



**XXIV SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GTL/05

22 a 25 de outubro de 2017  
Curitiba - PR

**GRUPO - XV**

**GRUPO DE ESTUDO SISTEMAS DE INFORMAÇÃO E TELECOMUNICAÇÕES PARA SISTEMAS ELÉTRICOS –  
GTL**

**LPWAN E MESH: APLICABILIDADE DE NOVAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO EM REDES  
SMARTGRID RURAIS**

**Márcio Luiz Ferreira Miguel (\*)  
COPEL**

**RESUMO**

Apresenta as características das tecnologias de comunicação sem fio emergentes que operam em frequências ISM não licenciadas, como o IEEE802.15.4.g e LoRaWAN, comparando suas características de alcance, banda, latência, disponibilidade e consumo de energia e discute as suas aplicações em redes AMI de medição e automação da distribuição de energia. São apresentados os ensaios de prova de conceito realizados para avaliação das tecnologias e a aplicabilidade para cada necessidade no âmbito das *Smartgrids* rurais.

**PALAVRAS-CHAVE**

*Smartgrid*, Lorawan, IEEE802.15.4, 6Lowpan, AMI

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A comunicação de equipamentos voltados à automação de sistemas elétricos em áreas rurais apresentam diversos desafios em virtude da grande extensão territorial do país. Estas áreas carecem de cobertura de redes celulares, tanto em alcance quanto em disponibilidade nos momentos de necessidade, pois o furto de baterias de estações rádio base é comum e o número de canais de dados alocados pelas operadoras é limitado pela baixa densidade de usuários. As redes de fibra óptica ou de comunicação fixas ainda apresentam custos muito elevados para aplicações em *Smartgrids* rurais, onde as linhas são extensas e com baixas densidades de equipamentos e consumidores. Esta característica das redes serem esparsas, com distâncias entre equipamentos de centenas de metros ou até quilômetros impede que as mesmas tecnologias empregadas em áreas densas, nas chamadas “Cidades Inteligentes” sejam viáveis técnica e economicamente.

Outros fatores, tais como segurança, disponibilidade e utilização de padrões abertos a fim de se evitar a dependência de um único fabricante também devem ser considerados.

Para uma avaliação da aplicabilidade das tecnologias existentes em redes *Smartgrid* rurais, foram desenvolvidos ensaios do tipo “prova de conceito” utilizando módulos de desenvolvimento disponibilizados pelos fabricantes dos circuitos integrados que implementam os padrões propostos. Por serem tecnologias recentes, em alguns casos não existiam produtos acabados disponíveis para testes no país, sendo por isso utilizados módulos montados em placas de prototipagem.

Os softwares escolhidos para serem empregados nos módulos e sistemas eram de código aberto ou de serviços presentes na Internet.

**2.0 - TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO PARA M2M**

Dentre as tecnologias existentes para a comunicação de dados M2M (*Machine-to-Machine*) em faixas ISM (*Industrial, Science and Medical*) que não necessitam licenciamento perante a ANATEL, criadas principalmente

(\*) Rua José Izidoro Biazetto, n° 158 – sala 260 - Bloco A – CEP 81.200-240 Curitiba, PR – Brasil  
Tel: (+55 41) 3230-9257 – Email: marcio.miguel@copel.com

para atender às demandas provenientes da expansão do conceito de IoT (Internet das Coisas), algumas se sobressaem por suas características de banda, alcance e consumo de energia em relação às tecnologias tradicionais de comunicação de dados sem fio, providas pelas operadoras celulares. A Figura 1 ilustra a relação entre os parâmetros das diferentes tecnologias existentes, apresentando as duas novas participantes do cenário denominado LPWAN, a LoRa<sup>1</sup> e a SigFox<sup>2</sup>, onde a banda é sacrificada em função do alcance e consumo de energia.

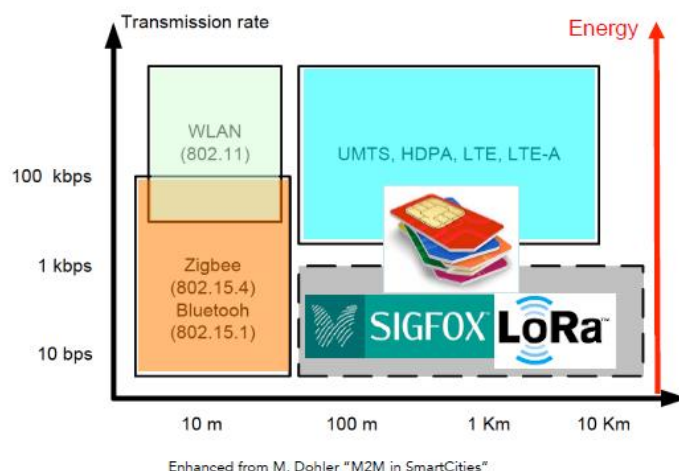


FIGURA 1 – Classificação das tecnologias em função da taxa de transmissão x consumo x alcance (1)

Embora sendo desenvolvidas para o mercado IoT, muitas de suas características as habilitam para as redes *Smartgrid* rurais, com o ganho de diminuição de custo esperado pela adoção em larga escala do que redes somente idealizadas com foco em *Smartgrid*.

As soluções mencionadas na Figura 1 utilizam uma topologia ponto-multiponto, mas para *Smartgrids* há de incluir as redes baseadas no padrão IEEE802.15.4 (2) baseadas em topologia *mesh*, especialmente as aderentes ao anexo "g" do padrão, com foco especial para redes de empresas de energia, água e gás, que especifica frequências ISM sub-GHz, e que possuem alcance superior às que operam na frequência também ISM de 2,4 GHz. Recentemente o 3GPP (*Third Generation Partnership Project*)<sup>3</sup> que é órgão técnico para padronização de redes de telefonia celular, observando o movimento de empresas iniciantes na área de IoT, propôs dois padrões de comunicação IoT, o LTE-M1 e o LTE-M2, também chamado de NB-IoT (*Narrowband IoT*), porém a operação comercial está em fase de implantação por parte das operadoras celulares.

## 2.1 Redes IEEE 802.15.4 6LoWPAN

As redes sem fio do tipo *mesh* de múltiplos saltos, onde os próprios nós sensores atuam como roteadores para nós mais distantes da base, como ilustrado na Figura 2, tem sido empregados nos últimos dez anos, desde a padronização IEEE 802.15.4, principalmente em redes AMI (*Advanced Metering Infrastructure*) em áreas metropolitanas densas.

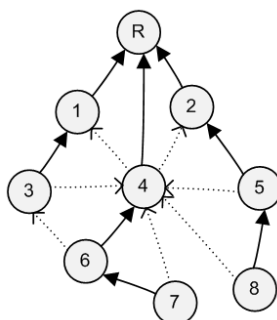


FIGURA 2 – Exemplo de topologia *mesh*

<sup>1</sup> <https://www.lora-alliance.org/>

<sup>2</sup> <https://www.sigfox.com/>

<sup>3</sup> <http://www.3gpp.org/>

Inicialmente as topologias *mesh* eram formadas autonomamente por protocolos proprietários como o Zigbee, mas com o advento das redes 6LoWPAN (3), o roteamento entre os nós passou a ser realizado pelo protocolo RPL(4). Com o 6LoWPAN as redes *mesh* passaram a empregar um endereçamento IPv6, possibilitando assim que as redes passassem a suportar as tecnologias utilizadas na Internet, tais como HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) e XML (*eXtensible Markup Language*), além de outras, como o CoAP (*Constrained Application Protocol*), desenvolvidas especialmente para redes de baixa capacidade, como as redes de sensores sem fio, em vez de suportar apenas protocolos específicos para uma aplicação, como o DNP3, PIMA, ABNT e etc..

O padrão IEEE 802.15.4g (5), estabelecido pelo grupo de trabalho IEEE SUN (*Smart Utility Network*) em 2012, definiu as normas a serem seguidas para a camada física das redes de sensores em frequências não licenciadas abaixo de 1 GHz (915 MHz para o Brasil). As frequências abaixo de 1 GHz possuem características bem superiores de alcance e penetração em edifícios do que as frequências livres acima de 2,4 GHz, como as utilizadas em redes Wi-Fi e por rádios IEEE802.15.4-2003. Este padrão tem sido utilizado principalmente em redes AML, com distâncias entre os saltos de 300 m em áreas populadas, chegando a mais de um quilometro em linha de visada. Também em 2012 o IEEE aprovou um novo adendo, o IEEE802.15.4e (6), que modificou a camada MAC (*Media Access Control*), possibilitando os saltos de canal e multiplexação destes canais no tempo, aumentando assim a imunidade às interferências que possam estar presentes em frequências não licenciadas.

A principal vantagem da topologia *mesh* é o uso de nós comuns como repetidores para os nós vizinhos. Esta funcionalidade traz vantagens em topografias acidentadas em comparação com a topologia ponto-multiponto pela diminuição das áreas de sombra em relação a um ponto central, além de prover caminhos redundantes dentro da rede. Por outro lado, como as mensagens devem atravessar vários nós antes de alcançarem o destino, há uma maior ocupação do meio de transmissão, possibilitando a interferência entre os nós e diminuindo a velocidade de comunicação.

## 2.2 Redes LPWAN

As redes LPWAN (*Low-Power Wide-Area Network*), diferentemente das redes *mesh*, utilizam topologias ponto-multiponto, como a apresentada na Figura 3.

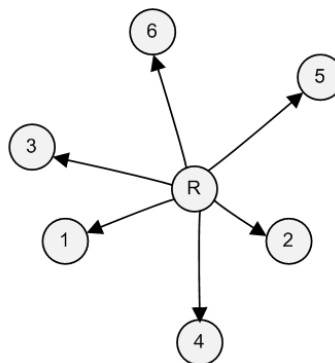


FIGURA 3 – Exemplo de topologia ponto-multiponto

As premissas principais dessas redes é um alcance elevado e baixo consumo de energia, permitindo a sua alimentação com baterias, painéis fotovoltaicos ou mesmo pela indução de linhas de transmissão. A característica de utilizarem topologias estrela permite que os nós sensores entrem no modo de hibernação quando não houver necessidade de comunicação, diminuindo o consumo de energia para a ordem de dezenas de microamperes. A sua independência de outros nós retransmissores é um fator interessante, pois no caso de falta de energia em uma região, a comunicação fica dependente apenas do *gateway* central estar no ar.

A contrapartida deste longo alcance está nas baixas taxas de transmissão, que podem variar de 240 bps a 37500 bps para a tecnologia LoRa ou 100 bps, com limite de 140 mensagens de 12 bytes por dia para o SigFox, que são atualmente as tecnologias mais proeminentes em LPWANs. Ambas são proprietárias, porém o SigFox é orientado ao modelo de prestação de serviços por operadoras celulares, enquanto que o LoRa permite a criação de redes privadas, operadas pelas próprias concessionárias. O LoRa utiliza uma tecnologia patenteada denominada CSS (*Chirped Spread Spectrum*), resultando em uma sensibilidade de -148 dBm para seus transceptores, o que a torna um candidata para as soluções de comunicação rural. Uma desvantagem já citada das redes ponto-multiponto em relação às redes *mesh* é a necessidade de visada dos nós ao ponto central, o que diminui a cobertura em áreas acidentadas, como exemplificado na Figura 4, onde os pontos elevados recebem o sinal à vários quilômetros, porém os vales ficam em áreas de sombra. Nestes casos haveria a necessidade de aumento do número de pontos centrais, encarecendo a solução.

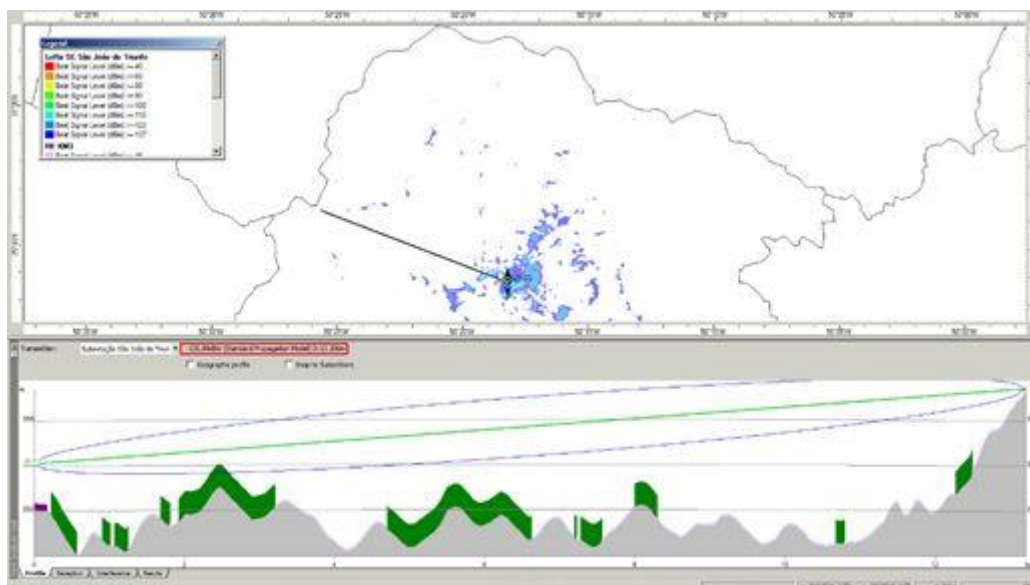


FIGURA 4 – Exemplo de um diagrama de cobertura de uma rede LoRaWAN 915 MHz

O LoRa estabelece o padrão de camada física, com parâmetros que podem ser modificados de acordo com a necessidades da rede, como modulação, largura de banda e fator de espalhamento espectral, que afetam o alcance, o tempo de transmissão e o consumo dos rádios. A tabela 1 mostra esta relação entre os parâmetros.

Tabela 1 – Tempo de transmissão de um pacote de 255 Bytes em diversos modos LoRa

Modo LoRa	Alcance	BW (kHz)	CR	SF	Tempo de transmissão para um pacote de 255 Bytes (s)
1	Elevado > 10 km	125	4/5	12	9,15046
2	Alto	250	4/5	12	3,91987
3	Alto	125	4/5	10	2,32858
4	Médio	500	4/5	12	1,95599
5	Médio	250	4/5	10	1,16429
6	Médio	500	4/5	11	1,06189
7	Médio	250	4/5	9	0,63334
8	Baixo	500	4/5	9	0,31667
9	Baixo	500	4/5	8	0,17882
10	Baixo	500	4/5	7	0,10093

A especificação LoRaWAN (7) define as características da camada MAC de uma rede que utiliza a modulação LoRa, de tal forma a promover a integração de dispositivos pertencentes à rede. O LoRaWAN estabelece pontos centrais com oito canais para atender o tráfego de subida (entre os nós e o central) e um canal de descida, para envio de mensagens da central aos nós, que normalmente é menos frequente. No ponto central fica um *gateway*, que tem o objetivo de encaminhar as mensagens para um servidor em uma rede IP ou do servidor para os dispositivos. A autenticação dos dispositivos autorizados e o fechamento da criptografia com os mesmos também é função do *gateway*.

No caso de dispositivos clientes, foram definidas na especificação três classes que podem operar na rede, denominadas A, B e C:

- Classe A: Baixo consumo de energia, somente recebe mensagens do ponto central em uma janela de recepção curta criada após uma transmissão iniciada pelo dispositivo. Após o ciclo, o dispositivo entra em modo de economia, desligando o rádio.
- Classe B: Consumo de energia moderado/alto, possui janelas de recepção agendadas.
- Classe C: Consumo de energia elevado, com o receptor ligado sempre que não estiver transmitindo.

A escolha da classe do dispositivo depende da aplicação. Como exemplo, um sensor de faltas de rede elétrica de média tensão sem alimentação externa deve utilizar um dispositivo de classe A para garantir a duração da bateria por vários anos, mas um dispositivo acoplado a um medidor de consumo de energia pode utilizar as classes B ou C, para permitir a execução de ações de corte e religação remotas sem que seja necessária a espera de



Os testes em ambiente real contaram com seis nós, tendo um deles a função de 6LBR (*6LoWPAN Border Router*), que é a raiz da árvore RPL, e interconecta a rede sem fio 6LoWPAN com a rede IPv6 cabeada, com a inclusão de uma interface Ethernet ao módulo CC1310 *Launchpad*. O alcance obtido em uma rede similar à simulada da Figura 5 foi de cerca de 100 m entre os saltos, sem visada direta e com obstruções, por o 6LBR estar em ambiente interno.

Esta tecnologia não possui a figura do *gateway*, apenas o 6LBR que promove o roteamento entre as redes sem fio e a Ethernet, e há uma comunicação fim-a-fim, podendo qualquer nó ser acessado diretamente por seu endereço IPv6 global.

### 3.2 Tecnologia LoRaWAN

Para a prova de conceito da tecnologia LoRaWAN, pela ausência na época no mercado nacional de um *gateway* totalmente aderente à especificação LoRaWAN, que deve utilizar o circuito integrado Semtech SX1301<sup>7</sup> com oito canais na faixa de frequência de 915 MHz, foi construído em placa de prototipagem (Figura 6) um *gateway* de apenas um canal, composto de um transceptor com o circuito integrado Semtech SX1276 e um módulo com o SOC Expressif ESP8266<sup>8</sup>, que possui um processador compatível com a programação Arduino e uma interface Wi-Fi, que possibilita sua comunicação com serviços de nuvem disponíveis para as redes LoRaWAN na Internet, como o TTN<sup>9</sup> (*The Things Network*).

O *firmware* do *gateway* foi obtido de um projeto de código aberto desenvolvido por Maarten Westenberg<sup>10</sup> para o ambiente Arduino.

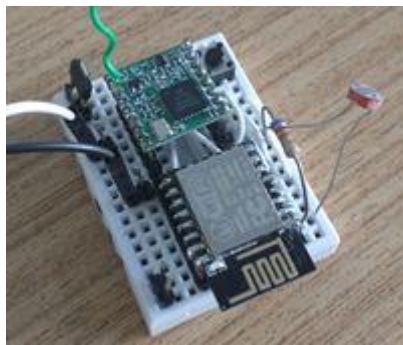


Figura 6 – Protótipo de *gateway* LoRaWan de um canal com comunicação Wi-Fi

Para os nós, o *hardware* utilizado foi o mesmo do *gateway*, porém sem a necessidade do uso do Wi-Fi, que foi desabilitado. O *firmware* utilizado foi também de código aberto, baseado na biblioteca Arduino-LMIC<sup>11</sup>.

Nos ensaios realizados, mensagens enviadas pelos nós eram recebidas pelo *gateway*, localizados até 1300 m de distância entre eles. As mensagens recebidas eram enviadas pela Internet ao servidor do serviço TTN, que as publicavam em uma página WEB. Mensagens postadas na página WEB também eram recebidas pelo *gateway*, que as encaminhavam para os nós.

O consumo medido do protótipo do nó LoRaWAN foi de 150 mA a 3,3 V durante a transmissão de 2 segundos, e durante o estado de espera, a corrente medida foi de apenas 0,25 mA.

### 4.0 - CONCLUSÃO

Para cada ensaio realizado foi avaliada a relevância de fatores como consumo, banda necessária, latência e disponibilidade, e a adequação para cada necessidade.

No caso da rede *mesh*, a comunicação IP fim-a-fim e com baixa latência é de grande importância para a automação da rede de distribuição (DA), onde os pacotes do protocolo DNP3 são encapsulados em IP, com conexão direta ao sistema SCADA. A maioria dos equipamentos de automação, como religadores, já possuem interface Ethernet, mas o endereçamento IP dos equipamentos existentes no mercado ainda é IPv4, o que implica na adoção de técnicas de tradução do endereçamento IPv4 para IPv6 quando do uso de redes *mesh* IPv6 ou 6LoWPAN. Para a aplicação de redes *mesh* na medição de energia, o endereçamento IPv6 não apresenta problemas, pois a conversão de protocolos seriais como o PIMA ou ABNT para mensagens encapsuladas em IPv6 é realizado pelo próprio dispositivo de comunicação. A ampla quantidade de endereços IPv6 permite que centenas de milhares de dispositivos sejam endereçados e se comuniquem com sistemas de coleta de dados de medição (MDC) diretamente, sem a intermediação de *gateways* de protocolo.

<sup>7</sup> <http://www.semtech.com/wireless-rf/rf-transceivers/sx1301/>

<sup>8</sup> <https://espressif.com/en/products/hardware/esp-wroom-02/overview>

<sup>9</sup> <https://www.thethingsnetwork.org/>

<sup>10</sup> <https://github.com/things4u/ESP-1ch-Gateway-v4.0>

<sup>11</sup> <https://github.com/matthijskooijman/arduino-lmic>



As soluções LPWAN são especialmente interessantes quando há dificuldade no provimento de energia para o dispositivo de comunicação, como no caso de equipamentos situados em locais sem alimentação elétrica, como medidores de água e gás, ou de sensoriamento de faltas em linhas de média tensão, que utilizam baterias que devem durar vários anos. Como o envio de informações para os centros de medição ou de monitoramento é muito esporádico, somente quando da ocorrência de um evento, e por não fazer retransmissão de outros nós como em redes *mesh*, o LoRaWAN se adequa bem nestas soluções.

Por sua baixa taxa de transmissão, o LoRa não é adequado a transmissão de pacotes IP, exigindo assim elementos intermediários (*gateways*) para o recebimento e encaminhamento das mensagens, o que pode ser um ponto de gargalo. Por possuir capacidade de transmissão bidirecional, é uma evolução em relação às redes de baixa velocidade que existiam até então, onde somente possuíam comunicação no sentido dos nós para o concentrador.

As conclusões dos testes servirão para balizar as especificações técnicas para a contratação de soluções mais adequadas para cada caso, bem como para disseminar na concessionária o conhecimento envolvendo as tecnologias atuais de comunicação M2M sem fio.

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) PHAM, C., Low-power, Long-range WAN for IoT: a Technology Overview. Disponível em <http://cpham.perso.univ-pau.fr/Paper/Talk-Rescom-16-LPWAN-review.pdf>, acesso em 24 de março de 2017.

(2) IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Std. 802.15.4-2003, Outubro 2003.

(3) MONTENEGRO, G., KULSHALNAGAR, N., HUI, J., & CULLER, D. (2007). RFC 4944-transmission of IPv6 packets over IEEE 802.15.4 networks. Internet Engineering Task Force (IETF) Request for Comments, disponível em <http://www.ietf.org/rfc/rfc4944.txt>.

(4) WINTER, T., THUBERT, P., HUI, J. RFC 6550 - RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. Internet Engineering Task Force (IETF) Request for Comments, disponível em <http://www.ietf.org/rfc/rfc6550.txt>.

(5) IEEE Standard 802. 15. 4g, "Part 15. 4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 3: Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Data-Rate, Wireless, Smart Metering Utility Networks, " Abril 2012.

(6) IEEE Standard 802. 15. 4e, "Part 15. 4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) Amendment 1: MAC Sublayer, " Fevereiro 2012

(7) LoRa Alliance Inc., LoRAWAN Specification. Disponível em <https://www.lora-alliance.org/portals/0/specs/LoRaWAN%20Specification%201R0.pdf>. Acesso em 24 de março de 2017.

## 6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Márcio Luiz Ferreira Miguel

Curitiba-PR 1966

Engenharia Eletrônica - UTFPR - 1993, Especialização em Teleinformática - UTFPR – 1998,

Mestrado em Informática - PUC-PR - 2011

Faz parte do corpo funcional da COPEL desde 1995, atuando na equipe de planejamento de redes IP/MPLS do Departamento de Engenharia de Redes da COPEL Telecomunicações.