Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

COMPRESSÃO DE DADOS DE MEDIDORES INTELIGENTES: UMA SOLUÇÃO PARA REDUZIR E OTIMIZAR OS RECURSOS DO MEDIDOR DE ENERGIA EM REDES NBIOT

https://doi.org/10.56238/arev7n3-270

Data de submissão: 26/02/2025 **Data de publicação:** 26/03/2025

Gleison Guardia
Matemático e Cientista de Dados (Mestrado)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução/Instituto Federal de Rondônia – IFRO
E-mail: gleison.guardia@ifro.edu.br
ORCID: orcid.org/0000-0003-1402-0777
LATTES: lattes.cnpq.br/3081488341816997

Rogério Guerra Diógenes
Engenheiro de Telecomunicações (Mestrado)
Núcleo de Estudos e Pesquisas do Norte e Nordeste – NEPEN
E-mail: rogerio.diogenes@nepen.org.br
ORCID: orcid.org/0009-0007-5461-7937
LATTES: lattes.cnpq.br/3782482898648331

Iury Gonçalves França
Analista e Desenvolvedor de Sistemas (em andamento)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução
E-mail: iurygfranca@gmail.com
ORCID: orcid.org/0009-0007-8535-0139
LATTES: lattes.cnpq.br/5608507491741074**,**

Lucas Noé dos Santos Santana
Engenharia Mecatrônica (em andamento)
Núcleo de Estudos e Pesquisas do Norte e Nordeste – NEPEN
E-mail: lucas.santana@nepen.org.br
ORCID: orcid.org/0009-0009-6236-1753
LATTES: lattes.cnpq.br/6086974571374063

Jamilly Cristina de Sousa
Engenheira de Produção Mecânica (Pós-Graduação)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução
E-mail: jamillycristina90@gmail.com
ORCID: orcid.org/0009-0001-8820-3165
LATTES: lattes.cnpq.br/6374960584977744

Brunna Conceição de Paulo
Engenharia da Computação (Cursando)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução
E-mail: brunnacdepaulo@gmail.com
ORCID: orcid.org/0009-0003-6448-1309
LATTES: lattes.cnpq.br/5168826144828472

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Antônio Ébano Rafael Machado de Oliveira
Engenharia Mecatrônica (em andamento)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução
E-mail: eebanorafael@gmail.com
ORCID: orcid.org/0009-0006-7576-2722
LATTES: lattes.cnpq.br/9847201110211140

Alberto Alexandre Moura de Albuquerque
Engenheiro Eletricista (Mestrado)
Instituto de Ciência e Tecnologia da Evolução
alberto.alexandre@evolucaoinstituto.org.br
ORCID: orcid.org/0009-0003-1742-8652
LATTES: lattes.cnpq.br/1776411644533237

RESUMO
Este estudo propõe uma estratégia para otimizar a compressão de dados em dispositivos embarcados baseados no microcontrolador STM32WBA. O principal objetivo foi reduzir o volume de dados transmitidos em redes NB-IoT, com o objetivo de reduzir o volume desses dados sem comprometer a integridade da informação, ao mesmo tempo que respeita as restrições de memória e capacidade computacional destes sistemas. A pesquisa utilizou a biblioteca HEATSHRINK, baseada no algoritmo LZSS, ajustando parâmetros como o tamanho da janela de compressão (window_size) e o tamanho do lookahead (lookahead_sz2) integrado ao algoritmo BZ2 baseado na técnica Burrows-Wheeler Transform (BWT), para alcançar um equilíbrio entre taxa de compressão, tempo de processamento e consumo de memória. Os experimentos revelaram que configurações intermediárias, como HSWB06_HSLB04 e HSWB06_HSLB05, alcançaram taxas de compressão de até 46,93% para conjuntos de 96 amostras. Combinadas com uma redução de 21,15% no cabeçalho DLMS, essas configurações resultaram em um ganho total de compressão de 68,08%. Esses parâmetros também apresentaram tempos de processamento moderados, na faixa de 525 ms, e consumo de memória de 200 bytes, tornando-os adequados para dispositivos com recursos limitados. Por outro lado, configurações mais extremas, como HSWB10_HSLB09, apresentaram desempenho inferior, com taxas de compressão abaixo de 40% e tempos de processamento superiores a 7.900 ms, tornando-as inviáveis para sistemas que exigem baixa latência. Uma abordagem estratégica para alocar recursos de microcontroladores também foi implementada. Os dados originais foram armazenados em memória FLASH, os dados compactados na RAM e os buffers temporários foram gerenciados pelo STACK, garantindo estabilidade operacional mesmo sob condições de alta carga. A viabilidade dessas configurações foi confirmada por meio de análises de memória realizadas com a ferramenta Build Analyzer integrada ao STM32CubeIDE, que mostrou impacto mínimo nas operações do dispositivo. Os resultados obtidos destacam o potencial da biblioteca HEATSHRINK como uma solução eficiente para compressão de dados em dispositivos embarcados, desde que devidamente ajustada às especificidades da aplicação. Além disso, o estudo abre caminhos para avanços futuros, como a integração de técnicas de compressão híbrida com aprendizado de máquina, validações em ambientes reais e adaptações para sistemas de transmissão intermitente, como redes NB-IoT e LoRaWAN. Essas melhorias têm o potencial de expandir significativamente as aplicações de compressão em diversos setores, incluindo energia, saúde e transporte, promovendo maior eficiência energética, robustez e confiabilidade.

Palavras-chave: Compressão de dados. Dispositivos incorporados. Redes IoT. STM32WBA52CE.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

1 INTRODUÇÃO

Este estudo foi conduzido pelo Instituto Evolução de Ciência e Tecnologia, em colaboração com o Núcleo de Estudos e Pesquisas Norte e Nordeste (NEPEN) e o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO, com o objetivo de investigar e implementar soluções mais eficazes para compressão de dados em redes de dispositivos embarcados.

A pesquisa se concentrou no uso do microcontrolador STM32WBA, utilizado em uma NIC com tecnologia NB-IoT adaptada para o aMeter WASION. O principal objetivo é minimizar o volume de dados transmitidos diariamente sem comprometer a integridade das informações, promovendo menor uso do espectro de frequências e economia no uso de dados, principal parâmetro utilizado pelas operadoras de telefonia para cobrança de tarifas.

O Wasion Group é líder em soluções avançadas de medição, distribuição inteligente e gerenciamento de eficiência energética, operando em mais de 50 países. Fundada em 2000 e listada na Bolsa de Valores de Hong Kong desde 2005, a empresa emprega mais de 6.000 pessoas e investe cerca de 9,4% de sua receita em P&D, destacando-se por sua inovação tecnológica. Seu portfólio abrange medidores de eletricidade, água e gás, sistemas de telecomunicações, energia renovável e distribuição inteligente, com mais de 100 milhões de dispositivos entregues globalmente. A Wasion possui fábricas em locais estratégicos como México, Brasil e Hungria, garantindo atendimento próximo e suporte técnico 24 horas. Reconhecida por sua qualidade e certificações como CE e KEMA, a empresa colabora com marcas renomadas como Siemens e ABB, reforçando seu compromisso com a eficiência energética e a inovação sustentável em escala global.

O projeto propõe uma abordagem inovadora para a redução significativa e sem perdas do tráfego de dados, utilizando o conceito de memória de massa de energia. Isso envolve a aplicação de técnicas de pré-processamento para reduzir o volume de informações antes da compactação, a adoção de bibliotecas específicas para compactação e descompactação de dados e a integração com uma aplicação web para transmissão e recuperação das informações.

A estrutura do artigo está organizada em seis seções principais. **A Seção 2** apresenta uma revisão da literatura, explorando estudos relevantes que sustentam as técnicas e soluções discutidas. **A Seção 3** descreve as características do hardware embarcado usado nos medidores, suas limitações e as especificidades dos dados coletados e transmitidos.

A secção 4 descreve em pormenor os desenvolvimentos técnicos realizados, incluindo os algoritmos e as bibliotecas utilizados, bem como a modelização e a execução das experiências. **A Seção 5** discute os resultados obtidos, analisando a eficácia das soluções propostas. Por fim, a **Seção 6**

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

apresenta as conclusões do estudo, destacando suas contribuições e sugerindo possíveis direções para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A compressão de dados para dispositivos embarcados tem sido amplamente investigada em diferentes contextos, com foco na melhoria da eficiência energética, redução do consumo de recursos computacionais e otimização da transmissão de informações. Ketshabetswe et al. (2021) realizaram uma análise comparativa de algoritmos de compressão voltados para redes de sensores sem fio (WSN), destacando ALDC (Adaptive Lossless Data Compression) e métodos de compressão distribuída e agregação de dados. Este estudo resultou no desenvolvimento de um algoritmo capaz de reduzir o consumo de energia em até 76,8%.

No campo da compressão de dados textuais, Kodituwakku e Amarasinghe (2010) avaliaram algoritmos sem perdas, identificando as limitações do LZW em arquivos grandes e o desempenho robusto dos métodos de Huffman e Adaptive Huffman. Em paralelo, Sandoval et al. (2020) introduziram a decomposição tensorial para identificar padrões e anomalias em sistemas de potência, contribuindo para a operação eficiente desses sistemas. Zhang et al. (2023) e Zhang (2023) apresentaram RSDC (Real-Time Synchrophasor Data Compression), uma técnica em tempo real que aumentou as taxas de compressão e reduziu os atrasos nas redes elétricas.

Estudos de medidores inteligentes destacam abordagens práticas. Santos et al. (2023) investigaram medidores NB-IoT para reduzir fraudes em áreas urbanas e rurais, registrando um aumento de 134 kWh por unidade após a instalação de proteções, com 99% de eficiência na transmissão de dados. Meffe et al. (2023) implementaram uma solução de baixo custo para monitoramento remoto com LoRaWAN, proporcionando melhor cobertura em locais de difícil acesso e maior eficácia na detecção de fraudes.

Outras contribuições exploraram soluções específicas para compressão em dispositivos embarcados. Lee et al. (2016) propuseram um método sem perdas para tabelas de dados móveis, reduzindo o tamanho do arquivo sem comprometer a precisão. Moon et al. (2018) analisaram a compactação com perdas em dados espaço-temporais de IoT, examinando as compensações entre a redução de dados e a integridade das informações. Qin et al. (2020) introduziram o algoritmo CZ-Array para longos fluxos de dados em sensores com recursos limitados, superando gzip e bzip2 em taxas de compactação.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

A adaptação de algoritmos clássicos para redes IoT também foi explorada em Júnior e Oyamada (2023) e Júnior et al. (2023) onde aplicaram métodos como LZ77, LZ78 e Huffman, alcançando reduções de até 22% no consumo de energia e 70% na compressão de dados.

Finalmente, Malandrino et al. (2024) contribuíram com abordagens para cidades inteligentes e redes neurais profundas. Gomes aplicou o aprendizado de máquina à compressão de sensores, melhorando a eficiência energética em 22% e reduzindo a latência. Malandrino desenvolveu o PACT (Predictive Adaptive Compression Technique), ajustando dinamicamente a compressão em DNNs e reduzindo significativamente o consumo de energia.

Embora esta pesquisa progrida na otimização da compactação de dados e na eficiência energética, ela não aborda totalmente as restrições de memória, um aspecto crítico para dispositivos embarcados. Com base nesses estudos, este trabalho propõe uma solução inovadora para reduzir o tamanho dos arquivos transmitidos pelas placas controladoras, garantindo que o consumo de memória e a capacidade de armazenamento permaneçam compatíveis com as limitações de hardware durante a compressão e transmissão de dados.

3 INFRA-ESTRUTURA

3.1 SOBRE O HARDWARE

O STM32WBA é um microcontrolador sem fio de 32 bits desenvolvido pela STMicroelectronics, projetado para atender às necessidades de aplicações que exigem conectividade Bluetooth® Low Energy (BLE) e alta eficiência energética. Equipado com o núcleo Arm® Cortex-M33®, operando a até 100 MHz, o dispositivo combina desempenho de computação robusto com recursos avançados de segurança, como TrustZone® e Unidade de Proteção de Memória (MPU). Além disso, ele suporta instruções DSP e incorpora uma Unidade de Ponto Flutuante (FPU), recursos que o tornam adequado para processamento digital de sinais, veja a **figura 01**:

Figura 01: Medidores de wasion: À esquerda está o medidor completo, no centro está a parte superior do microcontrolador STM32WBA, no canto superior direito está a frente do microcontrolador e no canto inferior direito está o microcontrolador traseiro.

Fonte: Próprio autor

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

No campo da conectividade, o STM32WBA integra um transceptor de rádio de 2,4 GHz compatível com BLE 5.4 e protocolos adicionais como Thread, Matter, Zigbee® e soluções proprietárias. A sensibilidade de recepção do dispositivo é de -96 dBm para BLE a 1 Mbps e -97,5 dBm para IEEE 802.15.4 a 250 kbps, enquanto a potência de saída é programável até +10 dBm, em incrementos de 1 dB, oferecendo flexibilidade para várias condições de operação.

No que diz respeito à memória, o STM32WBA oferece até 1 Mbyte de memória flash com correção de erros (ECC), dos quais 256 Kbytes podem suportar 100.000 ciclos de gravação. Ele também possui 128 Kbytes de SRAM, 64 Kbytes dos quais são verificados por paridade. A versão implementada em medidores inteligentes, no entanto, tem uma configuração simplificada, com 512 Kbytes de memória flash e 96 Kbytes de RAM, adequada para aplicações mais restritivas.

O microcontrolador foi projetado para operar em ambientes de baixo consumo de energia. No modo de espera, ele consome apenas 160 nA com 16 pinos de ativação e 6,5 µA no modo Stop com 64 Kbytes de SRAM, tornando-o ideal para dispositivos alimentados por bateria.

Além do baixo consumo de energia, o STM32WBA é equipado com uma ampla gama de periféricos. Isso inclui um ADC de 12 bits com uma taxa de amostragem de até 2,5 Msps, comparadores de baixa potência, temporizadores de 16 e 32 bits e interfaces de comunicação como I2C, SPI, USART e SAI. Além disso, o dispositivo possui um controlador de toque capacitivo que suporta até 20 sensores, ampliando sua versatilidade para aplicações de interface sensíveis ao toque.

Essas especificações tornam o STM32WBA uma solução altamente adaptável e confiável, ideal para aplicações que vão desde a Internet das Coisas (IoT) até sistemas industriais. Sua combinação de conectividade robusta, eficiência energética e suporte para uma variedade de protocolos o posiciona como uma escolha estratégica para projetos que exigem alto desempenho e operação eficiente em dispositivos embarcados.

3.2 SOBRE OS DADOS

O estudo foi baseado no medidor trifásico Wasion, no qual os dados são transmitidos por meio de uma placa de interface de rede (NIC) para um módulo de coleta de dados (MDC). Durante esse processo, os dados relativos às medições do medidor são enviados na forma de um quadro de memória de massa, estruturado como uma matriz de bytes. Essa matriz encapsula as informações relacionadas às medições feitas pelo dispositivo.

O medidor de energia trifásico DTSD341, desenvolvido pela Wasion, é uma solução para consumidores residenciais e pequenos estabelecimentos comerciais, oferecendo medições precisas e confiáveis, veja a **figura 01**. Certificado com precisão classe 1.0 para energia ativa e classe 2.0 para

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

energia reativa, o dispositivo suporta faixas de tensão de 3x120/240 V e 3x127/220 V, com tolerância de -20% a +20%.

Equipado com um módulo de RF integrado para comunicação sem fio e uma opção de porta óptica, o DTSD341 facilita a leitura remota e a configuração de parâmetros, garantindo eficiência operacional. Seus recursos incluem suporte para até quatro tarifas diferentes, registro detalhado do perfil de carga com armazenamento de dados por 60 dias (em intervalos de 15 minutos) e detecção de eventos como abertura de tampa, reversão de corrente e falhas de fase. Seu display LCD grande e de fácil leitura, com suporte opcional para bateria interna ou supercapacitor, garante a visibilidade dos dados mesmo na ausência de energia. Além disso, a segurança dos dados é aprimorada pela comunicação protegida por senha, enquanto sua compatibilidade com o protocolo IEC62056-21 garante a adesão aos padrões internacionais.

Tabela 01: Hash de memória de massa de leitura

Ler memória de massa
0F00000000000010109290C6748E7E0000000000000000000000000000000000000000000000000308C0000308A0000308B0000

Fonte: Próprio autor

Para melhor compreensão, a **tabela 01** fornece uma visão geral detalhada das leituras capturadas, enquanto a **tabela 02** fornece uma explicação detalhada de como esses dados são organizados e estruturados no quadro. Essas tabelas ajudam a visualizar o formato e a interpretação das informações transmitidas pelo medidor trifásico, fornecendo uma visão geral clara de como os dados são gerados, estruturados e enviados para processamento.

Tabela 02: Tabela da memória de massa lida pelo medidor trifásico Wasion

Bytes	Descrição
0F000000000000101	Cabeçalho DLMS PDU (número fixo de bytes e informações)
09	Tipo de dados: indica que o tipo de dados contido no quadro é 'octet-string'
2A	Indica o tamanho das informações
0C	Modelo de memória de massa
Nº 6748E7E0	Carimbo de data/hora do UNIX
00000000	totalizador geral energia ativa direta A
00000000	totalizador energia ativa reversa geral A
00000000	Totalizador Direto Indutivo Energia Reativa Qi Geral
00000000	Totalizador de energia reativa capacitiva reversa geral QII
00000000	Totalizador Geral Indutivo Indutivo Reativo QIII
00000000	Totalizador Capacitivo Reativo Energia Direta Geral QIV
308C	Tensão A
0000	atual a
308UMA	Tensão B
0000	corrente b

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

308B	Tensão C
0000	corrente c

Fonte: Próprio autor

Como os primeiros bytes do quadro correspondem ao cabeçalho DLMS, que tem um formato fixo, eles podem ser descartados antes do estágio de compactação. Essa simplificação reduz o tamanho inicial de uma leitura de 52 bytes para 41 bytes, resultando em uma redução de 21,15% no tamanho do arquivo a ser transmitido.

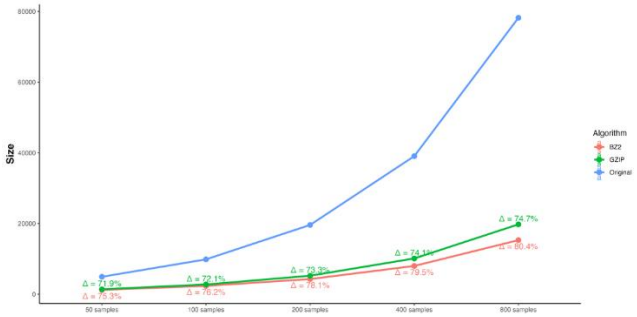
Com essa implementação inicial, a próxima etapa é aplicar técnicas de compactação ao restante do hash capturado em cada intervalo de tempo predefinido. Esse processo visa aumentar ainda mais o ganho obtido na redução do volume de bytes transmitidos, otimizando a eficiência da transmissão e garantindo maior economia no uso dos recursos do sistema.

4 DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de avaliar e melhorar o desempenho deste trabalho, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica em fontes renomadas, incluindo a Data Compression Conference (DCC), a base de dados IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), o portal de periódicos da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e os anais do SENDI (Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica) 2024. A pesquisa se concentrou exclusivamente em temas relacionados à compressão de dados em sistemas embarcados.

Com base nos estudos identificados, foram selecionados algoritmos para os testes iniciais, priorizando aqueles com potencial para atender às necessidades do sistema em termos de eficiência e desempenho. Com base nessa seleção, foi realizada uma análise detalhada da compressão aplicada ao armazenamento em massa, variando a quantidade de dados processados. O objetivo era encontrar o melhor equilíbrio entre volume de dados, taxa de compressão e desempenho do algoritmo. Os resultados obtidos para cada configuração testada são mostrados na **figura 02**.

Figura 02: Taxa de compressão dos algoritmos pesquisados



Fonte: Próprio autor

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

A análise revelou uma redução no volume de dados transmitidos variando de 75% a 80%, destacando a relevância da implementação proposta. Observou-se também que um aumento no número de arquivos acumulados resulta em ganhos incrementais na taxa de compressão. No entanto, o intervalo de tempo necessário para o envio dos arquivos mostrou-se um fator determinante nesse processo.

De acordo com os dados do sistema, acumular 100 leituras na memória de massa requer um período de aproximadamente 24 horas. Como o ganho percentual adicional na compactação não justifica o tempo adicional necessário para acumular mais dados, optou-se por padronizar em um intervalo de 24 horas como base para o envio. Essa decisão busca equilibrar a eficiência da compressão e o tempo de processamento, mantendo a viabilidade prática do sistema.

4.1 SOBRE O ALGORITMO BZ2

O algoritmo de compactação BZ2 é amplamente reconhecido por sua eficiência na compactação de dados sem perdas e é uma escolha frequente em sistemas Unix/Linux. Desenvolvido na década de 1990, é baseado na técnica Burrows-Wheeler Transform (BWT), que reorganiza subcordas para facilitar a compressão. Comparado aos métodos tradicionais, como ZIP e GZIP, o BZ2 tem taxas de compactação mais altas em muitos casos, tornando-o uma solução eficaz para armazenar e transmitir dados \cite{burrows1994bwt}. Sua eficácia vem da combinação de técnicas avançadas, como BWT, Move-to-Front (MTF), codificação Run-Length (RLE) e codificação de Huffman, que otimizam o processo de compressão Seward (2024).

O funcionamento do BZ2 é composto por estágios estruturados que maximizam a compressão. Em primeiro lugar, a Transformada de Burrows-Wheeler (BWT) reorganiza os caracteres no texto, agrupando padrões repetitivos e preparando os dados para as fases subsequentes. Em seguida, o Move-to-Front (MTF) converte caracteres em índices com base em sua frequência, maximizando a repetição de símbolos Cleary e Witten (1984). A codificação de comprimento de execução (RLE) compacta sequências repetitivas, como transformar 'aaaaa' em '5a'. Finalmente, a codificação de Huffman atribui sequências mais curtas aos caracteres mais frequentes, reduzindo ainda mais o tamanho dos dados Knuth (1998). Apesar dessas vantagens, o BZ2 requer mais memória e poder de processamento, limitando sua aplicação em sistemas com recursos limitados.

O BZ2 é amplamente utilizado em práticas que exigem compactação eficiente. Em sistemas Unix/Linux, é a escolha padrão para a criação de arquivos compactados com extensão .bz2, especialmente em backups e logs, devido à sua capacidade de reduzir o tamanho de arquivos grandes e facilitar sua transferência Python Software Foundation (2024). Além disso, o BZ2 é ideal para compactar grandes volumes de dados antes da transmissão, reduzindo custos e otimizando processos.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Ferramentas como tar oferecem suporte nativo para BZ2, integrando-o de forma eficiente aos fluxos de trabalho.

Neste estudo, o BZ2 foi avaliado quanto à sua viabilidade em sistemas embarcados, analisando o uso de ROM e memória RAM, bem como o custo operacional. No entanto, a natureza dos dados a serem compactados, armazenados em formato de byte, apresentou desafios significativos. Muitos algoritmos de compressão são otimizados para trabalhar com strings, valores hexadecimais ou números de ponto flutuante, enquanto os dados neste projeto exigiram uma abordagem específica. Essa limitação levou à experimentação com diferentes bibliotecas, buscando soluções que atendessem às restrições do sistema.

Após análise criteriosa, optou-se por adotar a biblioteca HEATSHRINK, disponível no repositório https://github.com/atomicobject/heatshrink. Desenvolvido para dispositivos embarcados, o HEATSHRINK é leve e eficiente, projetado para operar com formatos de dados como bytes, atendendo às necessidades específicas deste projeto. A escolha do HEATSHRINK permitiu contornar os desafios impostos pelos dados originais e possibilitou a implementação de uma compressão eficiente de acordo com as limitações e demandas do sistema.

4.2 SOBRE O HEATSHRINK

A biblioteca Heatshrink é uma solução projetada especificamente para compactação e descompactação de dados em sistemas embarcados e ambientes em tempo real. Sua principal característica é o baixo consumo de memória, com requisitos mínimos de apenas 50 bytes, bem como a capacidade de processar dados de forma incremental, otimizando o uso da CPU de forma controlada e eficiente. Essa flexibilidade torna o Heatshrink ideal para dispositivos com recursos limitados, permitindo alocações de memória estática ou dinâmica de acordo com as necessidades do projeto. As configurações podem ser personalizadas diretamente no *arquivo heatshrink_config.h*, fornecendo ajustes precisos para diferentes aplicações.

A biblioteca oferece duas formas de integração. O desenvolvedor pode incorporar diretamente as funções de codificação e decodificação no projeto ou usar a linha de comando autônoma programada para operações independentes. A operação segue um modelo simples baseado em uma máquina de estado. Os dados de entrada são fornecidos usando o método sink, processados e recuperados usando o método poll e, finalmente, a entrada é fechada com o método finish. Este ciclo pode ser repetido quantas vezes forem necessárias, permitindo a manipulação incremental dos dados.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Com sua eficiência e facilidade de uso, o Heatshrink se destaca como uma ferramenta dinâmica com baixo custo computacional, tornando-o uma escolha popular para sistemas embarcados que requerem compactação de dados sem comprometer os recursos limitados do dispositivo.

SOBRE O CÓDIGO

Para iniciar a implementação dos testes, estruturamos nossos algoritmos de forma a integrar a codificação do algoritmo BZ2 com as bibliotecas fornecidas pelo Heatshrink. Essa abordagem combinada visa aproveitar as vantagens de ambos os métodos, otimizando a compactação de dados em sistemas embarcados.

A **Tabela 03** apresenta o pseudocódigo que descreve a lógica usada para implementar o processo de compactação de dados. Essa estrutura detalha os estágios fundamentais do algoritmo, demonstrando como os dados são inicialmente processados pelo BZ2 e depois refinados usando o Heatshrink. Essa integração foi projetada para maximizar a eficiência, respeitando as limitações de memória e CPU típicas de dispositivos embarcados.

Tabela 03: Pseudocódigo de compactação

```
01 Use stdio.h
02 Use string.h
03 Use heatshrink_encoder
04 Use data_compress_app_layer.h

05 Definir max_compressed_data
06 Criar  mass_memory_samples
07 Criar compressed_data ← 0xff

08 Função compress_data (p_from*, from_size, p_to*, p_to_size*):
09 Inicializar p_from*
10 Inicialize  from_size
11 Inicializar p_to*
12 Artimanha :(x_i ≤ x_n)
13          p_to* ← x_i
14 Se  p_to*  ≥ max_compressed_data
15 Imprimir (erro)
16 Intervalo
17 Atualização p_to_size*
18 Retorno: p_to_size*

19 Função compress_data_test():
20 Inicializar compressed_data
21      compressed_data compress_data(mass_memory_samples)←
22 Imprimir compressed_data
```

Fonte: Próprio autor

O processo busca detalhar a implementação do sistema de compressão de dados utilizando a biblioteca Heatshrink, com ênfase na simplicidade e eficiência. Inicialmente, são definidas constantes

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

fundamentais, como o tamanho máximo permitido para os dados compactados, bem como estruturas básicas, incluindo o array *mass_memory_samples* para armazenar as amostras de memória que serão compactadas e o array *compressed_data* para conter os resultados compactados, inicialmente preenchidos com valores padrão.

A função principal, *compress_data*, é responsável por realizar a compactação iterativamente. Ele usa como entrada os dados originais, ponteiros para armazenar os resultados compactados e uma variável para registrar o tamanho final da compactação. O fluxo dessa função envolve a inicialização do codificador, o processamento dos dados originais em blocos e a extração contínua dos dados compactados até que todo o conteúdo tenha sido processado. Em caso de erros durante a execução, mensagens específicas são exibidas para garantir a transparência e facilitar a depuração. Quando a compactação é concluída, o tamanho final é atualizado e a função retorna o índice dos últimos dados processados.

Para validação e teste, a função *compress_data_test* usa a matriz *mass_memory_samples* como entrada, exibindo o índice retornado e os dados compactados em formato hexadecimal diretamente no console. Essa visualização facilita a análise e a verificação dos resultados obtidos.

A implementação também inclui funções auxiliares baseadas nos componentes da biblioteca, como *heatshrink_encoder* e *heatshrink_decoder*, que são usadas para compactação e descompactação de dados. Além disso, mecanismos robustos de tratamento de erros foram integrados para garantir que o processo seja confiável e seguro, mesmo em cenários adversos.

Com sua estrutura modular e bem definida, essa abordagem é altamente adequada para aplicações embarcadas que exigem eficiência e confiabilidade na compactação de dados, alinhando desempenho com simplicidade de implementação.

A função *decompress_data* **tabela 04** é responsável por descompactar os dados processados anteriormente, garantindo que o conteúdo compactado seja restaurado dentro dos limites especificados. Ele usa como entrada os dados compactados, o tamanho desses dados, um ponteiro para armazenar os dados descompactados, o tamanho final dos dados descompactados e o tamanho máximo permitido para a saída, garantindo que o processo permaneça dentro das restrições de memória.

Tabela 04: Pseudocódigo de descompactação

```
01 Use stdio.h
02 Use string.h
03 Use heatshrink_decoder
04 Use datacompressapplayer.h

05 Definir max_decompress_size
06 Função decompress_data(p_from*, from_size, p_to_size*, max_decompress_size ):
07 Inicializar p_from*
```

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

```
08 Inicializar from_size
09 Inicializar p_to*
10 Inicializar p_to_size*
11 Artimanha :x_i ≤ x_n
12          p_to* ⟵ x_i
13 Se p_to* ≥ max_decompress_size
14 Imprimir (erro)
15 Intervalo.
Atualização 16  p_to*
Atualização 17  p_to_size*
18 Retorno: 0
```

Fonte: Próprio autor

A função começa configurando o decodificador e inicializando as variáveis de controle, como a taxa de processamento e o tamanho pretendido para os dados descompactados. Para garantir um estado consistente, o decodificador é reiniciado antes de receber os dados compactados, que são gradualmente alimentados em partes menores. Essa abordagem de divisão em fragmentos reduz o risco de sobrecarga de memória, garantindo um processamento eficiente e compatível com as limitações do sistema.

Durante cada etapa de processamento, a função realiza verificações rigorosas para identificar possíveis erros. Se uma falha for detectada, mensagens de erro são exibidas, facilitando o diagnóstico e a correção. Ao mesmo tempo, o índice de processamento é atualizado continuamente, acompanhando o progresso do tratamento de dados. À medida que o fluxo progride, os dados descompactados são extraídos em cada iteração até que todo o conteúdo compactado tenha sido completamente processado.

Ao final do processo de descompactação, o tamanho final dos dados descompactados é registrado no ponteiro fornecido, garantindo que a memória alocada corresponda à quantidade de informações recuperadas. Por fim, a função retorna o valor 0, sinalizando que a operação foi concluída com êxito e que o conteúdo original foi restaurado sem erros ou interrupções.

4.3 IMPLEMENTAÇÃO

A biblioteca HEATSHRINK utiliza um conjunto de parâmetros configuráveis que impactam diretamente sua eficiência em termos de compactação e uso de recursos. Conforme descrito na documentação, o *parâmetro window_size* define o tamanho da janela, expresso como , e tem uma influência direta no consumo de memória e na eficiência do algoritmo de compactação. Outro parâmetro lookahead_sz2, que especifica o comprimento máximo de padrões repetidos, também definido como , com valores ideais entre 3 e . Além disso, o parâmetro $2^{W\ bytes} 2^{W\ bytes} window_size - 1$ *input_buffer_size* determina o tamanho do buffer de entrada no decodificador, influenciando a quantidade de dados processados em cada estágio.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Nos experimentos realizados, a configuração inicial para o parâmetro HEATSHRINK_STATIC_WINDO_BITS-(W) foi definida como 4, aumentando gradualmente para 10. Da mesma forma, o parâmetro HEATSHRINK_STATIC_LOOKAHEAD_BITS-(L) foi ajustado de 3 para *n-1*, levando em consideração o valor máximo de window_size. Cada bateria experimental incluiu 30 combinações diferentes de parâmetros. O cenário de teste foi desenhado para avaliar o desempenho em dois contextos de coleta de dados: o primeiro com 96 medições, equivalentes a 24 horas de leituras realizadas em intervalos de 15 minutos; o segundo com 144 medidas, correspondendo a leituras a cada 10 minutos no mesmo intervalo de 24 horas. Este último cenário foi denominado Tempo de Coleta (Tc).

O objetivo principal dos experimentos foi identificar a configuração que proporcionaria o melhor equilíbrio entre o tempo necessário para o envio dos dados e a eficiência da compressão, maximizando a relação custo-benefício. A estrutura matemática utilizada para modelar as configurações e analisar os resultados é formalizada na **equação 01**, que descreve a abordagem metodológica aplicada durante os testes.

$$T_{ij} = W_i Lj, \quad (1)$$

onde:

- $i = \{4, 5, 6, \cdots, 15\}$
- $j = \{3, \cdots, i-1\} \quad j \in Z.$
- T representa o teste

4.4 EXPERIÊNCIAS

Para a organização dos experimentos, foi adotado um planejamento de teste fatorial, representado por:

$$T_{30} \times Tc_2,$$

resultando em 60 testes diferentes, cobrindo todas as combinações possíveis de configurações.

A biblioteca HEATSHRINK foi usada para avaliar sua eficácia na compressão de quadros de memória de massa de um medidor trifásico. Cada quadro contém 52 bytes, dos quais 41 bytes são compostos de dados úteis após a remoção do cabeçalho DLMS, resultando em uma redução inicial de 21,42% no volume de dados transmitidos. Esses quadros incluem informações críticas, como o

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

carimbo de data/hora UNIX, totalizadores de energia ativa e reativa sob diferentes condições de operação, bem como as tensões e correntes correspondentes às fases A, B e C.

A implementação da biblioteca HEATSHRINK, baseada no algoritmo LZSS, possibilitou ajustar parâmetros que equilibram a eficiência da compressão com o consumo de recursos do sistema. O valor máximo para o parâmetro window_size foi limitado a 10, devido às restrições de memória do dispositivo, o que equivale a um buffer de 2.048 bytes. O experimento foi projetado para testar várias combinações de parâmetros, avaliando seu impacto no uso de memória, taxa de compressão e tempo de execução.

O dispositivo incorporado usado tem limitações significativas de memória: 4.096 bytes disponíveis para STACK, 2.048 bytes alocados para HEAP e 4.102 bytes livres. Na memória FLASH, o dispositivo possui 24.316 bytes. Esses recursos foram alocados estrategicamente para garantir a estabilidade do sistema durante os testes. Os dados originais foram armazenados na memória FLASH (seção .rodata), os dados compactados foram alocados na RAM (seção .noinit) e o buffer necessário para a operação da biblioteca foi alocado localmente no STACK.

A análise de uso de memória, conduzida com a ajuda do Build Analyzer do STM32CubeIDE, revelou que a inclusão da biblioteca HEATSHRINK implicou um aumento no tamanho da seção .text. Antes da incorporação da biblioteca, esta seção ocupava 146.204 bytes. Após a inclusão, o uso aumentou para 148.912 bytes, representando um aumento de 2.708 bytes. Desse total, 494 bytes foram atribuídos às funções criadas especificamente para os testes, enquanto 2.214 bytes corresponderam à própria biblioteca. Além disso, identificou-se uma variação no consumo de memória à medida que o parâmetro window_size foi ajustado: para o valor 6, houve um aumento de 44 bytes; para 7, o aumento foi de 212 bytes; e para valores entre 8 e 10, o aumento variou entre 216 e 220 bytes.

A análise estática do STACK confirmou que a alocação de buffer local, quando configurada corretamente, não comprometeu a integridade da memória do sistema. Essa validação foi essencial para garantir que as configurações testadas fossem adequadas para dispositivos reais, garantindo a confiabilidade das operações sem risco de falha. Os resultados obtidos estão detalhados na **Tabela 05**, fornecendo uma visão abrangente do impacto das configurações propostas.

Tabela 05: Resultados dos testes realizados, onde representa o tamanho dos dados originais, representa o tamanho dos dados compactados, representa a taxa de compactação, t representa o tempo necessário para compactação e SSA representa Análise de Pilha Estática.αβΔ

Configuração	96 Amostras				144 amostras				SSA
	α_1	β_1	$\Delta_{\alpha_1,\beta_1}$	t	α_2	β_2	$\Delta_{\alpha_2,\beta_2}$	t	
	(bytes)	(bytes)	(%)	(MS)	(Bytes)	(Bytes)	(%)	(MS)	(bytes)
HSWB04_HSLB03 3840 2405 0,3737 439 5760 3674 0,36215 664 104 HSWB05_HSLB03 3840 2258 0,4120 435 5760 3341 0,41997 661 136 HSWB05_HSLB04 3840 2311 0,3982 452 5760 3520 0,38889 687 136									

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

HSWB06_HSLB03 3840 2120 0,4479 541 5760 3179 0,44809 809 200
HSWB06_HSLB04 3840 2038 0,4693 525 5760 3056 0,46944 786 200
HSWB06_HSLB05 3840 2045 0,4674 527 5760 3060 0,46875 789 200
HSWB07_HSLB03 3840 2144 0,4417 840 5760 3212 0,44236 1257 336
HSWB07_HSLB04 3840 2047 0,4669 821 5760 3070 0,46701 1228 336
HSWB07_HSLB05 3840 2061 0,4633 821 5760 3084 0,46458 1228 336
HSWB07_HSLB06 3840 2112 0,4500 830 5760 3160 0,45139 1243 336
HSWB08_HSLB03 3840 2175 0,4336 1400 5760 3268 0,43264 2103 592
HSWB08_HSLB04 3840 2064 0,4625 1383 5760 3102 0,46146 2074 592
HSWB08_HSLB05 3840 2087 0,4565 1392 5760 3127 0,45712 2087 592
HSWB08_HSLB06 3840 2140 0,4427 1396 5760 3206 0,44340 2092 592
HSWB08_HSLB07 3840 2223 0,4211 1502 5760 3328 0,42222 2247 592
HSWB09_HSLB03 3840 2207 0,4253 2532 5760 3320 0,42361 3799 1104
HSWB09_HSLB04 3840 2086 0,4568 2517 5760 3142 0,45451 3773 1104
HSWB09_HSLB05 3840 2115 0,4492 2547 5760 3173 0,44913 3811 1104
HSWB09_HSLB06 3840 2205 0,4258 2764 5760 3309 0,42552 4149 1104
HSWB09_HSLB07 3840 2243 0,4159 2767 5760 3365 0,41580 4153 1104
HSWB09_HSLB08 3840 2281 0,4060 2770 5760 3422 0,40590 4158 1104
HSWB10_HSLB03 3840 2244 0,4156 4712 5760 3380 0,41319 7030 2128
HSWB10_HSLB04 3840 2116 0,4490 4716 5760 3194 0,44549 7008 2128
HSWB10_HSLB05 3840 2178 0,4328 5254 5760 3290 0,42882 7931 2128
HSWB10_HSLB06 3840 2218 0,4224 5254 5760 3350 0,41840 7933 2128
HSWB10_HSLB07 3840 2258 0,4120 5257 5760 3409 0,40816 7936 2128
HSWB10_HSLB08 3840 2298 0,4016 5256 5760 3469 0,39774 7936 2128
HSWB10_HSLB09 3840 2338 0,3911 5265 5760 3528 0,38750 7948 2128
Média 2179 0,4325 2318 3276 0,43119 3483 957

Fonte: Próprio autor

Os testes realizados com a biblioteca HEATSHRINK demonstraram claramente como as configurações de seus parâmetros influenciam a eficiência da compressão e o desempenho temporal do sistema. Durante as avaliações, a variação dos parâmetros window_size e lookahead_sz2 revelou uma relação direta: as configurações que adotaram valores mais altos para esses parâmetros resultaram em maiores taxas de compressão, refletindo maior eficiência na compressão dos dados. No entanto, esse ganho foi acompanhado por um aumento significativo no tempo necessário para o processamento.

Esse comportamento destaca o trade-off característico entre eficiência de compactação e desempenho, uma questão central no contexto de sistemas embarcados. Esses dispositivos operam sob severas limitações de recursos, como memória e capacidade de processamento, o que requer um equilíbrio cuidadoso na escolha das configurações. Portanto, a otimização dos parâmetros da biblioteca HEATSHRINK deve considerar não apenas a maximização da compressão, mas também a necessidade de preservar o desempenho geral do sistema, garantindo que ele permaneça funcional e eficiente dentro das restrições impostas pelo hardware.

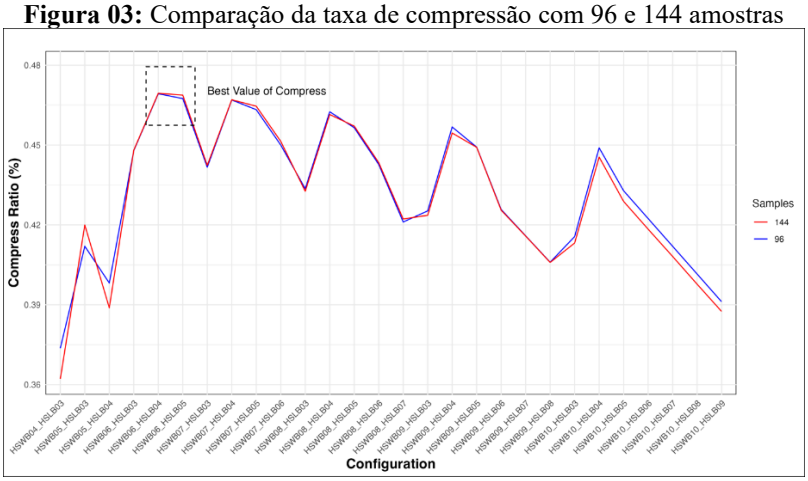
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Dentre os resultados obtidos, destacou-se o desempenho de configurações intermediárias, como HSWB0_HSLB04 e HSWB06_HSLB05, que demonstraram uma taxa de compressão próxima a

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

46,93% ao processar 96 amostras, com tempos de execução gerenciáveis de aproximadamente 525 ms. Esses achados mostram que é possível alcançar um equilíbrio adequado entre eficiência de compressão e desempenho temporal, tornando essas configurações viáveis para sistemas embarcados que precisam otimizar o uso de recursos sem comprometer significativamente o tempo de resposta. Veja a **figura 03**.

Figura 03: Comparação da taxa de compressão com 96 e 144 amostras



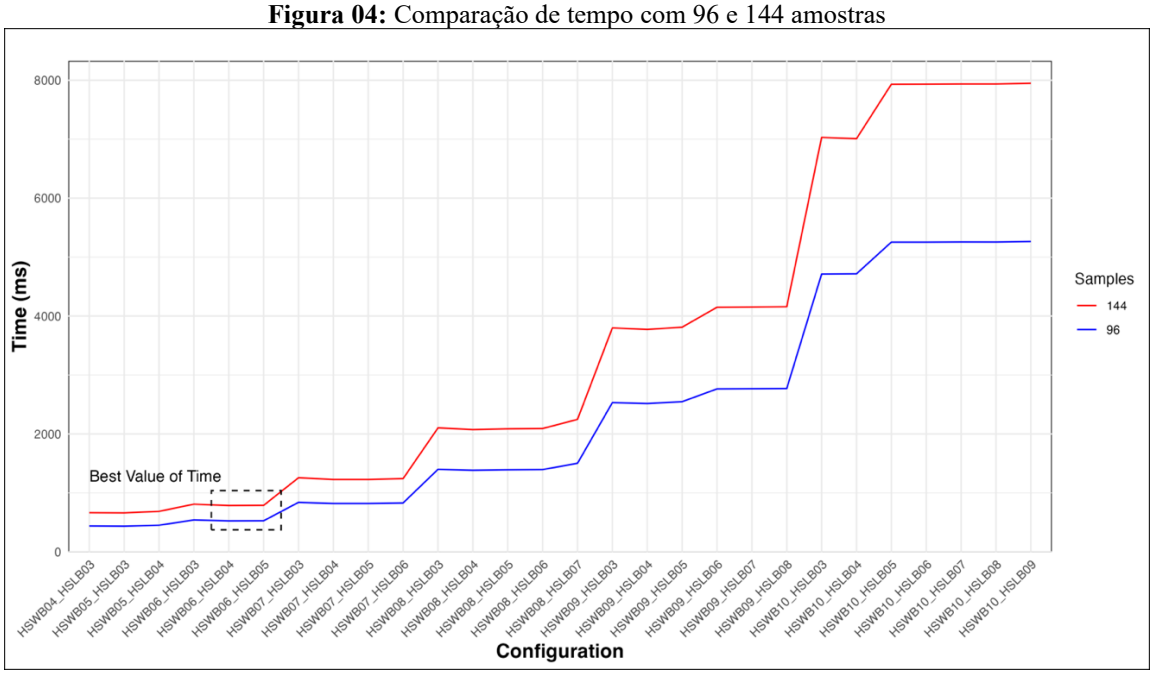
Fonte: Próprio autor

Em contrapartida, configurações mais extremas, como HSWB10_HSLB08 e HSWB10_HSLB09, apresentaram desempenho inferior, com taxas de compressão abaixo de 40%. Além disso, os tempos de processamento para essas configurações ultrapassaram 7.900 ms ao lidar com 144 amostras, valor que inviabiliza o uso em aplicações que exigem baixa latência ou respostas em tempo real. Esses resultados enfatizam a importância de balancear cuidadosamente os parâmetros para atender às demandas específicas de cada aplicação, especialmente em dispositivos embarcados onde os limites de hardware impõem restrições severas à escolha de configurações extremas.

Os testes também revelaram que o número de amostras processadas afeta diretamente o desempenho do tempo, enquanto as taxas de compressão permanecem praticamente inalteradas. Ao comparar cenários com 96 e 144 amostras, observou-se um aumento proporcional no tempo de execução em função do volume de dados processados, ver **figura 04**. Esses resultados indicam que a biblioteca HEATSHRINK é escalável, permitindo que ela seja usada com diferentes volumes de dados sem comprometer a eficiência da compactação. No entanto, em nosso aplicativo e caso de uso, o tempo não é um fator limitante, pois pode levar até minutos, pois estaremos compactando apenas uma vez por dia.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Figura 04: Comparação de tempo com 96 e 144 amostras



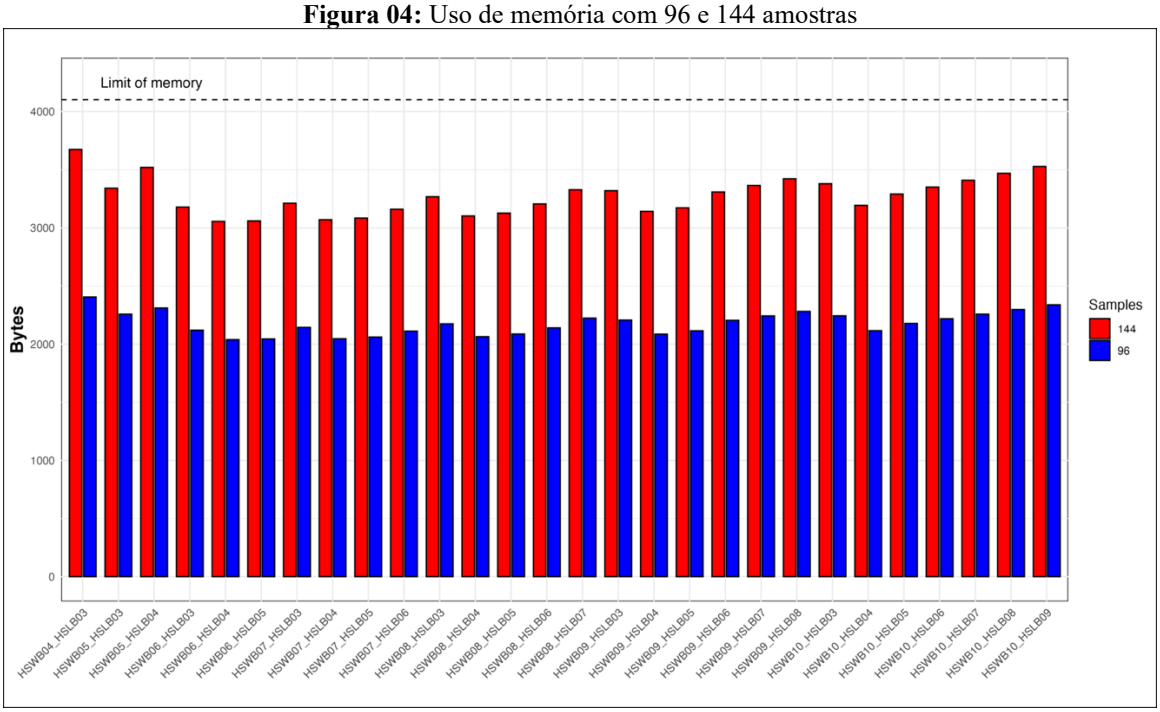
Fonte: Próprio autor

No entanto, o impacto no tempo de execução destaca a necessidade de ajustes precisos nas configurações, especialmente em aplicações que demandam tempos de resposta reduzidos. Essa análise reforça que, embora a escalabilidade do HEATSHRINK seja uma vantagem, sua aplicação em sistemas embarcados deve ser cuidadosamente projetada para garantir que o desempenho atenda aos requisitos operacionais específicos, mantendo a estabilidade e a eficiência do sistema.

A análise do impacto no uso de memória revelou resultados significativos, especialmente em configurações mais robustas como HSWB10_HSLB09, que demandavam até 2.128 bytes de memória, veja **a figura 05.** Esse consumo representa um desafio considerável para dispositivos embarcados, que geralmente são caracterizados por recursos limitados. Esses achados enfatizam a importância de fazer ajustes cuidadosos nos parâmetros, considerando não apenas a eficiência de compressão e o tempo de execução, mas também o consumo de memória, fator crítico para garantir a estabilidade e a funcionalidade dos sistemas embarcados em cenários operacionais restritos.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Figura 04: Uso de memória com 96 e 144 amostras



Fonte: Próprio autor

Com base nos resultados obtidos, as recomendações de configuração devem ser adaptadas ao contexto específico da aplicação. Para dispositivos que enfrentam restrições estritas de tempo e recursos, configurações intermediárias, como HSWB06_HSLB04 são mais apropriadas. Essas configurações oferecem um equilíbrio vantajoso, com taxas de compactação eficientes e tempos de execução gerenciáveis. Neste caso, a compressão provou ser altamente eficaz: reduzindo inicialmente o cabeçalho em 21,15% e aplicando uma taxa de compressão adicional de 46,93%, foi alcançada uma redução final de 68,08%, deixando o arquivo original com apenas 31,92% de seu tamanho inicial.

Em aplicações em que a eficiência máxima de compactação é uma prioridade, configurações com valores mais altos de window_size e lookahead podem ser exploradas, desde que o consumo de memória permaneça dentro dos limites aceitáveis do hardware. Dessa forma, é possível otimizar o desempenho da biblioteca HEATSHRINK para atender tanto às demandas de compressão quanto às restrições de cada ambiente operacional, garantindo a viabilidade e eficiência da aplicação em sistemas embarcados.

Os resultados obtidos enfatizam a importância de uma análise detalhada e criteriosa na definição dos parâmetros da biblioteca HEATSHRINK para sistemas embarcados. O ajuste adequado desses parâmetros é fundamental para alcançar o equilíbrio ideal entre eficiência de compressão, tempo de processamento e consumo de memória. Essa abordagem garante que os aplicativos atendam às suas demandas específicas sem comprometer a viabilidade técnica ou a eficiência operacional, especialmente em dispositivos com severas restrições de recursos.

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Os resultados também destacam a necessidade de uma parametrização equilibrada da biblioteca. Em cenários onde a prioridade é a eficiência de compressão, valores mais altos para window_size e lookahead_sz2 se mostraram vantajosos, proporcionando maiores taxas de compressão, mesmo com o aumento do consumo de memória e do tempo de processamento. Por outro lado, em aplicações que exigem baixa latência, como sistemas de tempo real, configurações intermediárias desses parâmetros foram mais adequadas. Essas configurações alcançaram taxas de compactação satisfatórias, com tempos de execução mais curtos e menor impacto no uso de RAM, tornando-as ideais para contextos onde o desempenho rápido é essencial.

O experimento mostrou que a aplicação do HEATSHRINK em sistemas embarcados requer uma compreensão completa das necessidades específicas da aplicação, bem como das limitações impostas pelo hardware. A estratégia de alocar os dados originais na memória FLASH e os dados compactados na RAM, aliada ao controle rigoroso sobre os parâmetros da biblioteca, possibilitou explorar sua eficiência em diferentes cenários. Essa abordagem não apenas otimizou o armazenamento e a transmissão de dados, mas também garantiu a estabilidade e o desempenho do sistema, mesmo em ambientes com recursos limitados.

Esses resultados fornecem uma base para a implementação de soluções de compactação em dispositivos embarcados. Ao equilibrar a configuração de parâmetros com as demandas específicas de cada aplicação, é possível maximizar os benefícios da compressão, garantindo a funcionalidade e eficiência do sistema sem comprometer sua estabilidade. Essas descobertas podem servir como uma referência valiosa para o desenvolvimento e otimização de sistemas embarcados que exigem soluções de compactação de dados robustas e escaláveis.

6 CONCLUSÃO

Este estudo investigou a aplicação de técnicas de compressão de dados em sistemas embarcados, com foco no uso da biblioteca HEATSHRINK para otimizar o desempenho de dispositivos baseados no microcontrolador STM32WBA. O principal objetivo era desenvolver uma solução eficiente que atendesse às restrições de recursos desse hardware, reduzindo o volume de dados transmitidos sem comprometer a integridade das informações ou a estabilidade do sistema.

Os testes realizados exploraram diferentes configurações de parâmetros HEATSHRINK, com ajustes nos valores de window_size e lookahead_sz2 para equilibrar a taxa de compressão, o tempo de processamento e o consumo de memória. As configurações intermediárias, como HSWB06_HSLB04 e HSWB06_HSLB05, alcançaram uma taxa de compactação de aproximadamente 46,93% ao processar 96 amostras, com tempos de execução em torno de 525 ms e um impacto controlado no uso

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

da memória, limitado a 200 bytes de RAM. Considerando a redução adicional proporcionada pela remoção do cabeçalho, a eficiência total atingiu 68,08%. Esses resultados demonstram que tais configurações são adequadas para dispositivos embarcados que requerem uma combinação de boa eficiência de compactação e tempos de execução gerenciáveis.

Em contraste, configurações mais extremas, como HSWB10_HSLB08 e HSWB10_HSLB09, apresentaram taxas de compressão inferiores a 40%. Além disso, os tempos de processamento excederam 7.900 ms para 144 amostras, enquanto o consumo de memória atingiu 2.128 bytes. Esses resultados enfatizam a importância de uma análise cuidadosa na escolha de parâmetros, particularmente em sistemas com restrições severas de memória e latência.

A análise também revelou que o volume de amostras processadas afeta diretamente o desempenho temporal, mesmo que as taxas de compressão permaneçam estáveis. Esse comportamento indica que a biblioteca HEATSHRINK é escalável, mas requer ajustes precisos para atender às demandas específicas de cada aplicativo. Para cenários que exigem baixa latência, as configurações intermediárias provaram ser a escolha ideal, oferecendo um equilíbrio eficiente entre compactação e desempenho.

A viabilidade técnica do experimento foi garantida pela alocação estratégica dos recursos do STM32WBA. Com memória RAM limitada a 4.096 bytes, os dados originais foram armazenados na memória FLASH, enquanto os dados compactados foram alocados na RAM. O buffer necessário para a operação da biblioteca foi gerenciado localmente no STACK, garantindo que o sistema permanecesse estável e livre de estouros de memória durante os testes. A análise realizada com o STM32CubeIDE Build Analyzer confirmou que essas estratégias de alocação possibilitaram integrar a biblioteca HEATSHRINK de forma eficaz, sem comprometer as operações gerais do dispositivo. Esses resultados fornecem uma base para a aplicação da compressão de dados em sistemas embarcados, equilibrando eficiência e estabilidade em diferentes cenários operacionais.

Os resultados deste estudo confirmam que a compressão de dados, além de reduzir significativamente o volume transmitido, representa uma solução eficaz para prolongar a vida útil de dispositivos alimentados por bateria, reduzir o consumo de energia e otimizar a largura de banda em redes IoT. Considerando as limitações específicas do STM32WBA, este trabalho propôs configurações otimizadas que maximizam os recursos do microcontrolador sem comprometer sua capacidade de armazenamento ou RAM durante os processos de compressão e transmissão de dados.

Como sua principal contribuição, o estudo posiciona a biblioteca HEATSHRINK, combinada com algoritmos de compressão, como uma solução viável para compressão em dispositivos embarcados, desde que configurada de forma precisa e adequada para atender às restrições de hardware

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

e demandas específicas de cada aplicação. Os resultados apresentados fornecem uma base para o desenvolvimento de implementações futuras, ao mesmo tempo em que sugerem a incorporação de técnicas híbridas e o uso de aprendizado de máquina para melhorar ainda mais o desempenho e a eficiência de dispositivos com recursos limitados.

Os avanços obtidos neste estudo oferecem uma contribuição significativa para a Wasion, fortalecendo sua posição como líder em soluções de medição inteligente e eficiência energética. A análise detalhada do impacto da compactação de dados em medidores embarcados, especialmente os STM32WBA, fornece diretrizes valiosas para otimizar o desempenho do dispositivo sem comprometer a integridade das informações ou a estabilidade operacional. Ao demonstrar a viabilidade do HEATSHRINK como uma solução eficiente para a redução do volume de dados transmitidos, este estudo possibilita a implementação de sistemas mais ágeis e energeticamente eficientes, prolongando a vida útil dos medidores e otimizando o consumo de recursos computacionais. Além disso, as configurações propostas permitem que os dispositivos da Wasion sejam melhor adaptados a redes de comunicação de baixa largura de banda, como LoRaWAN e NB-IoT, ampliando o alcance e a competitividade da empresa no mercado global de medição inteligente. Com base nos resultados apresentados, futuras integrações com técnicas avançadas, como compressão híbrida e aprendizado de máquina, poderão melhorar ainda mais a eficiência dos sistemas embarcados da empresa, consolidando sua capacidade de inovação e atendendo às crescentes demandas por soluções sustentáveis e escaláveis no setor de energia.

As recomendações para trabalhos futuros incluem a exploração de técnicas de compressão híbrida que combinam algoritmos clássicos, como os usados neste estudo, com métodos modernos baseados em aprendizado de máquina. Abordagens como redes neurais compactadas e modelos preditivos adaptativos podem ser investigadas para otimizar ainda mais a eficiência da compactação, especialmente em dispositivos com severas restrições de recursos. Essas soluções têm o potencial de identificar padrões em tempo real e adaptar o processo de compressão às características dinâmicas dos dados coletados, proporcionando maior flexibilidade e eficiência. Também podemos explorar uma comparação prática com equipamentos em campo, analisando a eficiência antes e depois da implementação do algoritmo.

Além disso, recomendamos investigar estratégias avançadas de gerenciamento de memória para dispositivos incorporados com recursos ainda mais limitados do que o STM32WBA, bem como novas configurações de amostra e tempos de coleta. Métodos como alocação dinâmica de memória e buffers segmentados podem ser testados para oferecer maior flexibilidade no gerenciamento de recursos durante a compactação e o envio de dados. Essa linha de pesquisa pode incluir o

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

desenvolvimento de métricas detalhadas para avaliar o impacto da compressão no desempenho geral do sistema, fornecendo uma visão mais abrangente dos benefícios e limitações das soluções propostas.

Outra área de interesse seria a integração de técnicas de compressão com sistemas de monitoramento e análise preditiva, usados em aplicações como manutenção preditiva e detecção de anomalias. A combinação de compactação eficiente com modelos preditivos não apenas reduziria o volume de dados transmitidos, mas também permitiria antecipar falhas e identificar comportamentos anômalos com maior precisão. Essa abordagem seria particularmente útil em redes IoT industriais, onde a confiabilidade e a eficiência são cruciais.

Por fim, a validação em campo das configurações otimizadas propostas neste estudo é uma etapa fundamental na consolidação dos resultados teóricos e experimentais. Estudos futuros poderão realizar testes em larga escala, simulando diferentes condições de operação e avaliando a robustez, eficiência e confiabilidade das soluções propostas em cenários reais. Esse tipo de validação prática tem o potencial de ampliar as aplicações das técnicas de compressão em setores como energia, saúde e transporte, ampliando o impacto e a relevância das contribuições deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Grupo Wasion, que acreditou no Evolução Instituto e em seus parceiros, NEPEN e IFRO, para realizar essa pesquisa e prototipar a solução encontrada. 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

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

REFERÊNCIAS

Burrows, M., & Wheeler, D. J. (1994). *A block-sorting lossless data compression algorithm* (Report No. 124). Digital Equipment Corporation. https://www.hpl.hp.com/techreports/Compaq-DEC/SRC-RR-124.pdf

Cleary, J. G., & Witten, I. H. (1984). Data compression using adaptive coding and partial string matching. *IEEE Transactions on Communications, 32*(4), 396–402.

Costanzi, J. E., & Guembarovski, R. H. (2023). Aplicação de técnicas de mineração de dados para aprimoramento da gestão do sistema elétrico de baixa tensão. In *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*.

Júnior, J. A. de O., Camargo, E. T. de, & Oyamada, M. S. (2023). Data compression in LoRa networks: A compromise between performance and energy consumption. *Journal of Internet Services and Applications, 14*(1), 1–15.

Júnior, J. A. de O., & Oyamada, M. S. (2023). Avaliando o impacto da compressão de dados no desempenho e energia em redes LoRa. In *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*.

Ketshabetswe, K. L., Zungeru, A. M., Mtengi, B., Lebekwe, C. K., & Prabaharan, S. R. S. (2021). Data compression algorithms for wireless sensor networks: A review and comparison. *IEEE Access, 9*, 136872–136882. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3114358

Knuth, D. E. (1998). *The art of computer programming: Sorting and searching* (Vol. 3). Addison-Wesley.

Kodituwakku, S. R., & Amarasinghe, U. S. (2010). Comparison of lossless data compression algorithms for text data. *Indian Journal of Computer Science and Engineering, 1*(4), 416–426.

Lee, J., Gong, Q., Choi, J., Banerjee, T., Klasky, S., Ranka, S., & Rangarajan, A. (2022). Error-bounded learned scientific data compression with preservation of derived quantities. *Applied Sciences, 12*(13), Article 6718. https://doi.org/10.3390/app12136718

Lee, W.-H., Chen, M.-H., Lee, C.-Y., & Li, Y.-L. (2016). *Lossless compression of data tables in mobile devices using co-clustering*.

Malandrino, F., Di Giacomo, G., Karamzade, A., Levorato, M., & Chiasserini, C. F. (2024). Tuning DNN model compression to resource and data availability in cooperative training. *IEEE/ACM Transactions on Networking, 32*(2), 1600–1615. https://doi.org/10.1109/TNET.2023.3325299

Meffe, A., Prieto, M. A. P., Garcez Neto, A. de F., & Teodoro Júnior, J. R. (2023). 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)*.

Moon, A., Kim, J., Zang, J., & Son, S. W. (2018). Evaluating fidelity of lossy compression on spatiotemporal data from an IoT. *Computers and Electronics in Agriculture, 154*, 304–313. https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.09.015

Revista ARACÊ
ISSN: 2358-2472

Python Software Foundation. (2024). *bz2 compression compatible with bzip2*. https://docs.python.org/3/library/bz2.html

Qin, J., Lu, Y., & Zhong, Y. (2020). Block-split array coding algorithm for long-stream data compression. *Journal of Sensors, 2020*, Article 1–22. https://doi.org/10.1155/2020/8839888

Ribera Neto, D., & Leite, M. A. R. (2023). Aplicação de inteligência artificial no processo de análise dos dados de medição com foco na recuperação de energia. In *Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (SENDI)*.

Sandoval, S., Vargas, A., Ortega, C., & Vidal, Y. (2020). Three-way unsupervised data mining for power system applications based on tensor decomposition. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 123*, Article 106241. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106241

Santos, W. G. V. dos, Queiroz Costa, J. V. de, Salustiano de Oliveira, R., & Cabral, M. de O. (2023). 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)*.

Seward, J. (2024). *bzip2 and libbzip2: A program and library for data compression*. https://www.sourceware.org/bzip2/

Zhang, F., Liu, M., Zhang, Z., He, J., & Gao, W. (2023). Real-time synchrophasor data compression technique with phasor interpolation and extrapolation. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 11*(3), 803–815. https://doi.org/10.35833/MPCE.2021.000567

Zhang, Z. (2023). The improvement of the discrete wavelet transforms. *Mathematics, 11*(1770). https://doi.org/10.3390/math11081770