

Front-End Analógico para Power Line Communication na faixa entre 1.7 e 50 MHz

Vinicius L. R. da Costa, Caique R. Miranda, Stéfano A. de Souza, Carlos H. N. Martins, Fabricio V. P. de Campos, Thiago R. Oliveira e Moisés V. Ribeiro

Resumo— Este artigo tem por objetivo descrever um *front-end* Analógico (AFE) desenvolvido para interfacear dispositivos *power line communication* e a rede de distribuição de energia elétrica de baixa tensão, considerando que a transmissão de dados se dá na faixa de frequência entre 1,705 MHz e 50 MHz.

Palavras-Chave— Circuito analógico, *power line communication*, PLC, banda larga, acesso de rede.

Abstract— This article has the objective to describe the Analogical Front-End (AFE) developed to interface a *power line communication* (PLC) modem and the low-voltage electric power distribution network, considering that the data transmission occurs in the frequency band between 1.705 MHz and 50 MHz.

Keywords— Analog circuit, *power line communication*, PLC, broadband, access network.

I. INTRODUÇÃO

A tecnologia *power line communication* (PLC) permite que a infraestrutura das redes de distribuição de energia elétrica seja utilizada como meio de transmissão de dados. Assim, os sistemas PLC demandam baixos investimentos, uma vez que quase toda a infraestrutura de comunicação (cabos de energia) já encontra-se instalado [1], [2]. Por outro lado, como não foram, inicialmente, concebidas para fins de comunicação de dados, tais redes de energia apresentam fortes atenuações quando a frequência e/ou distância aumentam e diversos tipos de ruídos [3], [4], [5].

O sinal presente na rede de energia elétrica e que tem por objetivo suprir a demanda de energia dos equipamentos dos consumidores, possui características bastante diferentes das dos sinais destinados à transmissão de dados. Enquanto que o sinal de tensão da rede possui amplitudes na ordem de centenas de volts, podendo chegar a alguns quilovolts, nos sinais de comunicação as amplitudes máximas são da ordem de apenas algumas centenas de milivolts. Além disso, outra diferença relevante está no fato de que a frequência do sinal de tensão da rede é de 60 Hz, no caso do Brasil, enquanto que no sistema PLC os sinais de comunicação podem ocupar faixas do espectro cujas frequências podem ser na ordem de dezenas de megahertz. No Brasil, do ponto de vista de telecomunicações,

os sistemas PLC banda larga são regulamentados para as redes externas de baixa e média tensões pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [6], que limita o uso dessa tecnologia a faixa de frequência entre 1,705 MHz e 50 MHz.

Devido às diferenças mencionadas acima, entre os sinais da rede de energia elétrica e os dos sistemas PLC, fica evidente a necessidade da utilização de circuitos analógicos de condicionamento de sinais e filtragem para permitir uma conexão adequada entre a rede de energia elétrica e os dispositivos PLC (modems e concentradores). De fato, a conexão direta entre o dispositivo PLC e a rede energia elétrica pode prejudicar o sistema PLC, uma vez que tais dispositivos suportam apenas baixas amplitudes, na ordem de centenas de milivolts. Além disso, é importante proteger os circuitos dos dispositivos PLC contra possíveis distúrbios provenientes da rede de energia elétrica, tais como sobretensão, picos de tensão, dentre outros. Por fim, faz-se necessário o uso do *analog-to-digital converter* (ADC) e *digital-to-analog converter* (DAC), uma vez que o sinal PLC a ser injetado ou extraído da rede de energia elétrica deve ser analógico, enquanto que o sinal processado pelo dispositivo PLC é de natureza digital.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo apresentar e descrever as principais características de um *front-end* Analógico (AFE) desenvolvido para operar na faixa de frequência regulamentada no Brasil quando redes de distribuição de baixa tensão são utilizadas para a comunicação de dados. Tal dispositivo contempla as funções de proteção, filtragem analógica, controle automático de ganho, amplificação e acoplamento capacitivo com a rede de energia elétrica, além de possuir conversores analógico-digital e digital-analógico.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção II descreve os componentes principais do AFE. A Seção III apresenta uma configuração usada para testes de campo. Por fim, a conclusão é apresentada na Seção IV.

II. FRONT-END ANALÓGICO

O AFE opera de modo a interligar os dispositivos PLC com a rede de energia elétrica, por meio de conversores ADC e DAC, além de implementar os estágios de amplificação de sinal, controle automático de ganho e condicionamento analógico dos sinais. O AFE descrito nesse trabalho foi desenvolvido para operar em redes de energia elétrica do Brasil e suas especificações principais são apresentadas na Tabela I.

A estrutura básica do AFE pode ser observada na Fig. 1, enquanto que a placa com os componentes pode ser vista na Fig. 2. O AFE é conectado ao modem PLC (plataforma de

Vinicius L. R. da Costa, Caique R. Miranda, Stéfano A. de Souza, Carlos H. N. Martins, Fabricio V. P. de Campos e Moisés V. Ribeiro do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brasil. Thiago R. Oliveira do Núcleo de Eletrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sudeste de Minas Gerais (IFSEMG), Campus Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil. E-mails: vinicius.lagrota@engenharia.ufjf.br; caique.rocha@engenharia.ufjf.br; stefano.andrade@engenharia.ufjf.br; chnmartins@gmail.com; fabricio.campos@ufjf.edu.br; thiago.oliveira@ifsudestemg.edu.br; mribeiro@engenharia.ufjf.br

processamento) através de um conector *high speed mezzanine card* (HSMC), o qual permite o interfaceamento com sinais *Low-voltage differential signaling* (LVDS) ou *complementary metal-oxide-semiconductor* (CMOS). Como forma de proteção dos circuitos digitais externos ao AFE, o DAC e o ADC utilizados são galvânicamente isolados do *chip* de amplificação e controle automático de ganho através de transformadores e, além disso, todo o controle de ganho realizado ao AFE é isolado através de optoacopladores de alta velocidade que estão localizados entre o estágio de ganho e os circuitos de condicionamento e filtragem analógica. Através dos circuitos projetados, uma conexão entre a rede de energia elétrica e um modem PLC é estabelecida utilizando-se comunicação *half-duplex* [7], ou seja, o equipamento pode transmitir e receber dados, mas não simultaneamente.

A seguir são apresentadas as descrições sucintas dos elementos principais que compõem o AFE.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES PARA O *front-end* ANALÓGICO.

Especificação	Detalhes
Taxa de conversão dos dispositivos ADC e DAC	> 120 Msps
Quantidade de bits para quantização da amplitude pelos ADC e DAC	≥ 12 bits
Faixa de operação do Amplificador de sinais para transmissão	1,7 MHz-50 MHz
Densidade espectral de potência máxima do Amplificador ($R_L = 1\Omega$)	-50 dB V ² /Hz
Amplificador com <i>programmable gain control</i> (PGA) que permite <i>automatic gain control</i> (AGC)	Um único chipset
Facilidade de projeto, reprojeção, prototipação e pesquisas para redução de custo de produção com ensaios de novos componentes com características compatíveis.	Premissa de projeto
Uso de componentes comercialmente disponíveis e de baixo custo	Premissa de projeto
Tipo de barramento	<i>single ended</i> 2.5 V

A. Estágio de acoplamento com a rede de energia elétrica

O estágio de acoplamento é a etapa responsável por realizar a interface entre a rede de energia elétrica e os demais dispositivos PLC [8], [9]. Pode ser dividido em três partes principais:

- Proteção contra sobre corrente: é feita através de um fusível de 150 mA, que é o primeiro elemento do AFE no lado de conexão com a rede de energia elétrica de baixa tensão. Caso a corrente nominal do fusível se exceda, o mesmo se romperá, realizando a proteção;
- Filtro analógico passa-alta: está situado entre a proteção e o primário do transformador de acoplamento tem como objetivo filtrar o sinal de 60 Hz da rede de energia elétrica o qual possui elevada amplitude, ao mesmo tempo em que deve permitir a passagem do sinal de comunicação com a menor atenuação possível. Esse filtro é constituído apenas de dois capacitores conectados em série aos terminais do AFE, nos quais serão conectados os condutores fase e neutro da rede de energia elétrica;

- Transformador de acoplamento: é utilizado por operar em altas frequências e tem como objetivo realizar a isolamento galvânica entre o AFE e a rede de energia elétrica e constitui, portanto, mais uma importante proteção para o modem PLC.

Como pode ser observado na Fig. 3, o estágio de acoplamento apresenta uma atenuação inferior a 4 dB em quase toda a faixa de interesse (de 1,705 MHz até 50 MHz). Por outro lado, para frequências acima de 45 MHz essa atenuação pode ser de até, aproximadamente, 15 dB.

B. Filtragem Analógica e Proteção do Transmissor e Receptor

Após o estágio de acoplamento, encontra-se um estágio de filtragem analógica e proteção para cada sentido de transmissão (injeção e extração de sinais PLC). Filtros foram utilizados para limitar a banda de frequência do sinal. Além disso, um circuito de proteção é utilizado para limitar a tensão na entrada do AFE (do lado da rede de energia elétrica), de modo a prevenir danos contra transientes de tensão e corrente provenientes da rede de energia elétrica.

O circuito de proteção do transmissor pode ser dividido em duas partes:

- Um conjunto de diodos montados na configuração de grameadores de tensão e diodos Zener: possuem a função de ceifar o sinal recebido, caso o mesmo ultrapasse um limiar de tensão preestabelecido;
- Diodos Schottky: para a proteção contra picos de tensão devido à sua resposta rápida.

O filtro analógico do transmissor é posicionado entre o circuito de proteção e o estágio de amplificação de sinais. Tem a função de limitar a frequência do sinal a ser transmitido.

A atenuação entre o ponto de conexão do AFE com a rede de energia elétrica e a saída do filtro transmissor pode ser observada na Fig. 3. Nota-se um aumento na atenuação se comparado com aquela proporcionada apenas pelo estágio de acoplamento. Por outro lado, nota-se também um aumento da seletividade, principalmente pela maior atenuação para as frequências menores que 1,705 MHz.

Para o AFE operando como receptor, dois filtros balanceados foram inseridos em cascata logo após o secundário do transformador do estágio de acoplamento: um filtro passa-alta de ordem seis e outro passa-baixa de ordem quatro. O filtro do receptor é posicionado entre o circuito de proteção e o estágio de ganho e tem a função de limitar a frequência do sinal recebido, evitando assim o efeito de *aliasing*. Além disso, assim como no transmissor, diodos Schottky foram utilizados para proteção do AFE contra picos de tensão.

C. Estágio de Amplificação de Sinal

O estágio de ganho e condicionamento de sinais é responsável por amplificar o sinal que é proveniente do DAC e que será, posteriormente, transmitido através da rede de energia elétrica. No sentido inverso de transmissão, este tem por objetivo controlar o ganho do sinal recebido da rede de energia elétrica, aproveitando ao máximo a faixa de excursão na entrada do ADC, garantindo assim, uma melhor resolução do sinal PLC digitalizado.

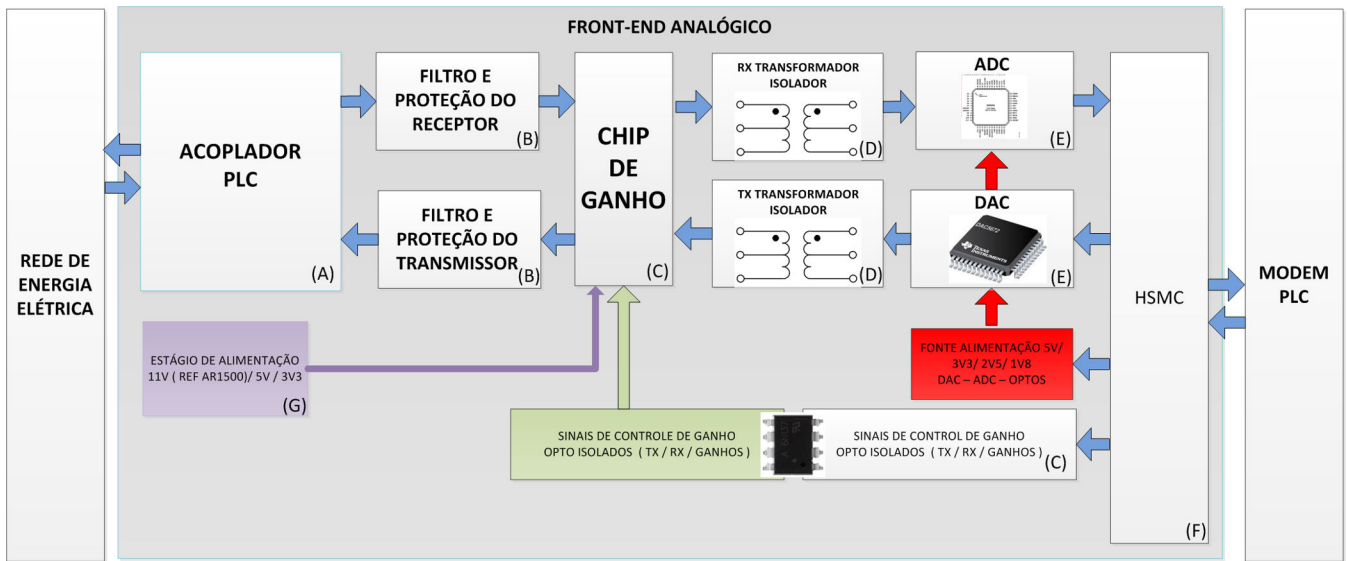


Fig. 1. Diagrama de blocos do AFE

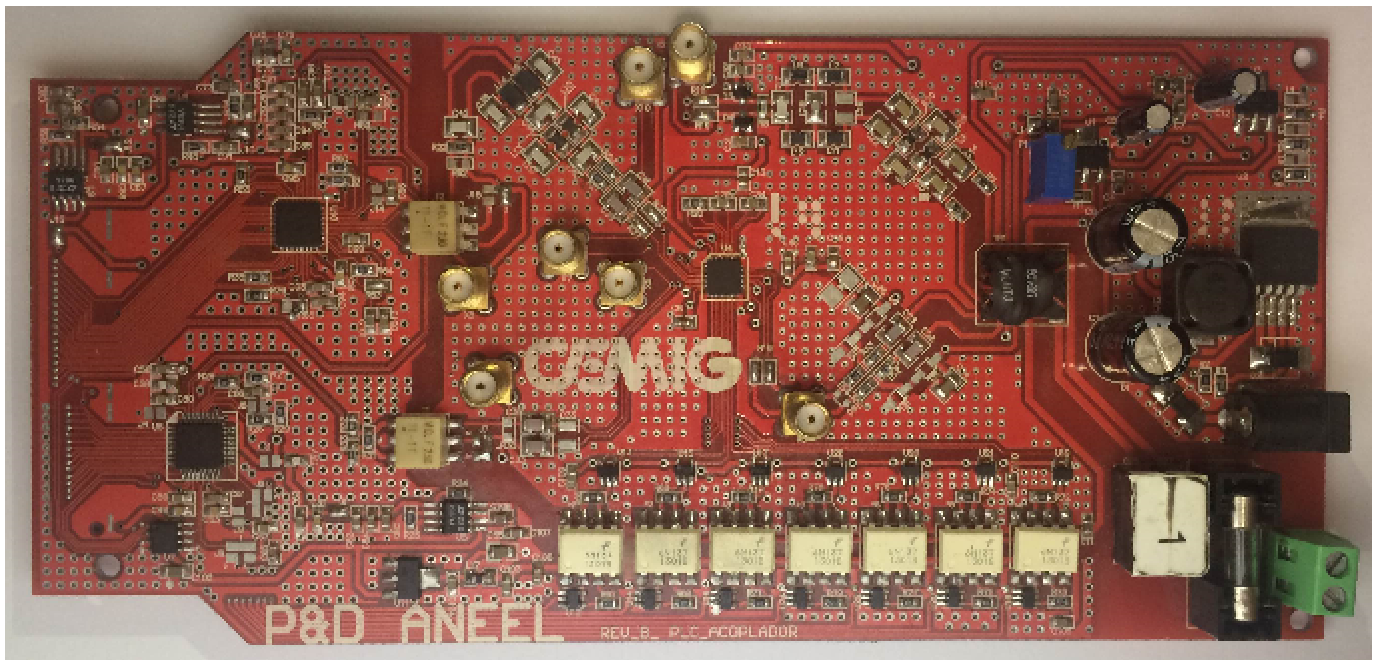


Fig. 2. Protótipo do AFE

Para executar esses ganhos, foi escolhido o *chip* AR1500 da empresa Atheros/Qualcomm, devido às seguintes características:

- incorpora em um único *chip* as funcionalidades de amplificação e controle automático de ganho do sinal PLC;
- incorpora um PGA, que permite programar o ganho do amplificador dinamicamente;
- demanda menor área útil na placa de circuito impresso, sendo que em um único encapsulamento várias funcionalidades estão incluídas;
- opera na faixa de frequência entre 2 MHz e 68 MHz.

D. Transformadores de Isolação

Os transformadores de isolação escolhidos são de aplicação comercial para utilização em sistemas de rádio frequência (RF). Suas características principais são apresentadas na Tabela II.

TABELA II
CARACTERÍSTICAS DO TRANSFORMADOR DE ISOLAÇÃO.

Largura de Banda	300 MHz
Relação de espiras	1:1
Potência máxima	250 mW

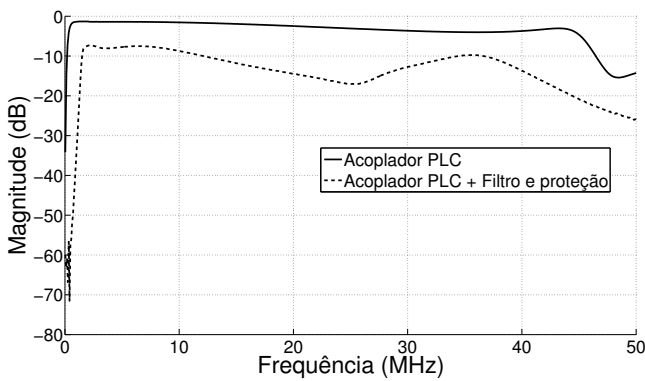


Fig. 3. Função magnitude.

E. Conversor ADC e DAC

Os conversores ADC e DAC são posicionados entre os transformadores isoladores e o conector HSMC. Eles devem possuir alta velocidade (com taxas de amostragem acima de 100 MHz), permitindo que o sistema PLC opere com frequências de até 50 MHz, que é o limite regulamentado no Brasil.

Para atender aos requisitos mínimos de projeto listados na Tabela I, foi utilizado o ADC AD9254 da empresa Analog Device. Suas características principais e que motivaram sua escolha são listadas na Tabela III. Já o DAC escolhido foi o DAC5672, fabricado pela empresa Texas Instruments, cujas características principais são encontradas na Tabela IV.

TABELA III
CARACTERÍSTICAS DO ADC AD9254

Resolução	14 bits
Taxa de conversão máxima	150 Msps
Tensão de operação	1,8 V
Tensão GPIO	2,5 V

TABELA IV
CARACTERÍSTICAS DO DAC DAC5672

Resolução	14 bits com duplo conversor DAC
Taxa de conversão máxima	275 Msps
Tensão de operação	3,3 V

F. HSMC

O HSMC é o conector responsável por fazer a conexão entre o AFE e o núcleo de processamento do modem PLC. Possui duas características principais: elevado desempenho em altas taxas de comunicação e elevada imunidade a ruídos. Sendo assim, o HSMC é a opção escolhida, tendo em vista que o AFE trabalha com altas taxas de transmissão, recebendo e enviando dados para o ADC e DAC, respectivamente. Além disso, o conector HSMC suporta sinais do tipo LVDS e CMOS, provenientes do núcleo de processamento do modem PLC [10].

G. Estágio de alimentação

O estágio de alimentação compreende a interface responsável por fornecer energia para os diversos componentes do AFE, através de uma fonte chaveada externa de 12 V e corrente máxima de 2 A. A fonte utilizada atende aos requisitos de estabilidade, baixo nível de ruído e ser capaz de operar em tensões de 80 V até 240 V.

Dessa alimentação de entrada, outros três níveis de tensão são obtidos através de reguladores e conversores do tipo *Buck*: 11 V, 5 V e 3,3 V. Essas diferentes tensões são utilizadas para alimentar os conversores, o *chip* de amplificação e controle automático de ganho e o circuito de proteção.

III. TESTE DE CAMPO

Para verificar o funcionamento do AFE, foi realizado um teste de campo no qual foram utilizados um modem PLC e um concentrador PLC, os quais constituem o sistema PLC Brasileiro para aplicações banda larga em redes de energia elétrica de baixa tensão [11].

O modem PLC foi implementado em uma placa de desenvolvimento DE2-115 da Terasic com um *chip field programmable gate array* (FPGA) Cyclone IV, enquanto que o concentrador PLC foi implementado em uma placa de desenvolvimento Arria II GX com um *chip* FPGA Cyclone IV GX. Ambos o modem PLC e o concentrador PLC foram conectados em pontos distintos de uma rede de energia elétrica através do AFE desenvolvido. A Fig. 4 ilustra a conexão entre o modem PLC, o AFE e a rede de energia elétrica.

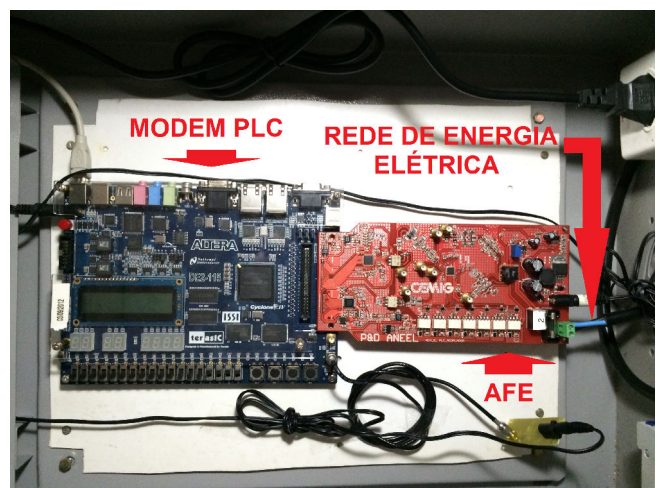


Fig. 4. Setup do modem PLC

Além disso, um link de internet foi conectado ao concentrador PLC e um cliente foi cadastrado no modem PLC. Dessa forma, quando o cliente envia informação para a internet, os dados passam pelo modem PLC, pelo circuito de transmissão do AFE e é inserido na rede de energia elétrica. Em outro ponto da rede de energia elétrica, os dados são recebidos pelo AFE conectado ao concentrador, que através do seu circuito de recepção, envia as informações para o concentrador conectado à internet. Na Fig. 5, podem ser visto os *frames* transmitidos pelo AFE do concentrador para o AFE do modem

PLC, caracterizando-se como *frames* de *downlink*. Cada um desses *frames* são compostos por 16 símbolos *Orthogonal frequency-division multiplexing* (OFDM) [12] e esses símbolos se combinam para compor o preâmbulo, dois pilotos e a parte de dados. Os dois primeiros são observados na imagem pela parte de maior amplitude e o último pela parte de amplitude constante. Os *frames* de *uplink* possuem as mesmas características, no entanto o número de símbolos OFDM passa de 16 para 32. Para o *upload* de informações o caminho é o oposto ao que foi descrito. Por fim, em todos os testes realizados, considerando ambos *download* e *upload*, obteve-se êxito na transmissão de dados.

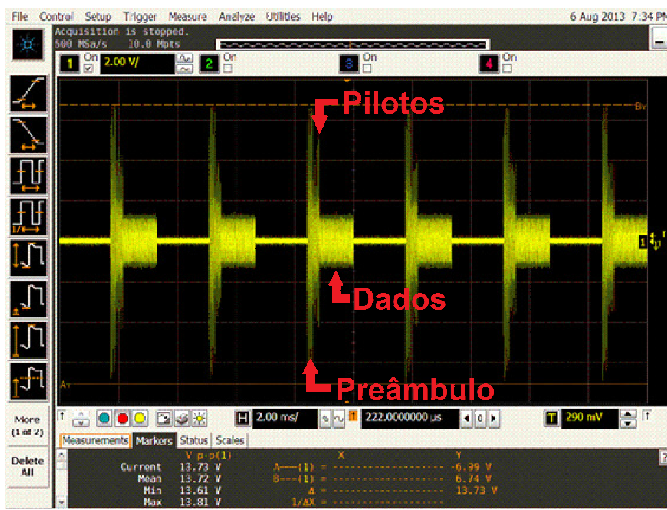


Fig. 5. *Frames* transmitidos pelo AFE

IV. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um *front-end* Analógico desenvolvido para fazer a conexão entre dispositivos PLC (modems e concentradores) e a rede de energia elétrica. Esse AFE foi desenvolvido para operar na faixa de frequência regulamentada no Brasil que é de 1,705 MHz até 50 MHz.

Seus componentes principais foram apresentados e discutidos e compreendem: acoplamento com a rede de energia elétrica, filtro analógico de transmissão e recepção, estágio de amplificação de sinais e controle automático de ganho, transformador isolador, ADC e DAC, HSMC e estágio de alimentação. Além disso, foi realizado um teste de campo no qual foi possível estabelecer a comunicação entre um usuário cadastrado no modem PLC e a internet, conectada a um concentrador PLC, quando ambos, modem e concentrador, estavam conectados em uma rede de energia elétrica, através do *front-end* Analógico desenvolvido.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a CAPES, CNPq, FAPEMIG, INERGE, P&D ANEEL, CEMIG, FINEP e Smarti9 pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] M. V. Ribeiro. *Técnicas de Processamento de Sinais aplicadas à Transmissão de Dados via Rede Elétrica e ao Monitoramento de Qualidade de Energia*. Tese (Doutorado), 2005. Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- [2] H. A. Hrasnica, A. Haidine and R. Lehnert. *Broadband Powerline Communications Networks: Network Design*. John Wiley & Sons, 2005.
- [3] M. Gotz, M. Rapp, K. Dostert, "Power line channel characteristics and their effect on communication system design", *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 4, p. 78-86, Apr. 2004.
- [4] M. Zimmermann, K. Dostert, "A multipath model for the powerline channel", *IEEE Trans. on Communications*, v. 50, n. 4, p. 553-559, Apr. 2002.
- [5] H. Meng, Y. L. Guan, S. "Chen. Modeling and analysis of noise effects on broadband power-line communications", *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 20, n. 2, p. 630-637, Apr. 2005.
- [6] Resolução Brasileira para PLC banda larga. Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). <http://legislacao.anatel.gov.br/resolucoes/2009/101-resolucao-527>, 2009. Acessado em 28 de abril de 2015.
- [7] A. S. Tanenbaum, D. J. Wetherall. *Computer Networks*. Prentice Hall, 5th edition, 2010.
- [8] P. A. J. Rensburg, H. C. Ferreira, "Coupling circuitry: understanding the functions of different components", *Proc. International Symposium on Powerline Communications and Its Applications*, Mar. 2003, Japan.
- [9] L. G. da Silva Costa, A. A. M. Picorone, A. C. M. de Queiroz, V. L. R. da Costa, M. V. Ribeiro, "Projeto e Caracterização de Acopladores para Power Line Communications", *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, Juiz de Fora, MG, Set. 2015 (submetido).
- [10] Conector HSMC. Datasheet: https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/ds/hsmc_spec.pdf. Acessado em 27 de abril de 2015.
- [11] M. V. Ribeiro, F. V. P. de Campos, G. R. Colen, H. V. Shettino, D. Fernandes, L. M. Sirimaco e V. Fernandes, 'A novel power line communication system for outdoor electric power grids', in *Proc. International Symposium on Power Line Communications and its Applications*, Mar. 2015.
- [12] Litwin, Louis and Pugel, Michael. "The Principles of OFDM" 2001.