



# Contribuições da Neoenergia visando Interoperabilidade para AMI com Wi-SUN

**Tema:** Sistemas de Medição

**Autores:** José Antonio de Souza Brito; Marina de Souza Santos; Maiana Barbosa da Silveira; Eric Jordan Bastos Nascimento dos Santos; Janine Souza Dórea Costa; Leonardo Gomes Tavares; Luciana Michelotto Iantorno; Ananias Ambrosio Quispe; Adriel Guimarães de Lima; Alan Donizeti Rodrigues Fernandes de Moraes

**Co-Autores:** Igor Henrique Tomiatti; Sérgio Vianna de Farias

**Empresa:** Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia - Neoenergia Coelba

---

## Resumo

Com o crescimento das Redes Elétricas Inteligentes e dos diferentes meios de comunicação para IoT, as concessionárias de energia estão, cada vez mais, interessadas em um protocolo de comunicação que garanta interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes e aplicações distintas. O protocolo Wi-SUN foi desenvolvido justamente com esse intuito. No projeto GODEL Multilink, em sua primeira fase, realizou-se a validação da interoperabilidade em laboratório e do desempenho em campo do protocolo Wi-SUN para aplicações de sensores e transformadores inteligentes. A segunda fase do projeto visa expandir a rede para aplicação de medidores inteligentes, garantindo a interoperabilidade fim-a-fim do sistema. Os principais desafios do projeto foram as definições não apenas do protocolo Wi-SUN e protocolo para gerenciamento de dados, mas também as definições da comunicação entre o Concentrador e o MDC com uso de protocolos abertos e de fácil implementação para que novos fornecedores possam aderir à rede sem grandes esforços de desenvolvimento. Esse artigo descreve a análise de possíveis lacunas para a interoperabilidade fim-a-fim do sistema, definições realizadas para garantia da interoperabilidade e validação dessas definições em testes realizados em laboratório e campo. O sistema teve sua validação de desempenho em campo e encontra-se em validação da interoperabilidade em campo.

## 1. Introdução

Com o crescimento de aplicações voltadas para Redes Elétricas Inteligentes, não apenas no Brasil como no mundo, a existência de um meio de comunicação que garanta tanto a comunicação entre dispositivos distintos, quanto também a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes diferentes é fundamental para que as concessionárias de energia não dependam apenas de um único fornecedor para os equipamentos de seu parque, possibilitando um maior poder de negociação no processo de aquisição de novas soluções.

Analisando os protocolos de comunicação disponíveis para IoT (*Internet of Things*), observa-se uma série de alianças que se propõem a definir soluções com protocolos abertos de redes de IoT para aplicações de larga escala em redes de sensores sem fio. Como exemplo disso, tem-se as alianças LoRa, Zigbee e Wi-SUN (*Wireless Smart Ubiquitous Networks*) cujas soluções e tecnologia são muito pesquisadas e

avaliadas. Cada um desses protocolos possui especificidades, fazendo com que cada protocolo seja mais adequado para determinado tipo de aplicações e cenário. No projeto GODEL Multilink, realizado no âmbito do programa de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação (PDI) da Neoenergia, regulado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), estudou-se a tecnologia da aliança Wi-SUN, especificamente a solução apresentada para Rede de Área de Campo (FAN, do inglês *Field Area Network*), chamada Wi-SUN FAN (HEILE, 2017). De acordo com a norma IEEE 2857 de 2021 (IEEE, 2021), a tecnologia Wi-SUN FAN caracteriza-se, principalmente, por suportar redes de grande escala, formando uma topologia malha de tipo multi-salto. Em comparação com outras especificações, possui maior taxa de dados, que estão normatizadas regionalmente, utiliza a função de salto de frequência que permite utilizar toda a faixa de frequências para evitar interferências, e seu perfil está formado por protocolos abertos que promovem a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fornecedores, por meio de certificação de dispositivos, que é realizado através de laboratórios certificadores credenciados pela aliança Wi-SUN. Suas características de topologia em malha, alta imunidade a ruído, possibilidade de uso de vários protocolos na camada de aplicação e, principalmente, interoperabilidade, fazem dele um dos protocolos ideais para uso em AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) ou multi-aplicações. A escolha desse protocolo pela Neoenergia deu-se por conta dessas características. Uma vez que a mesma deseja construir uma AMI com diferentes fornecedores, permitindo o crescimento de sua rede inteligente com uma independência sobre os mesmos e possibilitando ainda integração de outras aplicações utilizando a mesma rede.

Como esta é uma tecnologia relativamente nova, a primeira documentação do protocolo surgiu em 2017, ainda restrita aos membros da aliança Wi-SUN, tendo seus primeiros produtos certificados em 2019 (Wi-SUN Alliance, 2023) e publicação na IEEE para acesso público apenas em 2021 (IEEE, 2021). Desta forma, faz-se necessário uma avaliação da tecnologia, principalmente a interoperabilidade, para a verificação dos desafios que possam surgir para que a concessionária consiga garantir a expansibilidade da rede de comunicação para aplicações de medição inteligente e sensoramento da rede de distribuição, independentemente do fornecedor.

O projeto Multilink, em sua primeira fase, contemplou as etapas de desenvolvimento, teste em laboratório, fabricação e instalação de dispositivos Wi-SUN FAN na cidade de Salvador entre os anos de 2017 e 2020. Seu objetivo principal foi a avaliação das características técnicas e de interoperabilidade do protocolo Wi-SUN, existindo trabalhos prévios do projeto com resultados publicados de avaliação do padrão (IANTORNO, 2022) e testes iniciais de laboratório de interoperabilidade (AMBROSIO, 2021). Nessa primeira fase, os equipamentos Wi-SUN foram integrados nas aplicações de sensores inteligentes de média tensão e transformadores inteligentes, com uso de dois tipos de protocolos, o DNP3.0 e um proprietário na camada de aplicação.

Em 2021, iniciou-se a segunda fase do trabalho, com objetivo principal de integrar aplicação de medidores inteligentes, incluindo a adoção do perfil brasileiro do protocolo DLMS (*Device Language Message Specification*) na rede de comunicação previamente desenvolvida. A integração dos medidores tem como foco principal a garantia da interoperabilidade do sistema, não apenas na rede Wi-SUN previamente desenvolvida, como também nos servidores MDC (*Meter Data Collector*) e NMS (*Network Management System*) interoperável. Nesse trabalho, já foram realizadas as especificações para interoperabilidade com análise das principais lacunas do Wi-SUN para garantir a interoperabilidade fim a fim, testes iniciais em laboratório, teste em campo de equipamentos da primeira fase com os seguintes equipamentos: Concentrador GODEL Multilink, Repetidores/Injetores de Dados e Sensores Inteligentes para Média Tensão, que são equipamentos que permitem a medição e análise do desempenho da rede Wi-SUN, na cidade Brasília. No primeiro semestre de 2025, a rede será expandida com a instalação de 5000 medidores inteligentes. Em janeiro de 2025, foi iniciada a expansão da rede com a instalação de 20 medidores até 17/01 e a previsão de que sejam instalados mais 230 até o final do mês.

Dentre as contribuições desse trabalho estão o desenvolvimento, fabricação e instalação de dispositivos Wi-SUN FAN interoperáveis para análise de desempenho do protocolo em campo. Análise das lacunas de interoperabilidade do protocolo Wi-SUN para aplicação AML, além de sugestão de configuração para garantir a interoperabilidade Wi-SUN e adoção de protocolos padronizados para interoperabilidade fim a fim.

## 2. Desenvolvimento

2.1. *Arquitetura* O projeto visa integrar aplicações de sensores inteligentes e medidores inteligentes em uma mesma rede de comunicação Wi-SUN FAN, garantindo ainda interoperabilidade fim-a-fim dos medidores ao MDC através da definição de protocolos da camada de aplicação. A Figura 1 ilustra a arquitetura do sistema completo de comunicação, desde os dispositivos localizados em campo até os servidores de aplicação e gerenciamento de rede. Na figura é possível observar a topologia *mesh* da rede Wi-SUN, na qual qualquer equipamento é capaz de rotear pacotes para os outros equipamentos. Os dados dos equipamentos em campo são direcionados ao Concentrador GODEL Multilink, que é responsável pela transferência segura de informações entre os equipamentos de campo e os servidores de aplicação, realizando a interface entre as redes Wi-SUN FAN e WAN (Wide Area Network), que é implantada por múltiplos meios: rede celular 3G/4G, comunicação via satélite e via fibra óptica, dependendo da disponibilidade do local de instalação. Na aplicação atual do projeto, utilizou-se a comunicação com rede celular 4G pública utilizada atualmente pela Neoenergia, rede celular 4G privada desenvolvida juntamente com o projeto atual e para os pontos localizados dentro das dependências da empresa links de fibra óptica, na qual são complementares.

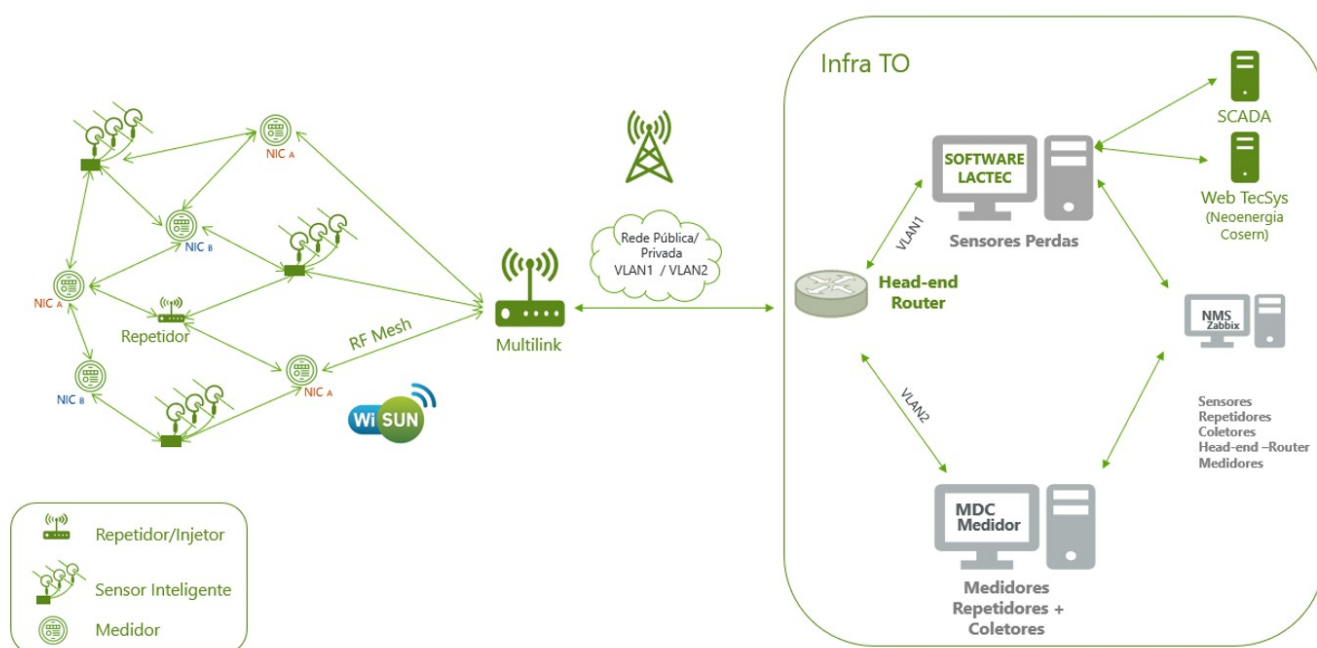


Figura 1. Arquitetura do Sistema

O sistema de comunicação completo é formado pelos seguintes dispositivos e subsistemas:

**Repetidor/Injetor de Dados:** na rede Wi-SUN, os roteadores são responsáveis por aumentar o alcance, através de saltos previstos na topologia em malha (*mesh*). Na rede desenvolvida neste projeto, qualquer

dispositivo pode ser utilizado como roteador (módulo de comunicação dos sensores, medidores ou injetores). No caso do repetidor, ele é apenas um roteador, sem nenhuma outra funcionalidade agregada, tornando seu hardware mais simples e barato. Os repetidores são fundamentais em redes com equipamentos localizados em distância maiores entre si, como é o caso de uma rede exclusiva com sensores inteligentes. Já em cenários de rede mais densa, como por exemplo rede de medidores de energia, seu posicionamento em locais estratégicos pode reduzir a quantidade de saltos entre os equipamentos e o concentrador, o que evita que a latência da comunicação fique muito alta. Para esse projeto específico o repetidor, por meio de comando, pode ainda assumir a função de injetor de dados, sendo que esta função serve para medição de desempenho da rede Wi-SUN. No modo injetor, é feita injeção periódica de dados para análise da rede. Esses dados possuem intervalos variáveis para envio dos pacotes de análise da rede (5 pacotes são enviados com intervalo de 5 minutos entre eles, em seguida, esse intervalo é aumentado para 10 minutos com o envio de mais 5 pacotes e, por fim, o intervalo é incrementado para 15 minutos e mais 5 pacotes são enviados. Após esse ciclo, o intervalo retorna para 5 minutos e o processo é iniciado novamente).

**Sensor Inteligente + Módulo de comunicação:** O sensor inteligente é um produto de mercado, desenvolvido em um outro projeto de PDI da Neoenergia, com recurso do programa de PDI ANEEL. O produto original utiliza modem de comunicação celular para transmissão dos dados entre os sensores e o COD (Centro de Operação e Distribuição). Nesse projeto, o modem de comunicação celular foi substituído por um módulo de comunicação Wi-SUN com o objetivo de integrar a remota e sensores a rede de comunicação Wi-SUN. Esse módulo de comunicação é um equipamento para integração de equipamentos sem comunicação Wi-SUN na rede Wi-SUN.

**Medidor Inteligente + NIC:** os medidores de energia inteligente visam otimizar a medição e leitura de informações dos medidores, permitindo a leitura e envio de comandos remotos aos mesmos, para isso esses medidores são dotados de meio de comunicação através de um NIC para comunicação através de rede que pode ser RF, PLC ou outro meio de comunicação. Nesse projeto específico o requisito para o NIC é comunicação RF utilizando o protocolo Wi-SUN. Além disso, o projeto exige que dentro da rede de comunicação, haja NIC de ao menos dois fabricantes distintos, garantindo que a rede Wi-SUN seja realmente interoperável.

**Concentrador GODEL Multilink:** equipamento responsável pelo gerenciamento da rede Wi-SUN FAN e das redes WAN para roteamento de informações entre a rede Wi-SUN e Servidores. O concentrador GODEL Multilink possui 6 slots destinados a concentradores Wi-SUN e/ou modem 3G/4G. Além disso ele possui 6 portas Ethernet para conexão com outros equipamentos e um conector para fibra óptica. Nessa fase de instalação, está previsto o uso de 1 slot para o concentrador Wi-SUN, 2 slots para modem 3G/4G, além da conexão de fibra óptica.

**Servidor dos Sensores + SCADA + Web:** os dados dos sensores são gerenciados por um servidor SCADA, além de um Servidor Web Lactec/Tecsys. O Servidor dos Sensores, desenvolvido no projeto é responsável pelo gerenciamento da comunicação Wi-SUN dos sensores, além do encaminhamento das informações dos sensores para os servidores SCADA e Web e dos servidores SCADA e Web para os sensores.

**Servidor MDC:** o servidor MDC (*Meter Data Colector*) é responsável pela coleta de informações e envio de comandos para os medidores. No do projeto, definiu-se que o mesmo será responsável ainda pelo gerenciamento da comunicação Wi-SUN dos repetidores e NICs.

**NMS Zabbix:** como a rede de comunicação é formada tanto por sensores quanto medidores, os dados de gerenciamento de rede ficam divididos em dois servidores distintos. Assim, o NMS Zabbix é responsável por coletar as informações dos dois servidores e centralizar o gerenciamento da rede. Essa troca de informações é realizada utilizando o protocolo SNMP.

Dentre os elementos descritos, no projeto GODEL Multilink foram desenvolvidos os equipamentos ilustrados na Figura 2 (Concentrador GODEL Multilink, Repetidor e Injetor e Módulo de Comunicação Wi-SUN), assim como o Servidor dos Sensores. Medidores + NIC e MDC foram adquiridos de fabricante consolidado no mercado brasileiro e sistemas SCADA, Web dos Sensores e NMS Zabbix são utilizados os sistemas já existentes na infraestrutura Neoenergia.

Como o projeto utiliza tanto equipamentos e servidores desenvolvidos no projeto quanto produto de fabricantes já disponíveis no mercado, é fundamental uma especificação técnica com definições claras de interoperabilidade para integração de todos os equipamentos e sistemas.

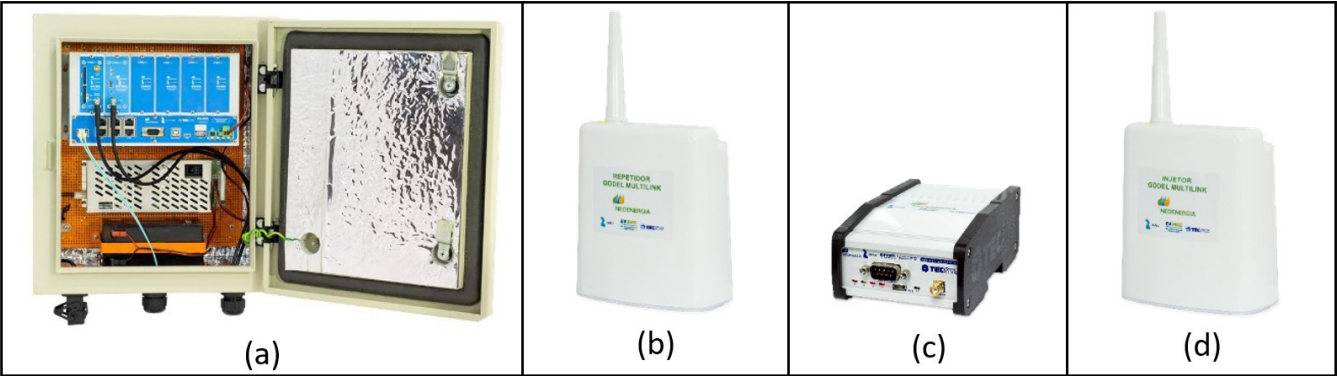


Figura 2 - Equipamentos desenvolvidos para o sistema de comunicação. (a) Concentrador GODEL Multilink, (b) Repetidor, (c) Modulo de comunicação e (d) Injetor.

2.2. *Análise de Lacunas para Interoperabilidade*O protocolo Wi-SUN foi desenvolvido com o objetivo de garantir a interoperabilidade, permitindo que equipamentos de diferentes fabricantes comuniquem em uma mesma rede. Por outro lado, ele é um protocolo flexível com distintos modos de operação, que, além de possibilitar desenvolvimento de alguns parâmetros proprietários, podem vir a comprometer a compatibilidade entre as camadas definidas. Além disso, seu escopo define desde a camada física até a camada de transporte, não incluindo as camadas de sessão, apresentação e aplicação. Ou seja, são definidos todos os parâmetros necessários para conexão de dispositivos ao concentrador de borda, mas não é definido como esses dados saem do roteador de borda para chegar até o servidor. Logo, para que seja possível a interoperabilidade fim a fim, faz-se necessário algumas definições adicionais.

2.3. *Definições para Interoperabilidade*2.3.1. *Wi-SUN Configurações Camada Física*As definições do protocolo Wi-SUN preveem configurações que podem variar entre diferentes implementações. Desta forma, para garantir a interoperabilidade de forma simples em relação a configuração do Wi-SUN, ou seja, sem necessidade de grandes implementações, optou-se pelo uso do padrão Wi-SUN sem implementações adicionais ou uso de parâmetros proprietários, seguindo as implementações obrigatórias do protocolo, como por exemplo roteamento RPL. Neste contexto, foram mapeadas as principais variáveis do Wi-SUN, sendo que, para o Brasil, optou-se nesse projeto pelo uso da configuração descrita na Tabela I.

Tabela I. Configuração Wi-SUN



Descrição	Configuração
Espaçamento de canal	200 kHz ou 400 kHz (configurável)
Função de canal	<i>Frequency Hopping - Direct Hash</i> (2)
Potência	Até 30 dBm
<i>Channel Plan</i>	Indireto (0)
<i>Regulatory Domain</i>	Brazil (7)
Supressão de canais	Faixa de frequência do Brasil (902-907,5 MHz e 915-928 MHz) 90 canais - faixa: 0-25 e 65-129 (200 kHz) 43 canais – faixa: 0-11 e 33-64 (400 kHz)
Exclusão de canais	Sem exclusão de canais
Autenticação	Chave padrão idevID descrita no Wi-SUN
GTKS	Randômica
Modulação	FSK
<i>Wi-SUN Setting</i>	1b – 200kHz ou 3 - 400kHz (configurável)
Tipo de Rede	Larga escala
<i>Unicast e Broadcast</i>	UDI e BDI: 255 ms e BI: 1020 ms (configurável)
<i>RPL e trickle timer</i>	Recomendações do padrão pelo Tipo de rede (larga escala)
<i>Operating Class</i>	1
Ch0	902,2 MHz
<i>Network Name</i>	32 caracteres (configurável)

**2.3.2 Wi-SUN Segurança** Na especificação Wi-SUN é definido o uso do IEEE802.1X em conjunto com protocolo EAP-TLS para a autenticação mútua entre dispositivo e o servidor de autenticação. Este servidor de autenticação pode ser o próprio roteador de borda, ou também um servidor de autenticação externo como por exemplo o *Radius Server*. Também é especificado que o modelo de certificado deve seguir os padrões baseado na RFC5280 (COOPER, 2008).

Para um dispositivo autenticar na rede Wi-SUN é necessário que o certificado (chave pública) da autoridade de certificação (CA) esteja presente no cliente e no servidor. Se a infraestrutura de chaves públicas (PKI) for diferente para o cliente e servidor, então a chave pública do CA da PKI do cliente precisa estar armazenada no servidor, e a chave pública do CA da PKI do server precisa estar armazenada no cliente, para que haja uma autenticação mútua.

Essas definições são necessárias para a implantação de uma rede Wi-SUN segura com dois ou mais modelos de dispositivos de fabricantes diferentes. Onde no servidor de autenticação irá ter a cadeia de certificado para o dispositivo A e a cadeia de certificado para o dispositivo B conforme mostrado na Figura 3.

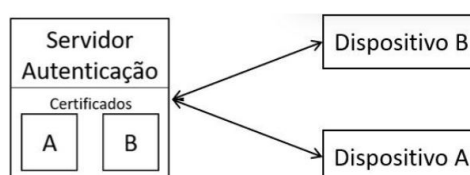


Figura 3 - Cadeia de Certificados

**2.3.3 Protocolo de Aplicação**No projeto, definiu-se o uso do protocolo DLMS/COSEM, incluindo o perfil brasileiro do protocolo DLMS definido na norma ABNT (NBR 16968, 2022), para comunicação com os medidores de energia e protocolo LwM2M para gerenciamento de rede.

O protocolo DLMS/COSEM é amplamente utilizado para medidores de energia e já utilizado pelos principais fornecedores de medidores inteligentes. Já o perfil brasileiro do protocolo DLMS (NBR 16968, 2022) define objetos que visam cumprir os requisitos específicos de medição de energia para o mercado brasileiro, que não são previstos em outros países e, consequentemente, no protocolo DLMS/COSEM original.

O protocolo LwM2M é um protocolo aberto para gerenciamento de rede, leve, com diversas bibliotecas já implementadas que pode ser facilmente integrado tanto em servidores quanto dispositivos com baixa capacidade de processamento e memória, como é o caso dos microcontroladores.

**2.3.4 Comunicação Fim-a-Fim**O emprego de uma arquitetura com comunicação fim-a-fim refere-se a um modelo de comunicação em que os dados são transmitidos diretamente entre o remetente e o destinatário final. Quando baseada em protocolo IP, a definição das camadas torna-se elemento básico e necessário para garantir a interoperabilidade na comunicação entre dispositivos. A TPS1.0 elaborada pela Aliança Wi-SUN tratou de definir todas as camadas inferiores a camada aplicação, pois ao empregar na camada de rede o uso do protocolo de endereçamento IPv6 e na camada de transporte o uso dos protocolos TCP (*Transmission Control Protocol*) ou UDP (*User Datagram Protocol*) facilitou o tráfego de pacotes na comunicação fim-a-fim. Quando não existe uma forma de endereçamento definida, geralmente essa separação de pacotes é realizada através de um cabeçalho na camada de aplicação tornando uma solução proprietária.

A instalação da rede AMI Interoperável desenvolvida pela Neoenergia possui o tráfego de pacotes de dois tipos de dados:

- Medição: Dados coletados de medidores através de um MDC através do perfil brasileiro do protocolo DLMS.
- Gerenciamento: Dados coletados de NIC através de um NMS através do protocolo LwM2M (*Lightweight Machine to Machine*).

Neste projeto foi definido o uso da arquitetura cliente-servidor para os dados de medição. O cliente é definido como a entidade que solicita as informações do medidor inteligente DLMS, neste caso o MDC. Já o servidor é definido como responsável por fornecer serviços de acesso a dados DLMS, neste caso o conjunto NIC mais medidor. Os dados de gerenciamento podem ser transmitidos periodicamente através de um *keep Alive* ou coletados através do servidor NMS.

Quando um NIC conecta à rede, ele recebe automaticamente um endereço IPv6 através do processo DHCPv6. Este endereço, associado a porta especificada serão responsáveis pelo encaminhamento correto dos pacotes de medição e gerenciamento na comunicação fim-a-fim. Segundo a IANA (*Internet Assigned Numbers Authority*), a porta definida para o serviço DLMS/COSEM é 4059. Todavia, todo pacote que chegar ao endereço IPv6 do NIC numerado pela porta 4059 deverá ser descapsulado e o *payload* encaminhado ao medidor inteligente. Segundo a LwM2M (ALLIANCE OM, 2020), a porta destinada ao tráfego de pacotes é a 5683, e ao chegar um pacote com esse endereçamento cabe ao NIC realizar o tratamento do pacote e responder ao servidor NMS. Como o endereço IPv6 dos equipamentos não é fixo, foi definido dentro do projeto que toda vez que um equipamento se conecta na rede, ele irá enviar um pacote LWM2M para o servidor cujo endereço foi previamente definido no equipamento, informando seu endereço IPv6 e seu endereço MAC.

Em uma arquitetura de comunicação fim-a-fim é necessário que o concentrador execute o roteamento de pacotes proveniente dos medidores inteligentes na rede FAN para a infraestrutura onde estão alocados

os servidores. Devido ao fato desta infraestrutura ainda não estar preparada para o tráfego de pacote IPv6, então é necessário aplicar uma técnica chamada *Tunneling*, que consiste no tráfego de pacote IPv6 encapsulado em um túnel IPv4.

No projeto utilizou-se o túnel tipo TAP, que é uma interface de rede de camada 2 que está operando no nível de *Ethernet*. Ele é projetado para emular uma placa de rede física, permitindo que pacotes *Ethernet* sejam transmitidos através dele. Para realizar o roteamento, é necessário que cada roteador de borda seja configurado com um prefixo IPv6 diferente, devido ao fato de que a rede FAN estará conectada na infraestrutura por um túnel IPv4, então é necessário que o concentrador anuncie a rota para cada prefixo IPv6 configurado nos roteadores de borda.

Para uma comunicação segura entre o concentrador GODEL Multilink e a infraestrutura foi necessário a implementação e uso de VPN (*Virtual Private Network*), onde é possível garantir a segurança na comunicação, no concentrador GODEL Multilink foi implementado o DMVPN (*Dynamic Multipoint VPN*) que é o padrão definido pelo grupo Neoenergia.

**2.4. Teste de Validação da Interoperabilidade Fim-a-Fim** O teste de comunicação fim-a-fim realizado foi configurado utilizando o medidor inteligente e um MDC ambos em padrão DLMS e do fabricante A. Foi integrado um NIC compatível no medidor inteligente desenvolvido pelo fabricante B, o concentrador GODEL Multilink desenvolvido neste projeto foi responsável por promover a rede Wi-SUN e realizar a comunicação com a infraestrutura dos servidores. O NIC instalado no Medidor Inteligente foi configurado com os parâmetros Wi-SUN definidos pelo projeto, de acordo com os parâmetros informados na Tabela I. Também foram gravados os certificados *Root* e *Cliente* no NIC compatível com o concentrador GODEL Multilink. Então, o concentrador GODEL Multilink abriu uma conexão segura através de uma VPN até a infraestrutura alocada ao MDC, criando um túnel do tipo TAP para tráfego de dados IPv6, foi configurada a tabela de rotas para realizar o roteamento de pacotes.

Como o Wi-SUN emprega o uso de IPv6, é possível realizar o ICMP (*Internet Control Message Protocol*) e é razoável utilizá-lo para verificar a conexão de um dispositivo qualquer. Então, ao formar o enlace da comunicação entre a infraestrutura e o NIC, foi realizado o teste de ICMP entre o servidor com endereço IPv4 e o NIC com o endereço 2020::7690:5000:0:58, conforme mostrado na Figura 4.

```
[centos@ip-172-31-36-30 ~]$ ping6 2020::7690:5000:0:58
PING 2020::7690:5000:0:58(2020::7690:5000:0:58) 56 data bytes
64 bytes from 2020::7690:5000:0:58: icmp_seq=1 ttl=254 time=162 ms
64 bytes from 2020::7690:5000:0:58: icmp_seq=2 ttl=254 time=149 ms
64 bytes from 2020::7690:5000:0:58: icmp_seq=3 ttl=254 time=148 ms
64 bytes from 2020::7690:5000:0:58: icmp_seq=4 ttl=254 time=152 ms
^C
--- 2020::7690:5000:0:58 ping statistics ---
```

Figura 4 - Teste ICMP

Após realizar o teste ICMP, deu-se início ao teste de comunicação fim-a-fim entre MDC e o Medidor Inteligente mais o NIC através do protocolo DLMS, o tráfego de dados foi capturado, utilizando a ferramenta *wireshark*, onde é possível constatar a comunicação entre o MDC endereço IPv6 fd13::210 e o NIC 2020::7690:5000:0:58, através de algumas requisições conforme mostrado na Figura 5.



No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
211	1232.988934	fd13::210	2020::7690:5000:0:58	DLMS	101	AARQ
212	1233.332629	2020::7690:5000:0:58	fd13::210	DLMS	113	AARE
213	1233.350763	fd13::210	2020::7690:5000:0:58	DLMS	83	Get-Request-Normal data.value 0.0.43.1.4.255
214	1233.537332	2020::7690:5000:0:58	fd13::210	DLMS	79	Get-Response-Normal
215	1233.551585	fd13::210	2020::7690:5000:0:58	DLMS	145	AARQ
216	1234.189645	2020::7690:5000:0:58	fd13::210	DLMS	157	AARE
217	1234.231283	fd13::210	2020::7690:5000:0:58	DLMS	109	Unknown APDU
218	1234.490013	2020::7690:5000:0:58	fd13::210	DLMS	102	Unknown APDU

Figura 5 - Captura Comunicação fim-a-fim

2.5. *Instalação do Piloto* Após a validação inicial da interoperabilidade fim-a-fim, foi verificado o desempenho de uma rede de comunicação formada pelos dispositivos desenvolvidos no projeto e instalados na primeira fase, incluindo: 1 Concentrador GODEL Multilink, 1 Repetidor, 4 Injetores e 2 Sensores inteligentes (Módulos de comunicação) como é mostrada na Tabela II. Os equipamentos foram instalados entre os dias 29 e 30 de maio de 2023 com uma distância entre eles variando de 100 e 300 metros, na cidade de Brasília, conforme ilustrado na Figura 6.

Tabela II. Dispositivos instalados na cidade de Brasília

Dispositivo	ID
Concentrador GODEL Multilink	C0005
Repetidor	R2004
Injetor	I1001, I1002, I1003, I1004
Sensor	S3001, S3002



Figura 6 - Localização dos dispositivos instalados na 1ª Fase na Asa Norte (Brasília)

Para a análise detalhada do desempenho da rede, selecionou-se o intervalo entre os dias 17/06/2023 e 16/07/2023, excluindo o intervalo entre os dias 30/06/2023 e 03/07/2023 e o dia 14/06/2023 nos quais foram realizados testes de reset na rede e manutenção no sistema, respectivamente.

Com a validação do desempenho dos dispositivos foi realizada a implementação da segunda fase, na qual houve uma ampliação dos dispositivos instalados na Asa Norte e a instalação de equipamentos na região de Taguatinga. Esses equipamentos possuem novas configurações e alinhamento de *hardware* e *firmware*, permitindo que todos funcionem por padrão como Repetidor e via comando pode ser acionado a funcionalidade de Injetor para testes, posteriormente voltando à funcionalidade de Repetidor. Algumas unidades já fabricadas foram instaladas somente como Repetidor e algumas unidades foram trocadas para versões melhoradas. Para a Asa Norte foram adicionados: 1 Concentrador GODEL Multilink (com dois slots de Border Router, um em configuração de uso e um reserva), 6 Repetidores (sendo que o repetidor R2004 foi substituído pelo R2009) e 4 Injetores. Na Tabela III é apresentada a relação atualizada e na Figura 7 a localização dos dispositivos.

Tabela III. Dispositivos instalados na cidade de Brasília, na Asa Norte

Dispositivo	ID
Concentrador GODEL Multilink	C0 (antigo C0005), C4
Repetidor	R2006, R2007, R2009, R2010, R2012, R2013
Injetor	I1001, I1002, I1003, I1004, I1006, I1011, I1024, I1025



Figura 7 - Localização dos dispositivos na Asa Norte (Brasília)

Em Taguatinga, foram instalados: 4 Concentradores GODEL Multilink (com dois slots de Border Router, um em configuração de uso e um reserva), 5 Repetidores, 33 Injetores e 16 Sensores inteligentes (Módulos de comunicação), a relação pode ser vista na Tabela IV. Na Figura 8, é apresentada a localização dos dispositivos.

Tabela IV. Dispositivos instalados em Taguatinga, na cidade de Brasília

Dispositivo	ID
Concentrador GODEL Multilink	C1, C2, C3, C5
Repetidor	R2001, R2002, R2011, R2014, R2015
Injetor	I1007, I1008, I1009, I1010, I1012, I1013, I1014, I1016, I1017, I1018, I1019, I1020, I1022, I1023, I1026, I1027, I1028, I1029, I1030, I1031, I1032, I1033, I1034, I1035, I1036, I1037, I1038, I1039, I1040, I1041, I1046, I1048, I1049
Sensores	S3003, S3004, S3005, S3006, S3007, S3009, S3010, S3011, S3012, S3014, S3015, S3016, S3017, S3018, S3019, S3020





é que 250 medidores inteligentes estejam instalados. 2.5.1. *Resultados - LQIO* LQI (Link Quality Indication) mede a qualidade do link de comunicação. Ele é um valor cumulativo usado em redes multi-salto para medição do custo do link. De acordo com a sensibilidade do rádio utilizado, um LQI maior ou igual a -90 dBm resulta em uma comunicação de boa qualidade, abaixo desse valor, em alguns casos a comunicação ainda é bem-sucedida, porém menos estável, impactando na taxa de sucesso na transmissão de dados. Para análise dos valores, foi feita a média diária do LQI, conforme Figura 10 e, adicionalmente, verificou-se o valor mínimo diário do LQI, na Figura 11. No gráfico do valor médio do LQI, nota-se que todos os dispositivos estão dentro da faixa superior aos -90 dBm. Já na análise do valor mínimo, alguns dispositivos como o 1004 e o 1002 acabam tendo alguns valores na faixa mais crítica, entre -90 e -110 dBm. Porém, como esses valores são esporádicos, conforme análise da média, eles não impactam na taxa de sucesso da transmissão.

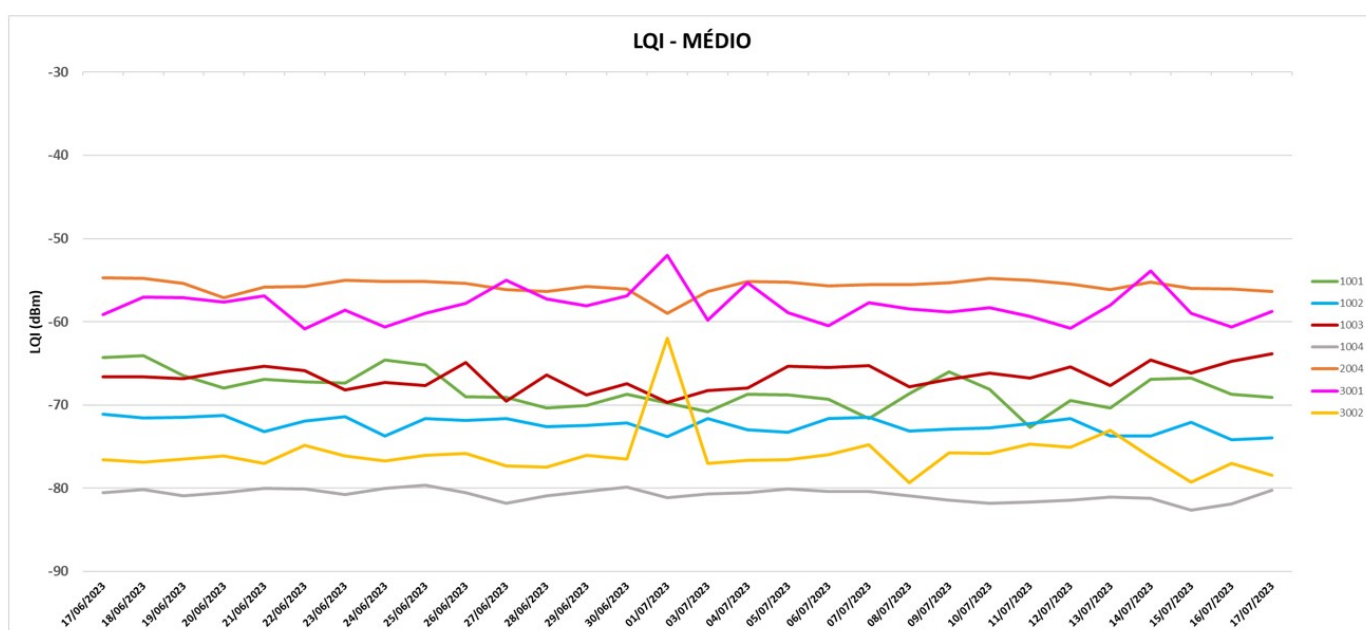


Figura 10. LQI diário médio por dispositivo

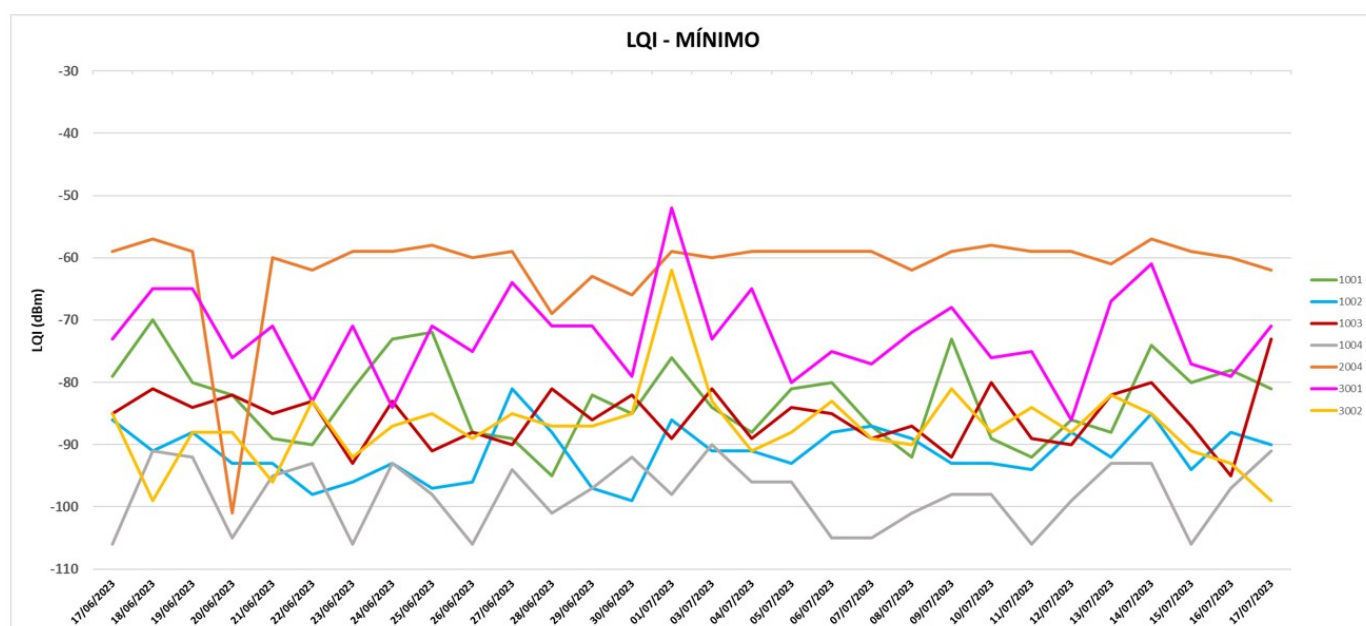




Figura 11. LQI diário mínimo por dispositivo

**2.5.2. Resultados – Taxa de Sucesso na Transmissão** A análise da taxa de sucesso na transmissão de pacote foi realizada com base nos dados da camada de aplicação. Nessa camada, são realizados reenvio dos pacotes em caso de falha na transmissão. Assim, considera-se como sucesso na transmissão pacotes recebidos no servidor, incluindo os que tiveram necessidade de mais de uma tentativa de envio.

Para a análise da taxa de sucesso da transmissão na camada de aplicação, foi realizada uma verificação nos pacotes de diagnóstico recebidos no servidor LWM2M. Como o intervalo de envio de pacotes é conhecido, analisando o intervalo entre os pacotes recebido é possível identificar a quantidade de pacotes perdidos. No gráfico da estatística da camada de aplicação, Figura 12, observa-se um ótimo desempenho da rede, com valores acima de 98% de taxa de sucesso diário ao longo do período, com exceção do dia 28/06, em que foi realizada manutenção no servidor fazendo com que ele fosse desligado por um período de 1 hora.

Para a camada de aplicação, no caso de repetidores e sensores, como o intervalo de envio de pacotes é de 1 hora, apenas 24 pacotes são enviados por dia. Assim, a perda de 1 único pacote tem um grande impacto na análise diária. Mesmo no caso do equipamento 3001, que no dia 28/06 apresentou uma taxa de 91%, considerando o período completo da análise, ou seja, período de 24 dias, a taxa média do período de disponibilidade do equipamento é de 99,49%, com 583 pacotes recebidos e 3 pacotes perdidos.

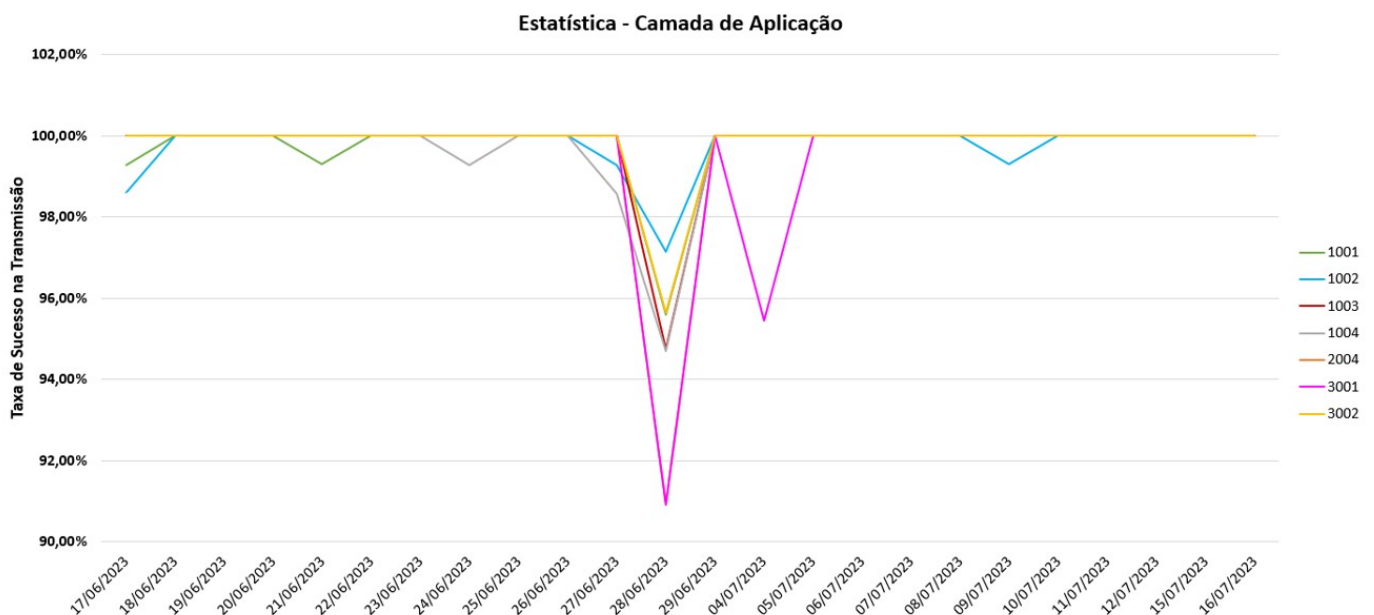


Figura 12. Estatística - Camada de Aplicação

### 3. Conclusão

Apesar de haver alguns pontos configuráveis no Wi-SUN, que não inclui camada de aplicação na sua definição, através do projeto GODEL Multilink, desenvolvido no âmbito do programa de Pesquisa Desenvolvimento e Inovação (PDI) da Neoenergia, regulado pela ANEEL, está em comprovação que, com algumas definições de configurações em comum, é possível construir uma rede AML, segura, interoperável fim a fim, com camada FAN Wi-SUN. Para isso, foram adotados padrões conhecidos e amplamente utilizados para camada de aplicação, tanto para leitura de medidores quanto para gerenciamento de rede.

Após a definição dos padrões utilizados no projeto, os testes de interoperabilidade fim a fim realizados em laboratório comprovaram a facilidade para integração dos sistemas.

Por fim, a análise do desempenho dos equipamentos instalados em campo comprovou a viabilidade técnica da solução adotada. Com equipamentos instalados em distâncias que variam entre 100 e 300 metros, o LQI médio na comunicação entre eles ficou acima de -90 dBm, valor considerado ideal para comunicação Wi-SUN. Com relação a taxa de sucesso na transmissão de pacotes, analisada na camada de aplicação, a taxa média para um período de análise de 24 dias ficou acima de 99% para todos os equipamentos analisados. Valor considerado muito bom para esse tipo de rede de comunicação.

Com o acompanhamento da rede inicial, foi visto uma sequência de períodos de não conexão, provenientes do uso exclusivo de um modem com conexão 3G. Isso ocorreu pela instabilidade da rede utilizada e pelo fato do concentrador GODEL Multilink estar com apenas um meio de comunicação. Como solução, foram adicionados 2 novos módulos de comunicação ao mesmo, sendo um público e um de rede privada, fornecendo alternativas para a comunicação WAN dos dispositivos.

Uma próxima etapa prevista no projeto irá analisar o desempenho da rede completa ao término da instalação dos 5 mil medidores inteligentes.

## **4. Referências bibliográficas**

HEILE, B.; LIU, B.; WHANG, M.; PERKINS, C. Wi-sun fan overview. draft-heile-lpwan-wisun-overview-00, Internet-Draft, IETF, 2017.

IEEE Std 2857™ 2021; IEEE Standard for Wireless Smart Utility Network Field Area Network (FAN). IEEE SA Standards Board: NY, US, 2021; pp.1-182.

Wi-SUN Alliance. Certified Products. Acesso em 21/07/2023, disponível em: <https://wi-sun.org/certified-products-list/>.

INTORNO, L. M.; SCARAMELLA, G.; SILVA, A. R. A.; GOMES, V. B., AMBROSIO, A.; FERNANDES, A. D. R.; DA SILVA, C. F.; VIANNA, S.; RIELLA, R. J.; LIPPMANN, L. Desenvolvimento e Análise de Desempenho do Protocolo Wi-Sun em Projeto Piloto na Rede de Distribuição. In XXVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Rio de Janeiro, Brazil, 15-18 de maio 2022.

AMBROSIO, A.; RIELLA, R. J.; INTORNO, L. M.; GOMES, V. B.; FERNANDEZ, E. M. Wi-SUN FAN Interoperability: Verification through Experiment Test. In Proceedings of the XXXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT 2021), Fortaleza, Brazil, 26–29 September 2021; pp. 1-5.

COOPER, D.; SANTESSON, S.; FARRELL, S.; BOEYEN, S.; HOUSLEY, R.; POLK W. Internet X.509 Public Key Infrastructure Certificate and Certificate Revocation List (CRL) Profile. RFC 5280; IETF: Fremont, CA, USA, 2008.

ALLIANCE, Open Mobile. Lightweight machine to machine technical specification: Transport Bindings. Open Mobile Alliance: San Diego, CA, USA, 2020.

ABNT NBR 16968 Perfil DLMS/COSEM para medidores inteligentes de energia elétrica – Requisitos, 2022.