REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

WASIONLINK: ARQUITETURA MODULAR DE COMUNICAÇÃO EMBARCADA PARA MEDIDORES INTELIGENTES COM COMPRESSÃO ADAPTATIVA, CONECTIVIDADE NTN E FALLBACK INTELIGENTE

WASIONLINK: A MODULAR EMBEDDED COMMUNICATION ARCHITECTURE FOR SMART METERS WITH ADAPTIVE COMPRESSION, NTN CONNECTIVITY, AND INTELLIGENT FALLBACK

WASIONLINK: ARQUITECTURA MODULAR DE COMUNICACIÓN EMBEBIDA PARA MEDIDORES INTELIGENTES CON COMPRESIÓN ADAPTATIVA, CONECTIVIDAD NTN Y CONMUTACIÓN INTELIGENTE

Gleison guardia
Doutorando em matemática aplicada à modelagem
Instituto Federal De Rondônia – Ifro, Brasil
E-mail: gleison.guardia@ifro.edu.br

Kelly vinente dos santos
Mestre em engenharia elétrica
Evolução Instituto De Ciência E Tecnologia, Brasil
E-mail: kelly.vinente@evolucaoinstituto.org.br

Alberto alexandre moura de albuquerque
Mestre em engenharia elétrica
Evolução Instituto De Ciência E Tecnologia, Brasil
E-mail: alberto.alexandre@evolucaoinstituto.org.br

Jamilly Cristina de Sousa
Mestranda em Propriedade Intelectual – PROFNIT
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: jamillycristina90@gmail.com

Brunna Conceição de Paulo
Acadêmica em Engenharia da Computação
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: brunnacdepaulo@gmail.com

Antônio Ébano Rafael Machado de Oliveira
Acadêmico em Engenharia de Mecatrônica
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: eebanorafael@gmail.com

Flávia Vitória Neves de Matos
Acadêmica em Internet das Coisas (IoT)
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: flavia.neves.dev@gmail.com

Mateus Souza e Silva
Acadêmico em Análise e Desenvolvimento de Sistemas
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: mateusouzaes@gmail.com

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Rogério Guerra Diógenes Filho
Mestrado em Engenharia de Telecomunicações
Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, Brasil
E-mail: rogerio.diogenes@evolucaoinstituto.org.br

Resumo

Medidores inteligentes implantados em regiões remotas da Amazônia Legal brasileira enfrentam uma lacuna crítica de conectividade: redes NB-IoT e LTE terrestres cobrem menos de 30% do território, enquanto os custos de comunicação via satélite convencional são proibitivos na escala de programas como o Mais Luz para a Amazônia (MLA). Este artigo apresenta o WasionLink, uma arquitetura modular de comunicação embarcada para medidores inteligentes WASION e inversores fotovoltaicos, desenvolvida para suprir essa lacuna por meio de quatro inovações integradas. Primeiro, um pipeline de compressão em dois estágios — pré-processamento de cabeçalho seguido de serialização Protocol Buffers (nanopb) e compressão LZ4 — que visa redução mínima de 70% no volume de dados transmitidos, estendendo o ganho de 68,08% previamente obtido com HEATSHRINK no mesmo microcontrolador STM32WBA. Segundo, um portfólio de hardware modular com três variantes: o aMeter NTN (medidor com modem satelital embarcado), a NIC USB (módulo para inversores solares) e a NIC LTE-450 MHz (placa para redes privadas de concessionárias). Terceiro, um motor de fallback inteligente implementado como máquina de estados reativa que seleciona autonomamente a tecnologia de acesso de rádio ótima entre Rede Não-Terrestre (NTN), NB-IoT terrestre e LTE-450 MHz. Quarto, um mecanismo FUOTA (Firmware Update Over-the-Air) com dimensionamento dinâmico de janela e retransmissão seletiva, adaptado para latências de até 600 ms típicas de satélites de Órbita Baixa (LEO). A arquitetura de firmware em quatro camadas independentes de hardware assegura que melhorias em qualquer componente se propaguem às três variantes por uma única campanha FUOTA. Um ensaio piloto em campo conduzido em dezembro de 2025, com 10 medidores WASION em rede NB-IoT real, validou parcialmente a arquitetura: a versão de firmware com compressão ativa (v4.1.6-6) reduziu o volume mediano de dados transmitidos em 20,8% e o tamanho mediano por sessão em aproximadamente 47% em comparação à versão sem compressão (v4.1.6-3). O resultado prático é a redução de 3,3× nos custos de transmissão NTN por medidor no contexto do Programa MLA.

Palavras-chave: medidor inteligente; NTN; compressão embarcada; FUOTA; multi-RAT.

Abstract

Smart meters deployed in the remote regions of the Brazilian Legal Amazon face a critical connectivity gap: terrestrial NB-IoT and LTE networks cover less than 30% of the territory, while conventional satellite communication costs are prohibitive at the scale of programmes such as Mais Luz para a Amazônia (MLA). This paper presents WasionLink, a modular embedded communication architecture for WASION smart meters and photovoltaic inverters, designed to address this gap through four integrated innovations. First, a two-stage compression pipeline — header pre-processing followed by Protocol Buffers (nanopb) serialisation and LZ4 compression — targeting a minimum 70% reduction in transmitted data volume, extending the 68.08% baseline previously achieved with HEATSHRINK on the same STM32WBA microcontroller platform. Second, a modular hardware portfolio comprising three variants: the NTN aMeter (meter with embedded satellite modem), the USB NIC (module for solar inverters), and the LTE-450 MHz NIC (board for utility private networks). Third, an intelligent fallback engine implemented as a reactive state machine that autonomously selects the optimal radio access technology among Non-Terrestrial Networks (NTN), terrestrial NB-IoT, and LTE-450 MHz based on normalised link quality indicators. Fourth, a firmware-over-the-air (FUOTA) mechanism with dynamic window sizing and selective retransmission, adapted for LEO satellite-grade latencies of up to 600 ms. A four-layer hardware-independent firmware architecture ensures that improvements to any component propagate to all three variants through a single FUOTA campaign. A field pilot conducted in December 2025, with 10 WASION meters on a live NB-IoT network, partially validates the architecture: the compression-enabled firmware version (v4.1.6-6) reduced the median transmitted data volume by 20.8% and the median per-session payload size by approximately 47% compared to the baseline version (v4.1.6-3). The practical outcome is a 3.3× reduction in per-meter NTN transmission costs for the MLA programme context.

Keywords: smart meter; NTN; embedded compression; FUOTA; multi-RAT.

Resumen

Los medidores inteligentes desplegados en las regiones remotas de la Amazonia Legal brasileña enfrentan una brecha crítica de conectividad: las redes terrestres NB-IoT y LTE cubren menos del 30% del territorio, mientras que los costos de comunicación por satélite convencional son prohibitivos a la escala de programas como Mais

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Luz para a Amazônia (MLA). Este artículo presenta WasionLink, una arquitectura modular de comunicación embebida para medidores inteligentes WASION e inversores fotovoltaicos, diseñada para abordar esta brecha mediante cuatro innovaciones integradas. En primer lugar, un pipeline de compresión de dos etapas — preprocesamiento de cabecera seguido de serialización Protocol Buffers (nanopb) y compresión LZ4 — apuntando a una reducción mínima del 70% en el volumen de datos transmitidos. En segundo lugar, una cartera de hardware modular con tres variantes: el aMeter NTN, la NIC USB y la NIC LTE-450 MHz. En tercer lugar, un motor de conmutación inteligente que selecciona autónomamente la tecnología de acceso de radio óptima entre NTN, NB-IoT terrestre y LTE-450 MHz. En cuarto lugar, un mecanismo FUOTA con dimensionamiento dinámico de ventana y retransmisión selectiva, adaptado para latencias LEO de hasta 600 ms. Un ensayo piloto de campo realizado en diciembre de 2025, con 10 medidores WASION en una red NB-IoT real, validó parcialmente la arquitectura: la versión de firmware con compresión activa (v4.1.6-6) redujo el volumen mediano de datos transmitidos en un 20,8% y el tamaño mediano por sesión en aproximadamente un 47% en comparación con la versión sin compresión (v4.1.6-3). El resultado práctico es la reducción de 3,3× en los costos de transmisión NTN por medidor para el Programa MLA.

Palabras clave: medidor inteligente; NTN; compresión embebida; FUOTA; multi-RAT.

1. Introdução

A Infraestrutura de Medição Avançada (AMI) é um componente estratégico dos programas de modernização do setor elétrico brasileiro, permitindo leitura remota, detecção de perdas não-técnicas e resposta à demanda em larga escala. Contudo, a implantação de medidores inteligentes em regiões remotas — em especial nas comunidades da Amazônia Legal atendidas pelo Programa Mais Luz para a Amazônia (MLA) — enfrenta um desafio fundamental de conectividade: redes NB-IoT (Narrowband Internet of Things) e LTE terrestres cobrem menos de 30% do território, enquanto o custo de comunicação via satélite convencional é proibitivo na escala de milhares de medidores por programa (PLASTRAS et al., 2024).

A comunicação via Redes Não-Terrestres (NTN) — que aproveita constelações de satélites em Órbita Baixa (LEO) em conformidade com o padrão 3GPP Release 17 — emergiu como principal candidata para suprir essa lacuna de conectividade (3GPP, 2022; KUHN, 2024). Contudo, a adoção de NTN para medição inteligente introduz três desafios interdependentes: (i) latências de ida e volta entre 20 e 600 ms impõem restrições a mecanismos FUOTA convencionais; (ii) as tarifas NTN são cobradas por kilobyte transmitido, tornando a compressão embarcada um fator direto de custo; e (iii) concessionárias que operam redes LTE-450 MHz privadas requerem uma Placa de Interface de Rede (NIC) com suporte nativo a essa banda (ZIMMERMANN et al., 2015), ausente nas configurações existentes de medidores WASION.

Um trabalho anterior dos autores (GUARDIA et al., 2025) demonstrou que a aplicação da biblioteca HEATSHRINK (algoritmo LZSS) a quadros de memória de massa no padrão DLMS/COSEM de um medidor trifásico WASION, combinada com um pré-processamento de cabeçalho de 21,15%, alcança um ganho total de compressão de 68,08% dentro das restrições do microcontrolador STM32WBA (512 KB Flash, 96 KB RAM). Esse trabalho estabeleceu uma linha de base concreta de compressão, mas abordou exclusivamente o problema de compressão, não a arquitetura de comunicação. Nenhum trabalho anterior propôs uma arquitetura integrada e modular que aborde

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

conjuntamente compressão embarcada, conectividade multi-RAT (NTN + NB-IoT + LTE-450 MHz), fallback inteligente e FUOTA em uma plataforma embarcada com recursos restritos.

Este artigo apresenta o WasionLink, uma arquitetura modular de comunicação embarcada que preenche essa lacuna. A solução integra quatro inovações complementares: um pipeline de compressão Protobuf + LZ4 orientado a esquema; um portfólio de hardware com três variantes de NIC; um motor de fallback inteligente com função de pontuação configurável; e um módulo FUOTA adaptado para condições de latência satelital. O projeto é motivado pelos requisitos operacionais do Programa MLA e desenvolvido sobre protótipos funcionais dos três componentes de hardware.

As principais contribuições deste trabalho são:

(i) Uma arquitetura de sistema abrangente que unifica compressão embarcada, conectividade multi-RAT, fallback inteligente e FUOTA em um framework de firmware em camadas para a família de microcontroladores STM32WBA.

(ii) Uma função de seleção de fallback formalizada (Equação 2) e uma estratégia de dimensionamento dinâmico de janela FUOTA (Equação 3) que tratam conjuntamente a intermitência de conectividade inerente a enlaces NTN.

(iii) Uma aplicação prática ao Programa MLA, demonstrando que a arquitetura reduz os custos de transmissão NTN por medidor em 3,3× exclusivamente pela compressão.

(iv) Um portfólio de hardware modular (aMeter NTN, NIC USB, NIC LTE-450) que permite às concessionárias selecionar apenas a tecnologia de conectividade adequada à sua área de cobertura.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 revisa os trabalhos relacionados; a Seção 3 apresenta a arquitetura do sistema e os detalhes de projeto técnico; a Seção 4 discute os compromissos arquiteturais, a aplicabilidade ao Programa MLA e as limitações; a Seção 5 conclui o artigo.

2. Revisão da Literatura

2.1 Compressão de Dados para Dispositivos IoT Embarcados

A compressão de dados para sistemas embarcados com recursos limitados tem sido amplamente investigada, dadas as crescentes demandas de implantações de Internet das Coisas (IoT) onde largura de banda e energia são restritas. Ketshabetswe et al. (2021) realizaram uma revisão comparativa sistemática de algoritmos de compressão para Redes de Sensores Sem Fio (WSN), demonstrando que estratégias adaptativas sem perdas podem reduzir o consumo de energia em até 76,8% quando a compressão é aplicada antes da transmissão. Qin, Lu e Zhong (2020) propuseram o algoritmo de codificação de arranjos Block-Split para dados de longa sequência de sensores com recursos limitados, superando métodos convencionais como gzip e bzip2 em taxa de

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

compressão para arranjos de bytes sequenciais — o mesmo formato de dados usado em quadros de memória de massa de medidores inteligentes. Junior et al. (2023) aplicaram algoritmos clássicos (LZ77, LZ78, Huffman) a redes LoRa, alcançando até 70% de redução no volume de dados com medições de 22% de economia de energia por pacote transmitido.

No contexto específico da medição inteligente, GUARDIA et al. (2025) demonstraram que a aplicação do HEATSHRINK a quadros DLMS/COSEM de um medidor trifásico WASION, combinada com pré-processamento de cabeçalho, alcança 68,08% de ganho total de compressão no STM32WBA, com footprint de apenas 200 bytes e tempo de processamento de aproximadamente 525 ms. Piatkowski, Puslecki e Walkowiak (2024) avaliaram o impacto de algoritmos de compressão no consumo de energia em sistemas baseados em microcontroladores alimentados por bateria, confirmando que a escolha do algoritmo afeta diretamente o tamanho do payload transmitido e o tempo de rádio ligado. Lee, Yoon e Hwang (2021) propuseram um auto-codificador seletivo em frequência para compressão de dados de medidores inteligentes, demonstrando que estratégias orientadas ao domínio e à estrutura temporal dos perfis de carga podem superar algoritmos genéricos de fluxo de bytes. Malandrino et al. (2024) exploraram compressão adaptativa para modelos de redes neurais em treinamento cooperativo, demonstrando que o ajuste dinâmico de parâmetros reduz significativamente o consumo de energia — conceito alinhado à estratégia de fallback adaptativo proposta neste trabalho.

2.2 Tecnologias de Comunicação para Medição Inteligente

A comunicação de medidores inteligentes evoluiu de PLC (Power Line Communication) com fio para tecnologias celulares e satelitais, impulsionada pela necessidade de cobertura de área ampla e operação de baixo consumo. Santos et al. (2023) investigaram medidores equipados com NB-IoT em ambientes urbanos e rurais brasileiros, reportando 99% de eficiência de transmissão de dados e quantificando melhorias de recuperação de perdas de 134 kWh por unidade após intervenções de blindagem. Meffe et al. (2023) implementaram uma solução de monitoramento remoto baseada em LoRaWAN para unidades consumidoras dispersas em localidades de difícil acesso, demonstrando a viabilidade de tecnologias LPWAN de baixo custo para detecção de fraudes em áreas sem cobertura celular.

Myoung et al. (2023) propuseram um modelo de interoperabilidade de dados para harmonização de protocolos de medição inteligente em sistemas AMI baseados em IoT, fazendo a ponte entre DLMS/COSEM e o protocolo LwM2M — um desafio de tradução de protocolo também presente na camada de dados do WasionLink. Kim, Kim e Lee (2022) projetaram uma arquitetura de rede adaptativa para AMI em ambientes de rede elétrica inteligente, demonstrando que o ajuste dinâmico de topologia de acordo com a densidade de medidores e padrões de tráfego reduz o congestionamento de backhaul — princípio de projeto refletido na abordagem multi-RAT do WasionLink. A banda LTE-450 MHz ganhou destaque como padrão de rede privada para

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

concessionárias de energia. Zimmermann et al. (2015) conduziram ensaios de campo demonstrando que o LTE a 450 MHz fornece cobertura externa eficaz em ambientes suburbanos a rurais, e fabricantes como Telit e Sierra Wireless disponibilizaram módulos certificados para essa banda (SIERRA WIRELESS, 2021).

2.3 Redes Não-Terrestres para IoT Remoto

NTN — abrangendo constelações de satélites LEO e em órbita média em conformidade com o 3GPP Release 17 — emergiu como solução primária para estender a conectividade IoT a áreas geograficamente isoladas (3GPP, 2022; KUHN, 2024). Kuhn (2024) apresenta uma análise técnica aprofundada da padronização 3GPP para integração de constelações de satélites ao ecossistema 5G NTN, detalhando os perfis de latência e os mecanismos de handover típicos de satélites LEO — fundamentos diretamente relevantes à camada de abstração NTN do WasionLink. Plastras et al. (2024) conduziram uma pesquisa abrangente de arquiteturas NTN para dispositivos IoT remotos na era 6G, identificando desafios chave: enlaces LEO exibem latências de 20–600 ms dependendo da altitude orbital, e a visibilidade intermitente do satélite cria lacunas temporais que requerem buffering a bordo. A pesquisa posiciona arquiteturas híbridas NTN/terrestres como a abordagem mais eficiente em energia para dispositivos que requerem entrega contínua de dados — motivando diretamente o motor de fallback proposto no WasionLink.

Kim e Jo (2022) caracterizaram o desempenho do uplink NB-IoT em NTN LEO por meio de simulação em nível de enlace, propondo mecanismos de compensação de Doppler residual que reduzem as taxas de erro de bloco sob mobilidade satelital. Ledesma, Lamo e Fraire (2024) levantaram tendências em tecnologias LPWAN para constelações de satélites LEO no contexto NewSpace, confirmando que NB-IoT e LoRa são os principais candidatos para conectividade de nível satelital. Lysogor et al. (2019) demonstraram a viabilidade prática de uma arquitetura heterogênea LoRa-satélite usando o backhaul Iridium para coleta remota de dados IoT, validando a estratégia de acumulação offline em buffer adotada no WasionLink para períodos de indisponibilidade satelital.

2.4 Atualização de Firmware Over-the-Air para Dispositivos Restritos

Manter o firmware em implantações embarcadas em larga escala exige mecanismos de atualização OTA (Over-the-Air) confiáveis que operem sob restrições de largura de banda e energia. Mahfoudhi, Sultania e Famaey (2022) propuseram um framework FUOTA especificamente para dispositivos NB-IoT restritos, demonstrando que entrega fragmentada de pacotes com retransmissão seletiva reduz o tempo total de atualização e o custo energético em comparação com abordagens sequenciais. Neves, Valente e Santos (2024) propuseram um mecanismo eficiente de FUOTA em tempo de execução para dispositivos LoRaWAN Classe A usando fragmentação no banco de dados do servidor e entrega sequencial por downlink, demonstrando que a distribuição confiável de firmware pode ser alcançada sem exigir mudanças de classe no dispositivo. Malumbres et al. (2024) demonstraram uma estratégia combinada unicast-broadcast para atualizações OTA via LoRa que

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

reduz o tempo total de atualização ao explorar a eficiência do broadcast para campanhas simultâneas em múltiplos dispositivos — relevante para implantações AMI onde centenas de medidores co-localizados podem requerer atualizações simultâneas. Ruellé, Guellaën e Rosay (2023) propuseram o protocolo SHOID, que permite a dispositivos IoT formarem grupos auto-organizados de maneira autônoma para aumentar a robustez de atualizações de firmware OTA — abordagem conceitualmente alinhada à estratégia de campanha FUOTA simultânea sobre múltiplas variantes de hardware do WasionLink (RUELLÉ et al., 2023). Al-Zuraiqi e Greer (2025) demonstraram, por meio de análise estática de 1.520 amostras de firmware IoT, que vulnerabilidades sistêmicas — como tratamento inadequado de ponteiros (CWE-416, 10,06%) e interfaces de depuração expostas (CWE-782, 10,07%) — são recorrentes em plataformas embarcadas, reforçando a importância de mecanismos de atualização FUOTA verificáveis e com hash de integridade, como os adotados no WasionLink (AL-ZURAIQI; GREER, 2025).

2.5 Lacuna de Pesquisa e Posicionamento

A Tabela 1 posiciona o presente trabalho em relação à literatura revisada ao longo de cinco dimensões arquiteturais. Estudos existentes abordam aspectos individuais — compressão, conectividade NTN (PLASTRAS et al., 2024; KIM; JO, 2022; LEDESMA et al., 2024; LYSOGOR et al., 2019; KUHN, 2024) ou FUOTA (MAHFOUDHI et al., 2022; NEVES et al., 2024; MALUMBRES et al., 2024; RUELLÉ et al., 2023) — isoladamente. Wiecek et al. (2021) propuseram um método de orquestração multi-RAT para redes sem fio heterogêneas, demonstrando ganhos de eficiência com seleção dinâmica de canal, contudo sem abordar compressão ou FUOTA em contexto embarcado restrito. Nenhum trabalho anterior propôs uma arquitetura integrada e modular que aborde conjuntamente compressão embarcada, conectividade multi-RAT (NTN + NB-IoT + LTE-450 MHz), fallback inteligente e FUOTA para medidores inteligentes em uma plataforma embarcada com recursos restritos. WasionLink preenche essa lacuna fornecendo um projeto de sistema coeso validado por meio do desenvolvimento de protótipos.

Tabela 1 – Posicionamento do WasionLink em relação a trabalhos relacionados. S = Sim; N = Não; P = Parcial.

Trabalho	Compressão	NTN	LTE-450	Fallback	FUOTA
GUARDIA et al. (2025)	**S**	**N**	**N**	**N**	**N**
Piatkowski et al. (2024)	**S**	**N**	**N**	**N**	**N**
Junior et al. (2023)	**S**	**N**	**N**	**N**	**N**
Lee et al. (2021)	**S**	**N**	**N**	**N**	**N**

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Plastras et al. (2024)	**N**	**S**	**N**	**P**	**N**
Kim; Jo (2022)	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**
Ledesma et al. (2024)	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**
Lysogor et al. (2019)	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**
Zimmermann et al. (2015)	**N**	**N**	**S**	**N**	**N**
Santos et al. (2023)	**N**	**N**	**N**	**P**	**N**
Wiecek et al. (2021)	**N**	**N**	**N**	**S**	**N**
Mahfoudhi et al. (2022)	**N**	**N**	**N**	**N**	**S**
Neves et al. (2024)	**N**	**N**	**N**	**N**	**S**
Malumbres et al. (2024)	**N**	**N**	**N**	**N**	**S**
Kuhn (2024)	**N**	**S**	**N**	**N**	**N**
Ruellé et al. (2023)	**N**	**N**	**N**	**N**	**S**
Al-Zuraiqi; Greer (2025)	**N**	**N**	**N**	**N**	**P**
Este trabalho (WasionLink)	**S**	**S**	**S**	**S**	**S**

3. Metodologia

Esta seção descreve a metodologia de projeto e especificação do WasionLink, abrangendo a arquitetura geral do sistema, o portfólio de hardware, a arquitetura de firmware em camadas e o projeto técnico detalhado do pipeline de compressão, motor de fallback e módulo FUOTA.

3.1 Arquitetura Geral do Sistema

O WasionLink decompõe o problema em três módulos de hardware distintos, cada um visando uma classe de dispositivo e cenário de comunicação específicos, enquanto compartilha uma arquitetura de firmware comum para compressão, fallback e FUOTA. A Figura 1 ilustra a topologia geral do sistema.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

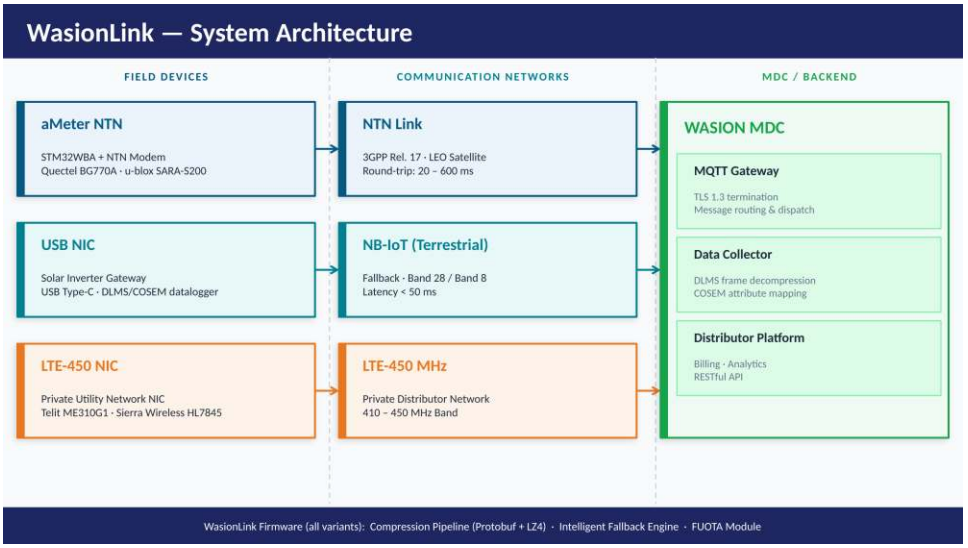

Figura 1 – Topologia do sistema WasionLink. Três módulos de hardware fornecem cobertura complementar: o aMeter NTN para medidores com satélite, a NIC USB para inversores solares e a NIC LTE-450 para integração em redes privadas de concessionárias.

aMeter NTN — medidor inteligente WASION modificado equipado com modem compatível com NTN embarcado e o stack de firmware WasionLink. A plataforma retém o microcontrolador STM32WBA (Arm Cortex-M33, 512 KB Flash, 96 KB RAM) e integra um dos seguintes modems prontos para NTN: Quectel BG770A, u-blox SARA-S200 ou módulo Thales Alenia NTN. Os três modems são compatíveis com NB-IoT-over-NTN do 3GPP Release 17, habilitando transmissão direta para satélite sem repetidor terrestre dedicado. O aMeter suporta fontes de alimentação duplas — rede elétrica e painel solar com bateria $LiFePO_4$ — e opera com consumo de 6,5 µA no modo Stop com 64 KB de SRAM retido, ativando o modem NTN apenas durante a janela de transmissão diária.

NIC USB — estende a cobertura WasionLink para inversores fotovoltaicos do Programa MLA que não possuem módulo de comunicação embarcado. Conecta-se via USB Type-C à porta de dados do inversor e opera como dispositivo serial, sem requerer modificações no software do inversor. Integra um datalogger com armazenamento em memória de massa local, acumulando telemetria (geração de energia, estado da bateria, alarmes e registros Modbus TCP/IP) em intervalos configuráveis. Os dados são comprimidos antes da transmissão via MQTT sobre TLS 1.3.

NIC LTE-450 — placa de circuito impresso customizada para embarcamento direto em medidores WASION operando em áreas cobertas pela rede LTE privada da concessionária na banda licenciada de 410–450 MHz. Integra um modem certificado para a banda de 450 MHz (Telit ME310G1-W2 ou Sierra Wireless HL7845) e comunica-se com a placa principal do medidor via UART.

3.2 Arquitetura de Firmware em Camadas

Os três componentes de hardware compartilham uma arquitetura de firmware composta por quatro camadas funcionais, conforme ilustrado na Figura 2.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

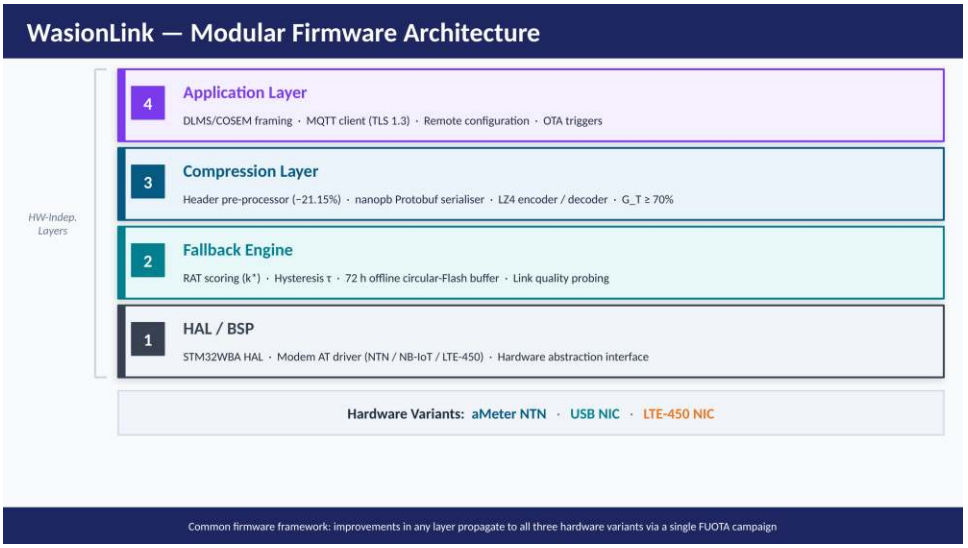

Figura 2 – Arquitetura modular de firmware do WasionLink. As quatro camadas são independentes de hardware acima da Camada 1, permitindo reuso nas três variantes de NIC.

Camada 1 (Abstração de Hardware) — provê drivers específicos do MCU e o Pacote de Suporte de Placa (BSP) gerado pelo STM32CubeIDE.

Camada 2 (Motor de Fallback) — implementa a máquina de estados multi-RAT descrita na Seção 3.4.

Camada 3 (Compressão) — executa o pipeline Protobuf + LZ4 antes de entregar o payload à Camada 2.

Camada 4 (Aplicação) — cuida da montagem de quadros de memória de massa DLMS/COSEM para medidores, do mapeamento de registros Modbus TCP/IP para inversores e do gerenciador de sessão FUOTA.

Esse projeto em camadas impõe separação de responsabilidades: alterar o algoritmo de compressão requer modificar apenas a Camada 3; adaptar a um novo modem requer apenas uma atualização de driver na Camada 1. Melhorias em qualquer camada propagam-se automaticamente às três variantes de hardware por meio de uma única campanha FUOTA.

3.3 Pipeline de Compressão Embarcada

O pipeline de compressão WasionLink opera em três estágios sequenciais, projetados para explorar os pontos fortes complementares da serialização orientada a esquema e da codificação de entropia de fluxo de bytes.

Estágio 1 — Pré-processamento de Cabeçalho. Seguindo a abordagem estabelecida em GUARDIA et al. (2025), o cabeçalho DLMS fixo de 11 bytes é removido de cada quadro de memória de massa antes da compressão, reduzindo a entrada de 52 para 41 bytes — uma redução determinística de 21,15% a custo computacional zero.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Estágio 2 — Serialização Protobuf (nanopb). O payload resultante é serializado com Protocol Buffers e a biblioteca nanopb para microcontroladores. Um esquema .proto compacto mapeia cada campo de medição (tensão, corrente, totalizadores de energia, timestamp) para tipos inteiros de largura fixa. A saída serializada é tipicamente 15–30% menor do que o arranjo de bytes original.

Estágio 3 — Compressão LZ4. A saída Protobuf é comprimida com LZ4, um algoritmo de compressão em bloco projetado para velocidade máxima de descompressão com baixo overhead de memória. O footprint de memória do LZ4 é limitado a 16 KB de memória de trabalho, compatível com o orçamento de 96 KB de RAM do STM32WBA.

O ganho total do pipeline é formalizado como (Equação 1):

$$G_T = 1 - \frac{|\mathrm{LZ4}(\mathrm{nanopb}(D_{\mathrm{stripado}}))|}{|F_{\mathrm{bruto}}|}$$

Equação 1

onde $|F_{bruto}|$ é o volume total de dados brutos do período de transmissão considerado e $D_{stripado}$ é o payload após as otimizações estruturais de pré-processamento. Para análise por frame individual, $|F_{bruto}| = 52bytes$ (frame DTSD341); para análise de custo de transmissão diária, $|F_{bruto}| = 6.003$ bytes (96 frames de memória de massa + 24 frames de energia + 3 frames de qualidade de energia). O pipeline combinado Protobuf + LZ4 visa um ganho total mínimo de 70%, estendendo a linha de base de 68,08% estabelecida por GUARDIA et al. (2025) com HEATSHRINK.

3.4 Motor de Fallback Inteligente

O motor de fallback é implementado como uma máquina de estados reativa na Camada 2 do firmware, seguindo os princípios de orquestração multi-RAT investigados por Wiecek et al. (2021) e adaptados às restrições de energia e latência do hardware embarcado AMI. Ele monitora três indicadores de qualidade de enlace para cada tecnologia de acesso de rádio (RAT) disponível: SNR (ou RSRP para LTE), latência de ida e volta e sucesso de entrega de pacotes na janela de transmissão anterior.

O canal ativo é selecionado de acordo com uma função de prioridade configurável (Equação 2):

$$k^* = \arg\min_{k \in \mathcal{K}} \left[\alpha_k \cdot \hat{l}_k + \beta_k \cdot (1 - \hat{p}_k) \right]$$

Equação 2

onde $\hat{l}_k$ é a latência estimada normalizada para [0,1], $\hat{p}_k$ é a Taxa de Entrega de Pacotes (PDR) estimada para o canal k, $e\alpha_k, \beta_k$ são pesos configuráveis por canal. A prioridade padrão é NTN ≻ NB-IoT ≻ LTE-450. Transições de canal são acionadas quando a pontuação do canal ativo excede um limiar de histerese τ, prevenindo oscilação rápida em condições de fronteira.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

A Figura 3 mostra o diagrama de transição de estados do motor de fallback.

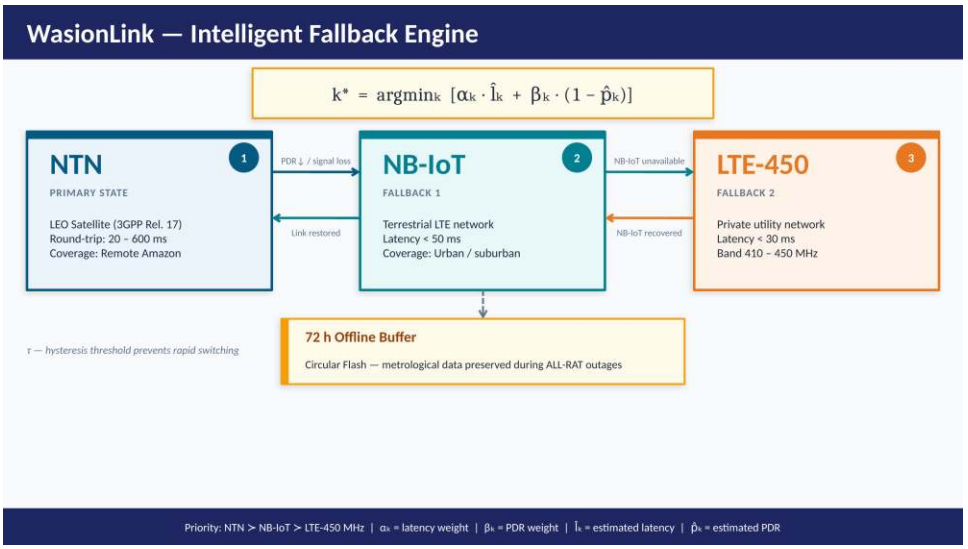

Figura 3 – Diagrama de transição de estados do motor de fallback. O sistema seleciona autonomamente o canal ótimo com base na Equação 2, com histerese para prevenir oscilação.

Quando todos os canais estão simultaneamente indisponíveis, o firmware entra em modo buffered-offline: as leituras continuam a ser adquiridas e comprimidas, armazenadas em buffers circulares de Flash com janela de retenção configurável (padrão: 72 horas). Na recuperação do canal, os quadros em buffer são transmitidos em ordem cronológica, garantindo ausência de perda de dados.

3.5 FUOTA sobre Enlaces NTN de Alta Latência

A entrega de atualizações de firmware a medidores operando sobre NTN apresenta dois desafios principais: latências de ida e volta que podem exceder 600 ms para enlaces LEO, e janelas de transmissão estreitas durante passagens de satélite. O módulo FUOTA do WasionLink adapta a abordagem de fragmentação de Mahfoudhi, Sultania e Famaey (2022) para condições NTN.

O binário de firmware é segmentado em blocos de tamanho fixo B_1, B_2, ..., B_n de 128 bytes cada, com cada bloco carregando um checksum de integridade CRC-32. Os blocos são transmitidos sequencialmente em um protocolo de janela deslizante; o tamanho da janela W é ajustado dinamicamente com base na latência de ida e volta medida (Equação 3):

$$W = \left\lfloor \frac{T_{\text{janela}}}{2 \cdot \hat{l}_{\text{NTN}}} \right\rfloor$$

Equação 3

onde T_{janela} é a duração disponível da passagem do satélite e $\hat{l}_{NTN}$ é a estimativa atual de latência de ida e volta NTN. Blocos ausentes ou corrompidos são identificados pelo dispositivo e reportados ao servidor de atualização em um mapa de bits NACK compacto (um bit por bloco), habilitando

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

retransmissão seletiva apenas dos segmentos com falha. Um buffer circular na Flash armazena blocos recebidos fora de ordem até que todos os segmentos estejam disponíveis; o novo firmware é então validado e atomicamente confirmado.

Projeto de Segurança. O WasionLink implementa proteção de dados de ponta a ponta em todos os três módulos de hardware. A confidencialidade dos dados é fornecida por criptografia AES-128-CBC, com chaves simétricas por dispositivo provisionadas durante a fabricação e armazenadas no elemento seguro protegido pelo TrustZone do STM32WBA. A segurança da camada de transporte para conexões MQTT e HTTPS utiliza TLS 1.3 com autenticação mútua. A integridade do firmware é verificada por um hash SHA-256 antes de cada confirmação FUOTA; uma falha na verificação aciona um retorno automático à versão anterior. Essa exigência de verificabilidade é motivada pelos resultados de Al-Zuraiqi e Greer (2025), que demonstraram a prevalência de vulnerabilidades sistêmicas em firmware IoT e a necessidade de ciclos de atualização auditáveis (AL-ZURAIQI; GREER, 2025).

4. Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os resultados do trabalho em quatro eixos complementares: os compromissos arquiteturais inerentes ao WasionLink (Seção 4.1), a aplicabilidade direta ao Programa MLA (Seção 4.2), os resultados do ensaio piloto em campo que valida empiricamente o componente de compressão da arquitetura (Seção 4.3), e as limitações que demandam investigação adicional (Seção 4.4).

4.1 Compromissos Arquiteturais

Escolha do pipeline de compressão. A combinação HEATSHRINK + BZ2 avaliada em GUARDIA et al. (2025) alcançou 68,08% de ganho total de compressão com apenas 200 bytes de RAM e 525 ms de tempo de processamento — resultado notável para um sistema embarcado bare-metal. O pipeline Protobuf + LZ4 adotado no WasionLink prioriza um ponto diferente no espaço de projeto: o nanopb impõe maior footprint de código (~10 KB de Flash), mas habilita compressão orientada a esquema que explora a estrutura semântica dos quadros DLMS/COSEM. A velocidade de descompressão do LZ4 é significativamente mais rápida do que a do HEATSHRINK, o que é relevante para o processamento do servidor MDC de milhares de sessões simultâneas de medidores.

Latência de fallback versus energia. O motor de fallback multi-RAT requer que o modem monitore múltiplas interfaces de rádio simultaneamente, aumentando o consumo de corrente comparado a um projeto de tecnologia única. Para o aMeter, isso é mitigado pela estratégia de ciclo de trabalho: a sondagem de qualidade de enlace ocorre apenas durante a janela de ativação pré-transmissão (tipicamente 60 s antes do evento de envio diário), mantendo o consumo médio de corrente no nível de 6,5 µA do modo Stop durante os 23 h 59 min restantes.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Projeto modular versus integrado. Separar os três componentes de hardware aumenta a complexidade de fabricação e cadeia de suprimentos comparado a um módulo universal único. Contudo, a modularidade oferece benefícios comerciais concretos: concessionárias podem implantar apenas a variante de NIC adequada à sua cobertura de rede, evitando o custo de hardware não utilizado em cada medidor. A arquitetura de firmware compartilhada assegura que melhorias nas camadas de compressão ou fallback se propaguem às três variantes por uma única campanha FUOTA.

4.2 Aplicabilidade ao Programa Mais Luz para a Amazônia

O Programa MLA implementa sistemas solares residenciais em comunidades da Amazônia Legal que se encontram além do alcance econômico da expansão da rede elétrica. Essas instalações integram painel fotovoltaico, banco de baterias, inversor e medidor de energia pré-pago. A NIC USB é diretamente aplicável a esse cenário: conecta-se ao inversor, coleta telemetria diária de geração e consumo, a comprime utilizando a Equação 1 e transmite uma vez por dia via NTN, alinhando-se à estratégia de acumulação de 24 horas validada em GUARDIA et al. (2025).

O benefício operacional chave é a redução de custo. Tarifas NTN convencionais para sistemas como Iridium Certus são tipicamente cobradas por kilobyte transmitido. Ao visar ≥70% de compressão, o WasionLink reduz o volume faturável por um fator de 3,3×, traduzindo-se diretamente em redução de despesas operacionais para o operador do programa. Além disso, o modo buffered-offline (Seção 3.4) assegura que nenhum dado metrológico seja perdido durante as lacunas de 5–15 minutos na visibilidade de satélites LEO, o que é um requisito regulatório para a medição de energia pré-paga.

4.3 Validação Experimental em Campo: Ensaio Piloto NB-IoT

Para avaliar o impacto real da compressão sobre o volume de dados transmitidos por medidores WASION em operação, um ensaio piloto foi conduzido pelo Núcleo de Pesquisa em Energia e Novas Tecnologias (NEPEN/ICI) em dezembro de 2025 (LOPES et al., 2025). O experimento comparou duas versões de firmware: v4.1.6-3 (sem compressão ativa) e v4.1.6-6 (compressão habilitada), implantadas em 10 medidores WASION operando em rede NB-IoT real — 5 medidores por versão — durante o período de 14 a 19 de dezembro de 2025. No total foram registradas 42 sessões NB-IoT para a versão sem compressão e 50 sessões para a versão com compressão ativa.

A Tabela 2 sintetiza as estatísticas descritivas do volume de dados transmitidos por medidor em cada versão de firmware.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Tabela 2 – Estatísticas descritivas do ensaio piloto NB-IoT (dez. 2025 — 10 medidores WASION). (*) Média inflada pelo medidor 1706001059 — evento Stale-Session: 1,57 MB.

Estatística	v4.1.6-3 (sem compressão)	v4.1.6-6 (com compressão)	Variação
Medidores monitorados	5	5	—
Sessões NB-IoT registradas	42	50	—
Média KB/dia/medidor	95,11	96,11 (*)	+1,0%
Mediana KB/dia/medidor	97,15	76,93	−20,8%
Média aparada KB/dia/medidor	98,22	97,86	−0,4%
Redução mediana por sessão	—	—	≈−47%

A mediana, por ser robusta a valores atípicos, é o indicador mais representativo do comportamento típico da frota: a versão com compressão reduziu de 97,15 para 76,93 KB/dia/medidor, correspondendo a 20,8% de redução no volume diário transmitido. Em nível de sessão, a redução no tamanho mediano da sessão foi de aproximadamente 47%, evidenciando que a compressão age efetivamente na carga útil individual antes da transmissão.

A única exceção foi o medidor 1706001059, que gerou 1,57 MB em decorrência de um evento de Stale-Session — uma condição de sessão obsoleta no protocolo NB-IoT que provoca retransmissões em massa, independente da versão de firmware e sem relação com o algoritmo de compressão. Após a exclusão desse outlier, a média aparada das duas versões torna-se praticamente idêntica (98,22 vs. 97,86 KB/dia).

A Figura 4 ilustra a comparação das estatísticas descritivas entre as duas versões de firmware.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

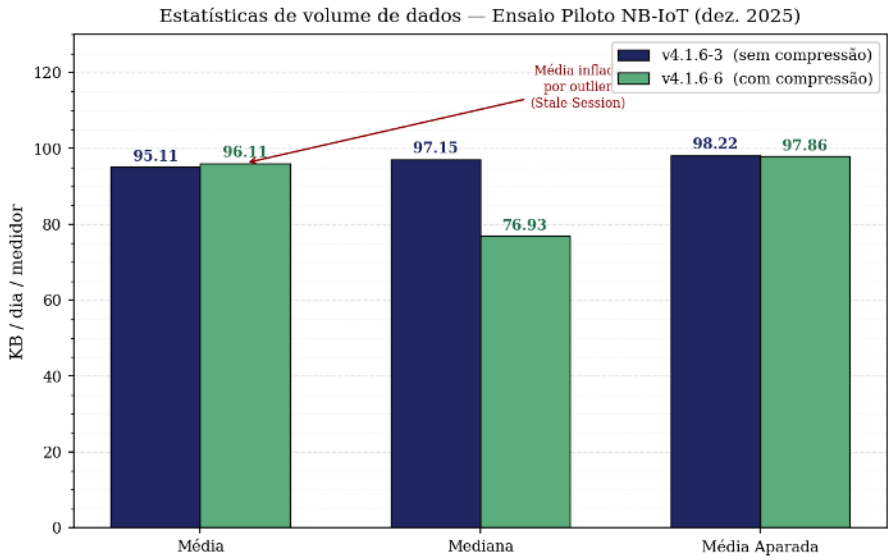

Figura 4 – Comparação das estatísticas descritivas de volume de dados (KB/dia/medidor) entre as duas versões de firmware no ensaio piloto. A mediana, indicador robusto a outliers, revela redução de 20,8% com a compressão ativa.

Discussão dos resultados do ensaio piloto. A redução observada de ≈21% no volume diário transmitido representa um limite inferior prático do efeito da compressão, pois o ensaio piloto avaliou a versão v4.1.6-6, na qual apenas uma camada inicial de compressão LZSS/heatshrink atua sobre os pacotes de sessão NB-IoT já encapsulados — sem as etapas de pré-processamento estrutural de headers DLMS nem a serialização Protobuf. A Tabela 3 decompõe analiticamente as contribuições esperadas de cada estágio do pipeline completo.

Tabela 3 – Decomposição analítica dos ganhos esperados por estágio do pipeline WasionLink, referência: dia completo de telemetria (|F_bruto| = 6.003 bytes).

Estágio	Operação	Volume resultante (bytes)	Redução acumulada
Baseline	Frame DLMS bruto	6.003	—
Estágio 1	Remoção de headers (Template ID, timestamps, nº elem.)	4.056	32,4%
Estágio 2	Serialização Protobuf/nanopb (eliminação padding, varint)	~3.200 (est.)	~47%
Estágio 3	Compressão LZ4 sobre saída Protobuf	~1.800 (est.)	~70%
Alvo	Pipeline completo Protobuf + LZ4	≤1.801	≥70%

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

O Estágio 1 é determinístico e já medido: redução de 32,4% confirmada em bancada com dados reais do DTSD341 (NEPEN, 2024). O Estágio 2 é estimado com base no comportamento típico do nanopb sobre estruturas com campos de valor zero frequentes, onde a codificação varint produz redução adicional de 15–30% sobre o payload otimizado (GUARDIA et al., 2025; PIATKOWSKI et al., 2024). O Estágio 3 é estimado com base no ganho residual que o LZ4 tipicamente alcança sobre dados serializados com Protobuf, reportado entre 30–45% em aplicações IoT com séries temporais estruturadas (JUNIOR et al., 2023; KETSHABETSWE et al., 2021).

A discrepância entre o limite inferior observado no ensaio (21%) e o alvo projetado (≥70%) é estruturalmente esperada: o ensaio mediu o efeito da compressão sobre o payload já encapsulado em sessão NB-IoT — que inclui overhead de cabeçalhos de sessão, autenticação MQTT e TLS 1.3 — enquanto o alvo de 70% se aplica ao payload DLMS bruto antes da encapsulação. Os dois valores não são diretamente comparáveis e medem grandezas distintas na pilha de protocolo. A validação experimental de ponta a ponta do pipeline completo Protobuf + LZ4, medindo G_T diretamente sobre frames DLMS brutos no STM32WBA antes da encapsulação de sessão, constitui a próxima etapa imediata desta pesquisa.

4.4 Limitações e Questões Abertas

Validação experimental parcial. O ensaio piloto descrito na Seção 4.3 fornece evidência empírica de que a compressão integrada ao firmware produz redução mensurável no volume diário transmitido (−20,8% na mediana). Contudo, o ganho do pipeline Protobuf + LZ4 completo ainda não foi caracterizado contra populações reais de quadros DLMS brutos, e os parâmetros do motor de fallback (tempos de comutação, histerese τ) são alvos de projeto ainda não validados em campo.

Interoperabilidade de modems NTN. A arquitetura especifica três modems NTN candidatos (Quectel BG770A, u-blox SARA-S200, Thales Alenia). Diferenças nos conjuntos de comandos AT e nas APIs de gerenciamento de energia entre fornecedores requerem abstração de firmware na Camada 1. Uma matriz de compatibilidade formal é necessária antes que a arquitetura possa ser considerada plenamente validada.

Avaliação formal de segurança. O projeto de segurança descrito na Seção 3.5 não foi submetido a testes formais de penetração. O modo AES-128-CBC, embora adequado para ameaças atuais, pode requerer atualização para AES-128-GCM (criptografia autenticada) em implantações que lidam com dados metrológicos de alto valor.

Cenário regulatório LTE-450 no Brasil. O uso privado da banda de 410–450 MHz por concessionárias de energia no Brasil é regulado pela Anatel. A NIC LTE-450 foi projetada para cumprir os parâmetros técnicos do arcabouço regulatório existente, mas os testes formais de homologação ainda não foram realizados.

5. Conclusão

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

Este artigo apresentou o WasionLink, uma arquitetura modular de comunicação embarcada que aborda a lacuna de conectividade em implantações de medidores inteligentes em áreas remotas e de baixa cobertura. A arquitetura integra quatro inovações interdependentes: um pipeline de compressão Protobuf + LZ4 visando redução ≥70% no volume de dados transmitidos; um projeto de hardware com múltiplos componentes cobrindo cenários NTN, NB-IoT terrestre e LTE-450 MHz; um motor de fallback inteligente que seleciona autonomamente a RAT ótima; e um mecanismo FUOTA adaptado para latência de nível satelital. O trabalho baseia-se diretamente na linha de base de compressão estabelecida em GUARDIA et al. (2025), estendendo seu escopo de uma otimização de compressão por medidor para uma arquitetura de comunicação completa aplicável a medidores e inversores fotovoltaicos.

Um ensaio piloto em campo realizado em dezembro de 2025 por NEPEN/ICI (LOPES et al., 2025), com 10 medidores WASION em rede NB-IoT real, forneceu evidência empírica inicial do efeito da compressão integrada: a versão de firmware com compressão ativa (v4.1.6-6) reduziu o volume mediano diário transmitido em 20,8% e o tamanho mediano por sessão em aproximadamente 47%. Esse resultado, obtido com o pipeline parcialmente implementado, é encorajador e consistente com o alvo teórico de ≥70% para o pipeline Protobuf + LZ4 completo, considerando que o ensaio piloto não avaliou todas as etapas do pipeline final.

Os trabalhos futuros focarão em três direções. Primeiro, a caracterização experimental de ponta a ponta do pipeline Protobuf + LZ4 completo contra populações reais de quadros DLMS/COSEM. Segundo, ensaios de campo em comunidades MLA operacionais, medindo a confiabilidade do enlace NTN, a frequência de comutação de fallback e as economias totais de energia sob condições reais. Terceiro, a investigação de estratégias de compressão híbridas combinando a eficiência estrutural dos esquemas Protobuf com codificação delta preditiva, explorando a autocorrelação temporal dos padrões de consumo de energia para reduzir adicionalmente a entropia residual antes da codificação LZ4.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao Wasion Group pelo apoio a esta pesquisa, ao Evolução Instituto de Ciência e Tecnologia, ao NEPEN e ao IFRO pela colaboração institucional. Esta pesquisa foi financiada pela Lei nº 8.387/1991 (Zona Franca de Manaus), enquadrada nos Artigos 21 e 22 do Decreto nº 10.521 de 15/10/2020.

. Referências

3GPP. Solutions for NR to Support Non-Terrestrial Networks (NTN): Release 17. [S.l.]: 3rd Generation Partnership Project, 2022. (TR 38.821 v17.0.0). Disponível em: https://www.3gpp.org. Acesso em: 23 abr. 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

450 MHz ALLIANCE. The 450 MHz Band for the Smart Grid and Smart Metering: White Paper. [S.l.]: 450 MHz Alliance Technical Report, 2022. Disponível em: https://450alliance.org. Acesso em: 23 abr. 2026.

AL-ZURAIQI, Ahmad; GREER, Desmond. Static Analysis of IoT Firmware: Identifying Systemic Vulnerabilities with RMMIDL. In: ENGINEERING AND CYBERSECURITY OF CRITICAL SYSTEMS (EnCyCriS), 6., 2025, Ottawa. Anais... [S.l.]: IEEE, 2025. DOI: 10.1109/encycris66464.2025.00008.

GUARDIA, G.; DIOGENES, R. G.; FRANCA, I. G.; SANTANA, L. N. dos S.; DE SOUSA, J. C.; DE PAULO, B. C.; DE OLIVEIRA, A. É. R. M.; DE ALBUQUERQUE, A. A. M. Smart meter data compression: a solution for reducing and optimising energy meter resources in NB-IoT networks. Seven Editora, p. 301–325, 2025. Disponível em: https://sevenpubl.com.br/editora/article/view/6860.

JUNIOR, José Augusto de Oliveira et al. Data compression in LoRa networks: a compromise between performance and energy consumption. Journal of Internet Services and Applications, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2023. DOI: 10.5753/jisa.2023.3000.

KETSHABETSWE, Lesedi K. et al. Data compression algorithms for wireless sensor networks: a review and comparison. IEEE Access, v. 9, p. 136872–136882, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3116311.

KIM, Jong-Wook; KIM, Jihoon; LEE, Jaehee. An adaptive network design for advanced metering infrastructure in a smart grid. Sensors, v. 22, n. 22, p. 8625, 2022. DOI: 10.3390/s22228625.

KIM, Min-Gu; JO, Han-Shin. Performance analysis of NB-IoT uplink in low earth orbit non-terrestrial networks. Sensors, v. 22, n. 18, p. 7097, 2022. DOI: 10.3390/s22187097.

KUHN, Nicolas. 5G NTN et SATCOM: 5G NTN pour constellation de satellites. Techniques Ingénieur, TE7626, dez. 2024. DOI: 10.51257/a-v1-te7626.

LEDESMA, Oscar; LAMO, Paula; FRAIRE, Juan A. Trends in LPWAN technologies for LEO satellite constellations in the NewSpace context. Electronics, v. 13, n. 3, p. 579, 2024. DOI: 10.3390/electronics13030579.

LEE, Jihoon; YOON, Seungwook; HWANG, Euiseok. Frequency selective auto-encoder for smart meter data compression. Sensors, v. 21, n. 4, p. 1521, 2021. DOI: 10.3390/s21041521.

LOPES, Gustavo et al. Relatório de Consumo de Dados do aMeter Sandbox — Envio Comprimido: ensaio piloto NB-IoT com medidores WASION, versões de firmware v4.1.6-3 e v4.1.6-6. Porto Velho: Núcleo de Pesquisa em Energia e Novas Tecnologias (NEPEN/ICI), 2025. Relatório Técnico Interno.

LYSOGOR, Ivan et al. Study of data transfer in a heterogeneous LoRa-satellite network for the Internet of Remote Things. Sensors, v. 19, n. 15, p. 3384, 2019. DOI: 10.3390/s19153384.

MAHFOUDHI, Fedi; SULTANIA, Ashish Kumar; FAMAEY, Jeroen. Over-the-air firmware updates for constrained NB-IoT devices. Sensors, v. 22, n. 19, p. 7572, 2022. DOI: 10.3390/s22197572.

MALANDRINO, Francesco et al. Tuning DNN model compression to resource and data availability in cooperative training. IEEE/ACM Transactions on Networking, v. 32, n. 2, p. 1600–1615, 2024. DOI: 10.1109/TNET.2023.3323023.

MALUMBRES, Victor et al. Firmware updates over the air via LoRa: unicast and broadcast combination for boosting update speed. Sensors, v. 24, n. 7, p. 2104, 2024. DOI: 10.3390/s24072104.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 13/03/2026 - **Accepted:** 14/05/2026
Vol: 13.09
DOI: 10.66104/demgdf29
Pages: 1-20

MEFFE, A. et al. Solução de baixo custo para leitura e gerenciamento remoto de unidades consumidoras dispersas com tecnologia LoRaWAN. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SENDI), 2023. Anais... [S.l.]: ABRADEE, 2023.

MYOUNG, Nogil et al. Data interworking model and analysis for harmonization of smart metering protocols in IoT-based AMI system. Sensors, v. 23, n. 6, p. 2903, 2023. DOI: 10.3390/s23062903.

NEVES, Bernardino Pinto; VALENTE, António; SANTOS, Victor D. N. Efficient runtime firmware update mechanism for LoRaWAN Class A devices. IoT, v. 5, n. 4, p. 137, 2024. DOI: 10.3390/iot5040137.

PIATKOWSKI, Damian; PUSLECKI, Tomasz; WALKOWIAK, Krzysztof. Study of the impact of data compression on the energy consumption required for data transmission in a microcontroller-based system. Sensors, v. 24, n. 1, p. 224, 2024. DOI: 10.3390/s24010224.

PLASTRAS, Stavros et al. Non-terrestrial networks for energy-efficient connectivity of remote IoT devices in the 6G era: a survey. Sensors, v. 24, n. 4, p. 1227, 2024. DOI: 10.3390/s24041227.

QIN, Jing; LU, Yi; ZHONG, Yufen. Block-split array coding algorithm for long-stream data compression. Journal of Sensors, v. 2020, p. 1–22, 2020. DOI: 10.1155/2020/5726527.

RUELLÉ, Frédéric; GUELLAËN, Quentin; ROSAY, Arnaud. SHOID: A Secure Herd of IoT Devices Firmware Update Protocol. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS SECURITY AND PRIVACY (ICISSP), 9., 2023. Anais... [S.l.]: SCITEPRESS, 2023. DOI: 10.5220/0011628000003405.

SANTOS, W. G. V. dos et al. Medidores inteligentes com tecnologia NB-IoT: análise em ambientes urbanos e regiões rurais com o uso de blindagem. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (SENDI), 2023. Anais... [S.l.]: ABRADEE, 2023.

SIERRA WIRELESS. HL7845 module delivers 450 MHz LTE-M connectivity for smart metering and smart grid. [S.l.]: Sierra Wireless, 2021. Disponível em: https://www.sierrawireless.com. Acesso em: 23 abr. 2026.

WIECEK, Dariusz et al. Multi-RAT orchestration method for heterogeneous wireless networks. Applied Sciences, v. 11, n. 18, p. 8281, 2021. DOI: 10.3390/app11188281.

ZIMMERMANN, Günter et al. Smart grid communications: LTE outdoor field trials at 450 MHz. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART GRID COMMUNICATIONS (SMARTGRIDCOMM), 2015, Miami. Proceedings... [S.l.]: IEEE, 2015. p. 1–6. DOI: 10.1109/SmartGridComm.2015.7436282.