

NovaGenesis Over LoRa in an IoT Scenario

Epper Bonomo¹, Rodrigo Hilario Santos¹, Antonio Marcos Alberti¹

¹ICT Lab – Instituto Nacional de Telecomunicações (INATEL)
Santa Rita do Sapucaí – MG – Brazil

epper.bonomo@mtel.inatel.br, rodrigo.hilario@gea.inatel.br, alberti@inatel.br

Abstract. *This article expands our previous works to improve the FIA (Future Internet Architecture) called NovaGenesis regarding Internet of Things (IoT) scenarios, specially for LPWAN (Low Power Wide Area Network) applications. First, the basic concepts necessary to understand NovaGenesis, as well as the fundamental characteristics of the LoRa (Long Range) communication technology will be briefly discussed. This paper extends NovaGenesis for LoRa integration, updating its embedded version, developing and configuring the required OS and device resources. Then, an experimental evaluation scenario is proposed in order to prove the benefits of NovaGenesis with LoRa for IoT. The evidence collected from the laboratory tests subsidize and prove the feasibility of implementing a FIA on a LPWAN with low throughput capacity and packet loss. To the best of our knowledge, this is the first time LoRa is integrated with a FIA, evaluating its performance. Finally, the points still open for future work and the conclusion of this article are delimited.*

Resumo. *Este artigo expande trabalhos anteriores visando melhorar a FIA (Future Internet Architecture) chamada NovaGenesis em cenários de Internet das Coisas (em inglês Internet of Things - IoT), especialmente para aplicações LPWAN (Low Power Wide Area Network). Primeiramente, serão discutidos brevemente os conceitos básicos necessários para entendimento da NovaGenesis, bem como as características fundamentais da tecnologia de comunicação LoRa (Long Range). Este artigo estende a NovaGenesis para integração com LoRa, atualizando sua versão embarcada, desenvolvendo e configurando os recursos necessários do SO e do dispositivo. Em seguida, é proposto um cenário de avaliação experimental para comprovar os benefícios da NovaGenesis com LoRa para IoT. As evidências coletadas nos testes em laboratório subsidiam e comprovam a viabilidade da implementação de uma FIA em uma LPWAN com baixa capacidade de throughput e com possíveis perda de pacotes. Até onde sabemos, esta é a primeira vez que o LoRa é integrado a uma FIA, avaliando seu desempenho. Por fim, delimitam-se os pontos ainda em aberto para futuros trabalhos, bem como as conclusões que pode ser delineadas.*

1. Introdução

Ao longo dos últimos anos, vem-se observando um crescimento exponencial do número de dispositivos capazes de se conectar a Internet, como por exemplo: geladeiras, televisores, lâmpadas, carros, tratores, entre outros. Estudos recentes indicam que mais de 70 bilhões de dispositivos estarão conectados a Internet até 2025 [Evans 2019] [STADISTA 2016].

Duas vertentes surgiram com objetivo de ampliar a capacidade da Internet para suportar esta crescente demanda de novos serviços impulsionados pela IoT. Uma baseada na evolução da Internet atual, que utiliza pilha dupla de protocolo como o IPv6 e em cenários IoT uma versão otimizada denominada 6LoWPAN (*IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks*) [Mulligan 2007] foi implementada. Um outro caminho de pesquisa foca em desenvolver novas arquiteturas do zero, em um conceito chamado *Clean Slate*, levando em consideração os aprendizados anteriores, os serviços conhecidos e preparação para outros serviços ainda não populares ou a serem inventados. Ambos os caminhos são denominados de FI (*Future Internet*). Existem importantes projetos que buscam atender a este repensar da Internet, denominados de *Future Internet Architecture* (FIA), dentre eles podemos destacar **NDN Named Data Networking** [Lixia Zhang and Zhang 2014] uma evolução da CCN *Content Centric Network* [Van Jacobson and Braynard 2009]; **ETArch Entity Title Architecture** [Pereira 2011] que propõe uma arquitetura baseada em roteamento por títulos; **XIA eXpressive Internet Architecture** [David Naylor 2000] uma proposta de arquitetura projetada em torno do princípio central de segurança intrínseca permitindo que cada parte expresse sua intenção de se comunicar; e, **NovaGenesis (NG)** [Antonio M. Alberti and da R. Righi 2019, Alberti et al. 2018], a qual será melhor detalhada na próxima seção.

Este artigo propõe a implementação da FIA NG utilizando LoRa. Trabalhos anteriores provaram a viabilidade de implementar uma versão reduzida da NG para dispositivos embarcados [Antonio M. Alberti and da R. Righi 2019] utilizando Ethernet e Wi-Fi. Neste artigo, expandimos este conceito para uma rede LPWAN. As principais contribuições desse trabalho são: (a) Desenvolvimento da arquitetura NG com LoRa para IoT; (b) Aprimoramento do serviço embarcado NG (EPGS - Embedded Proxy Gateway Service) para executar em dispositivo ESP-32; (c) Preparação do sistema operacional RTOS para execução do EPGS; (d) Aprimoramento da aplicação IoT NG (IoTTestApp) para funcionamento com o EPGS LoRa; (e) Desenvolvimento de um Gateway LoRa para Wi-Fi e vice-versa.

O restante desse artigo é organizado como segue. Na Seção 2 serão apresentados as arquiteturas objeto desta proposta, na seção 3 serão abordados os principais desafios de se integrar a NG em uma rede LoRa utilizando plataformas abertas para desenvolvimento e as grandezas desejadas a serem medidas. Nesta prova de conceito foi utilizado o ESP-32 LoRa da *Heltec Automation*. Os resultados obtidos baseados em registros de *logs* e pacotes coletados são apresentados na Seção 4 os quais mostraram um excelente desempenho da NG em uma rede LoRa com perdas próxima de 4% de publicações de temperatura. Em adicional foram identificados os principais ofensores de perda. A Seção 5 encerra este artigo, delimitando os pontos em aberto para futuros trabalhos e apresentando as conclusões e contribuições para o estado da arte, expandido a abrangência de uma arquitetura NG em cenários de longa distância utilizando redes LoRa.

2. Fundamentação

Esta seção se divide em duas partes: NovaGenesis e LoRa.

2.1. NovaGenesis

O repensar da Internet pela ótica da NovaGenesis leva em consideração os aprendizados da Internet atual, o resultado de uma extensa pesquisa realizada nos requisitos de iniciativas de *Future Internet* (FI), tecnologias e mudanças com uma expressiva relevância no cotidiano da sociedade atual, incluindo em sua estrutura a capacidade de ser flexível o suficiente para suportar novos serviços emergentes. A NG é formada por um conjunto de sistemas distribuídos onde qualquer tratamento ou troca de informação é considerada como um serviço, sendo portanto uma arquitetura centrada em serviços “*Service Centric*”.

A NovaGenesis reúne em uma única arquitetura ingredientes que possibilitam sua convivência com as redes legadas, assim como outras arquiteturas que venham a surgir. É estruturada em três camadas com funções bem definidas [José A. T. Gavazza 2020][da Silva 2021]: uma camada que é responsável pela comunicação entre serviços internos da própria NG, ou quando fora, adaptar as mensagens a serem enviadas para a camada de enlace; uma segunda camada onde estão os serviços especializados; e por último a camada de aplicação. São definidas como *Convergence Layer*, *NovaGenesis Layer* e *Application Layer*, respectivamente.

Seu objetivo é criar uma estrutura genérica que pudesse lidar com nomeação, ciclo de vida, identificação persistente, independência de localização, fazer a ligação de conteúdo, serviços e coordenação de coisas. É formada por blocos com funções bem definidas utilizadas na comunicação entre entidades. Na NG uma “**Entidade**” designa a existência física e virtual que tem função de lidar com informações ou dados.

Uma versão reduzida da NG foi desenvolvida sem perder as suas características, funções e princípios básicos definidos na arquitetura principal. O EPGS [Antonio M. Alberti and da R. Righi 2019], *Embedded Proxy Gateway Service*, reúne em uma versão compacta todos os ingredientes da NG com capacidade para ser instalado em dispositivos com sistemas operacionais leves e com recursos limitados. É capaz de gerar, enviar, receber e interpretar comandos NG dentro de tarefas pré definidas para seu ciclo de vida. Tem a capacidade de adaptar as mensagens para serem enviadas em qualquer camada de enlace, fragmentando e remontando os pacotes. O EPGS tem métodos para receber informações sobre o dispositivo, características do sensores e dados.

O protocolo de comunicação entre o EPGS e o núcleo da NG é baseado em tarefas que indicam as ações a serem executadas dentro do ciclo de vida do serviço. Uma tarefa a ser executada é composta por um conjunto de linhas de comando NovaGenesis. As mensagens NG possuem todos os comandos e dados necessários para a comunicação e processamento entre as entidades envolvidas. Cada comando ocupa uma linha e é composto por duas partes. Um *Header* e os *Arguments*. A figura 1 ilustra a estrutura de um comando NG e suas componente de formação para a composição de uma tarefa. O tamanho médio das mensagens NG e a quantidade de fragmentos esperados na transmissão LoRa são apresentados nas últimas linhas dessa tabela. Estas informações serão úteis para o entendimento dos resultados dos testes em laboratório.

| Command Line | Hello | Exposition | Service Offering | Service Acceptance | Data Publishing | Header | | | Arguments Arg = <Nº Element Tipo Elemento Elem 1 Elem 2 ... Elem "n"> | |
|---------------------|-------|------------|------------------|--------------------|-----------------|---------------|----------|-------------|---|------------------------------------|
| | | | | | | ng command | Name | Alternative | | |
| | | | | | | ng | - name | --Altern. | Ver. | [<Arg1> <Arg2> <Arg3>... <Arg"n">] |
| Routing | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | ng | -m | --cl | 0.1 | [<Arg1> <Arg2> <Arg3>] |
| Hello | 2 | | | | | ng | -hello | --ihc | 0.2 | [<Arg1>] |
| Publish Name (Bind) | | 2* | | | | ng | -p | --b | 0.1 | [<Arg1> <Arg2> <Arg3>] |
| Publish Data | | | 2 | | 2 | ng | -p | --notify | 0.1 | [<Arg1> <Arg2> <Arg3> <Arg4>] |
| Payload Information | | | 3 | | 3 | ng | -info | --payload | 0.1 | [<Arg1>] |
| Key Signature | | | | 2* | | ng | -s | --b | 0.1 | [<Arg1> <Arg2>] |
| Verification | 3 | 3 | 4 | 3 | 6 | ng | -scn | --seq | 0.1 | [<Arg1>] |
| Message Type | | 4 | 5 | 4 | 4 | ng | -message | --type | 0.1 | [<Arg1>] |
| Message Sequence | | 5 | 6 | 5 | 5 | ng | -message | --seq | 0.1 | [<Arg1>] |
| Payload | | | 7 | | 7 | | | | | |
| Tamanho (Bytes) | 314 | 981 | 1213 | 420 | 535 | | | | | |
| Nº Frag. Em LoRa | 2 | 5 | 5 | 2 | 3 | | | | | |

Legend: * Numbers of commands is variable

Figura 1. Formação de mensagens e comandos NG executados pelo EPGS.

2.2. LoRa

Nos cenários de IoT, principalmente em casos de grandes áreas de cobertura e conectividade de longas distâncias algumas características são importantes e precisam ser avaliadas, como por exemplo, o tempo de vida das baterias em casos de dispositivos autônomos, sua capacidade de escalar considerando uma quantidade extremamente elevada de dispositivos, ser robusto para interferências dado percorrer grandes distâncias, suportar mobilidade e ter capacidade de garantir um nível de segurança dos dados transmitidos.

Neste sentido o LoRa, uma das tecnologias classificadas como LPWAN se desdobra com uma tecnologia que atende a estes principais requisitos. O LoRa é estruturado em duas camadas [Bor et al. 2016], uma associada a camada física, também conhecida como LoRa MAC que define a modulação e cria os enlaces para comunicações de longo alcance, utiliza com técnica de modulação o *Chirp Spread Spectrum*. A segunda camada é a LoRaWAN^R, onde se define os protocolos de comunicação e arquitetura de rede entregando ou adaptando as mensagens para a Aplicação. O LoRaWAN possui três classes de rede que define como será o modo de comunicação entre o Nó e o *Gateway* visando ter a melhor eficiência energética do dispositivo remoto.

O LoRa na faixa do 915 MHz pode operar em largura de banda de 125 KHz ou 500 KHz com 64 ou 8 canais respectivamente suportando uma taxa máxima de transmissão de 21,9 Kbps com um *payload* útil máximo de 222 Bytes utilizando um Spread Factor (SF) igual a 7 em uma banda de 500 KHz. A topologia Estrela é a mais comum em uma rede LoRa onde os *Gateways* retransmitem mensagens entre os dispositivos finais (Nós) e um servidor de rede central no *back-end* onde estão as aplicações [N. Sornin (Semtech) 2015].

Este trabalho se restringe a utilizar apenas a camada física do LoRa para garantir a viabilidade do protocolo suportar o transporte de mensagens trocadas entre os elementos da arquitetura FIA em um ambiente de IoT, que não se limita a apenas publicação de dados de telemetria, possuindo um protocolo que define todo o ciclo de vida do serviço. Com ajustes de intervalos de tempos entre mensagens enviados pela NG e definição de regras de hibernação do dispositivo é possível se implementar na própria NG uma condição similar ao realizado pelas classes de rede do LoRaWAN, o qual não é escopo deste trabalho.

3. NovaGenesis com LoRa para Conectividade IoT de Longa Distância

A Figura 2 ilustra de forma geral os desafios de implementar a FIA NG permeando os elementos que compõe a rede LoRa. O dispositivo ESP-32 LoRa foi escolhido como plataforma que o mesmo reúne em um único *hardware* alguns ingredientes que viabilizaram a prova de conceito, tais como: (a) ser *open*; (b) possuir 2 núcleos de processamento; (c) possuir memória suficiente para suportar os “OS”, protocolos de comunicação e o EPGS; (d) suportar protocolos IoT, como Wi-Fi, BLE e LoRa; (e) diferentes faixas de frequências; (f) baixo consumo de energia; e (g) baixo custo.

Para avaliar NG com LoRa implementamos um nó remoto com o EPGS embarcado no sistema Operacional RTOS, que é capaz de transmitir medidas coletadas para um servidor central NG utilizando comunicação LoRa. O núcleo da NG é instalado em um servidor central, conectado a uma rede local Ethernet. Um *Gateway* (GW) de protocolo desenvolvido para atender este cenário, traduz pacotes NG encapsulados em LoRa para Wi-Fi e vice-versa. Por fim, um roteador Wi-Fi é utilizado para viabilizar esta comunicação fim a fim entre a rede local e o *Gateway* LoRa. A Figura 2 ilustra o cenário.

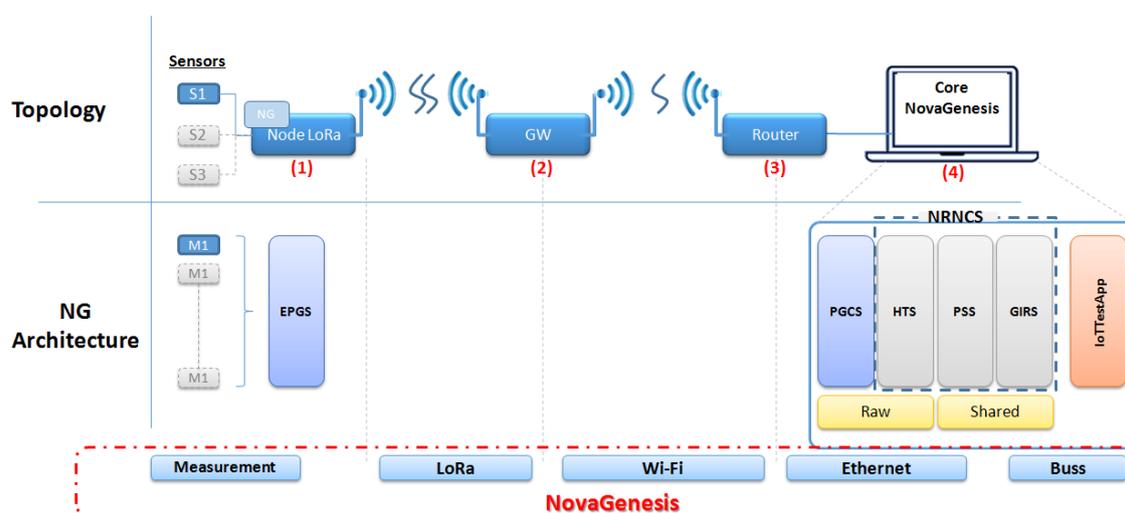


Figura 2. Cenário da NG com LoRa incluindo GW CPE. A figura mostra outros serviços NG do core, como o PGCS e o NRNCS, ambos parte do núcleo da NG.

O **EPGS** é a versão reduzida da NG para dispositivos embarcados, responsável pela inicialização, exposição e publicação de dados coletados nas interfaces IO onde estão conectados os sensores. O **GW** faz a adequação/tradução de mensagens LoRa e Wi-Fi, implementa controle de fluxo por meio de semáforos e controle de filas. O **Router** conecta os Gateways LoRa a rede local. O **NG Core** é o núcleo da NG. Os módulos PGCS e NRNCS (HTS, PSS e GIRS) são responsáveis pelo controle, descoberta, exposição e gestão do ciclo de vida dos serviços. E por fim, a **IoTTestApp** é a aplicação consumidora de dados de temperatura, que assina contrato com a NG e com o EPGS.

O EPGS foi adaptado com as características do meio de transmissão LoRa antes de disparar o processo de inicialização da NG, expandindo sua capacidade para operar em uma rede LoRa que possui características próprias, tais como: limitação de *throughput*, e processo de auto descoberta para encontrar os nós adjacentes. Os temporizadores entre mensagens da NG foram ajustados, garantindo uma maior aderência da FIA NG ao meio.

Isso demonstra a capacidade de adaptação da NG a novos meios de comunicações.

O desenvolvimento de um *Gateway* foi necessário para a tradução das mensagens LoRa para Wi-Fi e vice-versa. Uma fila para tratar as mensagens enviadas para o nó foi desenvolvida, garantindo que só seriam enviadas na janela de transmissão. Mecanismos de validação de uma mensagem NG foi implementado para minimizar possíveis colisões. No sentido Wi-Fi não foi necessário este controle devido sua capacidade de vazão. Nesta implementação do GW não foi considerado método de controle de acesso ao meio, o que ampliaria a capacidade do GW em tratar mensagens para um número maior de nós EPGs. Neste protótipo, apenas um único nó é suportado. A Figura 3 ilustra o macro fluxo implementado no GW e seus principais blocos de tomada de decisão.

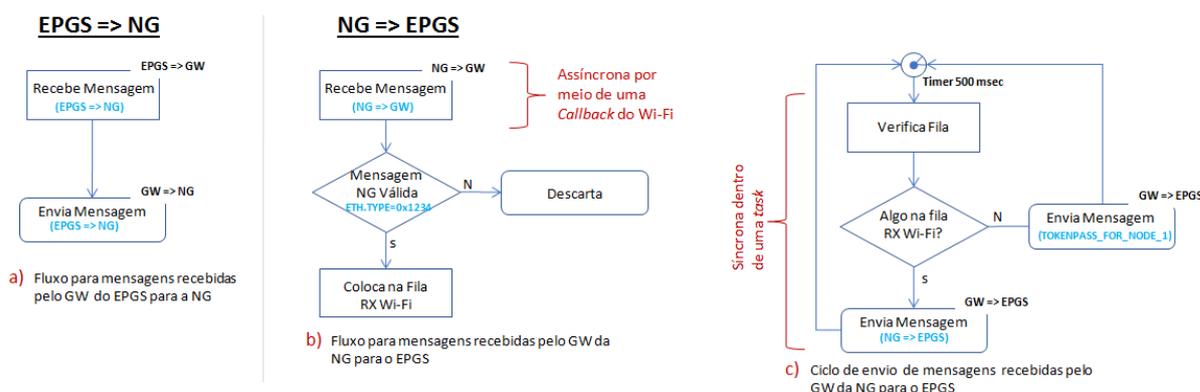


Figura 3. Macro fluxo de mensagens NG implementadas no Gateway.

4. Metodologia de Teste e Resultados

De forma a garantir que todos os pontos fossem abordados para validação da hipótese desta pesquisa, a seguinte metodologia foi aplicada para realização do teste em bancada: (a) Definição dos recursos de *hardware* e *software*; (b) definição de um plano de teste; (c) implementação do ambiente; (d) teste de validação da solução; (e) coleta dados e *logs* no maior número de pontos que subsidiasse a hipótese; e (f) geração de relatórios de conclusão. Considerando o ambiente implementado atendendo a arquitetura proposta em 2, foram realizados testes de publicação de dados de temperatura pelo EPGs considerando um intervalos de 2 segundos entre cada publicação. Foram coletados **5.402** amostras enviadas pelo EPGs para a aplicação IoTTestApp. As coletas dos registros que comprovam a hipótese deste artigo estão baseados em: (a) *logs* na interface serial do EPGs e do GW; (b) mensagens/pacotes capturados pelo WireSharkTM na rede local; e (c) do arquivos com os registros de publicações assinadas pela aplicação que contem indicadores de sequencia e tempos além do próprio dado de temperatura, indicados pelos números 1/2, 3/4 e 5 respectivamente da Figura 2. Os registros coletados foram processados em planilhas, mantendo suas características e rastreabilidade.

Dado que a rede local está em ambiente controlado e isolado, sem tráfego concorrente sob nosso controle que pudesse inserir atrasos, foi inicialmente considerado (mas, isso se provou errado mais tarde) que toda a variação entre medições, assim como possíveis perdas, tenha ocorrido no trecho da comunicação LoRa ou processamentos interno do GW ou da própria NG. A grandeza analisada será a perda de mensagem NG e seus sensores.

Os pacotes de publicação de dados de medição de temperatura enviados em mensagens NG “Data Publishing”, quando recebidos pelo PGCS, são armazenados no cache de rede NRNCS e notificados aos demais interessados. A aplicação “IoTTestApp”, que tem dois contratos assinados, um com o PGCS e outro com o EPGS, recebe as notificações de publicação do NRNCS e assina os arquivos de amostra “*.json”. Então, a “IoTTestApp” assina os arquivos de amostra do cache (NRNCS) e guarda os valores no arquivo com o nome de “data.txt”, que contem as seguintes informações: (a) o *Timestamp* das publicações gravadas; (b) **nome do nó** que publicou; (c) o **número de sequência** da publicação; e (d) a **medida instantânea da temperatura** coletada.

4.1. Medidas de Perda de Mensagens e Fragmentos

Dos *logs* coletados e analisados concluiu-se que **4,28%** das mensagens de publicação de dados foram perdidas e estão relacionados a perda de um (1) único fragmento da mensagem. Uma vez que cada mensagem de publicação de dados possui três fragmentos, indica que o LoRa entregou uma disponibilidade de **98,56%** ou perda de **1,44%**, conforme ilustrado na Figura 4.

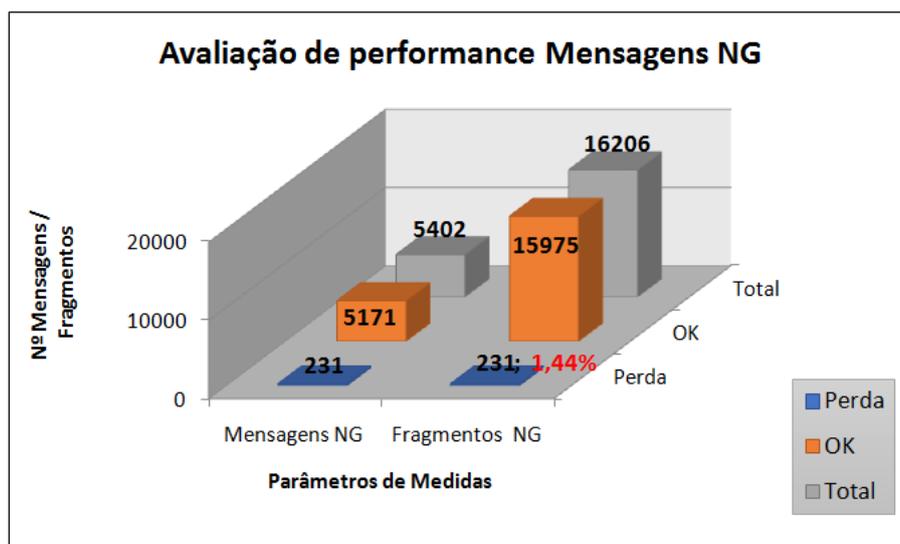


Figura 4. Perda de mensagens NG, fragmentos e mensagens fora de ordem.

Uma vez que todas as coletas foram obtidas no mesmo PC utilizando o mesmo sincronismo de relógio físico, foi possível correlacionar os registros do arquivo “data.txt” com os *logs* e capturas do Wireshark™, possibilitando identificar ofensores de perda, fragmentos perdidos e relevância das perdas em cada trecho apresentados na Figura 2. Apesar de inicialmente o Wi-Fi ter sido considerado como elemento neutro neste experimento, o trecho Wi-Fi se demonstrou como o maior ofensor de perda, representando **65,80%** do total de mensagens perdidas. Este elevado índice de perda levou a uma análise mais profunda dos possíveis motivos deste resultado. Os Gráficos ilustrados na Figura 5 apresentam os resultados obtidos da análise de perdas.

Na busca dos motivos que levaram ao grande volume de perdas no Wi-Fi foi avaliado o uso do espectro no local dos testes. A Figura 6 ilustra recortes de imagens de telas de monitoramento do *Access Point* Aruba modelo IAP-205RW

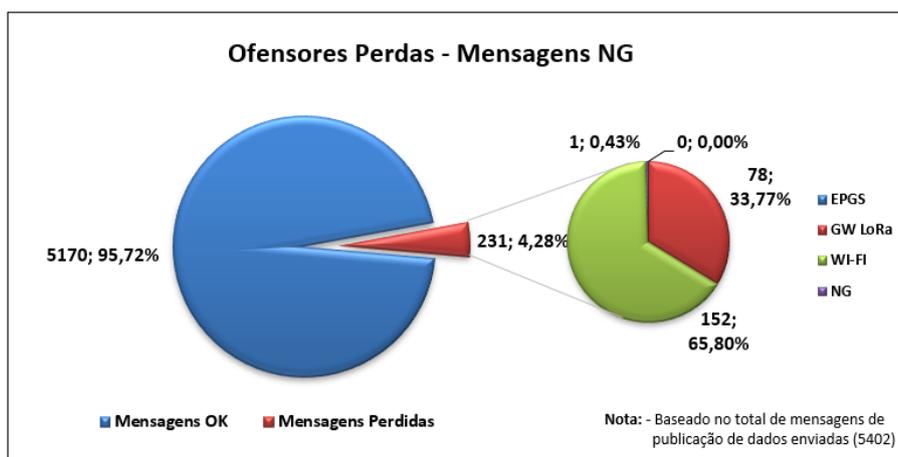


Figura 5. Ofensores de Perda de mensagens NG em uma Arquitetura NG sobre uma rede LoRa.

[Networks 2017], com a versão de *firmware* 6.5.4.22 no modo *Spectrum Monitor* utilizado para analisar os níveis de interferência na rede Wi-Fi para a frequência de 2.4GHz, mesmas utilizadas no experimento desta proposta. Foram identificados no monitoramento ofensores de qualidade e interferência representados na figura pelo mesmo índice: (a) identificados Telefones sem fio, microondas e *Bluetooth* operando na mesma frequência gerando interferência; (b) o canal utilizado durante os testes apresenta uma degradação 40% do sinal; (c) no total de geradores de sinal ao redor foram identificados 223 APs e 53 cientes na mesma frequência gerando interferência. Os testes com o protótipo rodou em uma região próxima a Av. Paulista - São Paulo - SP (Lat/Long 23°34'52"S 46°39'09"W), local com elevado índice de interferência de RF [de Leon. Yara Maria Botti Mendes de Oliveira e Raquel Cymorot 2007]. Com base nos resultados apresentados é possível afirmar que a interferência gerada por dispositivos externo foi a principal causadora das perdas de pacotes no trecho Wi-Fi, sendo que foram identificados nos *logs* do GW que os pacotes foram transmitidos. Não foi possível realizar o teste em local com menor nível de interferência.

5. Conclusão

Este trabalho propôs expandir a utilização da arquitetura FIA NovaGenesis em cenários de IoT utilizando LoRa. A partir deste objetivo foram abordadas brevemente as características das duas arquiteturas objeto desta integração. Um cenário de teste foi proposto para validar sua implementação e testes foram realizados utilizando o protótipo. Registros que pudessem subsidiar análises do comportamento e fundamentasse os resultados foram coletados em todos pontos possíveis deste protótipo.

Com base nos resultados obtidos durante os experimentos e análise dos *logs* podemos afirmar: (a) é totalmente viável a implementação da FIA NovaGenesis utilizando LoRa em um cenário de IoT — foi possível comprovar que ambas arquiteturas (NG e LoRa) não foram ofensores de perda; (b) a NG não enfrentou dificuldades em operar com mensagens de PDU limitadas no LoRa, mostrando a capacidade da NG e do EPGS em se adaptar a distintos meios físicos, provando a capacidade da NG tratar fragmentação, remontagem e ordenação dos pacotes em IoT; (c) o ESP-32 LoRa da Heltec, suportou em-



Figura 6. Nível de interferência RF no local de teste.

barcado no mesmo dispositivo o RTOS, o LoRa e o EPGS; e por ultimo (d) a flexibilidade do ESP-32 para diversas aplicações possibilitando a implementação de um *Gateway*.

6. Trabalhos Futuros

Alguns pontos não foram possíveis de serem abordados neste protótipo e ficam como sugestões para novos experimentos e trabalhos futuros expandido o cenário da FIA NG utilizando rede LoRa:

- Repetir os teste em local com um nível menor de interferência na banda de teste para validar a hipótese de que o nível de interferência externo foi o maior ofensor de perdas no Wi-Fi;
- Múltiplos Gateways / Múltiplos Nós** de forma a validar cenários de escalabilidade gerenciados pela NovaGenesis.
- Validar cenários **mobilidade de Nós EPGS** em uma arquitetura FIA NG com múltiplos *Gateway*;
- Tipos de Classes de serviço** similar ao LoRaWAN implementado diretamente na NovaGenegis, assim possibilitando a NG gerenciar fim a fim a eficiência energética do EPGS;

Nota: Durante os testes foi identificado um problema no código principal do EPGS, em parte não sofreu intervenção para implementar o protótipo em LoRa, que ocasiona erro de alocação de memória dinâmica, não sendo liberada por algum processo não identificado. Este deverá ser corrigido antes de prosseguir com as demais proposta de projetos futuros.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela RNP, com recursos do MCTIC, processo No 01245.010604/2020-14, sob o projeto Sistemas de Comunicações Móveis de 6ª Geração (6G) do Centro de Referência em Radiocomunicações (CRR) do Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel, Brasil. Os autores também agradecem ao CNPq e FAPEMIG. Em tempo, espera-se que os experimentos e resultados obtidos nesta prova de conceito possa contribuir para o enriquecimento do "Estados da Arte" nesta jornada de evolução das Arquiteturas de Internet do Futuro (FIA).

Referências

- Alberti, A., Aurelio Favoreto Casaroli, M., Righi, R., and Singh, D. (2018). *Introducing NG as a Novel Distributed System-Based Convergent Information Architecture*.
- Antonio M. Alberti, Gabriel D. Scarpioni, V. J. M. A. C. S. J. J. J. P. C. R. and da R. Righi, R. (2019). Advancing novagenesis architecture towards future internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 6:215 – 229.
- Bor, M., Vidler, J. E., and Roedig, U. (2016). Lora for the internet of things. *Lancaster University*.
- da Silva, T. B. (2021). Novagenesis control agent for future internet exchange point. *Tese de Mestrado*.
- David Naylor, Matthew K. Mukerjee, P. A. R. G. R. K. M. M. (2000). Xia:architecting a more trustworthy and evolvable internet. *ACM Journals*, pages 50 – 57.
- de Leon. Yara Maria Botti Mendes de Oliveira e Raquel Cymorot, L. C. P. (2007). Estudo dos níveis de radiações eletromagnéticas de alta frequência em uma importante avenida da cidade de são paulo. *Mackenzie*.
- Evans, D. (2019). The future of iot miniguide: The burgeoning iot market continues. *Cisco Newsletter*.
- José A. T. Gavazza, Juliano Coelho Melo, T. B. d. S. A. M. A. P. F. R. F. d. O. S. F. L. V. . J. A. S. (2020). Future Internet Exchange Point (FIXP): Enabling Future Internet Architectures Interconnection. *Springer, Cham*.
- Lixia Zhang, Alexander Afanasyev, J. B. V. J. k. c. P. C. C. P. L. W. and Zhang, B. (2014). Named data networking. *ACM Journals*, pages 66 – 73.
- Mulligan, G. (2007). The 6LoWPAN architecture. *ACM Journals*.
- N. Sornin (Semtech), M. Luis (Semtech), T. E. I. T. K. I. O. A. (2015). Lora specification. *LoRa Alliance*.
- Networks, A. (2017). Aruba 200 serie access point. *Technical Datasheet*.
- Pereira, J. H. d. S. (2011). Title model ontology for future internet networks. in: Future internet assembly 2011: Achievements and technological promises. *The Future Internet*.
- STADISTA (2016). Internet of things (iot) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025. *Statista Research Department*, page 5.
- Van Jacobson, Diana K. Smetters, J. D. T. M. F. P. N. H. B. and Braynard, R. L. (2009). Networking named content. *ACM Journals*, pages 1 – 12.