

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPLETO DE SMART METERING BIDIRECIONAL PARA APLICAÇÕES EM SMART GRIDS.

Paulo S. Sausen<sup>1</sup>, Mauricio de Campos<sup>1</sup>, Airam T. Z. R. Sausen<sup>1</sup>, Luís Fernando Sauthier<sup>1</sup>, Alexandre C. Oliveira<sup>2</sup>, Samuel C. de Oliveira<sup>3</sup>

<sup>1</sup>UNIJUI, Universidade regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí – RS, Brasil

<sup>2</sup>UFCG, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, Brasil

<sup>3</sup>CEEE D, Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica, Porto Alegre – RS, Brasil

e-mail: {paulosausen, decampos.mauricio, airmsausen, luisfernandosauthier}@gmail.com, aco@dee.ufcg.edu.br, SamuelO@ceee.com.br

**Resumo** – As Redes Inteligentes (Smart Grids) são formadas por inúmeras funcionalidades e novas tecnologias, que são gradualmente incorporadas as redes elétricas tradicionais. A telemedição é uma destas novas funcionalidades, que permite o gerenciamento remoto de consumidores, assim como possibilita o combate a fraudes, a identificação de faltas e desligamentos, o gerenciamento dos transformadores de distribuição, entre outros serviços. Neste contexto, neste trabalho são apresentados os resultados de um sistema de Smart Metering Bidirecional que utiliza a tecnologia Power Line Communication (PLC), considerando o padrão PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution), em uma rede urbana típica brasileira. A análise dos resultados mostra que o padrão PRIME, apesar de bastante difundido na comunidade europeia, apresenta diversas restrições operacionais nas redes elétricas brasileiras que afetam seu desempenho em termos de comunicação, porém não inviabilizam o seu uso.

**Palavras-Chave** – Medição Bidirecional, Redes Inteligentes, Telemedição.

## DEVELOPMENT OF A COMPLETE BIDIRECTIONAL SYSTEM FOR SMART METERING APPLICATIONS IN SMART GRIDS

**Abstract** – Smart Grids are composed of many features and new technologies, which are incorporated gradually the traditional power grids. The smart metering is one of these new features that allows remote management of consumers, as well as enables frauds prevention, identification of faults and shutdowns, distribution transformers management, among other services. In this context, this paper presents the results of a Smart Metering Bidirectional system that utilizes Power Line Communication (PLC) technology, considering the standard PRIME (Powerline Intelligent Metering Evolution), in a typical Brazilian urban network. The results analysis shows that the standard PRIME, although quite widespread in the European community, presents

several operational constraints in the Brazilian power grids that affect their performance in terms of communication, but doesn't prevent their use.

**Keywords** – Bidirectional Metering, Smart Grids, Smart Metering.

### I. INTRODUÇÃO

O sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica, atualmente em uso no Brasil, foi implementado na década de 40 do século passado. Apesar de ter sofrido vários aprimoramentos no transcorrer das décadas, especialmente em materiais e componentes, o conceito original ainda mantém-se. Se no aspecto de fornecimento de energia, pouca evolução foi observada, no que se refere as cargas conectadas a rede houveram significativas alterações, sendo atualmente muito difundido o uso de cargas altamente não lineares, notadamente conversores estáticos de potência, que provocam distúrbios que impactam na qualidade da energia fornecida, exigindo das concessionárias ações para mitigação destes distúrbios.

Se por um lado os avanços da eletrônica de potência propiciaram a difusão de cargas não lineares que afetam a qualidade da energia distribuída, por outro lado, as mesmas tecnologias permitem, hoje, a um consumidor gerar energia a partir de fontes renováveis, possibilitando inclusive injetar na rede o excedente produzido, conforme definições previstas na Resolução Normativa N° 482 da ANEEL [1].

Todos estes avanços tecnológicos observados nos últimos anos, indicaram a necessidade de uma atualização profunda dos sistemas elétricos, culminando com a definição do conceito de Redes Inteligentes (*Smart Grids*). Entre as inúmeras atualizações previstas no conceito das Redes Inteligentes, a medição bidirecional e a telemedição (*Smart Metering*), representam uma parcela das tecnologias que integram o conceito das Redes Inteligentes [2]. A correta medição do consumo bem como o controle efetivo do fluxo de energia necessita de um sistema eficiente de troca de informações, que respeite requisitos temporais. Este sistema deve atender as demandas do fluxo de dados tanto no sentido de respeitar suas dinâmicas como garantir que em nenhum momento algum dispositivo, conectado à rede, opere de forma autônoma podendo comprometer as características da rede de energia [3].

Artigo submetido em 24/01/2016. Primeira revisão em 12/03/2016. Aceito para publicação em 25/04/2016 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

A comunicação entre dispositivos de potência tem sido realizada de diversas formas, através de sistemas cabeados (i.e. fibra ótica), tecnologias *wireless* (i.e. WiFi, Zigbee, rádio, entre outros) ou mesmo a partir da tecnologia *Power Line Communication* (PLC). Estudos recentes apontam que dificilmente apenas uma destas tecnologias conseguirá, individualmente, atender a todas as demandas geradas pelas Redes Inteligentes. Assim, a aposta em Sistemas Híbridos ou combinados de comunicação tem se apresentado como uma solução promissora [2]-[5].

Neste contexto, o PLC deverá ter papel relevante, pois faz uso da infraestrutura de rede já existente e disponível que é a própria rede de distribuição/transmissão de energia elétrica. Dentre as diversas tecnologias de PLC, o padrão PRIME (*PoweRline Intelligent Metering Evolution*) é um dos padrões que tem recebido atenção de grandes empresas de energia como a Iberdrola, que tem financiado o seu desenvolvimento em parceria com importantes fabricantes de circuitos integrados [6]-[9].

Visando contribuir para o desenvolvimento de soluções que possam ser aplicadas as redes elétricas brasileiras, neste artigo é apresentado o desenvolvimento de um sistema completo de *Smart Metering* utilizando o conceito PLC. O sistema em questão é composto de um medidor eletrônico de energia elétrica, trifásico, bidirecional e um conjunto de concentradores/repetidores que são utilizados quando é necessário ampliar à rede na ausência de consumidores. É apresentado todo o processo de desenvolvimento dos módulos, em suas várias versões, bem como o processo de tropicalização do padrão PRIME, aplicado a uma rede elétrica brasileira típica. Resultados e análises de um sistema piloto instalado em unidades consumidoras residenciais, localizadas na cidade de Porto Alegre, RS, Brasil, são apresentados.

### A. Estrutura de um sistema *Smart Metering*

A estrutura de um sistema de *Smart Metering* com comunicação PLC PRIME é apresentada na Figura 1. Nesta estrutura cada consumidor possui um medidor inteligente individual, que tem integrado um modem PLC operando como escravo na rede.

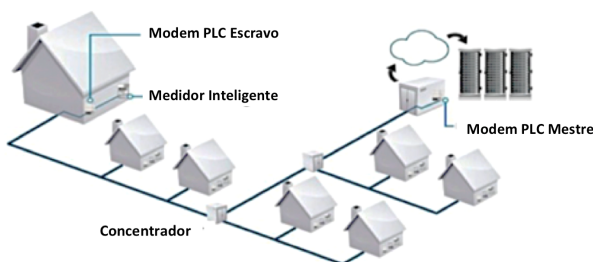


Fig. 1. Estrutura Básica do *Smart Metering*.

Cada medidor inteligente é um potencial nó de chaveamento (nó repetidor), sendo a condição de nó repetidor definida pelo nó mestre, de acordo com as condições do canal de comunicação (rede elétrica). Nos transformadores de distribuição são instalados nós concentradores. Os repetidores possibilitam a integração a rede de comunicação PLC de nós escravos isolados. O nó concentrador gerencia a operação da rede PLC (identificação de nós escravos, reconfiguração dinâmica de rotas de comunicação, alteração do status de nós

repetidores, etc.), além de funcionar como repositório de dados e *gateway* para interface com outras redes de comunicação.

Os modems PLC, padrão PRIME, que integram a rede PLC, utilizam a técnica de modulação OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Esta técnica, dentre outras características, possui a vantagem de trabalhar no domínio da frequência. Com isto, obtêm-se ganhos adicionais na utilização de métodos de melhoria do sinal (entrelaçamento e códigos corretores de erro) relativamente aos obtidos pela utilização da técnica baseada no domínio do tempo [10].

O padrão PRIME, apesar de bastante difundido na comunidade europeia, apresenta diversas restrições operacionais, quando aplicado às redes elétricas brasileiras, que afetam seu desempenho em termos de comunicação. No Brasil sua adoção, na implementação de sistemas de comunicação PLC, carece de registros de casos de sucesso. Neste sentido, uma investigação para avaliar sua viabilidade de uso, nas redes brasileiras, passa a ter significativa importância.

Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos do sistema do medidor proposto. O mesmo é formado pelos sensores e circuitos de aquisição dos sinais de corrente e tensão, um módulo de display LCD (*Liquid Crystal Display*) para exibição das informações, comunicação bidirecional IrDA (*Infrared Data Association*) e uma interface de comunicação serial USART (*Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter*) para interligação entre o medidor e o modem PLC, este último baseado no microcontrolador ADD8051C3A, com protocolo PRIME v1.3 integrado em seu firmware.

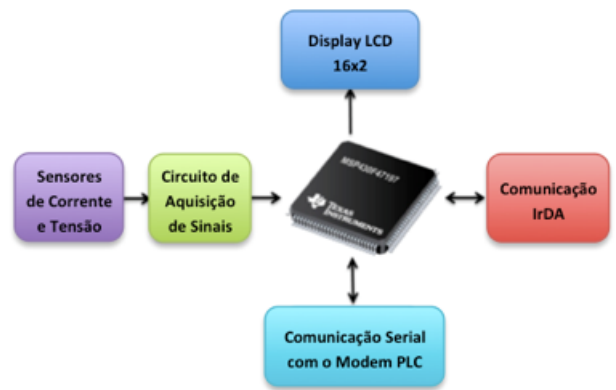


Fig. 2. Diagrama de blocos do sistema.

O microcontrolador MSP430F47197, fabricado pela Texas Instruments, é o responsável pelas tarefas metrológicas do medidor, para isso, dispõe de 7 conversores A/D de 16 bits, com capacidade de amostragem simultânea, que o tornam bastante adequado para a medição de energia em um sistema trifásico.

A partir da medição das tensões e correntes nas três fases do sistema elétrico é possível o cálculo das grandezas elétricas: Potência Ativa (W); Potência Reativa (VAR); Potência Aparente (VA); Fator de Potência; Consumo Geral (kWh). A Temperatura (°C) também é medida a partir de um sensor integrado ao próprio microcontrolador.

Para a medição da tensão foi utilizado um circuito divisor resistivo com resistores de alta precisão, e para a aquisição de

corrente foi utilizado um transformador de corrente (TC) toroidal. O TC escolhido está de acordo com a NBR 14519, que define a medição de 15A de corrente nominal e 120A de corrente máxima.

Na Figura 3(a) é apresentado o medidor em sua versão final. Esta versão já atende a todas as normas de segurança e padrões nacionais referente a medidores de energia. Na Figura 3(b) é visualizada a placa de circuito impresso do medidor, a qual é usada tanto pelos nós escravos, como também pelo nó concentrador, realizando-se apenas modificações no firmware embarcado no MSP430 e no ADD8051C3A.

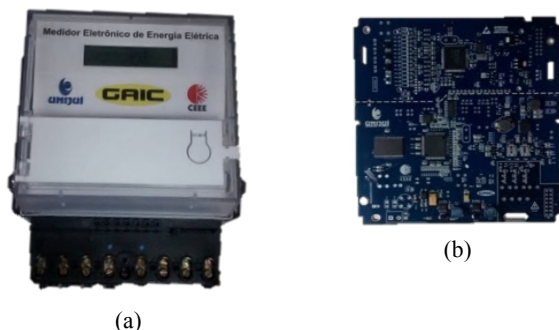


Fig. 3. (a) Versão final do protótipo do medidor. (b) Placa de circuito impresso do medidor.

### B. Testes Preliminares

Ao longo do desenvolvimento do medidor foi dada uma especial atenção a interface de comunicação PLC, baseada em um modelo de modem PRIME. Os primeiros dados coletados em campo, relacionados ao desempenho do modem PRIME, foram apresentados em [11], onde é realizada uma comparação de desempenho entre um modem PL3120 [12] (PLC 2G) e o modem ATPL210A [13], esse último PRIME. Uma análise dos dados apresentados revela uma correlação entre o nível de carga do circuito e o desempenho dos modems. No caso do PL3120 é mantido um desempenho praticamente constante para qualquer nível de carga, contudo, o modem PRIME tem seu desempenho comprometido a partir de níveis de carga em que a corrente do circuito ultrapassa a marca de 120A/130A.

Os testes apresentados em [11] foram realizados em um circuito de distribuição subterrâneo, cuja distância, em termos de cabeamento, entre os nós de comunicação, foi estimada em 250m.

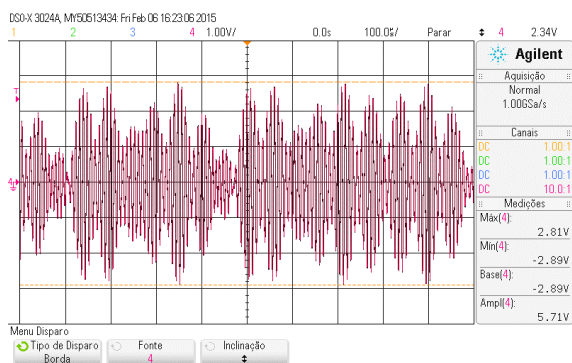


Fig. 4. Sinal de modem PL3120 (BPSK).

As análises que se seguiram, após os testes em campo, explicam o desempenho apontado em [11]. Nas Figuras 4 e 5 é possível observar a amplitude do sinal gerado pelo circuito baseado no modem PL3120 e no modem ATPL210A, respectivamente, aplicado ao primário do transformados de acoplamento com a rede elétrica. Na Figura 5 observa-se que a amplitude do sinal, pico-a-pico, é da ordem de 6V, enquanto a mesma amplitude no sinal observado na Figura 6 é da ordem de 2V de pico-a-pico. No caso do sinal da Figura 6, o sinal com amplitude de pico-a-pico de 6V, no início do sinal, é referente ao preâmbulo. Os dados estão distribuídos no sinal após o preâmbulo, sinal de menor amplitude.

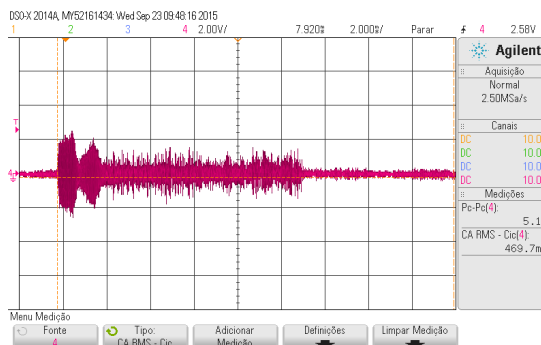


Fig. 5. Sinal do modem ATPL210A (OFDM).

O nível de carga é apenas um fator que interfere no desempenho da comunicação PLC em uma rede elétrica. Os ruídos na faixa de frequência de operação dos modems também têm papel relevante no desempenho que os mesmos apresentarão. Nesse aspecto, cargas que gerem harmônicos de corrente, múltiplos da frequência da rede, não são relevantes, contudo, as cargas que contenham conversores estáticos chaveados, comumente empregados em fontes chaveadas, reatores eletrônicos de lâmpadas, inversores de frequência, entre outros, contribuem fortemente para a poluição das redes elétricas.

Como as cargas com algum tipo conversor de potência estático tem se proliferado rapidamente e como não há uma legislação vigente que iniba, ou mesmo impeça, a conexão na rede de dispositivos com elevado nível de geração de ruído de alta frequência, a conjunção desses dois fatores torna o uso da comunicação PLC, nas redes brasileiras, mais desafiador do que em outros países que já adotam legislações mais restritivas em relação a essas cargas.

Visando avaliar o impacto dos ruídos de alta frequência no desempenho dos modems PLC, foi realizado um conjunto de ensaios em laboratório, onde foram usados reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, comumente vendidos no comércio. Novamente utilizou-se o modem PL3120 e o modem ATPL210A como elementos de teste. Na Figura 6, observa-se a tela do analisador de espectro, onde na curva apresentada destaca-se o ruído provocado por um conjunto de três reatores em funcionamento, nas faixas de frequência entre 50kHz a 60kHz e 70kHz a 83kHz. Nesse ensaio o PL3120 foi programado para operar na Banda C da CENELEC, portanto, o mesmo gera dois sinais centrados nas frequências de 115kHz e 132kHz, como pode ser observado na curva.

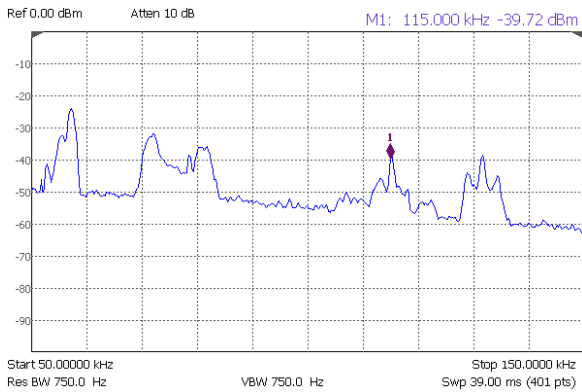


Fig. 6. Espectro de ruído gerado por reator eletrônico para lâmpada fluorescente – GAIC/UNIJUÍ.

Percebe-se pela comparação das amplitudes dos sinais que o ruído tem amplitude até maior que a do sinal de comunicação. No caso analisado, contudo, não há interferência, devido ao deslocamento do sinal de comunicação para uma outra faixa de frequência.

Em relação ao modem ATPL210A, o ruído observado na Figura 6, atua exatamente na faixa de operação do modem. Os dados mostrados na Figura 6 foram obtidos no laboratório do GAIC, na Unijuí. De modo a verificar a persistência do ruído em outra localidade, o mesmo experimento foi repetido na Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, tendo sido observada a curva apresentada na Figura 7.

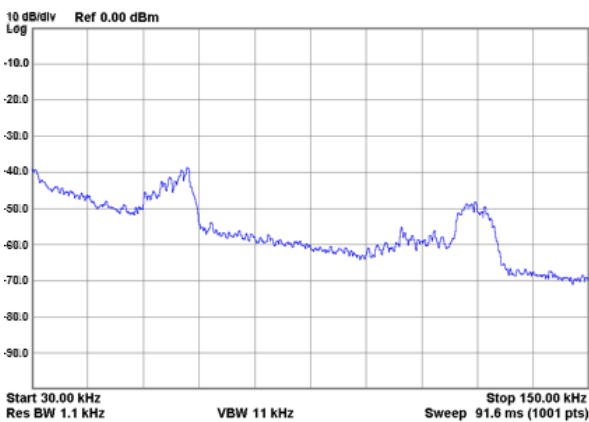


Fig. 7. Espectro de ruído gerado por reator eletrônico para lâmpada fluorescente - UFCG.

Observa-se a existência de condições de ruído na faixa de frequência de 52kHz a 64kHz e de 102kHz a 130kHz, sendo o ruído da primeira faixa gerado pelo reator eletrônico e o ruído da última faixa gerado por fonte não identificada.

O corrompimento dos dados associados a uma das 96 portadoras do sinal OFDM, distribuídas na banda CENELEC-A, que opera na faixa de 35 kHz à 91 kHz, gera a perda completa de um pacote [14]. É o efeito de “jamming” em sinais OFDM. Tanto nos ensaios no GAIC-Unijuí, como nos conduzidos na UFCG, foi observada a degradação da comunicação em maior ou menor grau, dependendo da relação de amplitude entre o sinal PLC e o ruído da rede. Houve casos de total bloqueio da comunicação, mesmo quando os nós de

comunicação foram ligados no mesmo ponto de acoplamento a rede elétrica.



Fig. 8. Painel de testes dos medidores.

### C. Ensaios de Medidores

Após o desenvolvimento completo dos medidores foi produzido um lote de medidores, os quais foram submetidos a uma série de testes em laboratório. Nessa fase, foi construído um painel, conforme pode-se observar na Figura 8, onde foi possível conectar, simultaneamente, até 18 medidores, aplicando uma mesma carga de consumo em todos. Os ensaios, nesta etapa, compreendiam avaliar a comunicação ao mesmo tempo que era realizada a calibração do medidor.

Para avaliar a comunicação PLC, foi definido um pacote de dados de 128 bytes, cuja estrutura é apresentada na Figura 9. O identificador do medidor possui 9 bytes o que garante a conexão de no máximo 512 medidores à mesma fase. Entretanto para uma conexão trifásica esse número aumenta para até 1536 medidores.

Cabeçalho - Início do pacote	Dados Referentes ao Medidor - 80 bytes	Rodapé - Fim do pacote	Identificação do Medidor - 9 bytes	2 bytes	Dados não utilizados - 25 bytes
AA 55 AA...	...Dados...	...55 AA 55...	...ID...	...CRC...	...

Fig. 9. Estrutura do pacote de dados.

O protocolo de comunicação entre os medidores e o nó concentrador prevê um ciclo de identificação de nós presentes na rede e um ciclo de leitura de dados. No ciclo de identificação, o nó concentrador (nó base) identifica os nós de serviço (nós escravos) presentes, através do envio de sinais de “Beacon”. Aqueles nós de serviço que não tem conexão direta com o nó concentrador, são conectados através de nós repetidores (nós de chaveamento), designados pelo nó concentrador. Uma vez descobertos os nós de serviço presentes na rede, o nó concentrador envia uma mensagem onde solicita os dados de cada medidor cadastrado na lista de nós de serviço, armazenada no nó concentrador. Ao fim do recebimento dos dados, o nó concentrador desconecta todos os nós de serviço e inicia novamente o processo de identificação e cadastramento dos nós de serviço. Com essa dinâmica, periodicamente é feita uma varredura na rede elétrica, para identificação de nós de serviço, podendo assim, incorporar novos nós adicionados a rede após a entrada em operação da mesma.



Fig. 10. Localização dos medidores em Porto Alegre.

## II. IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

A segunda fase de testes dos medidores se deu em campo, mais especificamente a partir da instalação de um conjunto de 14 medidores em uma zona residencial de atuação da Companhia Estadual de Energia Elétrica do Estado do Rio Grande do Sul – CEEE, na cidade de Porto Alegre - RS. Nesta fase de teste, sob responsabilidade da concessionária CEEE, foram instalados 14 medidores, sendo sete deles em unidades consumidoras (residências) e sete medidores em postes de distribuição de energia que funcionavam como repetidores uma vez que alguns segmentos não possuíam consumidores conectados.

Na Figura 10 é possível, a partir de uma imagem do GoogleMaps, verificar a localização dos pontos de instalação dos medidores na cidade de Porto Alegre. Na avenida principal, onde pode ser observado um canteiro, a rede elétrica é construída com cabos CA 2/0 AWG para as fases e CA 2 AWG para o neutro. Nas ruas perpendiculares, a rede elétrica é construída com cabos CA 1/0 AWG, tanto para as fases, quanto para o neutro. Há derivações do circuito da rede principal para os circuitos secundários, que alimentam as ruas perpendiculares a via principal e também para as derivações dos consumidores. No circuito principal não há emendas no trecho onde os medidores foram instalados.

Conforme pode-se observar na Figura 10 existe um ponto, destacado, em formato de estrela, que representa o nó concentrador, que gerencia a rede de medidores e realiza a transmissão dos dados coletados para o servidor.

No servidor os dados são armazenados em uma base de dados para consultas posteriores, ou mesmo disponibilizar, de forma online, a partir de um sistema desenvolvido especialmente para esta tarefa. No caso deste projeto, optou-se em utilizar a tecnologia 3G para interligar o nó concentrador ao servidor. No entanto, esta tecnologia poderia ser substituída por qualquer outra tecnologia de transporte (e.g., Rádio Frequência, Fibra Óptica, entre outras) de dados até mesmo o próprio PLC [5]. No caso do uso da tecnologia PLC seria necessário ampliar o número de medidores de forma a transportar os dados transmitidos até o local em que o servidor de banco de dados estiver localizado. A base de dados possui ainda uma interface amigável que permite uma rápida análise da comunicação e dos dados adquiridos. Esta interface pode ser visualizada na Figura 11.

CEEE Medidores								
Medidor	Data/Hora	Tensão A [V]	Tensão B [V]	Tensão C [V]	Corrente A [A]	Corrente B [A]	Corrente C [A]	Potência Ativa A [W]
a01	2015-05-10 20:56:57	109.8	104.99	105.6	0.1	0	0	8.26
a02	2015-10-23 08:39:38	127.79	130.38	133.43	3.48	0.6	0.9	402.81
a03	2015-12-23 11:10:49	128.42	128.12	128.92	0.08	0.8	0.05	10.02
a04	2015-10-23 10:02:56	127.17	14.12	14.16	0	0	0	-0.02
a06	2015-08-05 06:34:11	130.36	1.35	6.24	0	0	0	-0.02
a07	2015-12-22 08:43:27	130.6	130.32	129.97	2.05	0.98	0.43	189.29
a08	2015-11-21 16:22:47	128.23	130	128.8	2.52	0.07	0.15	320.25
a09	2015-07-30 10:00:38	126	13.21	13.62	0	0	0	-0.01
a0a	2015-12-22 18:37:04	129.97	129.86	129.83	0.14	2.47	2.69	13.85

Fig. 11. Sistema de monitoramento dos medidores.

### A. Primeira Análise dos Sados Transmitidos no Ambiente de Teste de Campo

Foram instalados e mantiveram-se em operação 14 medidores entre os dias 20 de junho de 2015 e 18 de julho de 2015 na cidade de Porto Alegre. Durante este período de 4 semanas (28 dias), foram transmitidos 173.500 dados oriundos do conjunto dos 14 medidores (incluindo concentradores). Isto representa, que em média, cada medidor transmitiu aproximadamente 18 pacotes de informações, por hora, durante estas 4 semanas. No entanto, estes dados não podem ser analisados de forma isolada, pois dependendo do horário e da localização do medidor existe uma significativa variação no número e periodicidade dos pacotes transmitidos conforme pode-se observar na Tabela I.

**TABELA I**  
**Relação de Pacotes Transmitidos por Medidor**

Medidor	1°	2°	3°	4°	Total
	Semana	Semana	Semana	Semana	
0x02	1601	1163	1036	1745	5545
0x03	8785	9273	9180	9227	36465
0x04	3542	3039	3349	3248	13178
0x05	3562	2972	1719	4122	12375
0x06	3851	3612	3533	3806	14802
0x07	3043	3149	2824	2163	11179
0x08	3210	2762	2912	3099	11983
0x0A	2143	3035	2188	2385	9751
0x0D	30	126	126	182	464
0x0E	5540	4180	4223	4936	18879
0x0F	3572	2948	3352	1641	11513
0x10	3365	2890	3138	1631	11024
0x12	3531	2594	1697	4119	11941
0x14	2014	1268	971	148	4401
<b>Média</b>	<b>3414</b>	<b>3072</b>	<b>2875</b>	<b>3032</b>	<b>12393</b>
<b>Total</b>	<b>47789</b>	<b>43011</b>	<b>40248</b>	<b>42452</b>	<b>173500</b>

Verificou-se que em determinados períodos do dia a frequência média de transmissão aumenta mantendo-se neste padrão no transcorrer da semana e do mês. Também foi verificado que independentemente da localização do medidor, todos, com exceção do medidor 0x0D, transmitem pacotes de dados em algum horário do dia, o que se espera de um medidor que seja utilizado para a aplicação de leitura/faturamento.

Especificamente em relação ao medidor 0x0D, conforme pode ser verificado na Figura 10, é o medidor mais distante do concentrador, assim como tem a maior distância entre os nós deste segmento, motivo que apresentou o menor número de

pacotes transmitidos em todos os experimentos conforme pode ser observado na Tabela I. Uma alternativa, para contornar o problema de comunicação deste medidor, seria a instalação de medidores/repetidores entre o medidor 0x0D e o próximo nó da rede, que conforme pode ser observado na Figura 8, é o medidor 0x02. Cabe lembrar que o ambiente de teste reflete, apesar de ser um cenário urbano, uma rede com poucos consumidores conectados, exigindo o uso de repetidores. Já em uma rede povoada estes repetidores são substituídos por medidores instalados nas unidades consumidoras e este problema tende a desaparecer.

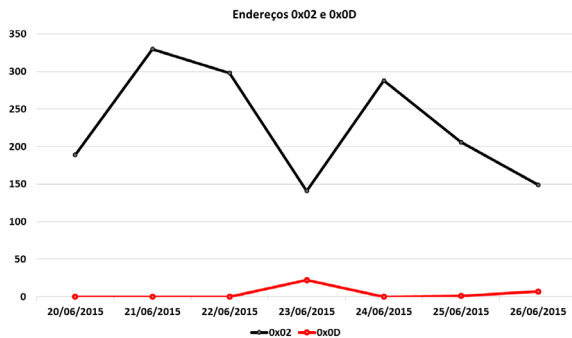


Fig. 12. Tráfego médio dos medidores 0X02 e 0X0D.

O medidor 0x02 também, em decorrência de sua posição e pelos mesmos motivos apontados anteriormente, possui uma média inferior de transmissão de pacotes quando comparado aos demais nós da rede, conforme pode-se observar na Tabela 1. Mesmo assim possui um desempenho muito superior ao medidor 0x0D, que na primeira semana de teste conseguiu transmitir apenas 30 pacotes, no dia 23 de junho, conforme apresentado na Figura 12, mantendo-se sem transmitir nos demais dias desta semana. No entanto este comportamento melhora nas semanas seguintes, mas sempre ficando com o pior desempenho entre todos os medidores.

### B. Horário de Melhor Desempenho.

Na seção anterior, foi possível verificar que, com exceção do medidor 0x0D, todos os medidores conseguem transmitir um determinado número de pacotes todos os dias. Somente esta constatação já permite que o medidor desenvolvido possa ser utilizado para fins de faturamento ou mesmo em serviços de desligamento e religamento de energia nas residências. Nesta seção será apresentado, que dependendo do horário e da localização do medidor, é possível transmitir pelo menos um pacote, em média por hora, frequência que possibilita utilizar este medidor em outras aplicações além da simples função de faturamento.

Para facilitar o entendimento e posterior análise dos dados, optou-se em dividir a análise em dia, semana e mês. Foi desenvolvida uma ferramenta, que a partir da base de dados armazenada de todas as medições do conjunto dos 14 medidores, apresenta um resumo dos dados coletados a partir da escolha de uma data e horário inicial e final. As métricas que podem ser avaliadas são: O número total de pacotes transmitidos no período; frequência média entre pacotes; frequência mínima registrada entre dois pacotes transmitidos por um mesmo medidor; e a frequência máxima entre dois pacotes transmitidos por um mesmo medidor.

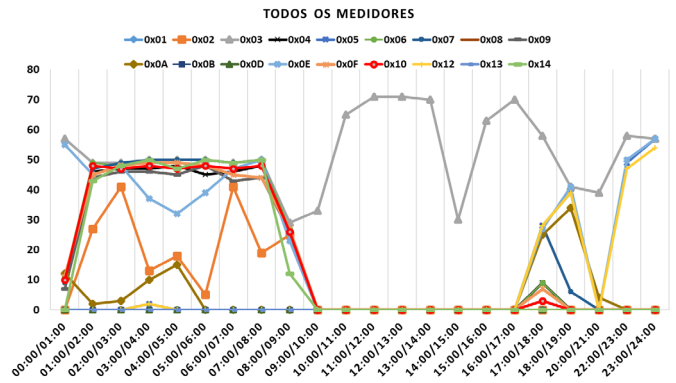


Fig. 13. Tráfego referente ao dia 20/06/2015.

A partir do uso da ferramenta desenvolvida é possível extrair uma série de informações. Inicialmente foi selecionado um dia, no caso o primeiro dia de teste que foi o dia 20 de junho de 2015, e plotado todo o tráfego de informações do conjunto completo dos 14 medidores, o resultado desta consulta pode ser visualizado na Figura 13.

Analisando a Figura 13 percebe-se que, com exceção do medidor 0x03, todos os medidores têm seu melhor desempenho, em transmissão de dados, entre as 00:00 até próximo as 09:00 da manhã. A exceção em relação ao medidor 0x03 justifica-se em decorrência deste ser o medidor localizado mais próximo do nó concentrador do sistema (representado por uma estrela na Figura 8). Esta constatação fica mais fácil de perceber quando, na Figura 14, é apresentada a média de transmissão de todos os medidores para o dia 20/06/2015.

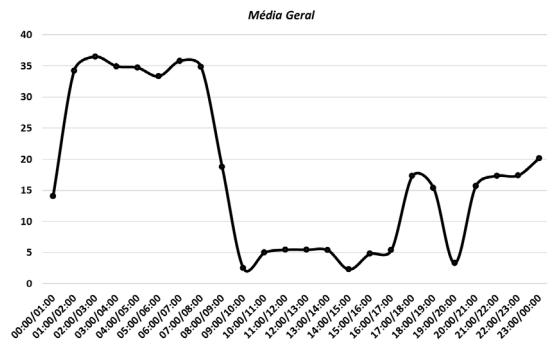


Fig. 14. Média geral de transmissões no dia 20/06.

Este mesmo padrão repete-se se for ampliada a análise de um dia para uma semana, conforme pode ser observado na Figura 15. O mesmo comportamento ocorre se estendermos a análise para um mês (4 semanas), estes resultados não foram apresentados por restrição de espaço.

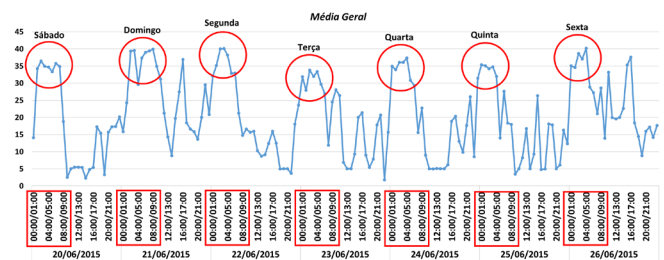


Fig. 15. Média geral de transmissões (20/06 e 26/06).

A partir da próxima seção será analisado o desempenho médio da transmissão de dados dos medidores. Será apresentado o resumo dos melhores e piores casos no transcorrer de cada semana dos testes, finalizando na análise mensal.

#### *C Análise do Desempenho Medidores – Primeira Semana*

Os dados apresentados nesta seção são gerados a partir da ferramenta de análise desenvolvida. Os dados aqui apresentados referem-se aos dados coletados dos medidores a partir de um *datalogger* instalado junto ao concentrador. A opção em usar esta base, em detrimento ao sistema online, é que os dados são os realmente adquiridos pelos medidores uma vez que o sistema online se baseia na comunicação 3G e pode, em determinados momentos, ficar inativa devido a problemas com a operadora do serviço, acarretando perda de dados que poderiam influenciar, de forma negativa, nas estatísticas aqui apresentadas.

Os dados compilados de todos os medidores entre as datas 20 de junho das 00:00:00 até a data de 26 de junho às 23:59:59 (primeira semana) resultaram em um total de 47.789 pacotes, com média de 3.414 pacotes, por medidor, por semana, o que equivale a 20 pacotes transmitidos, em média, por hora, por cada medidor. Sendo que a frequência e quantidade de pacotes transmitidos por cada medidor varia em decorrência, principalmente, de sua localização e exposição a interferências.

Em termos de melhor resultado, verificou-se que, para o período em questão, o melhor desempenho foi obtido pelo medidor 0x03 que conseguiu transmitir um total de 8.782 pacotes com uma frequência média de um pacote a cada 69 segundos. Sendo que a frequência mínima obtida, por este medidor, foi de 35 segundos e a máxima de 2.456 segundos. O que significa que no pior caso o medidor 0x03 ficou 40 minutos sem transmitir um pacote de dados e no melhor caso ele transmitiu dois pacotes com um intervalo de apenas 35 segundos. Em relação ao pior desempenho, o medidor 0x0D foi o que obteve os piores indicadores. Relembramos que este medidor possui a maior distância até o concentrador bem como está no segmento que possui os trechos mais longos (vão entre os postes de distribuição). O medidor 0x0D transmitiu apenas 30 pacotes no transcorrer de todo o período analisado, possuindo uma frequência mínima entre pacotes de 66 segundos e uma máxima de 190.170 segundos o que significa que o mesmo ficou por mais de dois dias sem transmitir dados conforme já mencionado anteriormente.

No entanto, caso seja desconsiderado o medidor 0x0D, o medidor que passa a ter o pior desempenho é justamente o medidor vizinho ao medidor 0x0D, no caso o medidor 0x02 (ver Figura 8). Mesmo estando em uma posição desprivilegiada, como já comentado, o medidor 0x02 transmitiu um total de 1.601 pacotes no transcorrer do período, o que representa quase 10 pacotes transmitidos, em média, por hora. O medidor 0x02 apresentou ainda uma frequência média mínima de 55 segundos e média de 378 segundos. No pior caso este medidor ficou por 85.595 segundos sem transmitir o que representa aproximadamente 23 horas, lembrando que o medidor 0x0D chegou a ficar mais de dois dias sem transmitir dados. Já em termos de desempenho médio geral, como já mencionado, cada medidor, para o período considerado,

transmitiu aproximadamente 20 pacotes por hora. Resultando em uma frequência média de um pacote a cada 182 segundos, sendo que a frequência média máxima entre pacotes foi de 62.627 segundos e a frequência média mínima foi de apenas 38 segundos.

#### *D Análise do Desempenho Medidores – Segunda Semana*

Entre os dias 27 de junho de 2015 até 3 de julho de 2015 foram transmitidos um total de 43.011 pacotes que representam uma média de 3.072 pacotes por medidor por semana, resultando em 18 pacotes transmitidos, em média, por hora por cada medidor.

Verifica-se que ocorreu uma pequena redução, em relação a primeira semana, em termos de número médio de pacotes transmitidos por medidor. Porém o comportamento geral, em relação a transmissão de pacotes, manteve-se o mesmo conforme pode-se observar na Figura 13.

#### *D Análise do Desempenho Medidores – Terceira Semana*

Na terceira semana de medições que compreende os dias entre 4 de julho de 2015 até 10 de julho de 2015 foram transmitidos 40.248 pacotes que representam uma média de 2.875 pacotes por medidor por semana, resultando em aproximadamente 17 pacotes transmitidos, em média, por hora por cada medidor.

Novamente foi verificada uma pequena redução, em relação a primeira semana, em termos de número médio de pacotes transmitidos por medidor. Porém o comportamento geral, em relação a transmissão de pacotes, continua a manter o mesmo padrão das duas semanas anteriores conforme pode-se observar na Figura 13.

#### *E Análise do Desempenho Medidores – Quarta Semana*

Na quarta semana de medições que compreende os dias entre 11 de julho de 2015 até 17 de julho de 2015 foram transmitidos 42.452 pacotes que representam uma média de 3.032 pacotes por medidor por semana, resultando em aproximadamente 18 pacotes transmitidos, em média, por hora por cada medidor.

Ocorreu um pequeno acréscimo no total de pacotes transmitidos em relação a terceira semana. Porém o comportamento geral, em relação a transmissão de pacotes, continua a manter o mesmo padrão das três semanas anteriores conforme pode-se observar na Figura 16.

Observou-se, ainda, que a frequência média mínima entre pacotes se manteve muito próxima aos valores obtidos nas três primeiras semanas de medição. Já a frequência média máxima de transmissão, que iniciou em 62.627 segundos na primeira semana, saltando para 110.043 segundos na segunda semana, mantendo-se em 61.709 segundos na terceira semana, teve um pequeno incremento e computou 69.965 segundos no final da quarta semana. Este valor corresponde a um atraso médio máximo de aproximadamente 19 horas, um pouco superior aos resultados obtidos na primeira e terceira semana de coletada de dados.

Em termos de melhor desempenho, novamente, o medidor 3 obteve os melhores resultados em termos de total de pacotes transmitidos, frequência mínima, média e máxima. Já o medidor 14, seguido agora pelo medidor 0x0D, obtiveram os piores desempenhos em todas as métricas avaliadas.

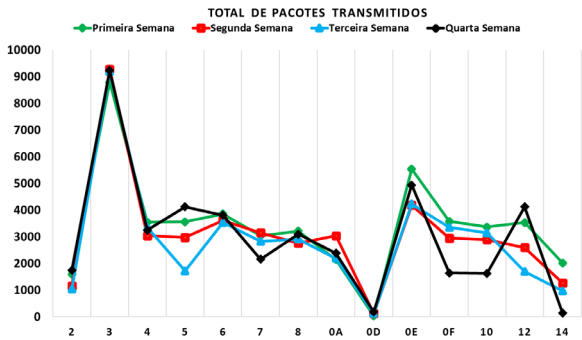


Fig. 16. Total de pacotes - Quatro Semanas.

### F Considerações Finais em Relação as 4 Semanas

A partir da análise da Figura 16 pode-se verificar que existe um padrão de transmissão nas 4 semanas analisadas, ocorrendo obviamente pequenas variações, tais como a alternância do pior caso entre os medidores 0x0D e medidor 14.

Na Figura 17 foi plotado o tráfego de todos os medidores no transcorrer das 4 semanas em que foram realizados os ensaios. Nela pode-se observar que existe uma tendência dos medidores de manter o número de pacotes transmitidos no transcorrer das 4 semanas, com pequenas exceções a destacar o medidor 14 que piorou de desempenho, à nível de transmissão de pacotes, deste a primeira semana.

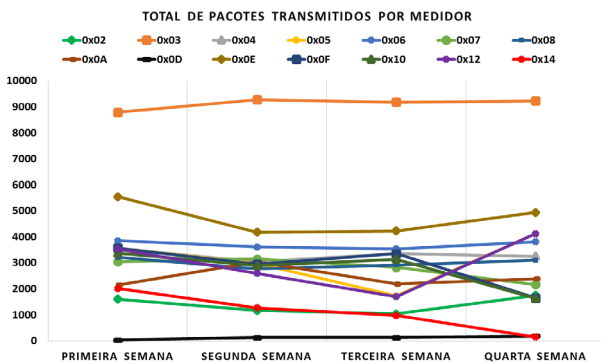


Fig. 17 Total de pacotes no período de teste.

Ainda observando a Figura 17, também é possível verificar claramente a diferença de desempenho do medidor 3 em relação aos demais medidores. Como já mencionado anteriormente, o medidor 3 é o medidor que está mais próximo do nó central (i.e., *gateway* da rede) e obviamente possui um melhor desempenho por ter sua comunicação facilitada com o nó central.

Cabe ressaltar que este foi o primeiro teste realizado com este conjunto de medidores em campo. Pretende-se ainda realizar alterações de configuração nos medidores para verificar se é possível melhorar o desempenho, em relação ao número e frequência de pacotes transmitidos, aproximando-os do desempenho do medidor 3.

### G Alternativas para incremento de desempenho da comunicação PLC.

De uma forma simplificada pode-se indicar dois fatores principais que comprometem a comunicação usando a rede elétrica: Variabilidade da impedância da Rede Elétrica (nível

de carga) e largo espectro de ruídos. A impedância, geralmente baixa, atenua significativamente os sinais contendo dados, em frequências acima de 30kHz. Os ruídos corrompem os sinais contendo dados, impossibilitando a recuperação das informações no destino, ou alterando um grande número de bits, destruindo significativa parcela de informação.

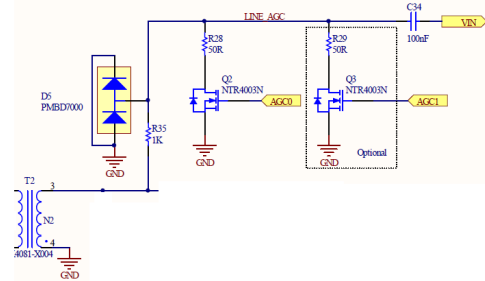


Fig. 18. Circuito de controle automático de ganho (CAG).

A mitigação dos problemas de atenuação e ruído, discutidos na Seção *Testes Preliminares*, e que tem relação com o baixo desempenho observado em alguns medidores do sistema piloto, exige uma revisão de pelo menos três itens do projeto da interface PLC do medidor:

- Circuito de controle automático de ganho (CAG) do circuito de recepção da interface PLC - Esse circuito, mostrado na Figura 18, tem impacto na sensibilidade do sinal captado;
- Circuito amplificador de saída e respectivos filtros de casamento de impedância - Uma discrepância no casamento de impedância do circuito amplificador, mostrado na Figura 19, poderá gerar significativa perda do sinal de transmissão;
- Parâmetros de configuração gravados junto com o *firmware* do modem ATPL210A, relacionados aos circuitos de CAG e de seleção de filtro de casamento de impedância do circuito "Front-End".

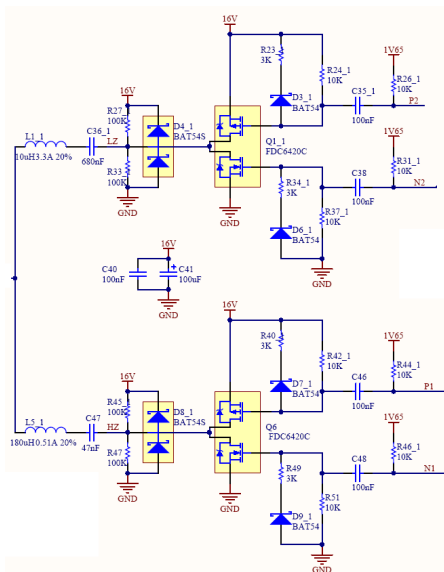


Fig. 19. Amplificador FET e filtro LC do circuito "Front-End" do modem ATPL210A.



No projeto da interface PLC baseada no modem ATPL210A, que foi integrada ao medidor, foram seguidas as diretrizes do projeto de referência do modem, as quais satisfazem as restrições impostas pela norma CENELEC. As comparações realizadas entre os modems PL3120 e ATPL210A, ambos submetidos as mesmas diretrizes especificadas na CENELEC, indicam haver margens de alteração, principalmente em termos de nível de sinal, para o circuito baseado no ATPL210A. O que será investigado.

#### IV. CONCLUSÕES

Resultados iniciais, apresentados neste artigo, demonstram que o sistema de medição desenvolvido atende aos requisitos mínimos para ser utilizado em sistemas de faturamento ou mesmo nas atividades de desligamento/religamento das unidades consumidoras sem a necessidade de deslocamento físico de uma equipe até a unidade consumidora. Quando utilizado e instalado na totalidade de consumidores de um segmento pode fornecer informações de carga, de qualidade de energia e proporcionar a execução de auditoria de consumidores, contribuindo para a redução dos percentuais de perdas não técnicas. Estas são algumas das possibilidades de aplicação do sistema de medição apresentado.

Também é possível verificar, a partir dos dados coletados nos ensaios em laboratório e posteriormente confirmados em campo com a instalação do sistema piloto, que regras mais rígidas de certificação e fiscalização de dispositivos que são conectados as redes elétricas são essenciais para que o Brasil possa se valer deste tipo de tecnologia no futuro.

Como trabalhos futuros pretende-se realizar melhorias na sensibilidade do circuito de recepção PLC, aumento da potência do circuito de transmissão e acoplamento PLC, sem desprezar os limites impostos pela norma CENELEC, com a possibilidade de uso de modems PRIME que já incorporem as melhorias definidas na versão 1.4 do padrão. Também pretende-se reavaliar a metodologia de gerenciamento dos nós escravos, não os desconectando periodicamente, como foi implementado na configuração do modem PRIME nesse projeto. Há a possibilidade de uma redução do tráfego de controle na rede, pois os nós já identificados não precisarão realizar um procedimento de cadastramento junto ao nó concentrador. A expectativa de melhoria do desempenho da comunicação dos medidores, geraria oportunidade de uso dos medidores para outras aplicações além das citadas neste artigo.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de P&D da ANEEL e a Companhia Estadual de Energia Elétrica - CEEE por apoiar financeiramente este projeto.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, "Resolução Normativa N° 482 de 17 de Abril de 2012". [Online]. Disponível: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>
- [2] N.S. Zivic, O. Ur-Rehman, C. Ruland, "Evolution of smart metering systems," in Proc. of

Telecommunications Forum Telfor (*TELFOR*), pp.635-638, 2015.

- [3] G. R. Barai, S. Krishnan, B. Venkatesh, "Smart metering and functionalities of smart meters in smart grid - a review," in Proc. of Electrical Power and Energy Conference (*EPEC*), pp.138-145, 2015.
- [4] F. Salvadori, C. Gehrke, A. C. Oliveira, M. de Campos, P. S. Sausen. "Smart Grid Infrastructure using a Hybrid Network Architecture", *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, issue 3, pp. 1630–1639, August 2013.
- [5] M. F. Khan, A. Jain, V. Arunachalam, A. Paventhan. "Communication technologies for smart metering infrastructure," in Proc. Of Electrical, Electronics and Computer Science (*SCEECES*), pp.1-5, 2014.
- [6] A. Sendin, Il H. Kim, S. Bois, A. Munoz, A. Llano "PRIME v1.4 Evolution: A Future Proof of Reality Beyond Metering", in Proc. Of *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 332–337, 2014.
- [7] A. Sendin, I. Berganza, A. Arzuaga, A. Pulkkinen, Il H. Kim "Performance Results form 100,000+ PRIME Smart Meters Deployment in Spain", in Proc. of *IEEE SmartGridComm 2012 Symposium – Smart Metering Infrastructure Networks and Data*, pp. 145–150, 2012.
- [8] I. Berganza, A. Sendin, A. Arzuaga, M. Sharma, B. Varadarajan "PRIME on-field deployment. First Summary of results and discussion", in Proc. Of *IEEE SmartGridComm 2011*, pp. 297–302, 2011.
- [9] A. Arzuaga, I. Berganza, A. Sendin, M. Sharma, B. Varadarajan "PRIME inoperability tests and results from field", in Proc. of *IEEE SmartGridComm 2010*, pp. 126–130, 2010.
- [10] E. L. Pinto, C. P. Albuquerque, "A Técnica de Transmissão OFDM", *INATEL – Revista de Telecomunicações*. 2002 [Online]. Disponível: <http://www.inatel.br/revista/>, pp. 1452-1459, 2002.
- [11] H. B. Nonemacher, D. C. Karnikowski, P. S. Sausen, M. Campos, " Smart Grids: Aplicação da Tecnologia Prime – PLC em um Sistema Real Para Aplicações em Smart Metering", in Proc. of 2012 CBA Congresso Brasileiro de Automática, 2012.
- [12] Echelon PL 3120, "Power Line Smart Transceivers", 2005 [Online], Disponível: <http://downloads.echelon.com/support/documentation/datashts/153x0.pdf>
- [13] Atmel ATPL210A, 2012 [Online], Disponível: <http://pdf.datasheetarchive.com/indexerfiles/Datasheets-D3/DSAHI00041818.pdf>
- [14] Prime Alliance, "Networks. (2nd ed.)", 2011 [Online]. Disponível: <http://www.prime-alliance.org/>, 2011.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Paulo Sérgio Sausen** possui Graduação (UNIJUI) e mestrado (UFPB) em Ciências da Computação e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2008). Atualmente é Bolsista de Produtividade em Pesquisa Nível 2 no CNPq e professor do DCEEng da UNIJUI. Atua nas áreas de Ciência da Computação, Engenharia Elétrica e Matemática Aplicada.

**Maurício de Campos** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNIJUÍ (1997), mestrado pela UFSM (2000) e é doutorando na mesma área pela Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Atualmente é professor da UNIJUÍ. Atua principalmente nos seguintes temas: qualidade de energia, instrumentação, sistemas supervisórios, acionamentos de máquinas elétricas e educação em engenharia.

**Alexandre Cunha Oliveira** possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFPB (1993), mestrado em Engenharia Elétrica UFPB (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2003). Entre 1996 e 2004, foi docente do Centro Federal de Educação Tecnológica do Maranhão. Desde 2004 é professor da UFCG. Atua nas áreas de sistemas de acionamento, eletrônica de potência, controle e qualidade de energia.

**Airam Sausen** possui graduação em Matemática e Mestrado em Modelagem Matemática pela UNIJUÍ e doutorado em Engenharia Elétrica pela UFCG (2009). Atualmente é professora do DCEEng da UNIJUÍ. Possui experiência nas áreas de Matemática Aplicada e Engenharia Elétrica.

**Luís Fernando Sauthier** é graduando em Engenharia Elétrica pela UNIJUÍ e atua como bolsista de iniciação científica junto ao projeto de P&D que financiou o desenvolvimento do sistema apresentado neste artigo.

**Samuel Centenaro de Oliveira** é graduando em Engenharia Elétrica pela UNISINOS e funcionário da Companhia Estadual de Energia Elétrica do RS (CEEE). Coordena o Projeto, por parte da CEEE-RS, de P&D que financiou o desenvolvimento do sistema apresentado neste artigo.