

Avaliação de um Sistema Híbrido de Comunicação para Aplicação em Redes Inteligentes de Energia Elétrica

Evaluation of a Hybrid Communication System for Application in Intelligent Electric Power Networks

DOI:10.34117/bjdv6n12-469

Recebimento dos originais: 20/11/2020

Aceitação para publicação: 19/12/2020

Lucas Romero Freitas

Formação acadêmica mais alta: Mestre

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do ABC – UFABC

Endereço completo (pode ser institucional ou pessoal, como preferir):

Universidade Federal do ABC - Avenida dos Estados, 5001 Bloco A, Torre 1, Sala 625- Bairro Santa Terezinha - Santo André - SP - CEP 09210-580

Email: lucasrfreitas85@gmail.com

Thales Sousa

Formação acadêmica mais alta: Doutorado

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do ABC – UFABC

Endereço completo (pode ser institucional ou pessoal, como preferir):

Universidade Federal do ABC - Avenida dos Estados, 5001 Bloco A, Torre 1, Sala 625- Bairro Santa Terezinha - Santo André - SP - CEP 09210-580

Email: thales.sousa@ufabc.edu.br

RESUMO

As redes inteligentes têm cada vez mais se tornado uma realidade junto aos sistemas elétricos. Devido a esta transformação tecnológica das redes elétricas, uma ampla gama de equipamentos com as mais diversas tecnologias de comunicação e funcionalidades têm sido instalados e distribuídos, suportados por uma abordagem de escalabilidade, interoperabilidade e adaptabilidade em aplicações críticas ou não, com objetivo de subsidiar empresas ou clientes sobre o estado da rede elétrica. Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo apresentar uma avaliação em relação a um sistema híbrido de comunicação capaz de suportar cenários desafiadores onde somente um meio de comunicação não é suficiente para alcançar todos os dispositivos da rede. Assim, esta avaliação suportará empresas e fornecedores a tomarem decisão sobre quais tecnologias de comunicação devem ser implementadas para manter a resiliência esperada.

Palavras-Chave - Comunicação, Escalabilidade, Rede Inteligente, Sistema Híbrido, Transformação.

ABSTRACT

Smart grids have increasingly become a reality with electrical systems. Due to this technological transformation of electrical networks, a wide range of equipment with the most diverse communication technologies and functionalities has been installed and distributed throughout the electrical network, supported by an approach of scalability, interoperability and adaptability in critical applications or not, in order to subsidize companies or customers on the state of the electricity network. In this sense, this

work aims to present an evaluation in relation to a hybrid communication system capable of supporting challenging scenarios where only one means of communication is not enough to reach all devices on the network. Thus, this assessment will support companies and suppliers to make decisions about which communication technologies should be implemented to maintain the expected resilience.

Keywords - Communication, Hybrid System, Scalability, Smart Grid, Transformation.

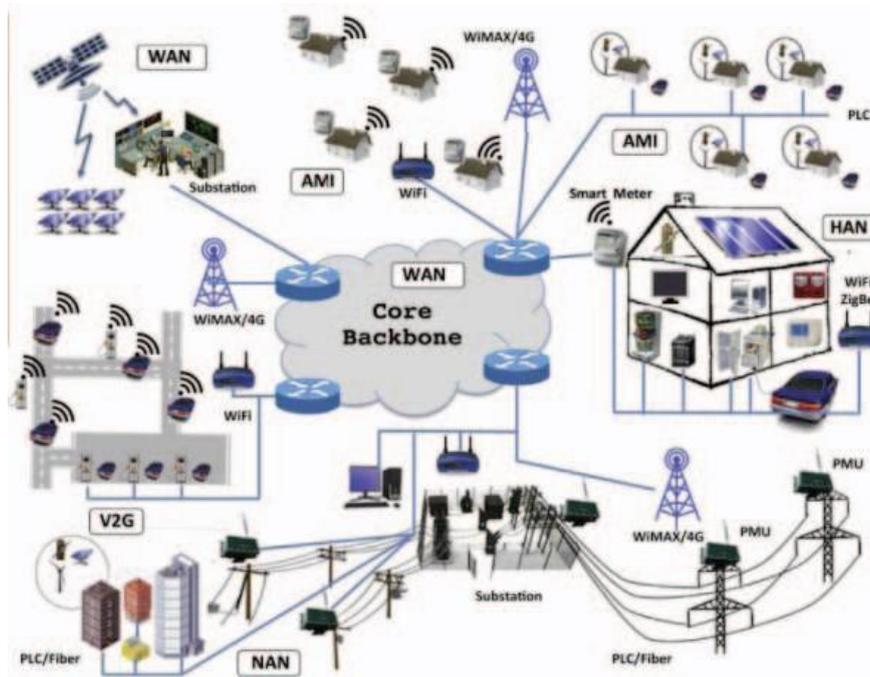
1 INTRODUÇÃO

Atualmente, muitos esforços e investimentos têm sido realizados, com o objetivo de demonstrar o quão inteligentes e confiáveis as redes de energia elétrica podem se tornar. Nesse sentido, os conceitos de Redes Inteligentes (*Smart Grid* SG) e a Internet das Coisas (*Internet of Things* - IoT) são promissoras tecnologias para a gestão da rede elétrica conforme apresentado em [1].

O fator chave para SG e IoT é certamente a infraestrutura de comunicação, ou seja, adaptar e modernizar às tradicionais redes de energia com o objetivo de aplicar modelos e tecnologias sejam elas unidirecional ou bidirecional a fim de proporcionar o monitoramento e a gestão de todas as informações dos sensores já implantados ou que serão implantados. A Figura 1 ilustra três componentes básicos, conforme pode ser visto em [2] e, em [3] quando se refere a infraestrutura de comunicação para as redes inteligentes. Neste contexto, são características destes componentes:

- *Home Area Network* (HAN): Conectam dispositivos inteligentes em residências e locais comerciais, bem como sensores implantados em linhas de energia internas;
- *Neighborhood Area Network* (NAN): Interconectam os diversos sensores espalhados na rede aos concentradores de dados os roteadores que são implantados por concessionárias;
- *Backhaul*: Conecta os roteadores ou concetradores ao centro de comunicação da concessionária.

Figura 1 - Arquitetura de Comunicação Alto Nível de uma Rede Inteligente. Fonte: [4]



Assim, o caminho que conecta os dispositivos finais até um roteador de um sistema de comunicação ou de um concentrador é o que traz efetividade para a porção inteligente da rede elétrica. Todavia, faz-se necessário realizar um estudo para cada tipo de tecnologia que se conectará aos dispositivos, principalmente no que tange às suas aplicabilidades, taxa de dados e ambiente onde o sistema de comunicação é constituído, dando a confiabilidade certa para cada tipo aplicação do serviço.

Sendo assim, em um cenário onde as comunicações com e sem fio desempenham um papel importante na combinação de tecnologias de comunicação necessárias para permitir futuras comunicações de redes inteligentes, uma rede híbrida é fator relevante de ser avaliado, pois amplia a cobertura de rede, melhora o desempenho e o mais importante, gera resiliência ao sistema.

Tendo em vista que a comunicação é um pilar extremamente importante na decisão estratégica de qualquer implantação de rede inteligente no mundo, os próximos tópicos deste artigo exploram as diversas tecnologias de comunicação no intuito da NAN para os diversos sensores que possam vir a ser instalados em uma rede elétrica.

2 TECNOLOGIAS APLICADAS

A seguir, são descritas as tecnologias que foram estudadas e escolhidas para subsidiar a proposta do sistema híbrido de comunicação.

2.1 POWERLINE COMMUNICATION - PLC

O PLC ou comunicação de dados via rede elétrica tem recebido grandes esforços de pesquisa e desenvolvimento, pois quando se trata de rede inteligente para distribuição de energia, essa tecnologia necessita de poucos investimentos quando comparado às outras tecnologias, uma vez que o meio de comunicação é a própria rede de distribuição, ou seja, não há a necessidade de se construir uma infraestrutura de comunicação.

A aplicação do PLC passou de uma simples aplicação inicial de sinalização a uma endereçável tecnologia para implantações de AMR e AMI como pode ser visto em [5].

Outro ponto relevante sobre o PLC, é que como ele é um sensor intrínseco a rede de energia, esta tecnologia pode fornecer outros tipos de informações que não sejam somente a transmissão de dados, por exemplo, o PLC pode ser utilizado para detectar e localizar faltas de alta impedância e envelhecimento do cabo de alimentação demonstrado em [6].

Todavia, o PLC tem algumas fragilidades comparado à outras tecnologias, principalmente à tecnologia sem fio, *wireless*, devido a taxa de transmissão e alcance aos dispositivos. Alguns estudos mostram que as fragilidades relacionadas a essa tecnologia de comunicação já está sendo superadas, podendo ser tão competitiva quanto o *wireless* como é demonstrado em [7].

Assim, longas distâncias estão sendo alcançadas a partir da comunicação de linha de energia de banda ultra estreita (UNB-PLC), na medida em que uma baixa taxa de dados seja uma característica aceitável para a aplicação. Dependendo das necessidades da aplicação, como por exemplo, comunicação unidirecional para ler medidores de eletricidade localizados em áreas remotas ou rurais, o UNB-PLC tem se demonstrado suficiente. A Tabela 1 detalha algumas dessas tecnologias.

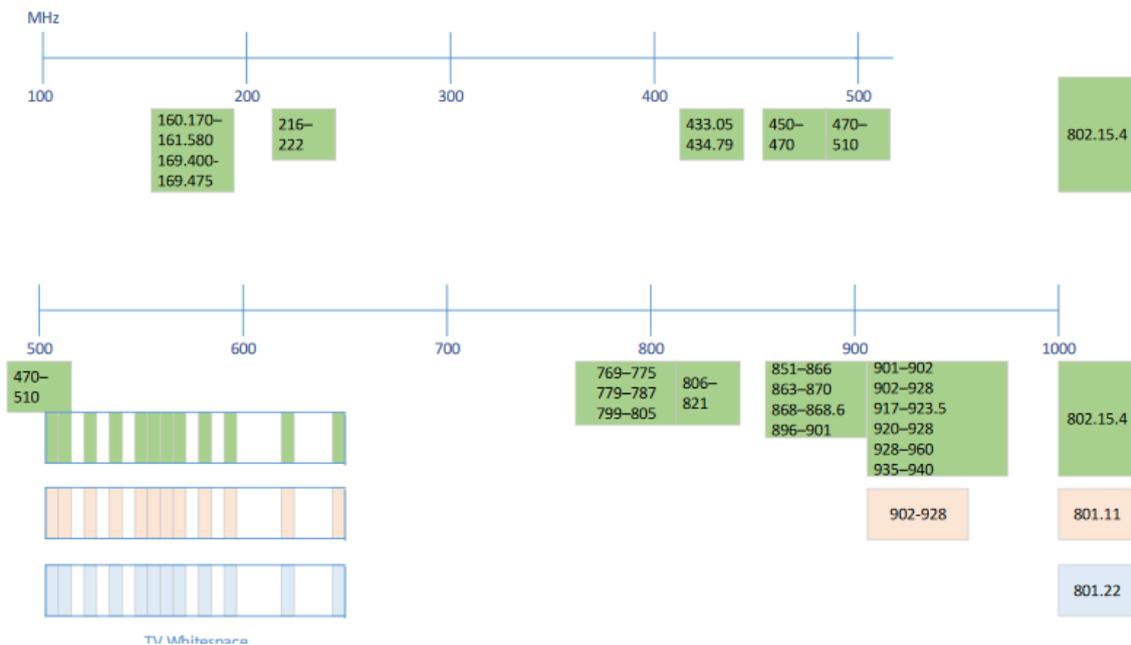
Tabela 1 – Tecnologias PLC.

PLC	Características Principais
G1	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação Aberta • S-FSK • Taxa Máxima: 2,4kbps • IEC61334
G3	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação Aberta • OFDM – Cenelec A • Frequência: 36-90,6kHz • Taxa: 5,6 a 45 kbps • 36 canais • 6Lowpan – Ipv6
Prime	<ul style="list-style-type: none"> • Especificação Aberta • 97 canais • Frequência: 42-89kHz • Taxa: acima de 128kpbs
Meters and More	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia aberta – Enel • Protocolo Open Meter • BPSK • Taxa: acima de 4,8kpbs
Echelon	<ul style="list-style-type: none"> • Solução proprietária • BPSK • Frequência: Cenelec A

2.2 RÁDIO - SUB 1 GHZ

Outra tecnologia aplicada às redes inteligentes são os rádios com banda abaixo de 1GHZ conforme demonstra [8]. Em muitos dos ambientes de implantação e cenários para dispositivos de rede inteligente, as frequências abaixo de 1 GHz fornecem características de propagação superiores em comparação às frequências mais altas, conforme apresenta [9]. A Figura 2 correlaciona os padrões com as suas respectivas bandas que podem ser utilizadas.

Figura 2 - Faixas utilizadas - Sub 1GHz.



Como exemplo do emprego desta tecnologia, utilizando modulação simples, os sinais a 900 MHz tenderão a penetrar na folhagem (por exemplo, árvores, arbustos, outras plantas) mais prontamente em comparação com 2,4 GHz, que é atenuado pela água contida em plantas e animais. A propagação através de alguns materiais de construção também pode ser melhorada em frequências mais baixas.

Na maioria das regiões do mundo, existem alocações de frequência isentas de licença entre 800 MHz e 1 GHz, e em muitas regiões também há alocações nas faixas de frequência de 400 MHz a 500 MHz. Os padrões IEEE 802 incluem modos de operação para abordar essas alocações, às vezes limitadas pela eficácia, com implementações simples e de baixo custo como demonstra [10].

Diferentemente dos sistemas PLC, os sistemas sem fio têm a vantagem da mobilidade, não se limitando à extensão da estrutura de fiação elétrica. No entanto, essa característica também pode ser uma vulnerabilidade, uma vez que o sinal pode ser capturado dentro da faixa de cobertura da rede sem fio.

As técnicas de espalhamento espectral proporcionam uma atenuação, distribuindo o sinal em uma grande largura de banda. Naturalmente, isso não é suficiente para a segurança das comunicações sem fio, assim, estratégias de defesa devem ser adotadas. No entanto, devido a o recurso computacional

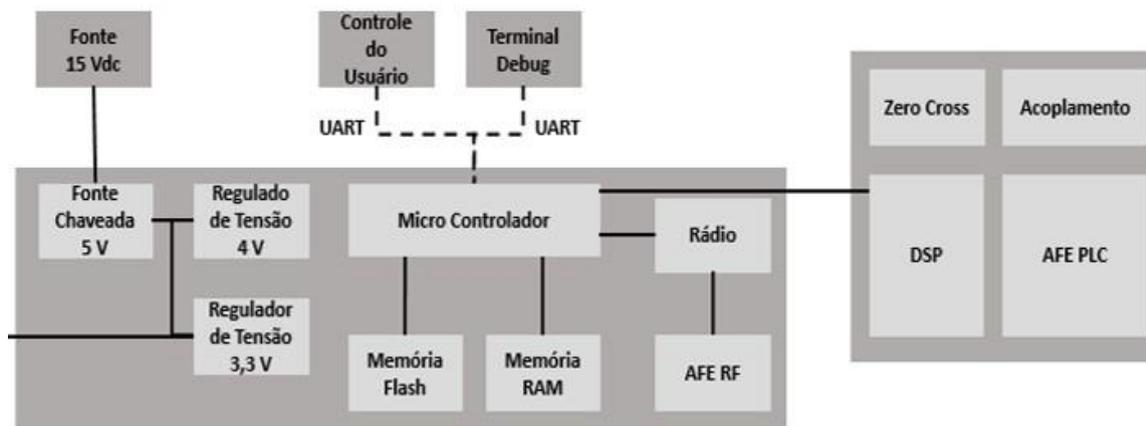
limitado disponível em IoT sem fio sensores, deve haver um conjunto equilibrado de recursos de segurança consistente com o risco da aplicação-alvo de acordo com [11].

3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA HÍBRIDO

A seguir são apresentadas as características do sistema híbrido avaliado. Nesse sentido, o *hardware* híbrido avaliado contém uma interface PLC e uma outra interface RF. Essas interfaces foram implementadas de forma que o sistema possa ser utilizado tanto em ambientes externos e internos, como por exemplo, dentro de um medidor de energia, com intuito de atender as capacidades para operar com transmissão simultânea ou individual de dados. As faixas de frequências escolhidas foram a Cenelec A (35 kHz até 91 kHz) para o PLC e a faixa de 900 MHz para o RF.

Dessa forma, o sistema de comunicação híbrido é avaliado é composto pela PCI de controle e rádio frequência (PCCRF) e pela PCI de PLC (PPLC), conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de Blocos do Sistema de Comunicação Híbrido [12].



Além disso, a placa possui os seguintes blocos funcionais: conexões com usuário, conversores DC/DC, unidade de processamento, interface PLC e interface RF.

O sistema de comunicação híbrido (SCH) conecta aos equipamentos por meio de dois conectores e cabos, sendo um para disponibilizar a alimentação da placa híbrida e outro para intercâmbio de sinais.

A demais, o SCH requer que sejam providos dois conversores DC/DC. Um conversor com tensão de saída de 3,3Vdc para alimentar os circuitos digitais e outro conversor com tensão saída de 4Vdc para o circuito amplificador de potência da saída do sinal de RF.

Para o amplificador de RF foi utilizado um conversor linear com resposta rápida a transientes de corrente. Este regulador sendo de saída ajustável pode também ser utilizado para alimentação dos circuitos digitais.

Para redução de perdas, já que a tensão de entrada é bastante alta foi provido um pré-regulador chaveado com saída estabilizada em 5Vdc, a partir da qual os reguladores lineares devem operar.

4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO

4.1 TESTES EM LABORATÓRIO

Em relação ao sistema híbrido vale destacar que diversos ensaios foram realizados em laboratório para que todos os testes realizados em campo fossem validados de forma correta.

A seguir é apresentada uma síntese dos ensaios realizados em laboratório.

1) Potência de transmissão e banda ocupada

- Objetivo: verificar se o RF e o PLC alcançam a potência máxima prevista de transmissão e se a banda de transmissão atende às restrições da Anatel.

2) Configuração básica da placa híbrida

- Objetivo: Efetuar a configuração básica placa da híbrida e verificar sua ativação na rede de comunicação.

3) LEDs de operação do módulo

- Objetivo: Verificar o funcionamento dos LEDs de operação da placa para monitoramento em campo.

4) Interface serial de configuração e monitoramento

- Objetivo: Validar o funcionamento da interface serial de configuração e monitoramento para teste em campo.

5) Recuperação do sistema após travamento do micro controlador

- Objetivo: Verificar a recuperação da placa híbrida após travamento do micro controlador.

6) Verificação de taxa de transferência unidirecional nas interfaces RF e PLC

- Objetivo: Verificar a taxa de transferência de dados, unidirecional, entre a placa híbrida e *host* remoto (computador), nas redes RF e PLC.

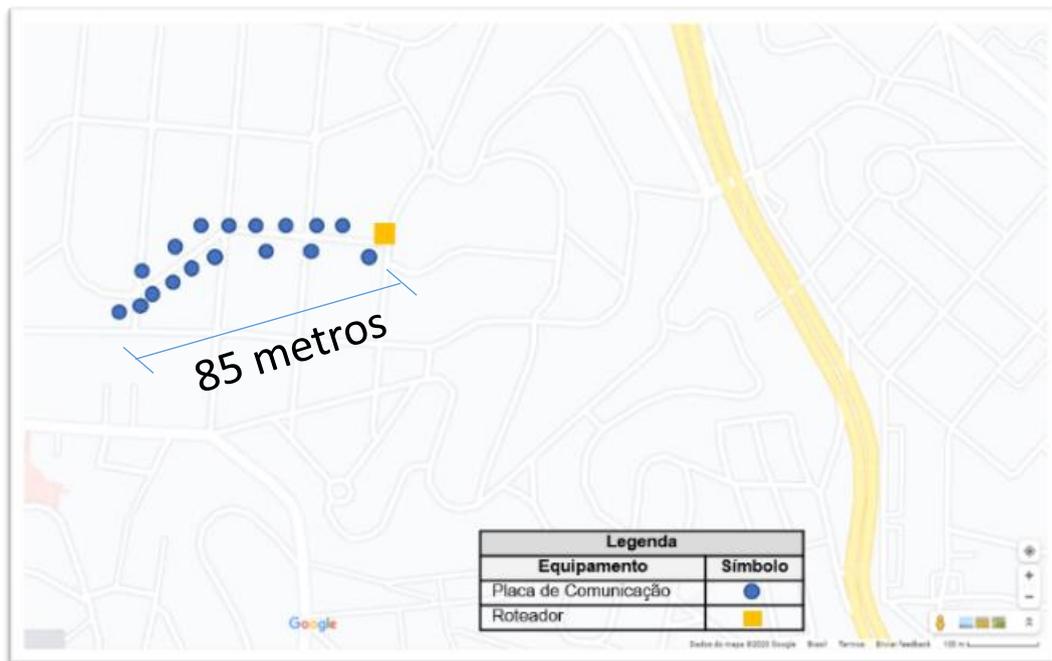
Neste ponto, deve-se ressaltar que todos os testes apresentados anteriormente tiveram resultados esperados.

Em seguida, após validação dos ensaios em laboratório, os testes de campo foram realizados para avaliar o sistema de comunicação híbrido.

4.2 TESTES EM CAMPO

A seguir são apresentados os resultados dos testes realizados em campo. Para tanto, as placas de comunicação foram instaladas ao longo de uma rua dentro da caixa metálica de medição e o roteador de comunicação instalado no início dessa rua, conforme mostra a

Figura 4 - Cenário de Teste.



1) Teste de Tráfego

O objetivo do presente teste foi avaliar o desempenho da placa de comunicação durante a geração de tráfego.

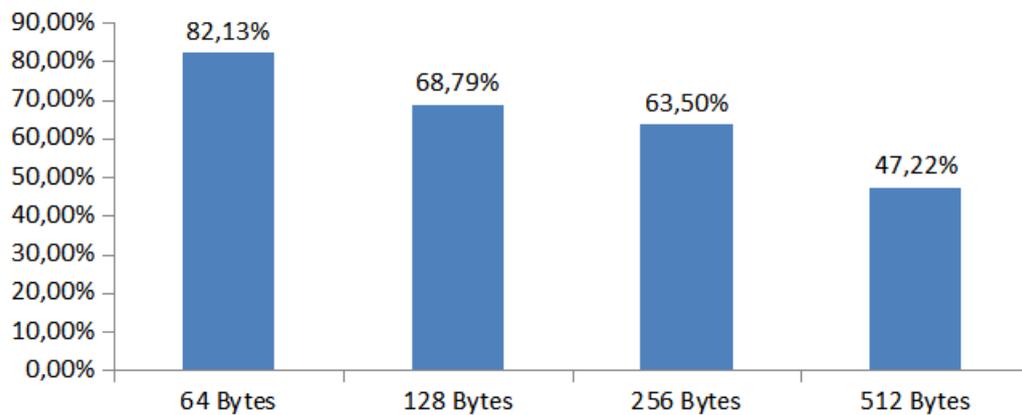
Para realização desse teste foram executados cenários de geração de tráfego com envio simultâneo de múltiplos pacotes de dados e geração de tráfego aleatório, que consistiu no envio de múltiplos pacotes dados em intervalos de tempos distintos.

a) Tráfego bidirecional com envio simultâneo

Neste teste, a ferramenta de validação foi configurada com quatro perfis de tráfegos, sendo que cada perfil foi configurado com um tamanho de *payload* de dados. Cada *payload* foi configurado em 64, 128, 256 e 512 bytes.

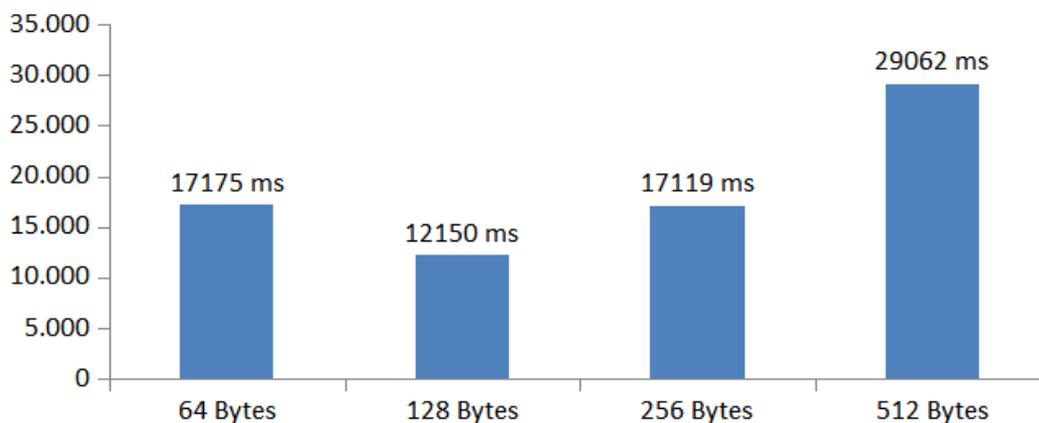
Nestes perfis foram associados 17 módulos e foram configurados para enviar mensagens para todos os módulos a cada 15 minutos. Para obtenção dos resultados cada perfil foi executado por 1 dia. De acordo com a Figura 5, observa-se que a taxa de sucesso para o menor *payload* de dados foi de 82,13%. Uma taxa bastante elevada. Para o maior *payload*, a taxa foi bem inferior (menor que 50%).

Figura 5 - Taxa de Sucesso - Envio Simultâneo.



Outro resultado observado quando da aquisição dos dados da taxa de sucesso foi a latência. Na Figura 6, observa-se que a latência variou entre 17 segundos e 30 segundos.

Figura 6 - Latência - Envio Simultâneo

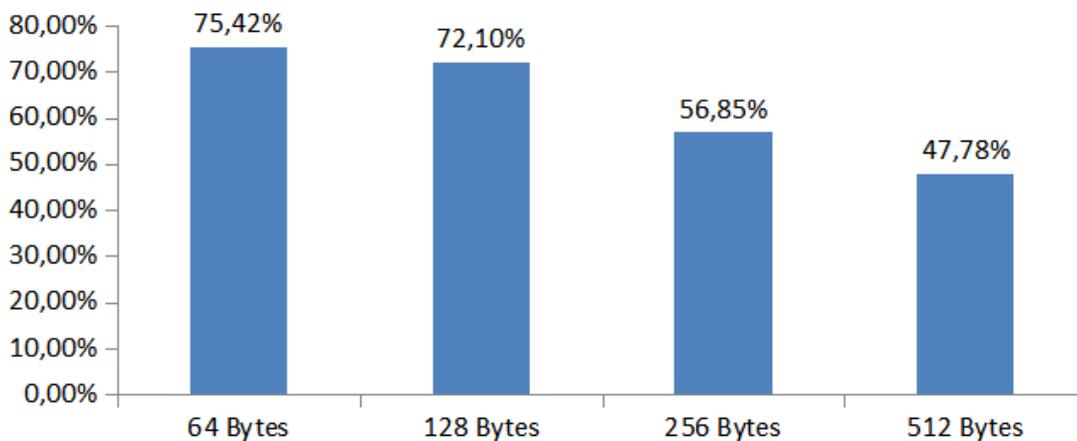


b) Tráfego bidirecional aleatório

Neste teste, a ferramenta de validação foi configurada com quatro perfis de tráfegos, sendo que cada perfil foi configurado com um tamanho de *payload* de dados. Cada *payload* foi configurado em 64, 128, 256 e 512 bytes.

Nestes perfis foram associados 17 módulos e foram configurados para enviar mensagens para todos os módulos a cada 15 minutos. Para obtenção dos resultados cada perfil foi executado por 1 dia. A Figura 7 apresenta os resultados obtidos.

Figura 7 - Taxa de Sucesso - Envio Aleatório.



Observa-se na Figura 7 que a taxa de sucesso para o menor *payload* (64 bytes) de dados foi de 75% por cento, resultado pouco inferior ao teste de envio simultâneo, que foi de 82%. Ou seja, não foi observado um efeito relevante devido ao acúmulo de tráfego simultâneo. Este resultado comprova a confiabilidade da rede devido à comunicação em RF e PLC. Observa-se também que houve um claro declínio na taxa de sucesso em relação ao tamanho do pacote, o que é um resultado esperado, já que para um número maior de *bytes* têm-se o aumento da probabilidade de erros.

2) Latência da Rede

O objetivo deste teste foi avaliar o tempo de resposta da rede de comunicação, através do comando *ping*, nos cenários de variação do *payload* e, também, conforme o número de saltos que a rede venha a realizar. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Latência Média (ms).

<i>Payload</i> (bytes)	RF (saltos)			PLC (saltos)
	1 Salto	2 Saltos	3 Saltos	1 Salto
Média (64 bytes)	1480	5451	13377	5737
Desvio (64 bytes)	964	4158	3329	1429
Média (128 bytes)	1323	11300	11539	5656
Desvio (128 bytes)	138	1917	1367	819
Média (256 bytes)	1435	10921	12370	6938
Desvio (256 bytes)	232	5166	3210	1015
Média (512 bytes)	1336	13694	10978	7749
Desvio (512 bytes)	448	6018	6430	609
Média Geral	1400	9976	12114	6449
Desvio Geral	568	5365	3699	1325

Para obtenção dos resultados apresentados na Tabela 2, foram considerados *pings* com diferentes tamanhos de *payloads* para módulos que em determinado momento dos 60 dias de teste estavam comunicando com 1 salto, 2 saltos ou 3 saltos.

Foi utilizado o critério da latência fim-a-fim, que vai do terminal do operador, conectado através de VPN na *internet* com o roteador 3G, até o módulo, considerando o tempo de ida e volta do *ping*. Esse critério foi adotado, uma vez que representa o mesmo critério a ser observado na operação do sistema.

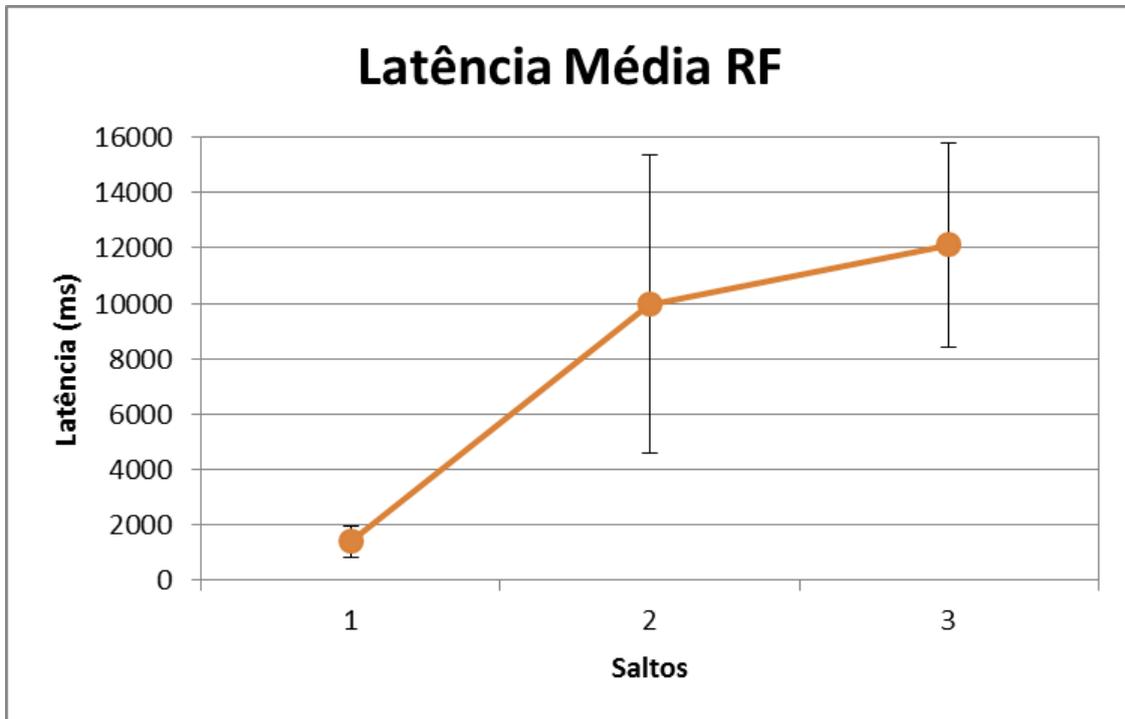
Com o intuito de representar o desempenho real da placa e da rede, em que podem ocorrer diferentes tamanhos de *payload*, em diversos cenários, a Tabela 2 contemplou o cálculo da média e do desvio padrão para cada *payload*.

A Figura 8 apresenta a latência média para o RF em função do número de saltos. Observa-se que a latência para 1 salto, com o valor de 1.400 ms, é significativamente menor que para 2 e 3 saltos, assim como o seu desvio padrão.

Para 2 e 3 saltos a latência salta para aproximadamente 10.000 e 12.000 ms, respectivamente, mas com um desvio padrão podendo alcançar a ordem de 5.000 ms. Isso indica a grande variação na latência com mais de um salto, que é fortemente influenciada pela qualidade do sinal e tráfego na rede.

Nesse sentido, pode-se dizer que a latência para 2 saltos provavelmente estará no intervalo entre 5 e 15 segundos e a latência para 3 saltos terá os valores entre 8 e 16 segundos.

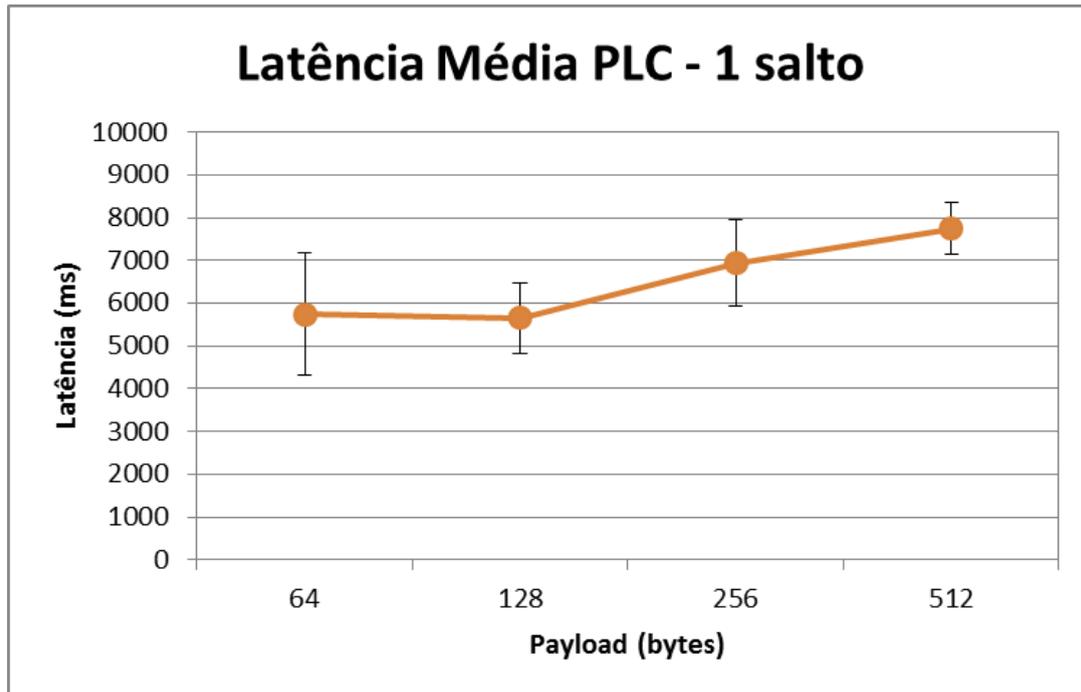
Figura 8 - Latência média do RF em função do número de saltos.



Em relação ao PLC, a Figura 9 apresenta a latência do PLC em função do *payload*. Considerando os testes realizados em campo, apenas o caso de 1 salto PLC na rede *Mesh* foi observado, não tendo sido observado o comportamento para um número maior de saltos.

Ainda em relação a Figura 8, o desvio padrão da latência foi pequeno, uma vez as variáveis que influenciam o seu valor são menos numerosas do que com vários saltos. Neste caso, observa-se que não existe um efeito significativo do *payload* na latência do PLC e essa se mantém em torno do valor médio de 6.500 ms, mas com uma leve tendência de aumentar, indo de 5.700 ms até 7.700 ms com o *payload* variando de 64 até 512 bytes.

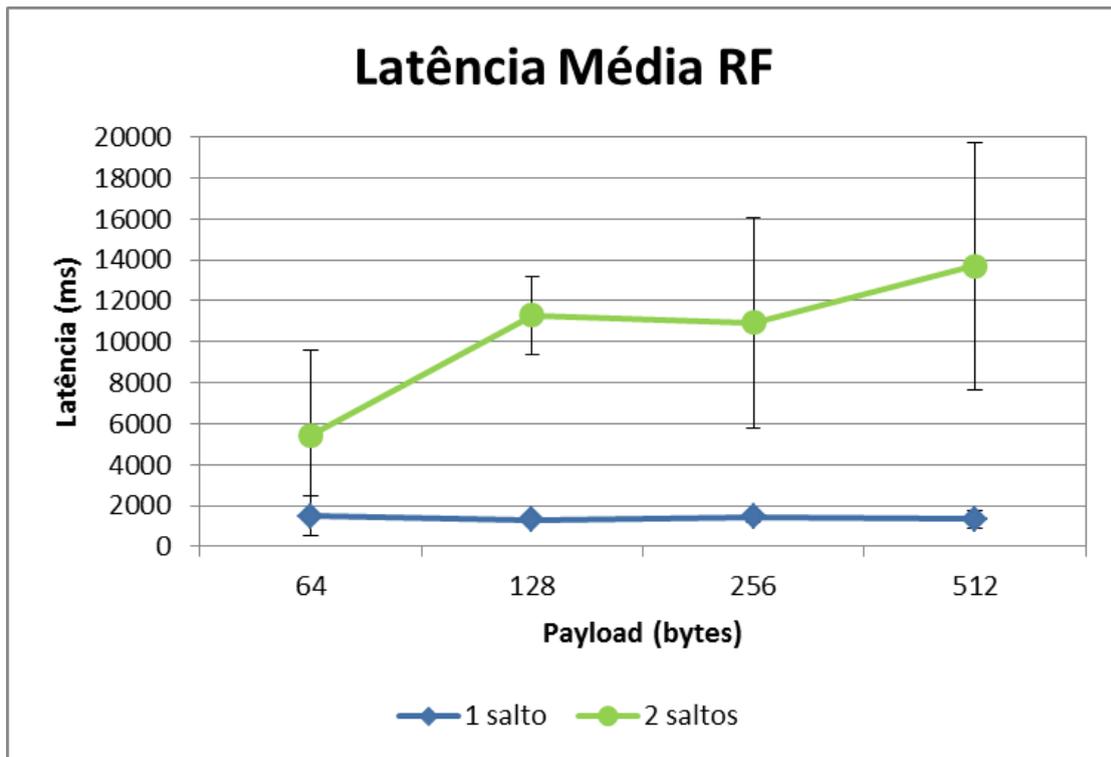
Figura 9 - Latência média do PLC em função do payload.



A Figura 10 apresenta a latência média do RF para 1 e 2 dois saltos, observando-se um comportamento similar ao PLC, ou seja, baixo efeito do *payload* na latência para 1 salto.

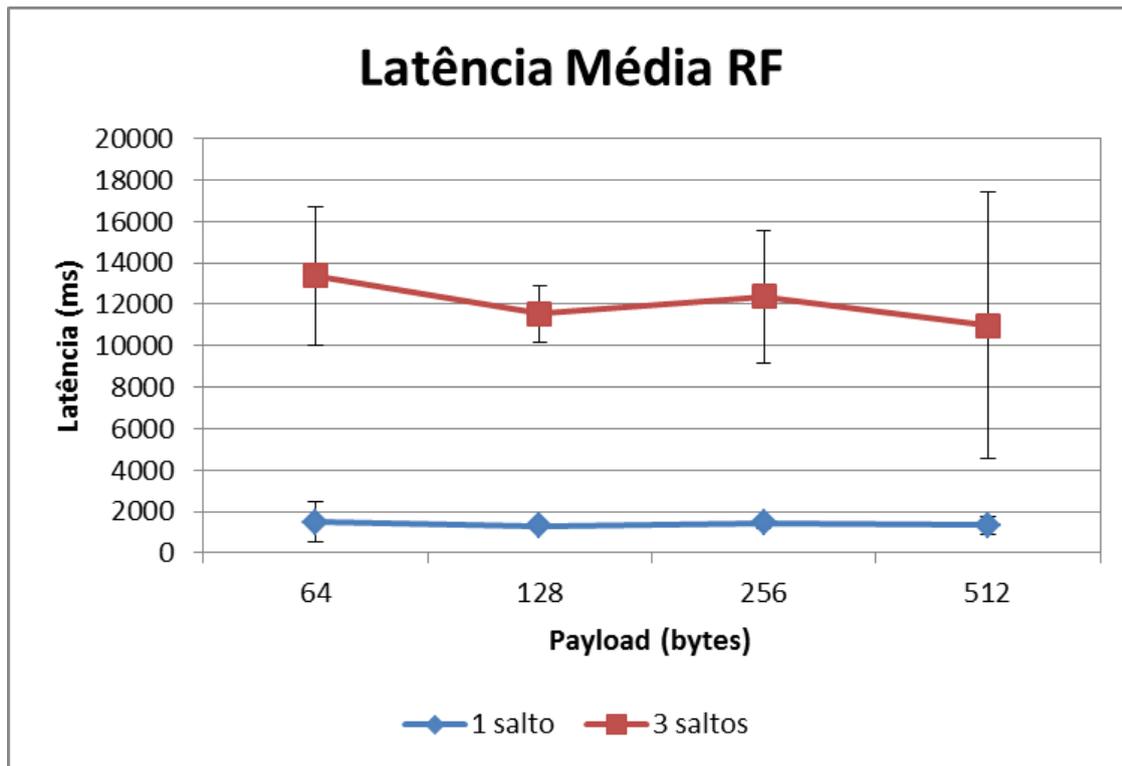
Porém, para 2 saltos esse efeito é mais sensível e, como é influenciado por muitas variáveis, como por exemplo, intensidade do sinal e tráfego, o seu desvio tem seu valor aumentado. Assim, foi observado que a latência pode variar de 3 a 9 segundos para 64 *bytes* de *payload* e de 7 a 19 segundos para 512 *bytes* de *payload*.

Figura 10 - Latência média do RF em função do payload para 1 e 2 saltos.



A Figura 11 apresenta a latência média do RF em função do *payload* para 1 e 3 saltos. Para 3 saltos, observa-se um efeito bem menor do *payload*, com a latência variando de 10 a 17 segundos para 64 *bytes* e de 5 a 18 segundos para 512 *bytes*. Ou seja, as variáveis presentes em cada salto, como intensidade de sinal e tráfego, têm um efeito maior na latência que quando comparado ao *payload*.

Figura 11 - Latência média do RF em função do payload para 1 e 3 saltos.



Vale ressaltar que como os testes foram executados de uma máquina conectada à VPN, a latência pode ser influenciada também pela velocidade da rede de comunicação existente entre o roteador e a infraestrutura de teste.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a avaliação de um sistema de comunicação híbrido para aplicações em redes inteligentes de energia elétrica. Nesse sentido, para validar o desenvolvimento proposto foram realizados, em campo, testes de tráfego e de latência da rede.

Para a realização dos testes propostos não houve a necessidade de realizar um dimensionamento de rede aprimorado uma vez que o sistema de comunicação avaliado se comunica via rádio frequência (ar) e, também via PLC (rede elétrica).

Nesse sentido, o sistema híbrido possui a vantagem de operar em diversos ambientes sem a necessidade de possuir especialistas na sua implantação.

Ademais, a partir aos resultados obtidos, constatou-se que o sistema de comunicação híbrido avaliado é mais dinâmico em relação aos sistemas que possuem somente um tipo de comunicação, uma vez que o mesmo se adapta melhor a diferentes ecossistemas.

Por fim, os resultados obtidos demonstraram a viabilidade técnica de uma solução híbrida de comunicação.

REFERÊNCIAS

- [1] Parikh, P. P., M. G. Kanabar, & T. S. Sidhu (2010). Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications. In IEEE PES General Meeting, pp. 1.
- [2] Prakash, P. (2013). Data concentrators: The core of energy and data management. Website: Texas Instruments.
- [3] Gungor, V. C., D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, & G. P. Hancke (2011). Smart grid technologies: communication technologies and standards. *IEEE Transactions on industrial informatics* 7 (4), 529-539.
- [4] Vijayanand, R.; Devaraj, D. and Kannapiran, B. (2014). A novel dual euclidean algorithm for secure data transmission in smart grid system. *IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research*, Pp. 1-5.
- [5] Galli S., Scaglione A., and Wang Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 998–1027.
- [6] Milioudis A. N., Andreou G. T., and Labridis D. P. (2012). Enhanced protection scheme for smart grids using power line communications techniques—Part I: Detection of high impedance fault occurrence. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1621–1630.
- [7] Rabie K., Tonello A. M., Al-Dhahir N, Song J. and Sendin A. (2019). *IEEE Access Special Section Editorial: Advances in Power Line Communication and its Applications*. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 133371-133374.
- [8] Aboelmaged M., Abdelghani Y., Ghany M.A.A.E. (2017). Wireless IoT based Metering System for Energy Efficient Smart Cites. *29th International Conference on Microelectronics (ICM)*, pp.1-4, 10-13.
- [9] Aust S., Prasad R.V., and Niem I.G. (2012). *IEEE 802.11ah: Advantages in standards and further challenges for sub 1 GHz Wi-Fi*.
- [10] Aust S. and Ito T. (2011). Sub 1GHz wireless LAN deployment scenarios and design implications in rural areas. *IEEE GLOBECOM Workshops, Houston, TX*. pp. 1045-1049.
- [11] Zhaoyang D. (2014). Smart grid cyber security. *13th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV)*. 10-12.

[12] Mafra, Johnny, et al. "Hybrid communication module-motivations, requirements, challenges and implementations." *Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015 IEEE PES. IEEE, 2015.