GRUPO DE ESTUDO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÃO PARA SISTEMAS ELÉTRICOS - GTL

DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE DESEMPENHO DO PROTOCOLO WI-SUN EM PROJETO PILOTO NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

LUCIANA MICHELOTTO IANTORNO(1);GEOVANA SCARAMELLA(1);ADRIANO RUSSI ALVES SILVA(2);VICTOR BARPP GOMES(1);ANANIAS AMBROSIO QUISPE(1);ALAN DONIZETI RODRIGUES FERNANDES DE MORAIS(2);CELSO FERREIRA DA SILVA(2);SERGIO VIANNA DE FARIAS(2);RODRIGO JARDIM RIELLA(1);LOURIVAL LIPPMANN JUNIOR(1)
LACTEC(1);TECSYS DO BRASIL(2)

RESUMO

Um meio de comunicação que garanta, além de um bom desempenho, interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes é uma demanda crescente das concessionárias de energia. O protocolo Wi-SUN FAN, por ser um protocolo aberto e ter tido seu desenvolvimento inicial focado para as concessionarias de energia, possui um ótimo potencial para suprir essa necessidade. O presente informe técnico descreve os resultados obtidos durante testes em campo com equipamentos Wi-SUN desenvolvidos no projeto P&D ANEEL PD-00047-0080/2017 utilizando duas redes de comunicação distintas, mostrando que para aplicações com controle de recebimento de pacote, a disponibilidade da rede é em torno de 99%.

PALAVRAS-CHAVE

1.0 - INTRODUÇÃO

Com o crescimento de aplicações voltadas para Smart Grid, não apenas no Brasil como no mundo, a existência de um meio de comunicação que garanta não apenas a comunicação entre dispositivos distintos, mas também a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes é fundamental para que as concessionárias de energia não dependam apenas de um fabricante para os equipamentos de seu parque, dando a elas um poder de negociação maior para aquisição de novos equipamentos e sistemas. Na atualidade, várias alianças de tecnologia têm se formado para fornecer soluções para as diferentes aplicações de larga escala, como exemplo disso, tem-se as alianças LoRa e Zigbee, onde seus padrões de LoRaWAN e Zigbee, respectivamente são muito pesquisadas (1) (2), que permitiram identificar a aplicabilidade e limitações desses padrões nos diferentes serviços. Neste cenário, emergem novas propostas de padrões que se tornam importante avaliar.

Nos últimos anos, surgiu o protocolo de comunicação da aliança *Wireless Smart Ubiquitous Network* (Wi-SUN), especificamente a solução para Rede de Área de Campo (FAN, do inglês *Field Area Network*), chamada Wi-SUN FAN (3), um padrão de comunicação sem fio em malha (*mesh*) de multi-salto. Por ser uma tecnologia relativamente nova, o Wi-SUN tem poucas publicações em comparação com as outras. A proposta de seu modelo é a utilização de uma estrutura de protocolos abertos, suportando redes de alta densidade de nós, o que se torna uma solução promissora para aplicações com baixa demanda de tráfego e alta densidade, como medição inteligente, por exemplo. O perfil Wi-SUN FAN (4) suporta especificações para Redes Sem Fio de Baixa Potência e com Perdas (LLNs, do inglês *Low Power and Lossy Networks*), nas quais os dispositivos requerem sistemas operacionais otimizados para uso em um ambiente cujos equipamentos são limitados em capacidade de processamento, memória e armazenamento.

Apesar de já haver equipamentos homologados pela aliança com o protocolo Wi-SUN FAN, ainda não há registro de redes de comunicação com esse tipo de protocolo operando em campo com equipamentos de fabricantes distintos. Além disso, não foram encontrados estudos práticos da análise de desempenho das redes Wi-SUN em aplicações reais. Por exemplo, o trabalho de Junjalearnvong et al. (2017) (5) propõe um aprimoramento do algoritmo de roteamento ETX (do inglês *Expected Transmission Count*) para melhorar o desempenho de transmissão para nós móveis, realizando a validação através de simulações. No ano de 2019 os mesmos autores (6) apresentam um modelo experimental multi-salto composto por um nó roteador de borda e quatro nós roteadores, no trabalho é feita uma análise do processo de configuração da rede, para descobrir os pontos críticos de uma configuração lenta, conseguindo melhorar o tempo de salto entre os nós de 5 min para 1 min. Para o experimento foram utilizados

dispositivos do tipo USB *dongle* com uma separação entre eles de 2 cm. O trabalho de Hotta et al. (2020) (7) propõem dois esquemas de seleção dos candidatos pais na rede, para evitar o problema frequente de alteração de pai (especialmente nos enlaces de baixa qualidade), buscando que os candidatos a nó pai sejam selecionados adequadamente. Os esquemas foram avaliados experimentalmente em uma rede de 1 roteador de borda e 12 roteadores instalados em um ambiente típico de prédio com escritórios, conseguindo validar as melhoras em seu esquema proposto. Neste sentido, ainda falta avaliar com mais profundidade esta tecnologia para identificar possíveis pontos fracos do padrão e realizar propostas de melhoria.

Com base nesta demanda, este trabalho selecionou a referida tecnologia para desenvolvimento de equipamentos e análise de desempenho em campo, onde foi possível realizar as avaliações em uma rede inteligente real em um ambiente de distribuição de energia elétrica. Para isso, no projeto foram desenvolvidos diferentes equipamentos para suportar este tipo de rede, como são os módulos concentrador Wi-SUN integrados no concentrador chamado Multilink, encarregados de receber os dados provenientes dos módulos de comunicação de Wi-SUN, que foram integrados em sensores inteligentes da rede elétrica. Dessa forma, foram realizados testes na rede, com diferentes tamanhos e frequências de envio de pacotes, o que permitiu, a medições de perda de pacotes por dispositivo e total da rede.

1.0 - METODOLOGIA

O sistema de comunicação aqui descrito foi projetado e desenvolvido pelo Lactec em parceria com a Tecsys para as empresas do Grupo Neoenergia, com apoio do programa de Pesquisa e Desenvolvimento da Aneel, sob o código PD-00047-0080/2017 – Desenvolvimento de Tecnologia para Redes Elétricas Inteligentes – Infraestrutura (Parte 2).

O projeto concebeu o desenvolvimento e construção de hardware e firmware para os quatro dispositivos mostrados na Figura 1, a, b e c, sendo: O Concentrador Wi-SUN, responsável por formar e gerenciar toda rede WI-SUN, realizando a autenticação dos dispositivos e armazenamento dos certificados de segurança. Módulo de Comunicação Wi-SUN, dispositivo conectado aos sensores inteligente e injetores de dados através de uma interface RS232. Repetidor Wi-SUN, aplicado para ampliar o alcance e também melhorar a performance da rede e Concentrador Multilink, equipamento concebido com uma arquitetura modular e escalável, responsável por gerenciar todos os meios de comunicação a *Wide Area Network* (WAN), que através do Concentrador Wi-SUN promove a conexão dos Módulos de Comunicação Wi-SUN com os servidores de aplicação.

a) b) c) d)

FIGURA 1 - Equipamentos desenvolvidos no projeto: a) Módulo de Comunicação Wi-SUN, b) Repetidor Wi-SUN, c) Concentrador Wi-SUN e d) Concentrador Multilink

Durante o desenvolvimento, os equipamentos passaram por testes em laboratório de interoperabilidade com equipamentos de mercado de dois diferentes fabricantes, para validação do protocolo Wi-SUN FAN (8).

Além disso, para validar o funcionamento dos equipamentos desenvolvidos no projeto, e para a análise do funcionamento do protocolo de comunicação Wi-SUN, os equipamentos foram instalados em campo na rede de distribuição da COELBA com duas aplicações distintas: uma aplicação simulada através de injetores de dados, com o objetivo de medir a performance da rede Wi-SUN em campo e uma aplicação real, utilizando Sensores Inteligentes de média tensão, com aplicação para detecção e localização de perdas não técnicas. Além disso, a rede de comunicação também foi utilizada para validação do desenvolvimento de um hardware de segurança cibernética desenvolvido no projeto.

1.1 - Aplicações

1.1.1 - Injetores de Dados

O sistema de injetor de dados foi proposto para gerar trafego de dados de forma contínua e conhecida na rede Wi-SUN, com tamanho de pacote e periodicidade variáveis. Este dispositivo injeta os dados através da porta serial do módulo de comunicação Wi-SUN, transmitindo assim, pela rede, até o concentrador Wi-SUN que, através de conexão com Concentrador Multilink, encaminha os dados até o servidor. Este servidor hospeda uma aplicação que realiza a análise e separação dos dados e os salva em um banco de dados. Tal processo é ilustrado na Figura 2FIGURA *2*.

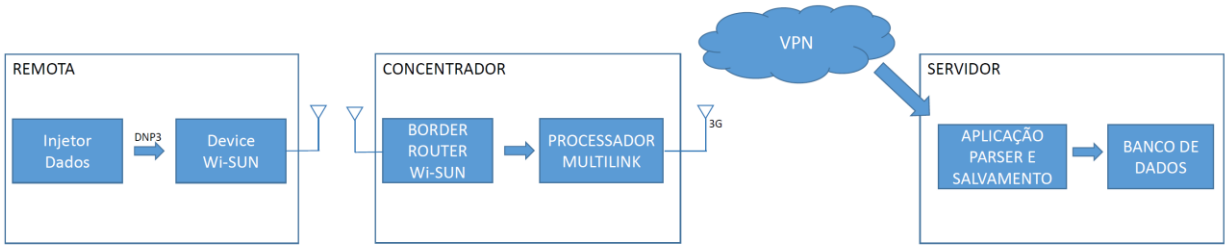

FIGURA 2 – Comunicação com o injetor de dados

A comunicação entre o injetor de dados e o módulo de comunicação Wi-SUN é feita através de uma porta serial padrão RS232. A lógica do injetor de dados via comunicação serial, foi uma solução apresentada para inserção de dados na rede Wi-SUN, com o objetivo de mensurar a quantidade e o tipo de mensagens recebidas com variação de tamanho e periodicidade de pacotes. Para isso o dispositivo envia mensagens com três tamanhos diferentes, de 50, 100 e 500 Bytes. Tais mensagens são enviadas de forma intercalada, com tempos de 1, 5, 10 e 15 minutos, sendo que cada mensagem é repetida 10 vezes. Com isso, o injetor de dados apresenta um tempo total de ciclo de mensagens de 890 minutos, para um total de 120 mensagens. Assim, este dispositivo gera mensagens de acordo com o apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Tipos de mensagens gerados pelo injetor

Tipo	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
Mensagem	01	01	01	01	02	02	02	02	03	03	03	03
Tamanho Total (bytes)	63	63	63	63	113	113	113	113	513	513	513	513
Tempo (min.)	15	10	5	1	15	10	5	1	15	10	5	1
Ciclo (vezes)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Para medir a quantidade de pacotes recebidos o injetor de dados possui um contador sequencial de mensagens enviadas. Este contador apenas reinicia sua contagem caso o dispositivo seja reiniciado devido à falta de energia. Assim, como cada mensagem enviada incrementa o contador, é possível verificar no banco de dados, que armazena as mensagens recebidas, a perda de um pacote apenas observando a sua falta no banco.

1.1.2 - Sensores

Os sensores utilizados para o teste em campo foram o Sensor Inteligente Monitoramento de Redes de Distribuição (Com função perdas) produzidos pela Tecsys do Brasil, estes sensores são empregados para detecção de faltas na linha trifásica em redes de distribuição de até 34,5KV. Cada conjunto engloba 3 sensores que coletam dados de cada fase, esses dados são processados em uma unidade remota, que encaminha os dados para o centro de operações da concessionária, neste caso utilizando a rede Wi-SUN para transmissão dos dados.

Os dados são integralizados e enviados para o servidor a cada 15 minutos, nesses pacotes são transferidos os dados de medição e destinados ao cálculo de perdas, o tamanho de cada pacote com essas informações são de 123 bytes, contendo as medidas de:

- Corrente: indicando o valor RMS da corrente medida no último ciclo da rede, em décimos de Ampère;
- Ângulo: defasagem em graus entre a corrente e a tensão, sendo que valores positivos indicam corrente adiantada em relação à tensão, e valores negativos indicam corrente atrasada em relação à tensão;
- Fluxo: O indicativo da direção de fluxo da corrente. O valor 1 significa fluxo normal. O valor 2 significa fluxo invertido. O valor 0 significa fluxo indefinido.
- Fase: E a qual fase o Sensor pertence. Valores válidos são 0, 1 e 2.

Na aplicação de perdas, há um controle do envio das mensagens e em caso de não recebimento dos dados no servidor, esses dados são reenviados.

1.1.3 - Segurança Cibernética

A rede de comunicação Wi-SUN também foi utilizada para realização de teste com hardware de segurança cibernética, também desenvolvido pelo Lactec. Esse hardware foi incluído na porta serial do módulo de comunicação Wi-SUN entre o módulo de comunicação e a aplicação. Foram utilizados 4 hardwares de segurança no projeto. O processo de criptografia aumenta o tamanho dos pacotes enviados na rede Wi-SUN por esses dispositivos, o que pode causar algum pequeno impacto no resultado dos testes.

1.2 - Métricas

Para avaliar as características da rede Wi-SUN, foram definidas algumas métricas de controle levando em consideração as seguintes variáveis: perda de pacotes de dados por dispositivo, tamanho dos pacotes trafegados, frequência de envio dos pacotes e perda de pacotes total na rede.

2.0 - INSTALAÇÃO

A instalação em campo abrangeu duas redes diferentes, localizadas em regiões distintas: a primeira rede com uma instalação de dispositivos mais densa, ou seja, distância menor, de 100 a 300 metros entre os dispositivos e maior possibilidade de reconfiguração automática da rede, e a segunda com uma rede de densidade mais baixa com dispositivos espaçados de 100 a 1000 metros.

2.1 - Rede de Comunicação 1

A primeira rede de comunicação utilizada para os testes incluiu a instalação e teste de 1 caixa concentradora Multilink com comunicação backhaul celular, satélite e rádio P2P, 10 módulos de comunicação Wi-SUN e 8 repetidores Wi-SUN. Os testes utilizando essa rede foram divididos em duas etapas: na primeira etapa os módulos de comunicação foram conectados a dispositivos injetores de dados. Como os injetores possuem dados conhecidos, eles foram fundamentais para a avaliação do desempenho da rede; a segunda etapa consistiu em substituir os injetores pelos sensores.

A aplicação com injetores de dados foi instalada entre os meses de abril e maio de 2020 em um bairro na cidade de Salvador/BA. Em seguida, no mês de junho de 2020, os injetores de dados foram substituídos por remotas e sensores inteligentes. A posição dos dispositivos está apresentada na Figura 3FIGURA 3, na qual os módulos de comunicação são identificados pelo código EDXX (XX representa o número de identificação do módulo) com ícone de cor amarelo, o código “+C” identifica os dispositivos equipados com hardware de segurança cibernética, os repetidores de cor verde são representados por números e o concentrador Multilink de cor azul é representado pelo código B003. Essa rede abrange uma área de 1,7 km por 550 metros, sendo que a menor distância entre dois pontos varia de 100 a 310 metros, aproximadamente. Analisando a topografia da região em que os equipamentos foram instalados, observa-se variação de altitude de 5 a 45 metros acima do nível do mar, evidenciando o terreno acidentado na região.

FIGURA 3 - Rede de Comunicação 1

2.2 - Rede de Comunicação 2

Na segunda fase de testes, foram instalados 1 caixa concentradora Multilink com comunicação backhaul celular, satélite e rádio P2P, 12 repetidores Wi-SUN e 16 módulos de comunicação Wi-SUN, sendo 10 com aplicação de injetores de dados e 6 com aplicação de sensores inteligentes (Figura 4FIGURA 4). Dessa maneira, a segunda fase inclui duas aplicações distintas em uma mesma rede de comunicação Wi-SUN.

FIGURA 4 – Rede de Comunicação 2

A rede 2 abrange uma área de 5,6 km por 2,5 km, sendo que a menor distância entre dois pontos varia de 100 e 1100 metros, aproximadamente, com altitude dos pontos variando de 10 a 70 metros do nível do mar em região com relevo montanhoso. Na figura, o ponto identificado com a sigla B002 com ícone de cor azul indica a posição do concentrador, já os números são os repetidores de cor verde e os equipamentos representados pela sigla EDxxI representam os módulos de comunicação com Injetores de Dados e os equipamentos representados pela sigla EDxxS os módulos de comunicação com remota/sensores todos representados com ícones de cor amarelo.

3.0 - RESULTADOS

Por ser um protocolo de comunicação atual e inovador, não existem muitos estudos e registros de testes em campo de redes utilizando o protocolo Wi-SUN FAN. Assim, antes da coleta dos resultados foi instalado um piloto para validação da rede desenvolvida, assim como verificação do funcionamento da rede Wi-SUN FAN em campo. Essa fase foi muito importante, nela foram registrados uma série de aprendizados que foram convertidos em ajustes e melhorias para as próximas fases de testes. A identificação de necessidade de ajuste deu-se não apenas na rede FAN (Wi-SUN) como também em outros módulos desenvolvidos no projeto.

Os dados presentes neste artigo apresentam o comportamento da rede no período de 22/04/2020 a 01/06/2020, para a rede 1 com aplicação de injetores de rede, o período de 08/06/2020 a 08/07/2020 para a rede 1 com aplicação de sensores e o período de 04/08/2020 a 18/08/2020 para a rede 2 com aplicação mista: sensores e injetores.

O primeiro período de testes foi realizado com uma grande janela de tempo para que fosse possível analisar a estabilidade em um ambiente de implementação real, que difere dos estudos encontrados na literatura, onde são realizados apenas testes pontuais de pequena duração. Essa duração também proporciona uma avaliação de como a rede Wi-SUN é capaz de realizar a reconfiguração para manter a conectividade, resultado que pode ser observada na perda de pacotes por dispositivo na rede. Após a realização dessa análise mais completa, os outros dois ensaios foram realizados utilizando uma janela de tempo menor por questão de adequação ao cronograma do projeto.

4.1 - Perda de Pacotes por Dispositivo

Os resultados relativos a perda de pacotes estão condensados na Tabela 2.

TABELA 2. Visão geral de pacotes enviados e recebidos por dispositivo

Teste	Aplicação	Dispositivo	Pacotes enviados	Pacotes Perdidos	Taxa de Perda %
Rede 1 – Aplicação 1	Injetor	ED07	n/a	n/a	n/a
		ED08	7525	362	4,81
		ED09	7531	670	8,90
		ED10	7522	275	3,66
		ED11	7526	202	2,68
		ED12	7531	272	3,61
	Injetor + Segurança Cibernética	ED13	7379	2600	35,24
		ED14	7385	2596	35,15
		ED15	7389	2690	36,41
		ED16	7411	2943	39,71
Rede 1 – Aplicação 2	Sensor	ED07	2945	2	0,07
		ED08	2945	5	0,17
		ED09	2945	18	0,61
		ED10	2945	2	0,10
		ED11	2945	0	0,00
		ED12	2945	0	0,00
	Sensor + Segurança Cibernética	ED13	2945	2	0,07
		ED14	2945	4	0,14
		ED15	2945	3	0,10
		ED16	2945	0	0,00
Rede 2	Sensor	ED01	3008	11	0,37
		ED02	3008	15	0,50
		ED03	3008	35	1,16
		ED04	3008	15	0,50
		ED05	3008	39	1,30
		ED06	3008	32	1,06
	Injetor	ED17	2766	243	8,79
		ED18	2795	406	14,53
		ED19	2799	387	13,83
		ED20	4042	347	8,44
		ED21	2794	455	16,28
		ED22	2805	291	10,37
		ED23	2794	248	8,88
		ED24	2804	287	10,24
		ED25	2798	300	10,72
		ED26	2749	274	9,97

Na tabela, observa-se que no primeiro teste (Rede 1 – Aplicação 1) não foi possível obter dados do dispositivo ED07 devido a um problema na sua instalação. Além disso, nesse mesmo teste a perda de dados dos dispositivos com hardware de segurança cibernética foram bem mais altas do que os outros dispositivos. Como o firmware do módulo de comunicação foi desenvolvido com foco na aplicação de sensores inteligentes, a limitação do tamanho do buffer para recebimento de pacote foi desenvolvida para essa aplicação. No caso da segurança cibernética, os pacotes estouraram o tamanho desse buffer, resultando em perda. Nos testes da rede 1 aplicação 2 esse problema foi solucionado.

Analisando os resultados dos ensaios, observa-se que, excluindo os dispositivos com segurança cibernética da rede 1, aplicação 1, os dispositivos obtiveram um resultado dentro do esperado, com uma taxa de perda de pacotes na média de 4,6%. Comparando a taxa de perda da aplicação de sensores com a taxa de perda da aplicação com injetores, é possível observar que os sensores apresentaram resultados melhores devido a característica dessa aplicação possuir retransmissão de pacotes. Considerando a característica do Wi-SUN, que foi desenvolvido para Redes Sem Fio de Baixa Potência e com Perdas, esse comportamento observado está de acordo com o esperado.

Já na comparação entre as duas redes, observa-se que o desempenho dos dispositivos na rede 1 foi superior ao da rede 2. Apesar de a rede 2 possuir um número maior de dispositivos, para uma rede Wi-SUN, que pode ser dimensionada para mais de 1000 dispositivos, esse número de dispositivos não é expressivo. Desta forma, a diferença no desempenho das duas redes foi atribuída ao posicionamento e a topologia da rede. Na rede 1, os dispositivos estão mais próximos uns dos outros, possibilitando um número maior de rotas alternativas na rede, configuração ideal para o funcionamento da rede Wi-SUN FAN. Já na rede 2, os dispositivos estão mais espaçados, com número menor de rotas alternativas entres os dispositivos.

4.2 - Reconfiguração da Rede

Um dos grandes recursos do padrão Wi-SUN é sua capacidade de reconfiguração, diminuindo muito o *Downtime* das aplicações. A rede possui caminhos alternativos para os dados trafegarem caso algum nó fique indisponível, mas também possui a capacidade de trocar a rota principal de dados caso a conexão original degrade, como por exemplo, o canal de comunicação de radiofrequência esteja com muita interferência, ou outro dispositivo da rede está um com sinal com melhor intensidade.

Durante o monitoramento dos testes foi possível extrair as informações de rotas e vizinhos a partir do software de gerenciamento de rede. Assim, observou-se que ocorreram diversas reconfigurações durante o período de teste. As Figura 5 e Figura 6 ilustram as conexões da rede 1 e da rede 2 coletadas em dois momentos diferentes.

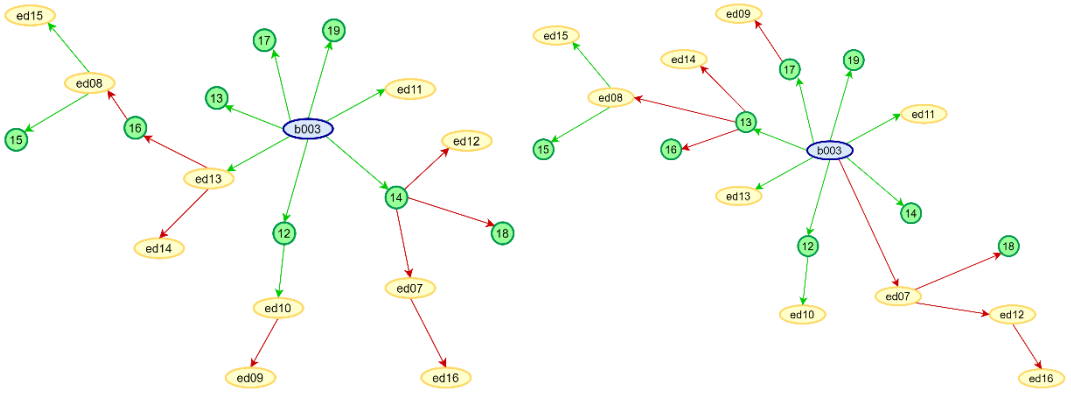

FIGURA 5 - Grafo da mudança da configuração da rede Wi-SUN em campo na rede 1

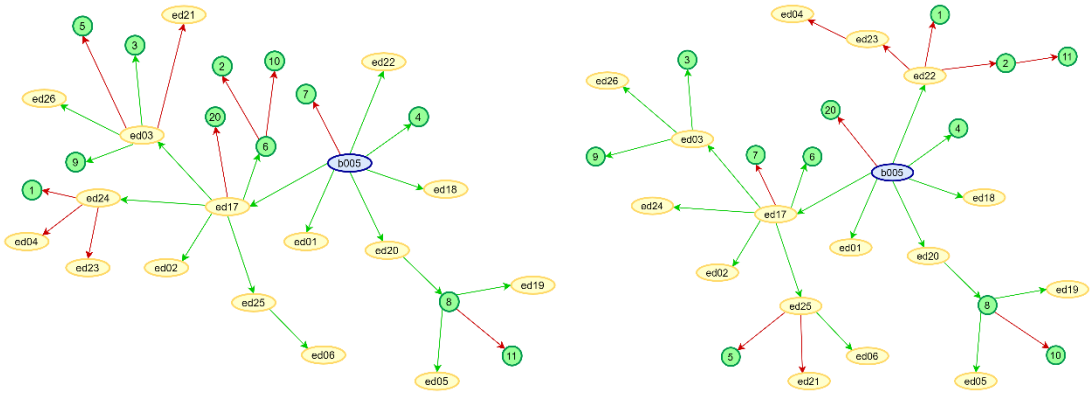

FIGURA 6 - Grafo da mudança da configuração da rede Wi-SUN em campo na rede 2

Nas figuras os dispositivos estão distribuídos exclusivamente por sua conexão, sem nenhum georreferenciamento, nelas as setas estão direcionadas do nó pai para o nó filho e a cor verde indica as conexões que foram mantidas e a vermelha as que foram alteradas nos dois momentos.

A rede 1 apresentou 8 reconfigurações ou 44,44% das rotas, enquanto a rede 2 apresentou 10 reconfigurações ou 35,71% das rotas. Na análise da quantidade de módulos de comunicação afetados pela reconfiguração, observa-se que na rede 1, 7 dos 10 módulos de comunicação foram afetados de alguma maneira com a mudança das rotas, já na rede 2, apenas 3 dos 16 módulos de comunicação foram impactados com a mudança da configuração. Esse resultado, em conjunto com a análise de perda de pacotes mais baixa na rede 1 evidencia o benefício de um dimensionamento da rede Wi-SUN com dispositivos próximos possibilitando um número maior de redundância nas rotas que resulta em um melhor desempenho da rede.

4.3 - Perda de Pacotes por Tipo

A análise de perda de pacotes por tipo de pacote foi realizada para a rede 1 e para a rede 2 apenas na aplicação de injetor de dados. No caso dos sensores os pacotes enviados possuem sempre a mesma característica. Além disso, devido ao problema descrito com o tamanho de pacotes dos dispositivos com hardware de segurança, esses dados foram excluídos da análise.

Na Tabela 3 é possível observar a perda de pacotes por tipo da rede 1, enquanto na Tabela 4 observa-se a perda de pacotes por tipo da rede 2. Nas duas redes, observa-se que pacotes com tamanho de 513 bytes (payload + header) causam um impacto na rede, aumentando consideravelmente a perda de pacotes observada. Com relação a pacotes de 63 e 113 bytes, na rede 1 não houve diferença na perda, enquanto na rede 2 houve uma sutil diferença. Como o próprio protocolo Wi-SUN prevê perdas na rede, a aplicação deve possuir um mecanismo de detecção de erros/perdas para reenvio, e também deve implementar algum tipo de segmentação de pacotes grandes em pacotes menores, para melhorar o desempenho geral do meio de transmissão.

TABELA 3 – Resultados de perda de pacote por tipo de mensagem na rede 1

	Tipo de Mensagem	Tamanho (bytes)	Período (min)	Total Enviado	Total Recebido	Pacotes perdidos %
Rede 1 – Injetor	0	63	15	3050	2941	3,57%
	1	63	10	3069	2964	3,42%
	2	63	5	3070	2964	3,45%
	3	63	1	3070	2965	3,42%
	4	113	15	3059	2952	3,50%
	5	113	10	3060	2942	3,86%
	6	113	5	3052	2935	3,83%
	7	113	1	3050	2941	3,57%
	8	513	15	3067	2865	6,59%
	9	513	10	3070	2858	6,91%
	10	513	5	3069	2848	7,20%
	11	513	1	3060	2866	6,34%

TABELA 4. Resultados de perda de pacote por tipo de mensagem na rede 2

	Tipo de Mensagem	Tamanho (bytes)	Período (min)	Total Enviado	Total Recebido	Pacotes perdidos %
Rede 2 – Injetor	0	63	15	3732	281	7,53
	1	63	10	3148	312	9,91
	2	63	5	2678	252	9,41
	3	63	1	2549	274	10,75
	4	113	15	2335	266	11,39
	5	113	10	2153	237	11,01
	6	113	5	2124	219	10,31
	7	113	1	2110	241	11,42
	8	513	15	2088	291	13,94
	9	513	10	2073	304	14,66
	10	513	5	2076	284	13,68
	11	513	1	2080	271	13,03

4.0 - CONCLUSÃO

Durante os períodos de teste da solução Wi-SUN Multilink os resultados obtidos foram bastante satisfatórios, levando em consideração os locais de instalação e a frequência de envio das mensagens. Observou-se que o alcance da rede Wi-SUN foi maior do que o esperado, com a conectividade de dispositivos distantes em até 3 km, porém com desempenho não satisfatório nessa distância. No cenário com menor densidade de dispositivos e com os mesmos mais espaçados (distâncias entre 500 metros e 1 km), a falha da comunicação foi considerada alta, média superior a 10%. Já no segundo cenário, com dispositivos espaçados entre 200 e 500 metros e posicionados de forma a possibilitar um número maior de reconfiguração da rede, o desempenho observado foi consideravelmente melhor. Na aplicação utilizando injetores de dados a perda média de pacotes foi de 4,7% ao longo de 41 dias de testes.

A comparação entre as taxas de perda de pacotes dos dispositivos possibilita avaliar quantitativamente o desempenho da rede em pontos geográficos específicos. Tendo isso em vista, o dispositivo ED09 teve desempenho ligeiramente inferior aos demais (8,9% de perda de pacotes), enquanto os dispositivos ED11, ED12 e ED10 tiveram desempenho melhor que a média (2,68%, 3,61% e 3,66%, respectivamente).

Já a comparação das taxas de perda de pacotes para cada tipo de mensagem gerada pelo injetor de dados possibilita avaliar o desempenho sob ponto de vista da aplicação. Observou-se uma pequena degradação no desempenho da rede com mensagens de 513 bytes (média de 6,7% de perda) com relação às mensagens de 63 bytes (3,4%) e de 113 bytes (3,7%). Quanto ao tempo entre mensagens, não se observou degradação do desempenho ao aumentar a frequência de envio.

Os testes com conjuntos reais de Sensores Inteligente mostraram uma perda menor que 1% dos pacotes de dados em uma das redes e em torno de 1% na outra, esse resultado mostra que para esse tipo de aplicação a solução de rede mesh Wi-SUN entrega uma ótima solução como meio de transporte. Assim, ficou comprovado que a rede de comunicação Wi-SUN foi projetada para um ambiente com maior densidade de dispositivos, no qual a presença de rotas alternativas e capacidade de reconfiguração automática de rotas possibilita um desempenho muito melhor da rede.

Como os sensores de monitoramento da rede de energia normalmente estão distantes um dos outros e repetidores acabam aumentando o custo da rede, sugere-se o uso compartilhado da rede com dispositivos de outras aplicações servindo com repetidores para a rede de sensores. A rede de comunicação 2 comprovou ser possível trafegar dados de dispositivos distintos em uma mesma rede. Essa comprovação foi realizada através do compartilhamento da rede entre sensores e injetores de dado.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) HAXHIBEQIRI, Jetmir et al. A survey of LoRaWAN for IoT: From technology to application. Sensors, v. 18, n. 11, p. 3995, 2018.

(2) LONG, Simin; MIAO, Feng. Research on ZigBee wireless communication technology and its application. In: 2019 IEEE 4th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE, 2019. p. 1830-1834.

(3) Wi-SUN Alliance. Wi-SUN Alliance and FAN: Secure large-scale IoT networking for today and tomorrow, 2018. Disponível em: https://wi-sun.org/wp-content/uploads/Wi-SUN-Alliance-and-FAN.pdf. Acesso em: 20 ago. 2021.

(4) WI-SUN FAN, “Technical Profile Specification Field Area Network, Field Area Network Working Group (FANWG)”, Confidential c Wi-SUN Alliance, 2017.

(5) JUNJALEARNVONG, Thidarut et al. A dynamic routing protocol supporting mobile nodes in Wi-SUN FAN systems. In: 2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC). IEEE, 2017. p. 325-331.

(6) JUNJALEARNVONG, Thidarut et al. Performance Evaluation of Multi-hop Network Configuration for Wi-SUN FAN Systems. In: 2019 16th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2019. p. 1-6.

(7) HOTTA, Daiki et al. Stabilization of Multi-Hop Routing Construction in Wi-SUN FAN Systems. In: 2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC). IEEE, 2020. p. 1-6.

(8) AMBROSIO, A. et al. Wi-SUN FAN Interoperability: Verification through Experiment Test. In: 2021 XXXIX SBrT.

DADOS BIOGRÁFICOS

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná (2009) e mestrado em Engenharia de Sistemas Embarcados - Karlsruher Institut für Technologie (2012). Atua desde 2012 em projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Telecomunicações. Atualmente trabalha nos Institutos Lactec, tendo como principal atividade o desenvolvimento de firmware com foco em sistemas de comunicação IoT para Smart Grid, Smart City e Geração Distribuída. Já trabalhou com diversos protocolos como Modbus/RS485, PLC G3, PLC Prime, ZigBee, LoRa/LoRaWAN e Wi-SUN.

(2) GEOVANA SCARAMELLA
Formada no Curso Técnico em Eletrônica integrado ao Ensino Médio pelo Instituto Federal do Paraná — Campus Curitiba (2014). Graduanda do 10º período de Engenharia Eletrônica pela UTFPR. Atualmente é bolsista no Lactec atuando em projetos de pesquisa e desenvolvimento na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Telecomunicações — Smart City, Smart Grid e IoT em geral envolvendo os protocolos LoRaWAN e Wi-SUN.

(3) ADRIANO RUSSI ALVES SILVA
Pós-Graduação em Eletrônica Embarcado - Centro Universitário Unisal Lorena-SP (2020), Graduação em Engenharia Elétrica - Centro Universitário ETEP (2018), Técnico Eletrônico - Centro Universitário ETEP (2008). Atualmente atuo no desenvolvimento de sistemas WEB (Full-Stack) utilizando Python, Django Framework, Django REST Framework, Docker, PHP, banco de dados, JavaScript, VueJs, jQuery, Bootstrap, HTML5 e CSS.

(4) VICTOR BARPP GOMES
Graduado em Engenharia de Computação pela UTFPR (2020) e Técnico em Informática pelo IFSC (2015). Atualmente cursa o Mestrado Profissional no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada (PPGCA) na UTFPR, com área de concentração em Visão Computacional e Reconhecimento de Padrões em Imagens. Atua nas áreas de inteligência artificial, ciência de dados, redes neurais, sistemas embarcados, microcontroladores, sistemas operacionais de tempo real, redes de computadores, comunicações sem fio e internet das coisas.

(5) ANANIAS AMBROSIO QUISPE
Possui graduação em Engenharia Eletrônica na Universidade Nacional de Huancavelica Peru (2004) e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFPR, Brasil (2020). Na atualidade aluno de doutorado na UFPR e pesquisador bolsista nos Institutos Lactec com atividade nas linhas de pesquisa: Redes Sem Fio LLNs e o perfil FAN da tecnologia Wi-SUN para sistemas IoT. Atua desde 2005 na área de telecomunicações especialmente serviços de engenharia de projetos para programas de Telecomunicações Rurais Internet e Telefonia sistemas satelitais.

(6) ALAN DONIZETI RODRIGUES FERNANDES DE MORAIS
Possui MBA em Gerenciamento de projetos na UMC - Universidade Mogi das Cruzes (2017), graduação em Automação Industrial pela Universidade de Mogi das Cruzes (2011). Atualmente atua com P&D na Tecsys do Brasil LTDA no seguimento de Coordenação de projetos. Com foco na coordenação de projetos para telecomunicações, utilizando comunicações mesh protocolo WI-SUN e comunicações utilizando comunicação LTE.

(7) CELSO FERREIRA DA SILVA
Possui Mestrado em Ciência da Computação pela UNIFESP (2020), Especialização em Eletrônica Embarcada na UNISAL (2017) em Campinas, Graduação em Engenharia de Computação pela UNIVAP (2004). Atualmente é engenheiro de software de P&D na TECSYS DO BRASIL LTDA. Seus interesses de pesquisa atuais são MPTCP, redes IoT/Edge e comunicações e aplicativos de smart grid.

(8) SERGIO VIANNA DE FARIAS
É estudante de doutorado no ITA na área de Dispositivos e Sistemas Eletrônicos. Atualmente está trabalhando com sistemas embarcados linux na Tecsys do Brasil. Mestrado em Engenharia Elétrica UFMS, Brasil (2014). Graduação em Engenharia Eletrônica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica, ITA, Brasil (2004).

(9) RODRIGO JARDIM RIELLA
Rodrigo Jardim Riella é Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela UTFPR. Atualmente é pesquisador sênior do Lactec, onde atua há 18 anos. Desenvolve projetos de P&D nas áreas de comunicações e segurança da informação aplicada a Redes Elétricas Inteligentes. Atualmente coordena os projetos de infraestrutura do programa de Convergência Tecnológica para Redes Elétricas Inteligentes do Grupo Neoenergia. Atua também como professor permanente no Mestrado Profissional em Desenvolvimento de Tecnologia dos Institutos Lactec e como professor adjunto do departamento de Engenharia Elétrica da UFPR.

(10) LOURIVAL LIPPMANN JUNIOR
Engenheiro Eletrônico pelo ITA, Mestre em Automação Industrial pela UTFPR, técnico em Eletrônica pelo CEFET-PR. Experiência de 35 anos na área de P&D para o setor elétrico, ex-professor de engenharia na UTFPR e PUC-PR. É pesquisador no LACTEC, atuando em projetos de P&D para o setor elétrico nos temas: conectividade para Smart grid e Smart city, fontes alternativas de energia, energy harvesting, sistemas de armazenamento e visão computacional.