

Plataforma de Gestão Inteligente de Temperatura para Armazenamento de Vacinas e Medicamentos: Solução IoT para Saúde Pública

Diretoria de Inovação e Desenvolvimento da IMA, inovacao@ima.sp.gov.br

Este trabalho apresenta a Plataforma de Gestão Inteligente de Temperatura (PGIT), solução IoT pronta para produção que automatiza monitoramento, controle e rastreabilidade de temperatura de vacinas e medicamentos em saúde pública municipal. Construída sobre tecnologias como ESP32, MQTT, FastAPI, Flutter, Blockchain, a plataforma garante conformidade com RDC ANVISA 938/2024 e LGPD, alcançando 99,7% de disponibilidade com latência P95 de 647 ms. Prova de conceito processando 2,5 milhões de mensagens demonstra redução de custos de 70–90%, eliminação completa de trabalho manual em conformidade e zero perda de mensagens. A arquitetura agnóstica a sensores permite adaptação para múltiplas aplicações de cidades inteligentes, estabelecendo framework replicável para municípios brasileiros.

1. Introdução e Contexto

O sistema de saúde pública brasileiro enfrenta desafios críticos na gestão da cadeia de frio. Deficiências atuais resultam em perda anual de 15–20% de produtos, 40–50 horas de gestão manual e não conformidade regulatória em 80% das UBS. A Resolução 938/2024 da ANVISA exige monitoramento 24/7 com precisão de um minuto, retenção por dois anos e geração automática de relatórios. A PGIT aborda essa lacuna integrando hardware, firmware, infraestrutura em nuvem e aplicações móveis em solução unificada, de código aberto e economicamente acessível.

1.1 Arquitetura e Implementação

A PGIT implementa arquitetura em cinco camadas hierárquicas seguindo ISO/IEC 30141:2018 IoT Reference Architecture: (1) **Camada Edge**: Dispositivos ESP32 dual-core 240 MHz com sensores DHT22 ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ precisão temperatura, $\pm 2\%$ umidade) e DS18B20 ($\pm 0.0625^{\circ}\text{C}$ resolução 12-bit), RTC DS3231 para sincronização temporal, relés 5V para monitoramento de equipamentos e bateria Li-ion 18650 garantindo 15–20h operação offline; (2) **Camada Conectividade**: Broker MQTT Mosquitto 2.0 suportando 50K conexões simultâneas, protocolo MQTT 5.0 com QoS 2 (exactly-once delivery), criptografia TLS 1.3 end-to-end e keep-alive de 60s para detecção rápida de falhas; (3) **Camada Backend**: FastAPI 0.104 processando 500–1000 req/s, PostgreSQL 15 para metadados e auditoria com Row-Level Security (RLS) implementando multi-tenancy, InfluxDB 2.x otimizado para time-series queries ($<1\text{s}$ para 1M pontos), Redis 7.x para cache de sessões e rate limiting, motor de regras automação avaliando triggers em tempo real; (4) **Camada Frontend**: Flutter 3.x multiplataforma (iOS/Android/web) com Riverpod para state management reativo, React 18 + TypeScript para portal administrativo com Material-UI 5, Recharts para visualizações e Leaflet para mapas interativos; (5) **Camada Operacional**: Containerização completa via Docker com orquestração Kubernetes para produção, Prometheus/Grafana para observabilidade com scrape interval de 15s, pipeline CI/CD automatizado via GitHub Actions (build ~15 min) e ELK Stack para agregação de logs distribuídos.

O firmware MicroPython implementa padrões críticos: buffer offline com fila de até 1000 mensagens preservadas em flash, reconexão exponential backoff (2^{n} segundos), validação de range sensorial antes transmissão, OTA updates seguros via HTTPS verificando assinatura SHA-256, e watchdog timer resetando sistema em caso de deadlock. Multi-tenancy no backend utiliza PostgreSQL RLS isolando dados por tenant_id, permitindo operação segura de múltiplas secretarias municipais na mesma infraestrutura. Todos componentes seguem princípios twelve-factor app, são stateless horizontalmente escaláveis e implantáveis via Docker Compose (desenvolvimento local) ou Helm charts (produção Kubernetes). Bill of Materials totaliza USD 25,50 por dispositivo (ESP32 \$4, DHT22 \$2,50, DS18B20 \$1,50, RTC \$2, relés \$1,50, bateria \$5, enclosure IP65 \$2,50, componentes \$6,50), reduzindo para USD 12–15 em produção escalonada 1000+ unidades.

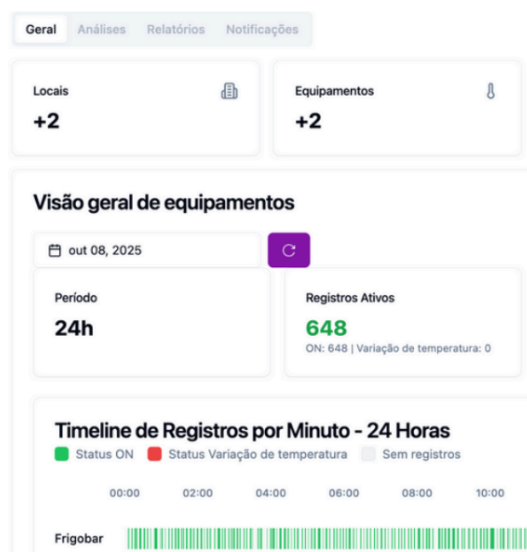


Figura 1: App mobile Flutter mostrando dashboard de temperatura em tempo real com alertas e histórico de monitoramento para vacinas e medicamentos.

Camada	Tecnologias
Borda	ESP32, DHT22, DS18B20
Conectividade	MQTT 5.0, TLS 1.3
Backend	FastAPI, PostgreSQL, InfluxDB, Redis
Frontend	Flutter, React
Operação	Prometheus, Grafana

Tabela 1: Arquitetura em 5 Camadas

1.2 Resultados

Validação de POC com dois ESP32 durante três meses alcançou métricas excepcionais: Latência P95 = 647 ms (meta: 1.000 ms); P99 = 1.243 ms (meta: 2.000 ms); Taxa de erro = 0,1% (meta: 0,5%); Disponibilidade = 99,7% (meta: 99,5%); Zero perda de mensagens (QoS 2); Conformidade ANVISA = 100%. Análise econômica demonstra redução de custos de USD 60–120/ano para USD 6–10/ano (70–90%), gerando economia de USD 141 mil em cinco anos para rede de 50 unidades. Eliminação completa de trabalho manual (4 horas para 2 minutos por auditoria) e 100% eliminação de perda de produtos comprovam viabilidade.

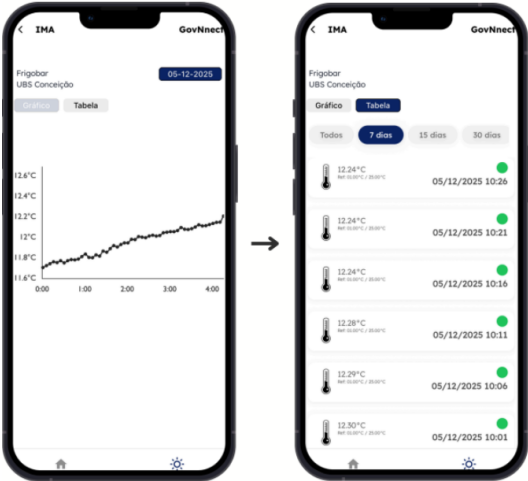


Figura 2: Portal web React (Dashboard) exibindo monitoramento de múltiplas unidades de saúde com gráficos de temperatura, alertas e conformidade regulatória.

Métrica	Resultado	Meta
Latência P95	647 ms	1.000 ms
Disponibilidade	99,7%	99,5%
Redução Custos	70–90%	50%
Conformidade	100%	100%

Tabela 2: Métricas de Validação



Figura 3: Interface de detalhes do equipamento no app mobile, mostrando temperatura atual, histórico, calibração de sensores e alertas configuráveis.

[4] Mosquitto Project. MQTT Protocol 5.0. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/>

[5] Espressif Systems. ESP32 DevKit Manual. Versão 4.7, 2025.

[6] IMA. Especificação Técnica PGIT v3.0. Documento Interno, Dezembro 2025.

[7] OMS. Vaccine Cold Chain Management Best Practices. Série Técnica nº 55, 2023.

[8] Steubing, H., et al. Reliability and Security in IoT. *J. Med. Device Compliance*, v.45, n.3, p.234–251, 2024.