

A Power Line Communication Based SmartPlug Prototype for Power Consumption Monitoring in Smart Homes

W. S. Costa, *Member, IEEE*, W. G. V. Santos, H. R. O. Rocha, M. E. V. Segatto and J. A. L. Silva

Abstract—In order to implement the concepts of smart grid and residential automation, this article presents a SmartPlug prototype for power consumption monitoring in smart homes. It is a device that, when coupled to the sockets, measures electrical voltage and current, and thereafter provides the power consumption to the consumer using the power line communication (PLC) technology. With the knowledge of the consumption, provided by the smart metering, of each outlet, the consumer is able to establish the concept of segmented energy consumption, which is an important allied of energy saving and power demanding. With commercial current and voltage sensors, the SmartPlug was built using the Arduino platform and the end user interface was created using the open source software ScadaBR. After performance evaluation in a laboratory, tests in real electrical plants were performed to validate the prototype, considering bit rates and signal spectrum in the PLC systems.

Index Terms—Smart grid, smart metering and smart homes, power line communication.

I. INTRODUÇÃO

As redes inteligentes do sistema elétrico de potência, também conhecidas como *Smart Grids* (SG), são aquelas dotadas de sistemas de controle e de comunicação para um sistema mais eficiente, sustentável, escalável e confiável [1].

O conceito de SG residencial é conhecido como *Smart Home* (SH) e consiste na aplicação dos conceitos de SG em uma residência, permitindo um monitoramento e controle de energia doméstico mais eficaz [2]. As SHs utilizam tecnologias de sensores, atuadores e de rede para a comunicação entre seus aparelhos, que relatam constantemente registros de consumo para o sistema de gerenciamento de energia e oferecem a seus proprietários a oportunidade de monitorar dispositivos remotos [3] ou de ter a rede monitorada através de uma inteligência artificial [4].

A Fig. 1 apresenta um exemplo de sistema de automação para uma *Smart Home*. No centro da Figura encontra-se o quadro de distribuição elétrica inteligente, onde localiza-se o sistema de gerenciamento do lado da demanda (do inglês *Demand Side Management* - DSM) [5]. Esta unidade

recebe informações da geração distribuída, da bateria, da carga residencial e da concessionária, para então, realizar a atuação e permitir o monitoramento do sistema. Neste processo, a medição, a adequada transmissão dos dados de forma segura e o monitoramento da qualidade de energia são indispensáveis.

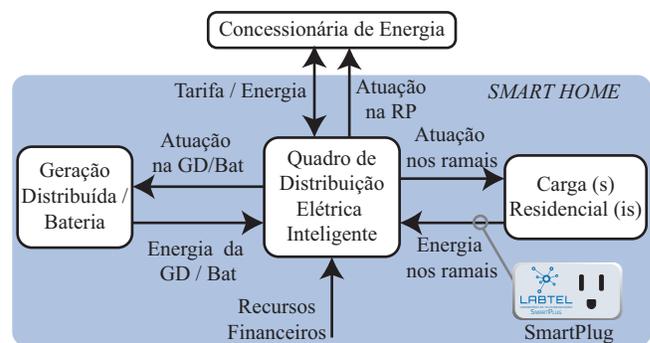


Fig. 1. Exemplo de sistema de automação de uma *SmartHome*.

Esta comunicação de dados pode ser realizada através de diversas tecnologias disponíveis, tais como Ethernet [6], Wi-Fi, LoRa [7], ZigBee [8] e a comunicação via rede elétrica nas suas duas vertentes: a de banda larga BPL (*Broadband Powerline*) e, principalmente, a de banda estreita NBPLC (*Narrowband Power Line Communication*) [9].

De fato, as tecnologias de comunicação sem fio acima referidas são boas alternativas para monitoramento de consumo em SHs. Entretanto, os custos de implementação podem ser proibitivos, principalmente se as taxas de transmissão demandadas pela aplicação não forem elevadas [10]. Neste contexto, a tecnologia baseada em NBPLC apresenta-se como uma alternativa de baixo custo por aproveitar-se da infraestrutura capilar instalada [11]. Esta solução de transporte de dados é fortemente recomendada em *smart grids*, em que as taxas de transmissão são inferiores a 1 Mb/s e ocorrem em faixas de frequências abaixo dos 500 KHz [12]. As diversas localizações de tomadas em uma residência podem ser um desafio para a adoção, por exemplo, do Wi-Fi (802.11), visto que o sinal pode ser extremamente atenuado a ponto de ser impossível estabelecer a comunicação. No entanto, a implantação da comunicação PLC pode ser complementar em redes Wi-Fi para reduzir interferências, principalmente em SHs dotados de dispositivos para internet das coisas (IoT) [13].

Aplicações da comunicação via rede elétrica NBPLC podem ser verificadas em [9], [14]. Sistemas de automação baseados nesta comunicação via rede elétrica são implantados sem

W. S. Costa, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, wesleycostae@gmail.com

W. G. V. Santos, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, willian.gvs@gmail.com

H. R. O. Rocha, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, helder.rocha@ufes.br

M. E. V. Segatto, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, segatto@ele.ufes.br

J. A. L. Silva, Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Vitória, Espírito Santo, Brasil, jair.silva@ufes.br

a instalação de meios adicionais para comunicação. Além disso, exploram a capilaridade de uma rede de comunicação inerentemente multiacesso. Diferentes tarefas podem ser executadas utilizando esta tecnologia, entre as quais destacam-se o controle de iluminação, o monitoramento de temperatura em ambientes de interesse, a abertura de janelas, monitoramento de painéis fotovoltaicos, bem como tarefas de segurança com sensores de presença ou câmeras [15], [16].

Alguns protótipos de medição, gerenciamento e monitoramento em SH's podem ser encontrados na literatura [10], [17]. Em [18] foi apresentado um medidor inteligente de energia capaz de interpretar os sinais de corrente elétrica, convertê-los em potência e energia elétrica e armazená-los em nuvem para interpretação e tomadas de decisão. Um medidor baseado em IoT para o consumidor de baixa tensão foi desenvolvido em [19] para monitoramento do consumo de energia em casas inteligentes. Corrente e tensão foram medidas usando uma placa de desenvolvimento Arduino Nano com o *shield* de comunicação Wi-Fi ESP8266 NodeMCU. Os resultados mostraram que foi possível realizar as medidas de tensão e corrente eficazes, das potências ativa, reativa e aparente e o fator de potência. Uma solução inteligente de medição em corrente alternada integrada ao sistema de monitoramento e gerenciamento de uma *Smart Home* é apresentada em [20]. O monitoramento utiliza a placa ESP32-EVB para comunicação e o processamento através do *gateway* em uma placa Raspberry Pi. Os dados medido foram disponibilizados em uma página Web em tempo real, bem como em uma base de dados para futuras consultas. Uma arquitetura de gerenciamento remoto de energia em residências HEMS (*Home Energy Management System*) foi proposta em [21] para otimizar consumo de energia e consequentemente reduzir os custos de consumo e geração de energia. No *smart HEMS* descrito, a tecnologia ZigBee é usado para monitorar o consumo de uma residência, enquanto que a tecnologia PLC é aplicada para monitorar a geração de energia renováveis.

No entanto, nenhum dos trabalhos acima apresentados descrevem o efeito do acoplamento de sinais inerente à tecnologia NBPLC, a influência das cargas conectadas na rede elétrica, nem tampouco uma estrutura de pacotes de comunicação de dados na rede. Apresenta-se neste artigo um modelo de monitoramento e gerenciamento de energia não-invasivo que se baseia em um medidor inteligente para tomadas de corrente. Além de inteligência e eficiência concebidas, este dispositivo, chamado de SmartPlug, tem como objetivo não afetar a infraestrutura predial existente e assim, reduzir o custo de sua instalação. Convém ressaltar que *hardwares* constituintes do adaptador foram desenvolvidos a partir de microcontroladores Arduino de baixo custo existentes no mercado, provendo acesso abrangente à tecnologia desenvolvida.

O SmartPlug é capaz de medir a tensão e a corrente elétricas e, consequentemente, a potência consumida em tempo real. Isto permitirá ao consumidor monitorar seu consumo de forma segmentada, uma vez que ele poderá acompanhar o consumo em pontos específicos de sua residência. Os dados medidos pelo SmartPlug são transmitidos, via rede elétrica, para um concentrador de dados. O concentrador, além de receber os

dados dos pontos de medição, disponibiliza-os na rede através de um supervisor desenvolvido, exibindo gráficos com o histórico de consumo e armazenando-os em banco de dados.

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira. Na Seção II são apresentados os resultados dos experimentos executados para obtenção dos parâmetros e dados relativos ao consumo de energia. Os experimentos e os resultados relacionados à comunicação via rede elétrica são descritos na Seção III. O resultado da avaliação do desempenho do protótipo desenvolvido em uma rede elétrica real é apresentado na Seção IV, descrevendo-se as taxas de transferência, os espectros medidos e a interface de usuário desenvolvida. Por fim, a Seção V apresenta as principais conclusões baseadas nos resultados experimentais obtidos e possíveis trabalhos futuros.

II. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE POTÊNCIA

Os cálculos de consumo de uma tomada são realizados através das medições instantâneas de tensão e corrente. Estes foram feitos através de um microcontrolador Arduino. Os valores instantâneos medidos na tomada de interesse são convertidos em valores eficazes ou RMS (*Root-Mean-Square*). A Fig. 2 ilustra o aparato experimental usado para medir tais parâmetros.

Para a medição de corrente foi utilizado o sensor invasivo Allegro ACS712 que, através do Efeito Hall, é capaz de medir correntes de até 30 A. Para a medição da tensão foi utilizado um transformador com relação 10 : 1 e um circuito de adequação do nível de tensão para garantir valores positivos dentro da faixa de leitura analógica do Arduino.

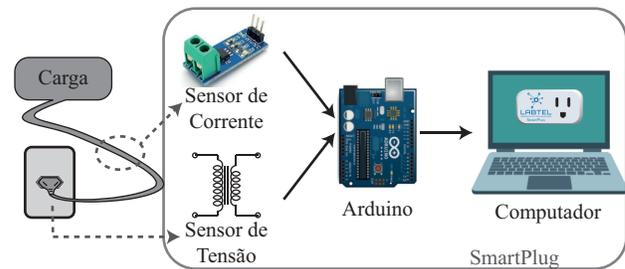


Fig. 2. Experimento usado na medição dos parâmetros de potência. Para a alimentação do Arduino utilizou-se uma fonte externa de tensão DC de 5 V.

A Fig. 3 mostra o circuito de adequação e as formas de ondas de tensão, sendo "Entrada do ADC: V_{in} " o valor disponibilizado pela porta analógica da plataforma de prototipagem. A calibração dos sensores de tensão e corrente foi realizada com o auxílio de um multímetro de referência, ajustado para valores *True RMS*. Este foi conectado ao primário do transformador de forma a capturar os valores de tensão e corrente que servem de referência para o ajuste das grandezas lidas pelo Arduino. O sensor de tensão é limitado pelo transformador, pelo circuito no secundário e também pela entrada do conversor analógico-digital ADC (*analog-to-digital converter*). Para aplicações que demandam tensões no primário de até $\approx 190 V_{RMS}$, o sensor não terá seu pleno funcionamento comprometido.

A. Algoritmo para o Cálculo de Potência

Para a obtenção dos valores RMS, leituras instantâneas de tensão e corrente são efetuadas, sendo que o quadrático

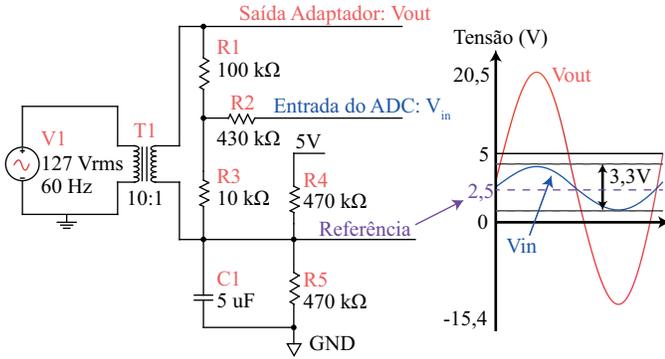


Fig. 3. Adequação de tensão para o nível do microcontrolador.

destes valores é acumulado a cada leitura. Este processo é repetido até que um número N de passagens da onda pelo zero (do inglês *zero-crossing*) seja atingido, ou então depois que uma variável temporizadora alcança um valor pré-determinado. Após isso, os valores acumulados são divididos pela quantidade de amostras coletadas, sendo que os valores resultantes desta operação passam então pela operação raiz quadrada. Como resultado têm-se a tensão (V_{RMS}) e a corrente (I_{RMS}) eficazes, determinados como [22]:

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n]^2}, \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i[n]^2}. \quad (2)$$

Dentro do mesmo *loop* de iterações há também a variável acumuladora de potência instantânea, que nada mais é que o produto da tensão e corrente instantâneas. O valor acumulado de potências instantâneas é dividido pela quantidade de amostras, obtendo-se assim o valor de potência ativa, fazendo

$$P = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} v[n] \times i[n]}. \quad (3)$$

O produto entre V_{RMS} e I_{RMS} determina a potência aparente S . Com as potências ativa e aparente calculadas determina-se o fator de potência FP , através da razão [23]

$$FP = \frac{P}{S}. \quad (4)$$

Uma versão simplificada da rotina descrita no algoritmo usado para o cálculo de todos estes parâmetros é mostrada na Fig. 4.

B. Resultados dos Experimentos do Sistema de Potência

Após a calibração dos sensores foram realizados experimentos com diferentes cargas, quais sejam, duas lâmpadas com potências diferentes, um ferro de solda, um ferro de passar roupas, um circulador de ar, o circulador de ar em paralelo com uma lâmpada, e uma furadeira. Durante a execução dos

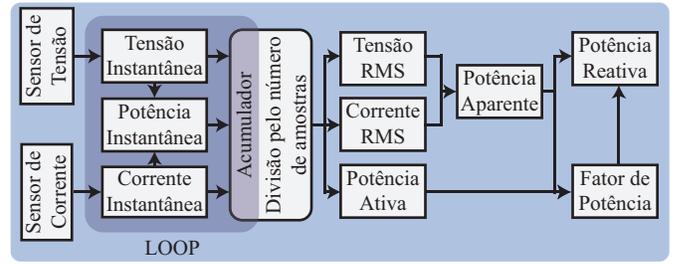


Fig. 4. Versão simplificada do algoritmo usado nos cálculos de potências.

processos no microcontrolador, foram coletadas aproximadamente 425 amostras para cada ciclo do acumulador, sendo 170 ms o tempo de cálculo de cada resultado. Observa-se pela Tabela I, que com a furadeira foram destacados três resultados. No primeiro foram realizadas medidas quando a furadeira começava a funcionar, portanto com corrente de partida do motor elevada e conseqüentemente maior potência consumida. Em um segundo momento, o valor foi medido com a furadeira em pleno funcionamento e com o controlador de velocidade totalmente ativo. No terceiro instante, a furadeira funcionou com o controlador de velocidade atuando.

Os erros de medição entre as grandezas calculadas pelo microcontrolador e as medidas pelo multímetro foram, aproximadamente, 1% para tensão, e, aproximadamente, 2% para corrente, valores estes aceitáveis para permitir a um usuário residencial ter uma estimativa de seu consumo.

As formas de onda de tensão e corrente medidas na entrada analógica do Arduino são mostradas na Fig. 5. Observa-se na Fig. 5.(a) que com o ferro de passar roupa, o fator de potência é unitário pois os valores medidos estão em fase. A forma de tensão e corrente para as lâmpadas incandescentes e qualquer outra carga puramente resistiva são similares a esta, conforme ilustram as curvas da Fig. 5.(b) [23].

A Fig. 5.(c) ilustra as formas obtidas com a furadeira que no terceiro cenário foi dotada de uma eletrônica responsável pelo controle de velocidade. Observa-se uma distorção no sinal de corrente que faz com que o valor do fator de potência seja reduzido.

III. AVALIAÇÃO DA COMUNICAÇÃO NBPLC HALF-DUPLEX

A maior parte dos sistemas NBPLC são baseados em modulação por chaveamento de frequência FSK (*Frequency Shift Keying*) [24], assim como a solução comercial utilizada no protótipo. Denominada “Mamba Shield”, esta utiliza a modulação FSK Binária (BFSK - *Binary FSK*) implementado no circuito integrado PLM-1, desenvolvido pela Ariane Controls, onde a taxa de transmissão prometida pode alcançar os 185 kb/s, com parâmetros tais como a frequência de operação, programáveis. Além de dispor de detecção de colisão, bem como de correção automática de erros e verificação da integridade de dados via CRC-16, o PLM-1 também implementa o controle de acesso ao meio na camada MAC [25].

Os primeiros experimentos de avaliação da comunicação NBPLC foram feitos com o aparato mostrado na Fig. 6. Inicialmente, para um tamanho de pacote fixado em 1 byte,

TABELA I
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DAS CARGAS DO EXPERIMENTO, MEDIDAS ATRAVÉS DO MULTÍMETRO E POR MEIO DO APARATO EXPERIMENTAL USANDO O MICROCONTROLADOR ARDUINO.

Carga	Valores Medidos com o Multímetro			Valores Medidos/Calculados no Arduino			
	Ten. RMS (V)	Cor. RMS (A)	Pot. Apa. (VA)	Pot. Ativa (W)	FP (Ind)	Ten. RMS (V)	Cor. RMS (A)
Lâmpada (40 W)	126,2	0,31	36,52	36,49	1,00	125,4	0,29
Lâmpada (40 W)	124,5	0,42	53,11	53,24	1,00	124,4	0,43
Ferro Solda (60W)	123,8	0,64	76,85	77,13	1,00	123,5	0,62
Circulador	124,2	1,88	235,96	166,2	0,70	128,2	1,84
Circ+Lâm (40W)	126,1	2,15	272,36	218,5	0,80	129,8	2,11
Ferro Roupa (1200W)	121,2	8,62	1036,8	10034	1,00	120,8	8,58
Três Cenários da Furadeira							
Furadeira-Cenário 1 (600W)	126,8	7,16	908,40	545,6	0,60	127,6	7,12
Furadeira-Cenário 2 (600W)	129,1	2,09	260,99	250,6	0,96	129,6	2,01
Furadeira-Cenário 3 (600W)	129,6	1,24	158,48	52,29	0,33	130,8	1,21

foi avaliado a relação entre taxa de transmissão e o percentual de bytes corretos no receptor. Após esta verificação, analisou-se a dependência da taxa de transmissão com o tamanho do pacote.

Com o auxílio do *software* de computação Matlab, foi desenvolvido um *script* para transmissão de um arquivo em formato .txt por uma porta serial escolhida, com velocidade de envio de cada caractere controlada e, portanto, a taxa de transmissão. No receptor é possível monitorar a chegada dos caracteres, por *byte*, utilizando o X-CTU. Com isto é possível determinar a relação entre bytes transmitidos e recebidos, além do percentual de acerto. A relação entre a taxa e a porcentagem de dados recebidos corretamente é mostrada na Fig. 7.(a). Nesta, constata-se que aumentos na velocidade de transmissão, mantendo-se fixo o tamanho do pacote, fazem com que pacotes de dados sejam perdidos. A Fig. 7.(b) ilustra a relação entre o tamanho do pacote e taxa de transmissão máxima. Para a geração deste resultado, optou-se por enviar repetidamente uma sequência de dados conhecida, em pacotes de diferentes tamanhos, e avaliar a taxa máxima em transmissões sem erros na recepção. Foram analisados pacotes com 2, 8, 32 e 61 *bytes*.

Observa-se a partir da Fig. 7 que, o parâmetro importante a ser definido para o protótipo é o tamanho do pacote, pois este está diretamente relacionado com a velocidade máxima de transmissão sem que haja perda de pacotes. Assim, com os 170 ms necessários para obter as amostras e calcular os valores

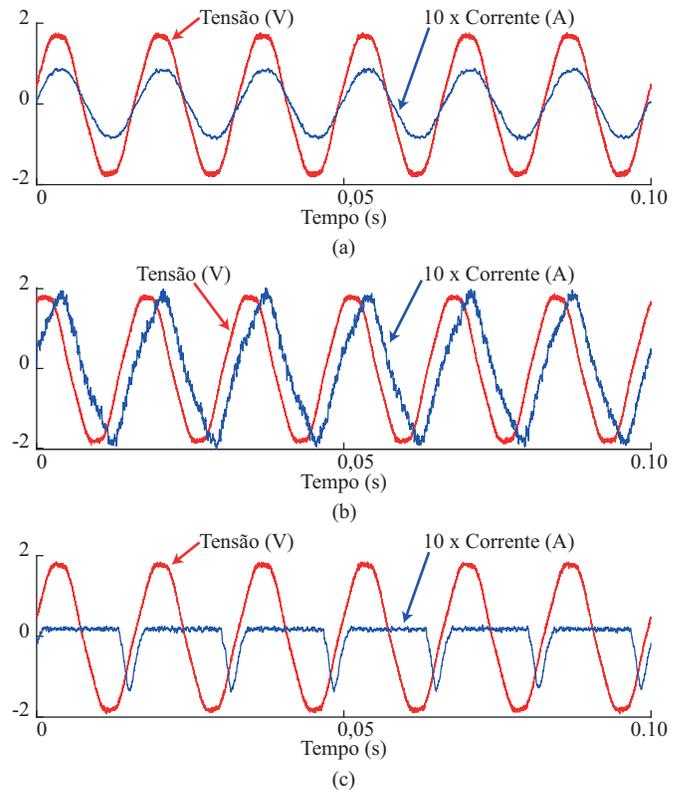


Fig. 5. Formas de tensão e corrente na entrada do conversor ADC do microcontrolador para diferentes cargas conectadas: (a) ferro de passar (FP unitário); (b) lâmpada de 40 W (FP não unitário) e (c) furadeira (FP não unitário com presença de distorção na corrente).

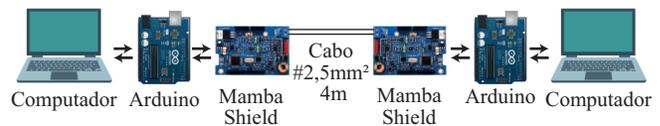


Fig. 6. Aparato experimental usado na análise da comunicação NBPLC em configuração *half duplex*.

dos parâmetros de potência, obtém-se uma taxa máxima de 380 b/s com pacotes de 8 bytes e a velocidade máxima de transmissão com pacotes deste tamanho é de 850 bps. Portanto, a capacidade de transmitir dados é maior do que a quantidade de dados que existe para transmissão. O pacote enviado tem 8 bytes, sendo os dois primeiros reservados para tensão RMS, os dois seguintes reservados para corrente RMS e os quatro últimos reservados para potência ativa, conforme ilustra a Fig. 8. Porém, nem todos estes bits precisam ser utilizados e alguns foram reservados para aplicações futuras, tais como endereçamento dos pacotes. A Fig. 8 mostra onde estão alocados os dados e os bits reservados, sendo que todos os 16 bits reservados foram preenchidos com bits 1 e 0 alternadamente.

IV. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS EM UMA REDE REAL

A utilidade do protótipo construído foi comprovada mediante a realização de experimentos na rede elétrica de baixa

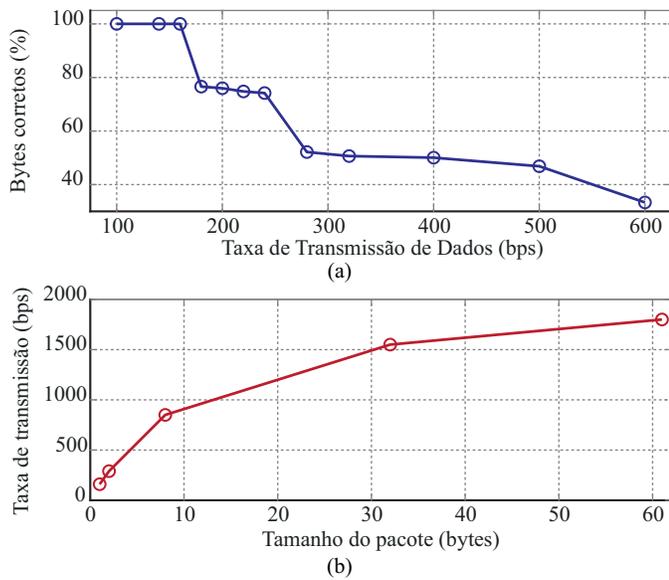


Fig. 7. Resultados de desempenho da comunicação PLC. (a) Razão entre a taxa de transmissão e a quantidade de bytes recebidos corretamente e (b) razão entre o tamanho dos pacotes e a referida taxa.

Byte 7	Byte 6	Byte 5	Byte 4	Byte 3	Byte 2	Byte 1	Byte 0
10101010	1010	0000	00000000	1010	0000	00000000	00000000
Reservado	Potência Ativa		Res.	Corrente RMS	Tensão RMS		

Fig. 8. Pacote com dados a serem enviados.

tensão ilustrada na Fig. 9, previamente preparada para testes desta natureza [26]. Trata-se de uma rede de 180 m de comprimento e com 7 pontos (tomadas) de acesso aos dados PLC propagados. Observa-se ainda pela Fig. 9 que existe a possibilidade de se estabelecer uma rede com topologia em anel para averiguação dos efeitos de acoplamento de sinal que pode acontecer quando altos valores de frequências centrais são usados para comunicação.

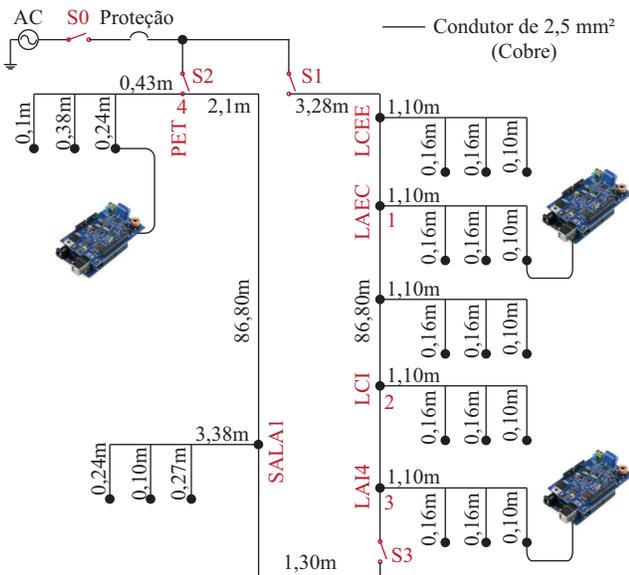


Fig. 9. Rede Elétrica utilizada para testes de comunicação PLC.

Inicialmente, o transmissor foi conectado na fase C do ponto 1 exibido na Fig. 9 e a chave S_0 foi aberta para desenergizar a rede elétrica. A chave S_1 foi aberta e as chaves S_2 e S_3 fechadas, para testes de recepção dos pacotes nos pontos 2, 3 e 4. A distância entre os pontos 1 e 2 é de aproximadamente 24 metros, e entre os pontos 1 e 3 aproximadamente 46 metros. A rede tem, aproximadamente, 139 metros entres os pontos 1 e 4. [26]. Em todas as medidas executadas, os pacotes de 8 bytes foram recebidos com a taxa máxima de 850 b/s. O mesmo comportamento foi observado quando o receptor foi conectado nas fases A e B, com o transmissor mantido na C. Isto ocorre devido ao acoplamento de sinais entre as fases, fenômeno este observado em todos as medidas efetuadas, inclusive no ponto de acesso mais distante (ponto 4). Posteriormente, a chave S_0 foi fechada, energizando assim toda a rede, e todos os procedimentos foram repetidos. Com a rede energizada, todas as cargas conectadas de todos os laboratórios e salas de aula existente no prédio onde a rede de testes foi construída influenciaram a transmissão NBPLC, inserindo diferentes tipos de ruído e alternado a impedância da linha [27]–[30].

Também nesta configuração conseguiu-se receber comunicação sem perdas de pacotes em todos os pontos de acesso, com a taxa esperada. Porém, apenas no ponto 2, isto ocorreu em todas as fases. Nos pontos 3 e 4 não conseguiu-se medir corretamente os sinais provenientes de acoplamento, pois muitos pacotes errados eram descartados pelo modem receptor.

A. Análise Espectral

O acoplamento de sinal nas fases onde o sinal de dados não era injetado estimulou a avaliação do espectro dos sinais propagados na rede elétrica. O aparato experimental utilizado neste experimento é o mostrado na Fig. 10, para o transmissor conectado no ponto 1 e fase C, as chaves S_0 e S_1 abertas, e as chaves S_2 e S_3 fechadas. Um analisador de espectro foi então conectado nos pontos 2, 3 e 4, em vermelho, ilustrados na Fig. 10.

O modem AC-PLM-1 utilizado possui vários parâmetros de configuração que são definidos na sua inicialização pelo micro-controlador. Entre estes existem os parâmetros que designam a frequência central de operação (F_c), a frequência para o bit 1 (F_1) e frequência para o bit 0 (F_0) importantes no estabelecimento da modulação BFSK. Em todos os experimentos realizados, os valores escolhidos foram 142,3 kHz, 143,8 kHz e 145,3 kHz para F_1 , F_c e F_0 , respectivamente.

A Fig. 11(a) mostra os espectros medidos em diferentes fases dos pontos 2, 3 e 4. Observa-se pelas curvas desta Figura que, atenuações na ordem dos 15 dB ocorrem em sinais provenientes do supracitado acoplamento nas frequências de interesse. Mesmo assim, a demodulação não foi comprometida nestas medidas.

Para medições de espectro com a linha energizada, os estados das chaves S_1 , S_2 e S_3 foram mantidos e a chave S_0 foi fechada. A Fig. 11(b) mostra os espectros obtidos nos mesmos pontos das medidas com a linha energizada. Comparando-se os espectros ilustrados nas Fig. 11(a) e 11(b), percebe-se uma

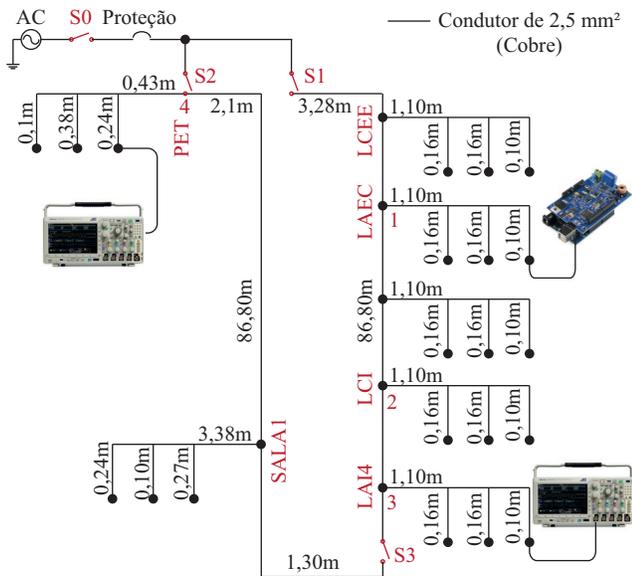


Fig. 10. Aparato experimental usado para a medição dos espectros dos sinais PLC propagados na rede elétrica.

atenuação de 10 dB entre estes. Convém ressaltar que neste cenário a presença de variadas cargas paralelas presentes na rede do edifício usado para fins educacionais (com laboratórios de informática, eletrônica, telecomunicações, entre outros) contribuiu para a incorreta demodulação de sinal nas fases de acoplamento. Desta forma, quando a linha é energizada, não é interessante, em termos de potência e correta demodulação, o acoplamento de fases para transmissão NBPLC, mas sim a injeção do sinal de informação na fase de recepção.

B. Interface Gráfica para o Usuário Final

Para a produção da interface final do protótipo desta tomada inteligente priorizou-se a simplicidade na disponibilização das informações demandadas pelo usuário, mesmo sabendo que estas são atualizadas periodicamente e armazenadas em um banco de dados para consultas futuras. Com ferramentas *open source* do ScadaBR, pôde-se desenvolver um sistema supervisorio completo, com visualização de gráficos, de variáveis e alertas. O acesso ao supervisorio dá-se através de um sistema web server que disponibiliza os dados do processo através da rede. Com isto, os clientes em vez de acessarem os dados através de um *software* instalado em um computador ou *smartphone*, o fazem via *browser* de Internet. O banco de dados utilizado foi o Apache Derby, também *open source*.

A Fig. 12 mostra a interface disponibilizada ao usuário final do SmartPlug. São exibidos potência ativa, tensão, corrente e fator de potência. Os valores destes são atualizados a cada segundo. Além disto exibe-se a energia consumida em Wh, sendo esta a informação mais relevante para o usuário final, pois através deste valor pode ser calculado o consumo em moeda local. Os resultados de potência, corrente, tensão, fator de potência e consumo apresentados na Fig. 12, foram obtidos ao se utilizar um ferro de passar como carga.

Observa-se pela Fig. 12 que, após atingir a temperatura programada na carga ($FP = 1$), esta desliga justificando o degra-

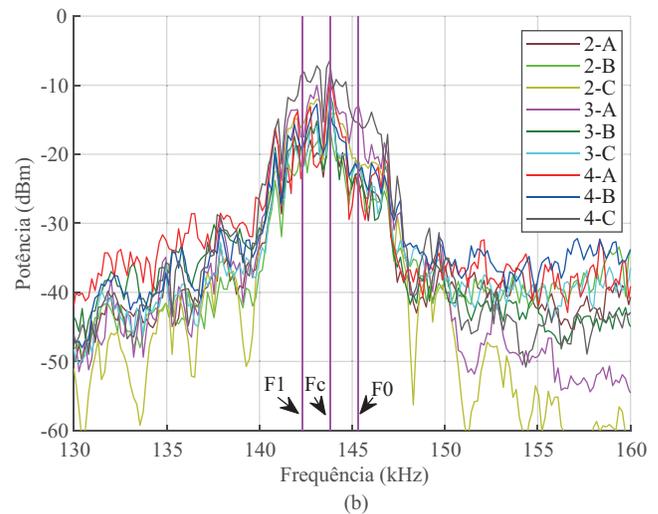
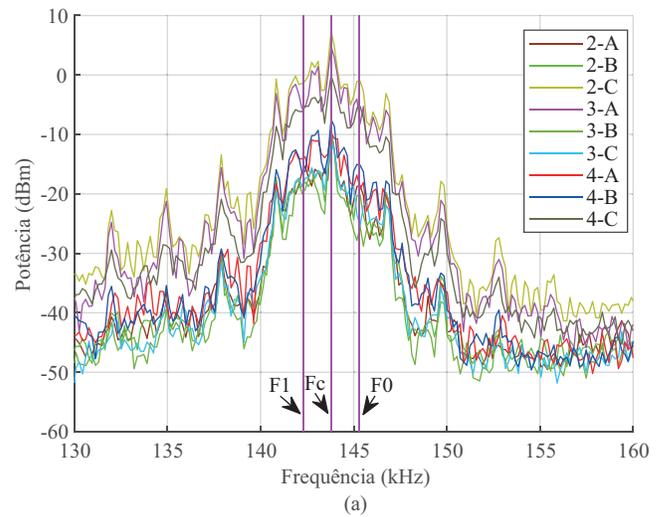


Fig. 11. Espectros dos sinais nos pontos 2, 3 e 4 com (a) a linha desenergizada e (b) a linha energizada.

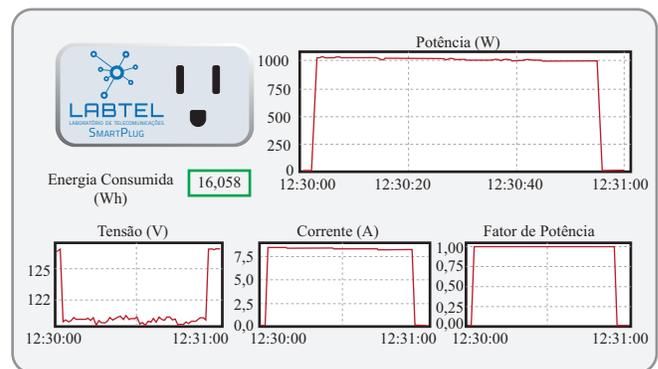


Fig. 12. Interface gráfica disponibilizada ao usuário final do SmartPlug.

de corrente mostrado. O valor de corrente com o afundamento da tensão ilustrado conduzem ao gráfico de potência mostrado e, conseqüentemente, aos 16,058 Wh consumidos.

A Fig. 13 apresenta o esquemático final com todas as partes da “tomada inteligente” integradas. Observa-se que, um computador com ScadaBR conecta-se com o roteador de

forma a, via internet, disponibilizar a interface para toda a rede interna, através de acesso por navegador, bem como para a rede externa ao abrir a porta do roteador para acesso remoto. As Figuras 14(a) e (b) ilustram fotos do experimento físico preparado para as avaliações aqui descritas.

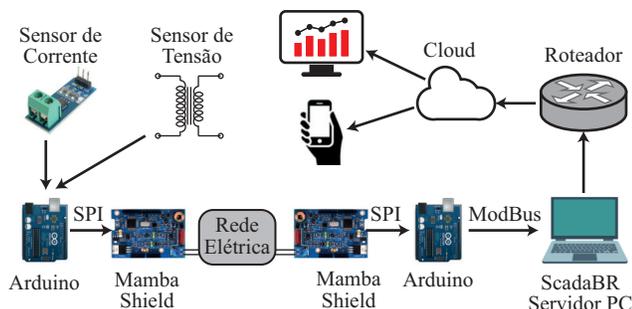
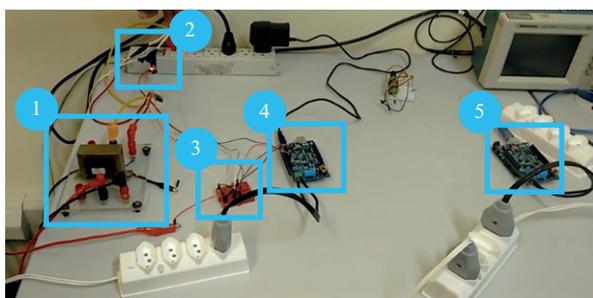
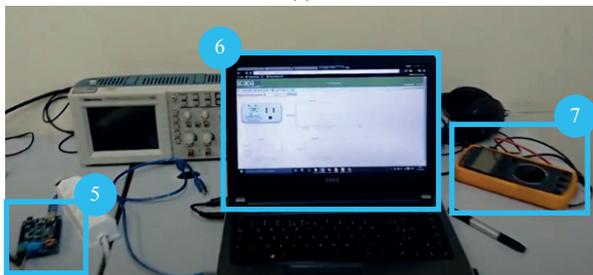


Fig. 13. Esquemático com todas as partes do SmartPlug integradas.



(a)



(b)

Fig. 14. (a) Foto ilustrando o processo de medição e comunicação NBPLC: 1 - Transformador, 2 - Sensor de corrente, 3 - Circuito de Adequação da Tensão ao Arduino, 4 - Arduino com Transmissor NBPLC. 5 - Arduino com Receptor NBPLC. Fig. 14. (b) Foto ilustrando o funcionamento do supervisor: 5 - Arduino com Receptor NBPLC, 6 - Supervisor ScadaBR, 7 - Multímetro usado na Calibração. Um vídeo explicativo do funcionamento do protótipo encontra-se em <https://youtu.be/TrYZLgOW1H4>.

V. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Um protótipo de “tomada inteligente”, denominado Smart-Plug, para monitoramento de consumo em *smart homes* foi apresentado neste artigo. De forma simples e barata, este protótipo é capaz de medir tensão e corrente elétricas, calcular a potência ativa e o fator de potência, e posteriormente mostrar o consumo em uma interface com acesso via servidor de internet.

O diferencial do SmartPlug desenvolvido está no fato deste utilizar-se da própria rede elétrica para a comunicação

dos dados dos sensores, através da tecnologia NBPLC com modulação por chaveamento de frequência FSK. A aplicabilidade do protótipo foi comprovada mediante a transmissão dos dados de consumo em uma rede elétrica de 180 m de comprimento previamente construída para estudos com a tecnologia. A uma taxa de 850 b/s, a comunicação foi exitosa em todos os pontos de acesso estrategicamente escolhidos na rede sem energia, inclusive em fases com acoplamento de sinal, ou seja, naquelas em que não houve injeção de sinal no lado do transmissor. Com a rede energizada, isto ocorreu apenas nas fases onde o sinal foi injetado, sendo que nas com sinal acoplado, pacotes foram perdidos devido às atenuações registradas por medidas de espectro levantadas.

Conclui-se, portanto, que a plataforma de prototipagem Arduino foi plenamente capaz de fazer o processamento de dados dos sensores de tensão e corrente e fornecer os valores de qualidade de energia com precisão aceitável para um consumidor residencial. Para o advento das *Smart Grids*, surge então mais uma alternativa para a popularização de medidores de consumo e parâmetros de qualidade de energia elétrica. Outro princípio fundamental de redes inteligentes é a medição remota, sendo esta realizada com o SmartPlug através da rede elétrica e com uma interface simplificada com a rede local e remota graças ao supervisor ScadaBR.

Como possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- publicação dos dados de medição diretamente na nuvem facilitando os acessos de outros dispositivos e o monitoramento;
- investigar a escalabilidade de medições e recepção destes dados pelo concentrador via protocolo mestre-escravo;
- o desenvolvimento de uma placa única de circuito impresso, utilizando um microcontrolador com um ADC de melhor resolução, sem deixar de avaliar o quesito custo-benefício;
- a fim de garantir a reprodutibilidade do atual trabalho, o *shield* de comunicação AC-PLM-1 da Ariane Controls ou então o *front-end* AFE031 da Texas Instruments podem ser utilizados em uma nova placa de circuito impresso a ser desenvolvida”.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho reconhecem os apoios dos projetos: FAPES 80599230/17, 538/2018, 84343338, 601/2018; CNPq 307757/2016-1, 304564/2016-8, 309823/2018-8; assim como da 2Solve Engenharia e Tecnologia, e NiDA.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Yahyaoui, *Advances in Renewable Energies and Power Technologies: Volume 2: Biomass, Fuel Cells, Geothermal Energies, and Smart Grids*. Elsevier, 2018.
- [2] N. Komninos, E. Philippou, and A. Pitsillides, “Survey in smart grid and smart home security: Issues, challenges and countermeasures,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 4, pp. 1933–1954, 2014.
- [3] M. R. Alam, M. B. I. Reaz, and M. A. M. Ali, “A review of smart homes—past, present, and future,” *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, part C (applications and reviews)*, vol. 42, no. 6, pp. 1190–1203, 2012.
- [4] V. Biagini, M. Subasic, A. Oudalov, and J. Kreusel, “The autonomous grid: Automation, intelligence and the future of power systems,” *Energy Research & Social Science*, vol. 65, p. 101460, 2020.

- [5] J. T. Flores, W. C. Celeste, D. J. C. Coura, S. das Dores Rissino, H. R. O. Rocha, and R. E. N. Moraes, "Demand planning in smart homes," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 7, pp. 3247–3255, 2016.
- [6] E. Khoudry, A. Belfqih, J. Boukherouaa, F. Elmariami, and B. Abdelmajid, "An overview of smart grid communication networks technologies, protocols and challenges," in *Proceedings of the 2nd International Conference on Networking, Information Systems & Security*, 2019, pp. 1–8.
- [7] M. Salaheldin, A. Faqeeh, M. Faqeeh, A. Awad, and I. Tumar, "Exploring the integration of lora and wi-fi technologies for smart grid applications," in *Dortmund International Research Conference 2019*, p. 113.
- [8] J. Yamini and Y. R. Babu, "Design and implementation of smart home energy management system," in *2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*. IEEE, 2016, pp. 1–4.
- [9] L. T. Berger, A. Schwager, and J. J. Escudero-Garzás, "Power line communications for smart grid applications," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2013, p. 3, 2013.
- [10] G. Lopez, J. Matanza, D. De La Vega, M. Castro, A. Arrinda, J. I. Moreno, and A. Sendin, "The role of power line communications in the smart grid revisited: Applications, challenges, and research initiatives," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117346–117368, 2019.
- [11] L. R. Castor, R. Natale, J. P. Favero, J. A. Silva, and M. E. Segatto, "The smart grid concept in oil & gas industries by a field trial of data communication in mv power lines," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 15, no. 2, pp. 81–92, 2016.
- [12] I. S. Association *et al.*, "P1901. 2/d0. 09.00 standard for low frequency (less than 500 khz) narrow band power line communications for smart grid applications," 2013.
- [13] T. S. Andjamba, G.-A. L. Zodi, and D. S. Jat, "Interference analysis of ieee 802.11 wireless networks: A case study of namibia university of science and technology," in *2016 International Conference on ICT in Business Industry & Government (ICTBIG)*. IEEE, 2016, pp. 1–5.
- [14] D. B. Avancini, J. J. Rodrigues, S. G. Martins, R. A. Rabêlo, J. Al-Muhtadi, and P. Solic, "Energy meters evolution in smart grids: A review," *Journal of cleaner production*, vol. 217, pp. 702–715, 2019.
- [15] J. Han, J.-D. Jeong, I. Lee, and S.-H. Kim, "Low-cost monitoring of photovoltaic systems at panel level in residential homes based on power line communication," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 63, no. 4, pp. 435–441, 2017.
- [16] C. Selvam, S. Ramakrishnan *et al.*, "Implementation and testing of power line communication network for lamp control application," in *2014 IEEE International Conference on Advanced Communications, Control and Computing Technologies*. IEEE, 2014, pp. 974–978.
- [17] Y.-J. Lin, H. A. Latchman, M. Lee, and S. Katar, "A power line communication network infrastructure for the smart home," *IEEE wireless communications*, vol. 9, no. 6, pp. 104–111, 2002.
- [18] K. P. P. M. and B. E., "Smart home: Energy measurement and analysis," in *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, 2020, pp. 1–5.
- [19] S. Yildiz and M. Burunkaya, "Web based smart meter for general purpose smart home systems with esp8266," in *2019 3rd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [20] G. Spasov, M. Kutseva, G. Petrova, and V. Tsvetkov, "A smart solution for electrical power monitoring based on mcp39f501 sensor," in *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET)*. IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [21] J. Han, C.-S. Choi, W.-K. Park, I. Lee, and S.-H. Kim, "Smart home energy management system including renewable energy based on zigbee and plc," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 60, no. 2, pp. 198–202, 2014.
- [22] N. Tamkittikhun, T. Tantidham, and P. Intakot, "Ac power meter design based on arduino: Multichannel single-phase approach," in *2015 International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.
- [23] J. W. Nilsson, *Electric circuits*. Pearson Education India, 2008.
- [24] L. T. Berger, A. Schwager, P. Pagani, and D. Schneider, *MIMO power line communications: narrow and broadband standards, EMC, and advanced processing*. CRC Press, 2014.
- [25] R. Roshanravan, "Real-time air monitoring system," 2013.
- [26] J. Silva, "Análise de desempenho de um sistema cofdm para comunicação via rede elétrica," Master's thesis, Universidade Federal do Espírito Santo, 2006.
- [27] R. M. Vines, H. J. Trissell, L. J. Gale, and J. B. O'neal, "Noise on residential power distribution circuits," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, no. 4, pp. 161–168, 1984.
- [28] Z. Jie, Y. Xiao, and Q. Kaiyu, "Research on characteristics of low voltage power line communication channel," in *2012 Power Engineering and Automation Conference*. IEEE, 2012, pp. 1–5.
- [29] H. Tian, R. Yuan, F. Li, Z. Huang, S. Wang, S. Li, and K. Zhong, "Measurement on narrow band power line communication channel impedance of distribution network," in *2011 International Conference on Consumer Electronics, Communications and Networks (CECNet)*. IEEE, 2011, pp. 454–457.
- [30] J. A. Malack and J. R. Engstrom, "Rf impedance of united states and european power lines," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, no. 1, pp. 36–38, 1976.



Telecomunicações (LabTel).

Wesley da Silva Costa é doutorando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFES com ênfase em Telecomunicações e Sistemas de Energia. Foi professor e coordenador de Física no PECS, projeto de extensão da UFES que oferece pré-vestibular gratuito à comunidade. Foi professor de ensino técnico por seis anos e bolsista de iniciação científica, sob fomento da UFES, onde estudou a implementação de sistemas multiportadoras OFDM em equipamentos no Laboratório de



Participou do programa de intercâmbio Branetec, em 2015, onde estudou o tema Advanced Sensor Applications in Hanze University of Applied Sciences (Holanda).

Willian Garcia Viega dos Santos é mestrando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFES com ênfase em Telecomunicações e Sistemas de Energia. Foi professor e coordenador de Física no PECS, projeto de extensão da UFES que oferece pré-vestibular gratuito à comunidade. Foi bolsista de iniciação científica do Laboratório de Telecomunicações da UFES (LabTel), onde estudou a modelagem do canal para comunicação de dados via rede elétrica.



pelo CEDERJ, professor no Instituto Federal do Espírito Santo e do Departamento de Computação e Eletrônica do CEUNES/UFES. Realizou pesquisa no âmbito do programa Pós-Doutorado da CAPES na UFES. Ocupa atualmente o cargo de Professor Classe C - Adjunto II do Departamento de Engenharia Elétrica da UFES. É bolsista de Produtividade PQ2.

Helder Roberto de Oliveira Rocha possui Doutorado e Mestrado em Computação Científica e Sistemas de Potência - UFF, Especialização em Administração e Negócios - UCAM, Bacharelado em Administração - UFRRJ e Graduação em Engenharia Elétrica - UFF. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: Estimação de Estado, Metaheurísticas, Sistema de Potência e Telecomunicações. Foi Tutor Presencial no curso de Tecnologia de Sistemas de Computação oferecido



Marcelo Eduardo Vieira Segatto possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (1991), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1994) e doutorado em Física - Imperial College of Science Technology and Medicine (2001). Trabalhou como pesquisador na British Telecom e posteriormente na Corning entre os anos de 1998 e 2001. Fez um estágio pós-doutoral no INESC-Porto em Portugal. Desenvolve pesquisas em parceria com diversas empresas nacionais e com diversos grupos

de pesquisa no Brasil e no exterior nas áreas de telecomunicações, projeto e análise de desempenho de redes ópticas de acesso e de transporte, sistemas e dispositivos para comunicações ópticas, comunicação por rede redes elétricas de baixa e média tensões e mais recentemente em redes de sensores sem fios. Atualmente é professor associado da Universidade Federal do Espírito Santo. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Telecomunicações, atuando principalmente nos seguintes temas: telecomunicações, comunicações ópticas, redes ópticas, eletromagnetismo aplicado e dispositivos ópticos.



Jair Adriano Lima Silva possui graduação, Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), no Laboratório de Telecomunicações (LabTel) da UFES. Fez parte do quadro permanente do curso de Engenharia Eletrotécnica do Instituto Federal do Espírito Santo (IFES). É Professor Adjunto do curso de Engenharia Elétrica da UFES desde Fevereiro de 2012. No grupo de pesquisas em Telecomunicações da UFES sediado no LabTel realiza investigações relacionadas aos Sistemas de Telecomunicações,

com ênfase em Sistemas Multiportadoras OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) aplicados às comunicações ópticas de longo alcance O-OFDM (Optical OFDM), às redes ópticas passivas PON (Passive Optical Networks), às Comunicações sem Fio na Tecnologia Rádio sobre Fibra, e às comunicações via Rede de Distribuição de Energia Elétrica PLC (Power Line Communications) de baixa e média tensões.