do trabalho ocorreu após a identificação das vulnerabilidades na etapa de transporte na cadeia logística dos

radiofármacos, além das lacunas de rastreamento no arcabouço normativo nacional e a ausência de soluções tecnológicas acessíveis.

Do ponto de vista da fundamentação teórica, iniciando pela análise dos eixos temáticos, passando pelos radiofármacos, Arduino e Módulo SIM808, geolocalização GPS, protocolos de comunicação sem fio e tecnologia Blockchain, os resultados corroboraram a hipótese de que a convergência tecnológica oferece as bases técnicas necessárias para a construção de um sistema de rastreamento modular, auditável e que seja economicamente acessível.

Imprescindível ressaltar que, o Flúor-18, com seus 110 minutos de meia-vida, tornam o monitoramento contínuo não apenas desejável, mas operacionalmente crítico para a garantia de eficácia terapêutica e segurança da cadeia de custódia da saída do hotspot até o destino.

A análise do arcabouço jurídico-normativo do Capítulo 3 revelou um sistema regulatório extenso e alinhado com os padrões da Agência Internacional de Energia Atômica, apresentando lacunas que comprometem a efetividade do controle logístico dos radiofármacos. Desta forma, foram identificadas como as principais lacunas: a ausência de cobertura normativa para a cadeia interna das instalações no intervalo de saída do radiofármaco da célula quente até o embarque no veículo transportador; as normativas esparsas sobre proteção, segurança e transporte e ainda a sobreposição regulatória decorrente da transição das competências entre a Comissão Nacional de Energia Nuclear e a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear, a partir da Lei 14.222/2021; e a inexistência de exigências regulatórias para a integração dos sistemas de rastreamento dos materiais nucleares dos operadores privados para uma plataforma unificada de monitoramento e acessível em tempo real pelo órgão regulador.

Desta forma, a ferramenta tecnológica desenvolvida, descrita no Capítulo 4, demonstrou a possibilidade de implementação de um sistema funcional de rastreamento em tempo real, com componentes de hardware acessíveis, sem comprometer os requisitos funcionais de precisão geográfica, latência de comunicação e robustez operacional. A decisão de adotar a comunicação via WiFi e Bluetooth Low Energy em substituição à conectividade GSM/GPRS, foi motivada pelas incompatibilidades entre as bibliotecas disponíveis e da arquitetura ARM Cortex-M4 do microcontrolador Renesas RA4M1, mas revelou-se tecnicamente consistente com o escopo da prova de conceito, preservando a possibilidade de migração futura para a comunicação celular enquanto ocorre a maturação do ecossistema de bibliotecas do Arduino Uno R4 WiFi.

Os resultados experimentais do Capítulo 5, obtidos a partir de três sessões de simulação nas dependências do Instituto de Engenharia Nuclear, confirmaram a viabilidade técnica do sistema. A precisão posicional obtida, inferior a 5 metros em condições favoráveis de recepção e na faixa de 8 a 15 metros em condições de obstrução parcial do céu, mostra-se adequada para a detecção de desvios de rotas, paradas não autorizadas e violações da integridade nas operações de transporte dos materiais. A cadência de atualização de 2 segundos nos trechos de movimento ativo e estabilidade altimétrica demonstrada no terceiro log, com variação inferior a 0,1 metro ao longo do percurso, validando a confiabilidade do receptor GPS integrado ao Módulo SIM808 em condições de campo representativas.

Portanto, do ponto de vista regulatório, a arquitetura desenvolvida atende diretamente às exigências da normativa CNEN-NN-5.04, a qual impõe a obrigatoriedade de instalação do sistema de rastreamento nos veículos utilizados para o transporte dos materiais radioativos, em complementação aos requisitos da norma CNEN-NN-5.01 e CNEN-NN-2.05, no fornecimento de uma camada adicional de segurança física e cibernética para o monitoramento das operações de transporte. A solução proposta insere-se na lacuna normativa de cobertura da cadeia interna das instalações, oferecendo um rastreamento contínuo desde a saída do radiofármaco da célula quente até a confirmação de entrega no destinatário final, intervalo que não se encontra coberto pelas normas vigentes.

A pesquisa contribui tecnicamente para a segurança nuclear nacional ao demonstrar que tecnologias abertas e hardware de baixo custo podem suprir lacunas normativas de rastreamento no setor, caracterizado pela alta criticidade, de modo a viabilizar o controle e o monitoramento supervisionado dos radioisótopos, para a segurança e proteção da sociedade, com a transmissão dos registros em tempo real e o potencial de replicação em instalações nucleares para assegurar auditabilidade e o rastreamento na cadeia logística dos materiais.

A dissertação apresenta a viabilidade tecnológica para a modernização dos sistemas de controle logístico dos institutos de pesquisa nucleares brasileiros, eliminando a dependência de soluções proprietárias de elevado custo de aquisição e manutenção. Essa perspectiva adquire relevância estratégica nacional considerando o contexto de abertura do controle de mercado na produção de radioisótopos para os operadores privados, representando uma evolução natural do texto da Constituição Federal até a Emenda Constitucional 118/2022.

## 6.2. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Analisando os resultados dos testes da ferramenta tecnológica, pode-se concluir que os registros produzidos pela interface web durante o funcionamento da ferramenta tecnológica são um demonstrativo de sua viabilidade. Os logs com os registros das coordenadas obtidos nas três sessões de teste contém 18 pontos registrados, conformando que o sistema possui capacidade compatível com a especificação nominal do Módulo SIM808 para o fornecimento dos dados de posicionamento com uma precisão de 2,5 metros.

A exportação dos registros em formatos estruturados, contém: coordenadas geográficas, carimbo de tempo e *link* para o Google Maps evidencia que a ferramenta, além do rastreamento, documenta a cadeia de custódia permitindo uma auditoria confiável, atendendo aos requisitos centrais da proposta e em plena conformidade com o arcabouço normativo do Capítulo 3. Desta forma, a ferramenta organiza os documentos, o que reforça seu papel nas inspeções regulatórias e prestação de contas das autoridades nucleares.

A validação, além da conformidade, rastreabilidade e transparência, responde às lacunas regulatório-tecnológicas identificadas, como por exemplo a ausência de normativas específicas a respeito da cobertura da cadeia interna das instalações produtoras, desde o intervalo de saída do radiofármacos até o embarque no veículo de transporte.

Nesse contexto, o protótipo apresenta plena funcionalidade no rastreamento das rotas de transporte dos radiofármacos, sem depender de infraestrutura de WiFi, podendo comunicar-se via Bluetooth com os dispositivos móveis do operador, realizando o registro as coordenadas, com frequência e precisão suficiente para documentar as movimentações do transporte.

A limitação mais relevante identificada ocorreu a partir da não ativação da conectividade celular GSM/GPRS do Módulo SIM808, em razão da incompatibilidade de bibliotecas com a arquitetura ARM do Arduino Uno R4 WiFi, fato que não compromete a validade conceitual da solução, tampouco os resultados de rastreamento obtidos, uma vez que os dados de localização foram transmitidos com sucesso via Bluetooth e USB para a interface web.

Tal limitação aponta para as possibilidades de evolução do sistema, como a habilitação de transmissão autônoma das coordenadas via rede celular, transformando o protótipo em um

rastreador independente, realizando uma comunicação direta com o servidor de monitoramento central, conforme a CNEN-NN-5.04 para veículos transportadores de materiais radioativos.

Nesse sentido, os resultados das sessões de teste realizadas confirmam a funcionalidade do protótipo como prova de conceito, além de demonstrar a viabilidade técnico-operacional da solução de rastreamento dos radiofármacos, através de tecnologias abertas e hardware de baixo custo.

Tais informações validam a cadeia de aquisição, processamento e exportação de dados implementada no firmware e interface web. Verifica-se que, a operação bem-sucedida em locais distintos reforça a robustez e a portabilidade da solução. Do ponto de vista da viabilidade de implementação, a arquitetura modular adotada permite uma evolução progressiva do protótipo, com a implementação de novas funcionalidades, como a conectividade celular, os registros em Blockchain permissionado e a integração com os sistemas de controle do órgão regulador, sem a necessidade de modificação substancial do código-fonte.

Os logs gerados transcritos no apêndice validam a utilidade prática da ferramenta, e os componentes selecionados provam-se funcionalmente adequados para a prova de conceito. A arquitetura modular adotada preserva o caminho para as extensões futuras descritas adiante, as quais convergem para uma plataforma integrada de rastreamento de materiais nucleares, com a possibilidade de auditoria e conformidade regulatória da cadeia logística nuclear.

Tais fatos demonstram a solidez da ferramenta como uma fundação tecnológica sólida para uma plataforma integrada de rastreamento, auditoria e conformidade regulatória da cadeia nuclear nacional. A solução desenvolvida contribui para alterar e suprir as normativas esparsas do setor, oferecendo uma rastreabilidade contínua e registros auditáveis, devido à inexistência e fragmentação das exigências regulatórias.

Por fim, a ferramenta tecnológica desenvolvida demonstra a viabilidade técnica de um sistema de rastreamento de radiofármacos, que utiliza hardware acessível e tecnologias abertas, considerando as restrições de tempo e recursos de uma pesquisa de mestrado. Os resultados obtidos permitem sua replicação em outros contextos e indicam caminhos para aprimoramentos futuros.

### 6.3. MELHORIAS E IMPLEMENTAÇÕES FUTURAS

O sistema apresentado na presente dissertação constitui prova de conceito funcional que demonstra a viabilidade técnica do rastreamento de radiofármacos, realizado por hardware de baixo custo e tecnologias web abertas. Portanto, o caminho entre a demonstração de viabilidade do sistema para a plena operação em ambiente produtivo envolve um conjunto significativo de evoluções técnicas e arquiteturais. Esta seção descreve as principais melhorias identificadas ao longo do desenvolvimento e as possibilidades de extensões futuras, que são apresentadas como continuações naturais e promissoras da pesquisa iniciada.

#### 6.3.1. Ativação da Conectividade Celular no SIM808

Como melhoria imediata, propõe-se habilitar a conectividade celular GSM/GPRS por meio do slot para chip SIM do Módulo SIM808, funcionalidade que permaneceu latente durante o projeto devido à incompatibilidade entre as bibliotecas e a Plataforma Arduino Uno R4 WiFi. A evolução prevista consiste em aguardar o amadurecimento do ecossistema de bibliotecas para o Arduino Uno R4 WiFi, que evolui continuamente com as contribuições da comunidade *open source* e a implementação no firmware dos comandos AT, para estabelecer uma conexão GPRS que transmita os dados a um *endpoint* HTTP.

Nesse sentido, a ativação dessa funcionalidade transformaria a arquitetura do sistema de forma substancial, onde o dispositivo embarcado deixaria de depender da proximidade de um computador ou smartphone para transmitir dados de localização, passando a operar de forma completamente autônoma. Essa evolução mostra-se particularmente relevante para o cenário de transporte de radiofármacos em percursos longos ou regiões cobertura da rede WiFi limitada.

#### 6.3.2. Rastreamento em Tempo Real com Controle de Usuários

A interface de monitoramento do sistema funciona localmente. Os dados de localização são recebidos e visualizados pelo dispositivo diretamente conectado ao Arduino. Até o presente momento não existe mecanismo para que terceiros autorizados acompanhem o trajeto de forma remota e simultânea. No âmbito da interface web, os dados de localização são liberados após a autenticação do protótipo, não havendo suporte para o acompanhamento de múltiplos usuários de forma remota e simultânea.

A proposta de alteração para o controle de usuários da aplicação representa uma camada de proteção adicional, limitando o acesso a informações sensíveis, uma vez que transportadoras, centros de medicina nuclear, unidades hospitalares, órgãos reguladores, entre outros podem ter acesso ao sistema, monitoramento de status e localização das remessas, desde o despacho até a confirmação de chegada, cada qual com diferentes restrições e distintas necessidades.

Nesse sentido, a implementação do módulo de controle de usuários encontra-se entre as extensões futuras de maior impacto prático. As remessas dos radiofármacos são registradas na plataforma com um identificador único, e os usuários autorizados, autenticados por credenciais e com papéis pré-definidos.

O sistema poderia emitir notificações automáticas em caso de desvio de rota, interrupção inesperada do trajeto ou atraso em relação ao tempo estimado de chegada, permitindo visualizar também os encarregados pelas remessas dos radiofármacos. Do ponto de vista arquitetural, essa evolução demandaria um *backend* e um banco de dados robusto para a persistência dos dados, um servidor de *WebSockets* para o monitoramento em tempo real, uma camada de autenticação e autorização baseada em perfis (RBAC), além da reformulação da interface web para suportar múltiplos usuários simultâneos.

### 6.3.3. Implementação via Blockchain para Auditoria e Imutabilidade

Ainda nos dias atuais, uma das limitações mais relevantes nos sistemas de rastreamento convencionais, em contextos regulados, como o da cadeia de custódia de materiais radioativos, reside na dificuldade de garantir a imutabilidade e a auditabilidade do histórico de localização, porque nos bancos de dados tradicionais os registros podem ser alterados ou apagados, seja por erro ou intencionalmente, comprometendo a integridade da trilha de auditoria. Nesse sentido, a tecnologia Blockchain apresenta-se como uma resposta estrutural a essa limitação.

A tecnologia Blockchain opera como um registro distribuído de transações organizado em blocos encadeados criptograficamente. E também, cada bloco contém transações, possui um *hash* do bloco anterior e seu próprio *hash*, formando uma cadeia em que a alteração de qualquer bloco invalida todos os subsequentes, chamada de imutabilidade, tornando o Blockchain como um atrativo para aplicações que exigem registros à prova de adulteração, permitindo auditorias em conformidade regulatória em relação ao transporte de materiais sensíveis.

A pretensão de implementação futura prevê que cada registro de localização gerado pelo dispositivo, com suas coordenadas, *timestamp* e identificador de remessa, seja gravado como uma transação em uma rede permissionada Blockchain. Atualmente existem plataformas como *Hyperledger Fabric* ou *Quorum*, apresentando restrições aos participantes da rede e entidades previamente autorizadas, tornando-as mais adequadas para aplicações empresariais e reguladas que demandam o controle de acesso e a privacidade dos dados.

Nesse modelo, todos os participantes da cadeia de custódia, como laboratório produtor, transportadora, centro de medicina nuclear e órgão regulador, seriam nós da rede, cada um com permissões específicas. O histórico completo de localização de cada remessa ficaria gravado de forma imutável e auditável, disponível para consulta e auditoria pelos participantes autorizados. Os contratos inteligentes poderiam, ainda, automatizar as verificações de conformidade, como a confirmação do transporte realizado no espaço da janela de tempo exigida pela meia-vida do radiofármaco.

A tecnologia Blockchain pode contribuir para o cumprimento das regulamentações da Comissão Nacional de Energia Nuclear e da Autoridade Nuclear de Segurança Nacional, e para suprir as lacunas normativas atuais.

Por fim, esclarece-se que o protótipo atual não implementa a tecnologia Blockchain, e, as discussões ao longo do Capítulo 2 e as perspectivas delineadas visaram estabelecer uma base de fundamentação teórica para demonstrar a viabilidades de integração futura. Desta forma, em trabalhos posteriores pretende-se realizar o desenvolvimento de uma camada de registro distribuído utilizando plataformas integradas ao firmware do Arduino e à interface web para garantir a imutabilidade dos registros de localização e auditabilidade regulatória. Essa evolução natural da pesquisa responderá às expectativas geradas e às exigências da CNEN/ANSN quanto à rastreabilidade de materiais nucleares.

#### 6.3.4. Rotulamento via Tags RFID e Integração com Supply Chain

Outra extensão de alto impacto prático seria a integração do sistema com o conceito de rotulamento individual de embalagens por meio de tags eletrônicas, aproximando a solução das práticas consolidadas nos setores como o farmacêutico, alimentício e eletrônicos de consumo. Neste modelo as unidades de radiofármacos produzida ou embalagens de transporte receberiam

desde a etapa de produção no laboratório uma *tag RFID* contendo um identificador único, para possibilitar o acompanhamento do produto ao longo de todo o ciclo de vida logístico, desde o fracionamento até a administração ao paciente.

As tecnologias frequentemente empregadas para esse tipo de rotulamento em contextos de *supply chain* são o código de barras, código QR e, especialmente, a RFID (Radio Frequency Identification) ou sua variante de curto alcance, o NFC (Near Field Communication).

As *Tags RFID* podem ser ativas ou passivas, e de acordo com a tecnologia utilizada, seu alcance pode variar. As *tags* podem ser utilizadas nas embalagens de transporte dos radiofármacos e lidas por leitores instalados em pontos estratégicos da cadeia logística, por exemplo, as saídas dos laboratórios, pátios das transportadoras, recepções dos centros de medicina nuclear de modo a ajudar na geração automática dos eventos de rastreamento.

Este modelo complementa, ao invés de substituir o rastreamento contínuo realizado pelo dispositivo desenvolvido na presente dissertação. Enquanto o GPS fornece a posição geográfica em tempo real durante o trânsito, as *tags* ajudam na garantia da rastreabilidade em cada um dos eventos discretos de transição de custódia.

Portanto, a combinação das duas tecnologias, de rastreamento geoespacial contínuo por GPS e leitura discreta de *tags RFID* em pontos críticos resulta na cobertura completa do ciclo logístico, eliminando lacunas de informação entre os pontos, além de garantir a rastreabilidade ponta a ponta. A integração com a tecnologia Blockchain potencializa esse modelo, pois cada evento de leitura da *tag RFID* geraria automaticamente uma transação na rede para registro de forma imutável e auditável todo o histórico, desde a produção no laboratório até a administração no paciente. Além disso, a utilização dos contratos inteligente automatizaria as notificações em caso de desvio de rota, violação de embalagens ou atrasos na entrega, fortalecendo a segurança física e cibernética da cadeia logística de radiofármacos.

### 6.3.5. Considerações Finais e Perspectivas Futuras

As melhorias e extensões descritas nesse capítulo não são independentes entre si, e sim, compõem em conjunto uma visão coerente da evolução do sistema para formar uma plataforma integrada de rastreamento e auditoria de radiofármacos. A ativação da conectividade celular do

SIM808 exemplifica a autonomia necessária para o rastreamento contínuo sem dependência de infraestrutura local. O controle de usuários habilita o monitoramento colaborativo por múltiplos participantes, com diferentes níveis de restrição de acesso às informações sensíveis, mantendo a integridade e segurança da remessa. A implementação do Blockchain garante a imutabilidade e auditabilidade exigidas no contexto regulatório. O rotulamento via *tags RFID* fecha as lacunas de rastreabilidade nos eventos de transição de custódia.

Por fim, a presente dissertação cumpre o papel de estabelecer as bases fundacionais que essas extensões podem ser construídas, tendo demonstrado a viabilidade da arquitetura central do sistema, do firmware embarcado, da comunicação sem fio e da interface web, a partir de componentes acessíveis de baixo custo e tecnologias abertas. E, o amadurecimento progressivo do sistema, ao incorporar as melhorias delineadas, deverá resultar em uma solução que atenda integralmente às exigências do órgão regulador sobre os requisitos de segurança, conformidade e operabilidade exigidos para o monitoramento dos materiais nucleares desde o ponto de origem até o destino.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMED, Hafiz. Blockchain and quantum technologies for securing the global nuclear supply chain: synergies, applications, technical challenges and opportunities. **Journal of Critical Infrastructure Policy**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. e70021, 2026. DOI: 10.1002/jci3.70021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jci3.70021>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ALIAGA ALIAGA, Walter. **Caracterização do Canal de Propagação GPS em Ambientes Urbanos**. 2010. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

ALMEIDA, M. C. de *et al.* O mercado de radiofármacos no Brasil: situação atual e perspectivas. **Cuadernos de Educación y Desarrollo**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 7928–7947, 2023. DOI: 10.55905/cuadv15n8-059. Disponível em: <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/1699>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ALQAHTANI, Fawaz F. SPECT/CT and PET/CT, related radiopharmaceuticals, and areas of application and comparison. **Saudi Pharmaceutical Journal**, [S. l.], v. 31, n. 2, p. 312–328, 2023. DOI: 10.1016/j.jsps.2022.12.013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319016422003127>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ALVES, Inglith de Souza Lage. **Implementação de um sistema de localização veicular em tempo real de baixo custo**. 2019. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica) – Universidade Federal de Uberlândia, Monte Carmelo, 2019.

AMAZON WEB SERVICES. **O que é blockchain?** [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/blockchain/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ARDUINO. **Arduino IDE 2**. [S. l.]: Arduino, 2026. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/software/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ARDUINO. **Arduino® UNO R4 WiFi**. [S. l.]: Arduino, 2025. Disponível em: <https://store-usa.arduino.cc/products/uno-r4-wifi>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ARDUINO. **Arduino® UNO R4 WiFi: datasheet**. [S. l.]: Arduino, 2024. SKU: ABX00087. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/ABX00087-datasheet.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

ARDUINO. **Libraries**. [S. l.]: Arduino, 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/retired/hacking/software/Libraries/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ARDUINO FORUM. **Arduino vs Raspberry Pi**. Arduino Forum, [S. l.]: Arduino, 2018. Disponível em: <https://forum.arduino.cc/t/arduino-vs-raspberry-pi/555848>. Acesso em: 17 de Maio de 2026.

AUTORIDADE NACIONAL DE SEGURANÇA NUCLEAR. **Transporte de material radioativo**. Brasília: ANSN, 2026. Publicado em 26 jan. 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/ansn/pt-br/servicos/transporte-de-material-radioativo>. Acesso em: 19 mar. 2026.

BLOWERS, Dallas. **Raspberry Pi vs. Arduino: A beginning maker's guide to tell them apart**. *Medium*, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://dallasblowers.medium.com/raspberry-pi-vs-arduino-a-beginning-makers-guide-to-tell-them-apart-2cbcc7778e42>. Acesso em: 17 de Maio de 2026.

BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidência da República, [2016]. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/constituicao.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. **Decreto 63.705, de 29 de novembro de 1968**. Promulga o Acordo para Aplicação de Salvaguardas entre o Brasil, os Estados Unidos e a Agência Internacional de Energia Atômica. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 10349, 29 nov. 1968. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/486337/publicacao/15703584>. Acesso em: 26 mar. 2026.

BRASIL. **Decreto 9.600, de 14 de dezembro de 2018**. Consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira. Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2018/decreto/d9600.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/decreto/d9600.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. **Emenda Constitucional 9, de 9 de novembro de 1995**. Dá nova redação ao art. 177 da Constituição Federal, alterando e inserindo parágrafos. Brasília, DF: Presidência da República, 1995. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc09.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc09.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. **Emenda Constitucional 49, de 8 de fevereiro de 2006**. Altera a redação da alínea b e acrescenta alínea c ao inciso XXIII do caput do art. 21 e altera a redação do inciso V do caput do art. 177 da Constituição Federal para excluir do monopólio da União a produção, a comercialização e a utilização de radioisótopos de meia-vida curta, para usos médicos, agrícolas e industriais. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 9 fev. 2006. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc49.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc49.htm). Acesso em: 26 mar. 2026.

BRASIL. **Emenda Constitucional 118, de 26 de abril de 2022**. Dá nova redação às alíneas "b" e "c" do inciso XXIII do caput do art. 21 da Constituição Federal, para autorizar a produção, a comercialização e a utilização de radioisótopos para pesquisa e uso médicos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, ano 159, n. 78, p. 1, 27 abr. 2022. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/constituicao/emendas/emc/emc118.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/emendas/emc/emc118.htm). Acesso em: 26 mar. 2026.

BRASIL. **Lei 4.118, de 27 de agosto de 1962**. Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da

República, 1962. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/14118.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/14118.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. **Lei 6.189, de 16 de dezembro de 1974**. Altera a Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962, e a Lei nº 5.740, de 1 de dezembro de 1971, que criaram, respectivamente, a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN e a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear - CBTN, que passa a denominar-se Empresas Nucleares Brasileiras Sociedade Anônima - NUCLEBRÁS, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 17 dez. 1974. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6189.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6189.htm). Acesso em: 26 mar. 2026.

BRASIL. **Lei 6.453, de 17 de outubro de 1977**. Dispõe sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados com atividades nucleares e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 18 out. 1977. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/l6453.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6453.htm). Acesso em: 26 mar. 2026.

BRASIL. **Lei 10.308, de 20 de novembro de 2001**. Dispõe sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2001. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/leis\\_2001/l10308.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10308.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. **Lei 14.222, de 18 de outubro de 2021**. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN); altera as Leis nos 4.118, de 27 de agosto de 1962, 6.189, de 16 de dezembro de 1974, 6.453, de 17 de outubro de 1977, 9.765, de 17 de dezembro de 1998, 8.691, de 28 de julho de 1993, e 10.308, de 20 de novembro de 2001; e revoga a Lei nº 13.976, de 7 de janeiro de 2020. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2021/lei/L14222.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14222.htm). Acesso em: 19 mar. 2026.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Resolução CNEN 148, de 20 de março de 2013**. Dispõe sobre o rastreamento de veículos de transporte de materiais radioativos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 2, 25 mar. 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo5/ansn-5-04-rastreamento-de-veiculos-de-transporte-de-materiais-radioativos.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

CARREIRO, Ana Caroline Blanco *et al.* Avaliação do conhecimento sobre radiação ionizante em métodos de imagem em uma população não médica. **Revista de Medicina**, São Paulo, v. 101, n. 2, p. e-188655, 2022. DOI: 10.11606/issn.1679-9836.v101i2e-188655. Disponível em: <https://revistas.usp.br/revistadc/article/view/188655>. Acesso em: 19 mar. 2026.

CHEN, Michael. **Blockchain para cadeia de suprimentos: usos e benefícios**. [S. l.]: Oracle, 2024. Disponível em: <https://www.oracle.com/br/blockchain/what-is-blockchain/blockchain-for-supply-chain>. Acesso em: 19 mar. 2026.

CHIEN, William *et al.* The last mile: DSCSA solution through blockchain technology – drug tracking, tracing, and verification at the last mile of the pharmaceutical supply chain with BRUINchain. **Blockchain in Healthcare Today**, [S. l.], v. 3, p. e134, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.30953/bhty.v3.134>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9907423/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-2.05: Proteção Física no Transporte de Materiais Nucleares e Outros Materiais Radioativos**. Resolução CNEN 262, de 22 de dezembro de 2022. Rio de Janeiro: CNEN, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-2/ansn-2-05-protecao-fisica-no-transporte-de-materiais-nucleares-e-outros-materiais-radioativos.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-3.01: Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação**. Resolução CNEN 264, de 22 de dezembro de 2022. Rio de Janeiro: CNEN, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/ansn-3-01-requisitos-basicos-de-radioprotecao-e-seguranca-radiologica-de-fontes-de-radiacao.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-5.01: Regulamento para o Transporte Seguro de Materiais Radioativos**. Resolução CNEN 115, de 26 de junho de 2013. Rio de Janeiro: CNEN, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo5/ansn-5-01-regulamento-para-o-transporte-seguro-de-materiais-radioativos.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-5.04: Rastreamento de Veículos de Transporte de Materiais Radioativos**. Resolução CNEN 148, de 25 de março de 2013. Rio de Janeiro: CNEN, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo5/ansn-5-04-rastreamento-de-veiculos-de-transporte-de-materiais-radioativos.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **CNEN-NN-6.02: Licenciamento de Instalações Radiativas**. Resolução CNEN 247, de 25 de novembro de 2021. Rio de Janeiro: CNEN, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-6/ansn-6-02-licenciamento-de-instalacoes-radiativas.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**. Rio de Janeiro: CNEN/DRS/DISEN, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/glossario/glossario-do-setor-nuclear-e-radiologico-brasileiro.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Grupo 3 – proteção radiológica**. Brasília, DF: CNEN, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo-3-protecao-radiologica>. Acesso em: 26 mar. 2026.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Produção de radiofármacos**. Brasília: CNEN, 2022. Atualizado em: 19 jul. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/assunto/pesquisa-desenvolvimento-e-ensino-na-area-nuclear/producao-de-radiofarmacos>. Acesso em: 19 mar. 2026.

DAI, Yi; LU, Gehao; HUANG, Yijun. A blockchain-based access control system for secure and efficient hazardous material supply chains. **Mathematics**, v. 12, n. 17, p. 2702, 2024. DOI: 10.3390/math12172702. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math12172702>. Acesso em: 31 mar. 2026.

DAMONA. **Leveraging blockchain in nuclear security: enhancing transparency and efficiency**. [S. l.]: Damona, 2025. Disponível em: <https://www.damona.co/leveraging-blockchain-in-nuclear-security-enhancing-transparency-and-efficiency/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ECEMIS, Irem Nur *et al.* Exploring blockchain for nuclear material tracking: a scoping review and innovative model proposal. **Energies**, v. 17, n. 12, p. 3028, 2024. DOI: 10.3390/en17123028. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17123028>. Acesso em: 31 mar. 2026.

EKINCI, Fatih *et al.* Exploring blockchain for nuclear material tracking: a scoping review and innovative model proposal. **Energies**, Basel, v. 17, n. 12, p. 3028, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/en17123028>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/12/3028>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ELGHAISH, Faris *et al.* Developing a digitized maintenance supply chain system for sensitive assets using “blockchain of things”. In: ELGHAISH, Faris *et al.* (ed.). **Digitalization in construction**. 1. ed. Londres: Routledge, 2023. cap. 14. DOI: 10.1201/9781003408949-14. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003408949-14/developing-digitized-maintenance-supply-chain-system-sensitive-assets-using-blockchain-things-faris-elghaish-farзад-pour-rahimian-nashwan-dawood>. Acesso em: 19 mar. 2026.

EURICO, Isaiás Chico Nambissi. **Estratégias de monitorização de tráfego em cidades inteligentes**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Informática) – Universidade do Minho, Braga, 2023. Disponível em: <https://repositorium.uminho.pt/handle/1822/92640>. Acesso em: 26 mar. 2026.

FEITOSA, Caroline Maia *et al.* Métodos de diagnóstico por imagem: princípios básicos. In: SOUZA, Juliana Cristina Martins de *et al.* (org.). **Pesquisas e abordagens educativas em ciências da saúde**. 5. ed. [S. l.]: Amplla Editora, 2023. v. 5. DOI: 10.51859/amplla.pae3248-32. Disponível em: <https://ampllaeditora.com.br/books/2023/07/PesquisasCienciasSaude.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

FERNANDES, Eduardo David Lima. **Uso de radioisótopos na medicina nuclear: uma revisão de literatura**. 2022. 14 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Tecnologia em Radiologia) – Centro Universitário de Patos, Patos, 2022.

FERRÉ-QUERALT, Joan *et al.* Leveraging a smart grid framework for interoperability with a distributed ecosystem. In: SUÁREZ CORONA, Adriana (ed.). **XVIII Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información: XVIII RECSI, León 23-25 octubre 2024**. León: Universidad de León, Servicio de Publicaciones, 2025. p. 181–186. ISBN 978-84-19682-95-6. Disponível em: <https://openaccess.uoc.edu/server/api/core/bitstreams/2326ca6c-e0b4-42d6-b26a-ea611434997d/content>. Acesso em: 19 mar. 2026.

FIKRY, Refaat M. *et al.* Design of real-time tracking system for radioactive material transportation. **Menoufia Journal of Electronic Engineering Research**, Menoufia, v. 34, n. 2, p. 60–66, jul. 2025. Disponível em: [https://journals.ekb.eg/article\\_447146.html](https://journals.ekb.eg/article_447146.html). Acesso em: 26 mar. 2026.

FONTENELLE, Maria Elisa Monteiro. **Monitoramento de uma indústria com dispositivos IoT: estudo de caso em uma indústria farmacêutica**. 2024. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024.

FREITAS, Moisés José dos Santos. **Contribuições no desenvolvimento e validação de monitores de cintilação GPS: uma abordagem alternativa de baixo custo para uso em larga escala**. 2019. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia da Computação e Sistemas) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2019.

GLOBAL GPS SYSTEMS. **How does a GPS receiver determine the distance between you and the satellites?** [S. l.], 2023. Disponível em: <https://globalgpsystems.com/gnss/how-does-a-gps-receiver-determine-the-distance-between-you-and-the-satellites/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

GLOBALWELL PCBA. **Tipos de placas Arduino**. [S. l.]: Globalwell PCBA, 2025. Disponível em: <https://www.globalwellpcb.com/pt/tipos-de-placas-arduino/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

GRECCO, Cláudio Henrique dos Santos. **Avaliação da resiliência em organizações que lidam com tecnologias perigosas: o caso da expedição de radiofármacos**. 2012. 154 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GUSE, Rosana. **Comparativo Arduino Uno R4 e Raspberry Pi Pico**. MakerHero, 5 abr. 2023. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/comparativo-arduino-uno-r4-e-raspberry-pi-pico/>. Acesso em: 13 maio 2026.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. **Como é feito o transporte do combustível de Resende até as usinas de Angra?** Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Contato/Perguntas-Frequentes/Pergunta/Conteudo/como-o-combustivel-e-levado-as-usinas-de-angra>. Acesso em: 26 mar. 2026.

INFANTE CÁMARA, Marina. **Implementation and test of an electronic system for satellite communication**. 2025. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Física) – Universidad de Sevilla, Seville, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11441/178165>. Acesso em: 19 mar. 2026.

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR. **Acelerador de partículas Cíclotron CV-28**. Rio de Janeiro: IEN, 2021. Publicado em 10 nov. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ien/pt-br/instalacoes/acelerador-de-particulas-ciclotron-cv-28>. Acesso em: 19 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Code of Conduct on the Safety and Security of Radioactive Sources**. Vienna: IAEA, 2004. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/code-2004\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/code-2004_web.pdf). Acesso em: 19 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Increasing radiopharmaceutical production with cyclotrons**. Viena: IAEA, 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/increasing-radiopharmaceutical-production-with-cyclotrons>. Acesso em: 19 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Model Protocol Additional to the Agreement(s) between State(s) and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards**. Vienna: IAEA, 1997. (INFCIRC/540 (Corrected)). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/model-protocol-additional-agreements-between-states-and-international-atomic-energy-agency-application-safeguards>. Acesso em: 26 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Regulations for the safe transport of radioactive material: 2018 edition**. Vienna: IAEA, 2018. (IAEA Safety Standards Series, n. SSR-6 (Rev. 1)). STI/PUB/1798. DOI: 10.61092/iaea.ur52-my9o. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1798_web.pdf). Acesso em: 19 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Security of radioactive material in transport**. Vienna: IAEA, 2020. (IAEA Nuclear Security Series, n. 9-G (Rev. 1)). Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1872\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1872_web.pdf). Acesso em: 26 mar. 2026.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **What are radiopharmaceuticals?** Viena: IAEA, 2025. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-radiopharmaceuticals>. Acesso em: 19 mar. 2026.

JAIME, G. D. G.; JESUS, E. A. de; PEREIRA, C. M. N. A. On the exploitation of human and technological vulnerabilities in the nuclear sector: a case study at a research institute. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE - INAC, 2024, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Escola de Guerra Naval, 2024. p. 1-4.

JAKUBIAK, Raisa Requi. **Evaluation of a PIN diode-based ionizing radiation detection system for controlling orphan sources**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Biomédica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020.

JAVED, Adeel. **Criando projetos com Arduino para a Internet das Coisas**. Tradução de Cláudio José Adas. São Paulo: Novatec, 2017. 280 p.

JIA, Leigang; SHAO, Bilin; BIAN, Genqing. Cross-chain technology of consortium blockchain based on identity authentication. **Electronics**, Basel, v. 14, n. 6, p. 1185, 2025. DOI: 10.3390/electronics14061185. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/6/1185>. Acesso em: 19 mar. 2026.

JING, S. P. *et al.* Blockchain-based multimodal transport of spent nuclear fuel: application of data trusted certification and tamper-resistant technology based on domestic consortium blockchain and national cryptographic algorithms. **Journal of Integration Technology**, v. 14, n. 5, p. 44–58, 2025. DOI: 10.12146/j.issn.2095-3135.20250518001. Disponível em: <https://doi.org/10.12146/j.issn.2095-3135.20250518001>. Acesso em: 31 mar. 2026.

LOLI, Gabriel Bristot. **Certificação digital em dispositivos da internet das coisas**. 2024. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/262193>. Acesso em: 19 mar. 2026.

LUCCA, Alexandre Alberto. **A potencial contribuição da blockchain para a redução dos problemas de demanda enfrentados pelas indústrias farmacêuticas brasileiras sob a ótica do compartilhamento de informações contábeis**. 2022. Dissertação (Mestrado em Controladoria e Contabilidade) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2022. DOI: 10.11606/D.96.2022.tde-12122022-101341. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/96/96133/tde-12122022-101341/>. Acesso em: 26 mar. 2026.

MAKERHERO. **O que é Arduino?** [S. l.]: MakerHero, 2014. Disponível em: <https://www.makerhero.com/blog/o-que-e-arduino>. Acesso em: 19 mar. 2026.

NAKAMOTO, Satoshi. **Bitcoin: a peer-to-peer electronic cash system**. 31 out. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

NORWEGIAN UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY. Why GPS fails in cities. And how it was brilliantly fixed. **ScienceDaily**, 10 out. 2025. Disponível em: <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/10/251009033124.htm>. Acesso em: 19 mar. 2026.

NWANKWO, Odinachi Udemezuo *et al.* Blockchain private key storage system for IoT device. **The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences**, Seul, v. 50, n. 2, p. 378–390, fev. 2025. DOI: 10.7840/kics.2025.50.2.378. Disponível em: <https://journal.kics.or.kr/digital-library/102042>. Acesso em: 19 mar. 2026.

OFFICE FOR NUCLEAR REGULATION (Reino Unido). **Key regulatory considerations for the application of blockchain technology in the nuclear sector**. [S. l.]: ONR, 2023. Disponível em: <https://www.onr.org.uk/our-expertise/innovation/key-regulatory-considerations-for-the-application-of-blockchain-technology-in-the-nuclear-sector>. Acesso em: 19 mar. 2026.

OLIVEIRA, Sérgio de. **Internet das Coisas com ESP8266, Arduino e Raspberry Pi: atualizado para ESP32**. 2. ed. [São Paulo]: Novatec, 2021.

OLIVEIRA NETO, Raimundo Leite de. **Implementação de blockchain privada para registro e gerenciamento de logs em sistemas de controle de acesso**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Privacidade e Segurança da Informação) – Faculdade

de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2025. Disponível em: <https://ppee.unb.br/wp-content/uploads/2025/12/Artigo-1-2.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PARLAMENTO EUROPEU; CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2011/62/EU do Parlamento Europeu e do Conselho, de 8 de junho de 2011**: que altera a Diretiva 2001/83/CE que estabelece um código comunitário relativo aos medicamentos para uso humano, no que se refere à prevenção da introdução de medicamentos falsificados na cadeia de abastecimento legal. **Jornal Oficial da União Europeia**, L 174, p. 74–87, 1 jul. 2011. Disponível em: <https://www.wipo.int/wipolex/en/legislation/details/20196>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PARVATHY, S. *et al.* Blockchain-integrated drug tracking system with IoT-enabled containers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART SYSTEMS AND ADVANCED COMPUTING, 2025, Virudhunagar. **Anais**. Virudhunagar: IEEE, 2025. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11052983>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PARTHIBIAN, K. G. *et al.* Blockchain & IoT based drugs traceability for pharma industry. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART SYSTEMS AND ADVANCED COMPUTING, 2021, Cardiff. **Anais**. Cardiff: IEEE, 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9570251>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PAVLENKO, Valeria A.; PETROV, Pavel V. Blockchain technology application features for solving FEC-related problems. **European Proceedings of Social and Behavioural Sciences**, [S. l.], v. 96, p. 483–490, 7 dez. 2020. International Conference Trends and Innovations in Economic Studies, Science on Baikal Session. DOI: 10.15405/epsbs.2020.12.63. Disponível em: <https://doi.org/10.15405/epsbs.2020.12.63>. Acesso em: 26 mar. 2026.

PEREIRA, Lucas Boaventura. **Integração GPS/INS baseada em filtro de Kalman para navegação**. 2022. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/35016>. Acesso em: 19 mar. 2026.

PETERSON, Larry L.; DAVIE, Bruce S. **Redes de computadores: uma abordagem de sistemas**. 5. ed. Tradução de Multinet Produtos. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

POLETO FILHO, Olavo; FRANCISCO, Eduardo de Rezende. Controle de medicamentos em farmácias hospitalares com Internet das Coisas. **Revista Foco**, [S. l.], v. 16, n. 3, e1355, 2023. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n3-082. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/1355>. Acesso em: 19 mar. 2026.

POUDEL, S. *et al.* A blockchain-based secure and transparent global radioactive source lifecycle management system. In: SOUTHEASTCON 2025, Concord, NC, USA, 2025. **Anais [...]**. Concord: IEEE, 2025. p. 595–600. DOI: 10.1109/SoutheastCon56624.2025.10971666. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SoutheastCon56624.2025.10971666>. Acesso em: 31 mar. 2026.

PTILLISCH. Arduino IDE 2.3.7 is now available. **Arduino Forum**, 18 dez. 2025. Disponível em: <https://forum.arduino.cc/t/arduino-ide-2-3-7-is-now-available/1420420>. Acesso em: 31 mar. 2026.

PTILLISCH. Arduino IDE 2.3.8 is now available. **Arduino Forum**, 26 fev. 2026. Disponível em: <https://forum.arduino.cc/t/arduino-ide-2-3-8-is-now-available/1432717>. Acesso em: 31 mar. 2026.

RASPBERRY PI LTD. **Raspberry Pi for industry**. [S. l.], s.d. Disponível em: <https://www.raspberrypi.com/for-industry/>. Acesso em: 13 maio 2026.

REVISTA PESQUISA FAPESP. **Flúor-18 garante uso de tomógrafo**. São Paulo: FAPESP, 2000. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/fluor-18-garante-uso-de-tomografo/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

RODERS, Arthur Fellipe. **Sistema de rastreamento via GPS para frotas**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau, Blumenau, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/256014>. Acesso em: 26 mar. 2026.

ROSA, Alan Franco; TEIXEIRA, David Vaz; JÚNIOR, Nilton Alves. Comunicações seguras entre dispositivos IoT utilizando o ESP32. **Notas Técnicas**, Rio de Janeiro, v. 11, n. 1, p. 1–6, 2022. Disponível em: <https://revistas.cbpf.br/index.php/NT/article/view/145>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SANTOS, Carlos *et al.* **Modelo de eficiência para o processo logístico de transporte de fármacos no Brasil**. 2022. 150 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) – Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, São Paulo, 2022. Disponível em: <http://repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/592>. Acesso em: 26 mar. 2026.

SANTOS, Pedro Maciel Rodrigues dos. **Projeto de segurança física em uma instalação nuclear brasileira**. 2019. 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: [https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9144/1/Disserta%C3%A7%C3%A3oPedroMaciel\\_v11.pdf](https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9144/1/Disserta%C3%A7%C3%A3oPedroMaciel_v11.pdf). Acesso em: 26 mar. 2026.

SANTOS-OLIVEIRA, Ralph *et al.* Radiofármacos, radiofarmácia e medicina nuclear. **Infarma**, [S. l.], v. 21, n. 9/10, p. 3–6, 2009. Disponível em: <https://ninho.inca.gov.br/jspui/bitstream/123456789/8599/1/Radiof%C3%A1rmacos%2C%20Radiofarm%C3%A1cia%20e%20Medicina%20Nuclear.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SILVA, Degemar Pereira da. **Esquema de autenticação e acordo de chaves para Internet das Coisas utilizando o protocolo MQTT**. 2022. 81 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia da Informação) – Instituto Metrópole Digital, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/52377>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SILVA, Diego de Almeida; GODOI, Jonatã Rodrigues; SANTOS, Zenia da Silva. **Transporte de materiais radioativos e nucleares**. 2021. 31 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Logística) – Faculdade de Tecnologia de Jundiá “Deputado Ary Fossen”, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Jundiá, 2021. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/5496>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SILVA, Joel de Sousa. **Uma avaliação comparativa entre mecanismos de autenticação para dispositivos Internet of Things (IoT) com baixo poder computacional na Indústria 4.0**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Sistemas de Informação) – Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80086>. Acesso em: 25 mar. 2026.

SILVA, Tammyse Araújo; MORAIS, Otávio; MONTEIRO, Raul Francé. A complexidade do transporte aéreo de medicamentos no Brasil: desafios regulamentares e documentais. **Revista Brasileira de Aviação Civil & Ciências Aeronáuticas**, Florianópolis, v. 5, n. 5, p. 8–33, dez. 2025. Disponível em: <https://rbaccia.emnuvens.com.br/revista/article/view/362>. Acesso em: 19 mar. 2026.

SIMCOM. **SIM808 hardware design V1.00**. Shanghai: SIMCom Wireless Solutions, 2014. Disponível em: [https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SIM808\\_Hardware+Design\\_V1.00.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SIM808_Hardware+Design_V1.00.pdf). Acesso em: 26 mar. 2026.

SIMCOM. **SIM808 hardware design V1.02**. [S. l.]: SIMCom, 2015. Disponível em: [https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2637/SIM808\\_Hardware+Design\\_V1.02.pdf](https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/2637/SIM808_Hardware+Design_V1.02.pdf). Acesso em: 19 mar. 2026.

SOARES DE ALEXANDRIA, João Carlos. **Gestão da segurança da informação: uma proposta para potencializar a efetividade da segurança da informação em ambiente de pesquisa científica**. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear – Aplicações) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em: [https://quoniam.info/competitive-intelligence/PDF/PhDs\\_Guidance/PhD\\_Joao\\_Carlos\\_Soares\\_De\\_Alexandria.pdf](https://quoniam.info/competitive-intelligence/PDF/PhDs_Guidance/PhD_Joao_Carlos_Soares_De_Alexandria.pdf). Acesso em: 19 mar. 2026.

SOUZA, Kéilton Silva de. **Validação de um monitor GPS de baixo custo para monitoramento de sinais de satélites na Banda L1**. 2022. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia, 2022.

SUSNAJRA, Stephanie; SMALLEY, Ian. **O que é blockchain?** [S. l.]: IBM, 2021. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/blockchain>. Acesso em: 19 mar. 2026.

TAVARES, Renato Luiz Alves. **Projeto e avaliação do sistema de proteção física de uma instalação nuclear**. 2018. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Nuclear) – Departamento de Ciência e Tecnologia, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://bdex.eb.mil.br/jspui/bitstream/123456789/9136/1/Mestrado%20-%20RENATO%20LUIZ%20ALVES%20TAVARES.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2026.

TEIXEIRA, Eduardo Salek. **Segurança nuclear: prevenção contra atos terroristas**. 2014. Monografia (Especialização em Altos Estudos de Política e Estratégia) – Escola Superior de Guerra, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <https://repositorio.esg.br/handle/123456789/1353>. Acesso em: 19 mar. 2026.

TSUKADA, Robert Hiroyuki; SANTOS, Vinicius Reges dos; SOUZA, Wellington de. **Dispositivo auxiliar de emergência**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Eletrônica Industrial) – Faculdade de Tecnologia de São Paulo, São Paulo, 2023.

U-BLOX AG. **NEO-6 u-blox 6 GPS modules data sheet**. [S. l.]: u-blox, 2011. (Document number: GPS.G6-HW-09005-E). Disponível em: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6\\_DataSheet\\_\(GPS.G6-HW-09005\).pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/products/documents/NEO-6_DataSheet_(GPS.G6-HW-09005).pdf). Acesso em: 26 mar. 2026.

USINAINFO. **Shields para Arduino**. [S. l.]: Usinainfo, 2026. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/shields-para-arduino-380>. Acesso em: 19 mar. 2026.

VICTORIA AND ALBERT MUSEUM. **Prototyping board: Arduino**. Londres: V&A, 2016. (Accession number: CD.100:1-2016). Disponível em: <https://collections.vam.ac.uk/item/O1360514/prototyping-board-arduino/>. Acesso em: 19 mar. 2026.

WANG, Yizhe *et al.* Towards achieving transparent and secure nuclear fuel transportation: a technical framework integrating consortium blockchain and IoT. **Blockchains**, Basel, v. 3, n. 4, p. 13, 2025. DOI: 10.3390/blockchains3040013. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2813-5288/3/4/13>. Acesso em: 19 mar. 2026.

ZHOU, Sisi *et al.* A systematic review of consensus mechanisms in blockchain. **Mathematics**, Basel, v. 11, n. 10, p. 2248, 2023. DOI: 10.3390/math11102248. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-7390/11/10/2248>. Acesso em: 19 mar. 2026.



APÊNDICES

## APÊNDICE 1

## Código-Fonte de Teste do Módulo SIM808

```

#define SIM808    Serial1

#define BAUD_SIM  9600

#define BAUD_USB  9600

bool gpsLigado = false;

// — Envia comando AT e aguarda resposta —————
String enviarAT(const char* cmd, unsigned long timeout = 2000) {
    SIM808.println(cmd);
    String resp = "";
    unsigned long t = millis();
    while (millis() - t < timeout) {
        while (SIM808.available()) {
            resp += (char)SIM808.read();
            t = millis(); // reinicia o timer a cada byte
        }
        delay(1);
    }
    resp.trim();
    return resp;
}

// — Exibe o menu —————
void exhibirMenu() {
    Serial.println();
    Serial.println("┌──────────────────────────────────┐");
    Serial.println("│           MENU — TESTE GPS           │");
    Serial.println("└──────────────────────────────────┘");
    Serial.println("│ 1 → Testar comunicação (AT)         │");
    Serial.println("│ 2 → Ligar GPS                       │");
    Serial.println("│ 3 → Desligar GPS                    │");
    Serial.println("│ 4 → Status do satélite              │");
}

```

```

Serial.println("|| 5 → Ler coordenadas (SCAN) ||");
Serial.println("|| 6 → Resposta bruta (RAW) ||");
Serial.println("|| 0 → Exibir menu novamente ||");
Serial.println("┌───────────────────────────────────────────┐");
Serial.print("Opção: ");
}

// — Setup —————
void setup() {
  Serial.begin(BAUD_USB);
  while (!Serial && millis() < 3000);

  Serial.println("\n┌───────────────────────────────────────────┐");
  Serial.println("|| TESTE GPS — SIM808 ||");
  Serial.println("└───────────────────────────────────────────┘");
  SIM808.begin(BAUD_SIM);
  delay(500);
  Serial.print("\nVerificando SIM808");
  bool ok = false;
  for (int i = 0; i < 5; i++) {
    String r = enviarAT("AT", 1200);
    if (r.indexOf("OK") >= 0) { ok = true; break; }
    Serial.print(".");
    delay(300);
  }

  Serial.println(ok ? " OK!" : "\n⚠ SIM808 sem resposta. Verifique pinos e
alimentação.");
  exibirMenu();
}

// — Loop —————
void loop() {
  if (!Serial.available()) return;
  String entrada = Serial.readStringUntil('\n');
  entrada.trim();
  int opcao = entrada.toInt();
  Serial.println(opcao);
  Serial.println();
}

```

```

switch (opcao) {

case 1: {
    Serial.println("[1] Testando comunicação com o SIM808...");
    String r = enviarAT("AT");
    Serial.println(r.indexOf("OK") >= 0
        ? "✓ SIM808 respondeu OK."
        : "✗ Sem resposta. Verifique fiação e alimentação.");
    break;
}

case 2: {
    Serial.println("[2] Ligando receptor GPS...");
    if (gpsLigado) { Serial.println("i GPS já estava ligado."); break; }
    String r = enviarAT("AT+CGPSPWR=1", 2000);
    if (r.indexOf("OK") >= 0) {
        gpsLigado = true;
        Serial.println("✓ GPS ligado. Aguarde o fix (opção 4).");
    } else {
        Serial.println("✗ Falha. Resposta: " + r);
    }
    break;
}

case 3: {
    Serial.println("[3] Desligando receptor GPS...");
    if (!gpsLigado) { Serial.println("i GPS já estava desligado."); break; }
    String r = enviarAT("AT+CGPSPWR=0", 1500);
    if (r.indexOf("OK") >= 0) {
        gpsLigado = false;
        Serial.println("✓ GPS desligado.");
    } else {
        Serial.println("✗ Falha. Resposta: " + r);
    }
    break;
}
}

```

```

}

case 4: {
    Serial.println("[4] Status do satélite:");
    Serial.println("  GPS: " + String(gpsLigado ? "LIGADO" : "DESLIGADO"));
    String r = enviarAT("AT+CGPSSTATUS?", 1500);
    Serial.print("  Satélite: ");
    if      (r.indexOf("3D Fix")           >= 0) Serial.println("3D Fix ✓");
    else if (r.indexOf("2D Fix")           >= 0) Serial.println("2D Fix ✓");
    else if (r.indexOf("Location Unknown") >= 0) Serial.println("Aguardando
fix...");
    else if (r.indexOf("GPS Off")          >= 0) Serial.println("GPS
desligado");
    else                                     Serial.println("Sem sinal");
    break;
}

case 5: {
    Serial.println("[5] Lendo coordenadas...");
    if (!gpsLigado) {
        Serial.println("⚠ GPS desligado. Use a opção 2 primeiro.");
        break;
    }
    String resp = enviarAT("AT+CGPSINF=0", 2000);
    int idx = resp.indexOf("+CGPSINF: 0,");
    if (idx < 0) {
        Serial.println("X Sem fix ainda. Use a opção 4 para acompanhar.");
        break;
    }
    String linha = resp.substring(idx);
    int c[8]; c[0] = linha.indexOf(',');
    bool ok = true;
    for (int i = 1; i < 8; i++) {
        c[i] = linha.indexOf(',', c[i-1]+1);
        if (c[i] < 0) { ok = false; break; }
    }
    if (!ok) { Serial.println("X Erro de parsing. Use opção 6."); break; }
}

```

```

float rLat = linha.substring(c[0]+1, c[1]).toFloat();
float rLon = linha.substring(c[1]+1, c[2]).toFloat();
float alt = linha.substring(c[2]+1, c[3]).toFloat();
float vel = linha.substring(c[6]+1, c[7]).toFloat() * 1.852f;
String dt = linha.substring(c[3]+1, c[4]);
if (rLat == 0.0f && rLon == 0.0f) {
    Serial.println("X Coordenadas zeradas - fix não estabelecido.");
    break;
}
int dLat = (int)(rLat/100);
float lat = dLat + (rLat - dLat*100.0f)/60.0f;
int dLon = (int)(rLon/100);
float lon = dLon + (rLon - dLon*100.0f)/60.0f;
if (lat > 0) lat = -lat;
if (lon > 0) lon = -lon;
Serial.println("✓ Fix obtido!");
Serial.println(" | _____");
Serial.print(" | Latitude : "); Serial.println(lat, 6);
Serial.print(" | Longitude : "); Serial.println(lon, 6);
Serial.print(" | Altitude : "); Serial.print(alt,1); Serial.println("
m");
Serial.print(" | Velocidade: "); Serial.print(vel,1); Serial.println("
km/h");
Serial.print(" | Data/Hora : "); Serial.println(dt);
Serial.println(" | _____");
Serial.print(" | Maps: https://maps.google.com/?q=");
Serial.print(lat,6); Serial.print(","); Serial.println(lon,6);
Serial.println(" | _____");
break;
}

case 6: {
    Serial.println("[6] Resposta bruta AT+CGPSINF=0:");
    Serial.println(" | _____");
    String r = enviarAT("AT+CGPSINF=0", 2000);
    int s = 0;
    while (s < (int)r.length()) {

```

```
int nl = r.indexOf('\n', s);
if (nl < 0) nl = r.length();
String ln = r.substring(s, nl); ln.trim();
if (ln.length()) { Serial.print(" | "); Serial.println(ln); }
s = nl + 1;
}
Serial.println("  _____");
break;
}

case 0: break;

default:
    if (entrada.length() > 0)
        Serial.println("⚠ Opção inválida: \"" + entrada + "\"");
    break;
}
exibirMenu();
}
```

## APÊNDICE 2

## Solução de Problemas Comuns

Sintoma	Causa	Solução
SIM808 não responde ao AT	Fiação incorreta nos pinos TX/RX ou problema na velocidade serial	TX do SIM808 no pino 0 e RX do SIM808 no pino 1, verificar a Baud Rate de 9600bps
GPS ligado e sem fix após 5 minutos	Problema ou ausência da antena do GPS	Verificar o conector IPEX do SIM808 e posicionar a antena em área aberta
Arduino reinicia ao ligar o GPS	Pico de corrente do SIM808 excedendo a capacidade de alimentação	Verificar se a fonte de alimentação possui 2 <sup>a</sup>
Coordenadas no hemisfério incorreto	Conversão de sinal não aplicada	Verificar o ajuste de negação da latitude e longitude
Velocidade do deslocamento absurda	Índice incorreto no parsing do CGPSINF	Confirmar o índice 7 para a extração da velocidade

Quadro 3: Principais Problemas da Ferramenta Tecnológica

## APÊNDICE 3

## Primeiro Log de Teste – 26/03/2026

Nº	Data / Hora	Latitude	Longitude	Altitude	Velocidade	Google Maps
1	26/03/2026 09:22:08	-22.864307	-43.225441	52.3 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864307,-43.225441">https://maps.google.com/?q=-22.864307,-43.225441</a>
2	26/03/2026 09:22:23	-22.864294	-43.225422	53.1 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864294,-43.225422">https://maps.google.com/?q=-22.864294,-43.225422</a>
3	26/03/2026 09:22:29	-22.864294	-43.225414	53.1 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864294,-43.225414">https://maps.google.com/?q=-22.864294,-43.225414</a>
4	26/03/2026 09:22:41	-22.864290	-43.225414	53.2 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864290,-43.225414">https://maps.google.com/?q=-22.864290,-43.225414</a>
5	26/03/2026 09:23:01	-22.864286	-43.225414	53.3 m	0.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864286,-43.225414">https://maps.google.com/?q=-22.864286,-43.225414</a>
6	26/03/2026 09:23:03	-22.864286	-43.225422	53.3 m	0.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864286,-43.225422">https://maps.google.com/?q=-22.864286,-43.225422</a>
7	26/03/2026 09:23:11	-22.864283	-43.225422	53.3 m	0.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864283,-43.225422">https://maps.google.com/?q=-22.864283,-43.225422</a>
8	26/03/2026 09:23:13	-22.864279	-43.225414	53.4 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864279,-43.225414">https://maps.google.com/?q=-22.864279,-43.225414</a>
9	26/03/2026 09:23:15	-22.864275	-43.225414	53.4 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864275,-43.225414">https://maps.google.com/?q=-22.864275,-43.225414</a>
10	26/03/2026 09:23:19	-22.864269	-43.225407	53.2 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864269,-43.225407">https://maps.google.com/?q=-22.864269,-43.225407</a>
11	26/03/2026 09:26:10	-22.864265	-43.225399	52.9 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864265,-43.225399">https://maps.google.com/?q=-22.864265,-43.225399</a>
12	26/03/2026 09:26:34	-22.864265	-43.225391	52.5 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864265,-43.225391">https://maps.google.com/?q=-22.864265,-43.225391</a>
13	26/03/2026 09:26:48	-22.864262	-43.225391	52.0 m	0.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225391">https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225391</a>
14	26/03/2026 09:26:50	-22.864262	-43.225384	52.2 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225384">https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225384</a>
15	26/03/2026 09:26:52	-22.864262	-43.225376	52.3 m	0.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225376">https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225376</a>
16	26/03/2026 09:26:54	-22.864262	-43.225384	52.4 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225384">https://maps.google.com/?q=-22.864262,-43.225384</a>
17	26/03/2026 09:26:56	-22.864258	-43.225384	52.4 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864258,-43.225384">https://maps.google.com/?q=-22.864258,-43.225384</a>
18	26/03/2026 09:27:02	-22.864254	-43.225384	52.6 m	0.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864254,-43.225384">https://maps.google.com/?q=-22.864254,-43.225384</a>

## Segundo Log de Teste - 31/03/2026

Nº	Data / Hora	Latitude	Longitude	Altitude	Velocidade	Google Maps
1	31/03/2026 09:20:40	-22.864201	-43.225449	89.4 m	1.2 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864201,-43.225449">https://maps.google.com/?q=-22.864201,-43.225449</a>
2	31/03/2026 09:20:42	-22.864197	-43.225449	89.4 m	0.8 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864197,-43.225449">https://maps.google.com/?q=-22.864197,-43.225449</a>
3	31/03/2026 09:20:51	-22.864197	-43.225456	89.3 m	0.4 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864197,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864197,-43.225456</a>
4	31/03/2026 09:21:10	-22.864189	-43.225456	89.0 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864189,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864189,-43.225456</a>
5	31/03/2026 09:21:12	-22.864176	-43.225456	88.5 m	0.5 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864176,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864176,-43.225456</a>
6	31/03/2026 09:21:14	-22.864168	-43.225456	88.1 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864168,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864168,-43.225456</a>
7	31/03/2026 09:21:16	-22.864161	-43.225456	87.7 m	0.9 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864161,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864161,-43.225456</a>
8	31/03/2026 09:21:18	-22.864153	-43.225456	87.5 m	0.8 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864153,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864153,-43.225456</a>
9	31/03/2026 09:21:20	-22.864140	-43.225456	87.1 m	1.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864140,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864140,-43.225456</a>
10	31/03/2026 09:21:22	-22.864124	-43.225464	86.6 m	1.3 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864124,-43.225464">https://maps.google.com/?q=-22.864124,-43.225464</a>
11	31/03/2026 09:21:24	-22.864119	-43.225464	86.6 m	1.5 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864119,-43.225464">https://maps.google.com/?q=-22.864119,-43.225464</a>
12	31/03/2026 09:21:26	-22.864115	-43.225456	86.6 m	0.9 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864115,-43.225456">https://maps.google.com/?q=-22.864115,-43.225456</a>
13	31/03/2026 09:21:28	-22.864111	-43.225464	86.6 m	0.7 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864111,-43.225464">https://maps.google.com/?q=-22.864111,-43.225464</a>
14	31/03/2026 09:21:36	-22.864100	-43.225471	85.5 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864100,-43.225471">https://maps.google.com/?q=-22.864100,-43.225471</a>
15	31/03/2026 09:21:40	-22.864096	-43.225471	85.4 m	0.4 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864096,-43.225471">https://maps.google.com/?q=-22.864096,-43.225471</a>
16	31/03/2026 09:21:54	-22.864096	-43.225479	85.2 m	0.4 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864096,-43.225479">https://maps.google.com/?q=-22.864096,-43.225479</a>
17	31/03/2026 09:22:00	-22.864100	-43.225479	85.2 m	0.3 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864100,-43.225479">https://maps.google.com/?q=-22.864100,-43.225479</a>
18	31/03/2026 09:22:04	-22.864103	-43.225479	85.2 m	0.9 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864103,-43.225479">https://maps.google.com/?q=-22.864103,-43.225479</a>

## Terceiro Log de Teste - 31/03/2026

Nº	Data / Hora	Latitude	Longitude	Altitude	Velocidade	Google Maps
1	31/03/2026 10:17:05	-22.865084	-43.225056	155.6 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.865084,-43.225056">https://maps.google.com/?q=-22.865084,-43.225056</a>
2	31/03/2026 10:17:46	-22.864918	-43.225140	155.6 m	0.2 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864918,-43.225140">https://maps.google.com/?q=-22.864918,-43.225140</a>
3	31/03/2026 10:17:48	-22.864918	-43.225132	155.6 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864918,-43.225132">https://maps.google.com/?q=-22.864918,-43.225132</a>
4	31/03/2026 10:17:50	-22.864922	-43.225121	155.5 m	0.6 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864922,-43.225121">https://maps.google.com/?q=-22.864922,-43.225121</a>
5	31/03/2026 10:17:52	-22.864912	-43.225121	155.5 m	0.8 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864912,-43.225121">https://maps.google.com/?q=-22.864912,-43.225121</a>
6	31/03/2026 10:17:54	-22.864922	-43.225113	155.5 m	1.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864922,-43.225113">https://maps.google.com/?q=-22.864922,-43.225113</a>
7	31/03/2026 10:17:56	-22.864908	-43.225113	155.5 m	1.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864908,-43.225113">https://maps.google.com/?q=-22.864908,-43.225113</a>
8	31/03/2026 10:17:58	-22.864904	-43.225113	155.5 m	1.1 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864904,-43.225113">https://maps.google.com/?q=-22.864904,-43.225113</a>
9	31/03/2026 10:18:00	-22.864901	-43.225113	155.5 m	0.2 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864901,-43.225113">https://maps.google.com/?q=-22.864901,-43.225113</a>
10	31/03/2026 10:18:02	-22.864897	-43.225121	155.5 m	0.7 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864897,-43.225121">https://maps.google.com/?q=-22.864897,-43.225121</a>
11	31/03/2026 10:18:04	-22.864893	-43.225121	155.5 m	0.4 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864893,-43.225121">https://maps.google.com/?q=-22.864893,-43.225121</a>
12	31/03/2026 10:18:06	-22.864893	-43.225132	155.5 m	0.8 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864893,-43.225132">https://maps.google.com/?q=-22.864893,-43.225132</a>
13	31/03/2026 10:18:10	-22.864889	-43.225140	155.5 m	1.0 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864889,-43.225140">https://maps.google.com/?q=-22.864889,-43.225140</a>
14	31/03/2026 10:18:12	-22.864885	-43.225140	155.5 m	0.7 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864885,-43.225140">https://maps.google.com/?q=-22.864885,-43.225140</a>
15	31/03/2026 10:18:14	-22.864880	-43.225147	155.5 m	0.8 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864880,-43.225147">https://maps.google.com/?q=-22.864880,-43.225147</a>
16	31/03/2026 10:18:16	-22.864876	-43.225147	155.5 m	0.7 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864876,-43.225147">https://maps.google.com/?q=-22.864876,-43.225147</a>
17	31/03/2026 10:18:20	-22.864868	-43.225147	155.5 m	1.2 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864868,-43.225147">https://maps.google.com/?q=-22.864868,-43.225147</a>
18	31/03/2026 10:18:23	-22.864861	-43.225147	155.5 m	1.3 km/h	<a href="https://maps.google.com/?q=-22.864861,-43.225147">https://maps.google.com/?q=-22.864861,-43.225147</a>