

REDE DE SENSORES PARA MONITORAMENTO E GERENCIAMENTO DE CARGAS RESIDENCIAIS COM INTERFACE PARA INTERNET

HADER A. D. AZZINI, LUIZ C. P. SILVA

*Departamento de Sistemas e Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Estadual de Campinas
DSE/FEEC/UNICAMP, Cidade Universitária, CEP 13081970, Campinas, SP, Brasil
E-mails: hader@dsee.fee.unicamp.br, lcpdsilva@gmail.com*

OMAR C. BRANQUINHO, FRANK H. BEHRENS

*Faculdade de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Campinas,
Rodovia Dom Pedro I km 136, Parque das Universidades
Caixa-postal 317, CEP 13086900, Campinas, SP, Brasil
E-mails: omar.branquinho@gmail.com, frankbehrens59@hotmail.com*

Abstract— This paper presents a wireless sensor network as base to the development of a new system for monitoring and managing residential electrical loads. The system aims at compromise between accuracy and intrusiveness. The basic idea is to combine the best features of two types of monitoring, Intrusive and Non-Intrusive, and provide information to the consumer, who can set preferences for the operation of appliances. The sensor network consists of a meter in the main branch of the residence and 10 current sensors connected to the outlets where the appliances are hooked up. The measurements are automatically available online which facilitates access to data. At a rate of one sample of current per second for each sensor, the network is able to properly monitor more than 75% of the time of run of appliances, which would be more than sufficient for the proposed system.

Keywords— Nonintrusive Load Monitoring, Smart Meter, Wireless Sensor Network, Monitoring and Management of Residential Electrical Loads

Resumo— Este artigo apresenta uma rede de sensores como base para o desenvolvimento de um novo sistema para monitoramento e gerenciamento de cargas elétricas residenciais. O novo sistema busca uma relação de compromisso entre intrusividade e precisão. A ideia básica é unir as melhores características de dois tipos de monitoramento, Intrusivo e Não Intrusivo, e disponibilizar as informações ao consumidor para que possa configurar suas preferências de funcionamento dos eletrodomésticos. A união destas duas abordagens visa reduzir custos sem ter danos à precisão. A rede de sensores é composta por um medidor no ramal principal da residência e 10 sensores de corrente conectados nas tomadas dos eletrodomésticos. As medidas são automaticamente disponibilizadas *on-line* o que facilita o acesso aos dados. Produzindo uma amostra de corrente por segundo para cada sensor, a rede é capaz de monitorar adequadamente mais de 75% do tempo de funcionamento dos eletrodomésticos, o que seria mais do que suficiente para o sistema proposto.

Palavras-chave — Monitoramento Não Intrusivo, Smart Meter, Rede de Sensores, Monitoramento e Gerenciamento de Consumo Residencial

1 Introdução

As opções disponíveis para um consumidor residencial que deseje controlar e diminuir seu consumo de eletricidade são um tanto limitantes. As opções variam desde a abordagem intuitiva de simplesmente diminuir a utilização dos eletrodomésticos à instalação de sensores em cada um deles. Entretanto, todas apresentam aspectos restritivos, que na maioria das vezes impedem uma economia racional e efetiva. A abordagem intuitiva de simplesmente reduzir o uso, pode trazer implicações negativas, tais como a perda desnecessária de conforto, seja ele térmico, luminoso ou relativo a praticidade oriunda do uso de certos eletrodomésticos. Enquanto, no outro extremo, o monitoramento individualizado pode necessitar de um investimento muito maior do que o retorno financeiro eventualmente alcançado com o monitoramento e gerenciamento das cargas. Certamente informações mais detalhadas serão úteis para os consumidores

residenciais que usem a tarifa convencional (fixa), porém, serão fundamentais para os que optarem pela modalidade tarifária branca. Tal modalidade, aprovada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em 22 de novembro de 2011, será uma alternativa à convencional, hoje em vigor, e oferecerá três diferentes patamares para a tarifa de energia, de acordo com os horários de consumo (ANEEL 2011). Ou seja, o consumidor residencial deverá saber não somente quanto cada eletrodoméstico consome, mas também quando. A Tarifa Branca ainda não entrou em vigor devido a entraves relativos a certificação dos medidores digitais junto ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) (ReclameAqui 2016).

Portanto, fica clara a necessidade de um sistema de monitoramento que forneça informações adequadas e convenientemente organizadas, porém com um custo reduzido aos consumidores. A abordagem tradicional de instalar um sensor em cada uma das cargas, devido ao fato de requerer acesso físico a cada

uma e, conseqüentemente entrada na residência, é chamada de Monitoramento Intrusivo. Depois de efetuadas as medidas, os dados armazenados em cada sensor são descarregados em um computador onde um software os organiza e os exibe. Os sistemas de monitoramento tradicionais geralmente apresentam uma estrutura de hardware mais complexa e um software mais simples (Hart 1992). Um sistema de Monitoramento Intrusivo, desde que seja bem projetado, obtém medidas bem precisas e detalhadas sobre o uso de energia na residência.

Em contraste com o Monitoramento Intrusivo de cargas existe o Monitoramento Não intrusivo. Este tem como objetivo básico determinar o consumo individual de cada carga sem ter acesso físico a cada equipamento. Isto é feito a partir da análise detalhada da tensão e da corrente na interface com a fonte de energia elétrica que alimenta a instalação elétrica. As formas de onda da corrente e da tensão no ramal principal são registradas e analisadas. Tal análise das formas de onda da carga total gera estimativas do consumo individual das cargas e outras estatísticas. Esta análise consiste em encontrar características elétricas específicas, comumente chamadas de assinaturas, que permitam identificar qual carga ligou ou desligou num determinado instante. É importante destacar que o termo “não intrusivo” está relacionado à ausência de acesso físico ao interior da instalação elétrica e, conseqüentemente, a cada uma das cargas (Hart 1992). A Figura 1 ilustra as duas abordagens de monitoramento.

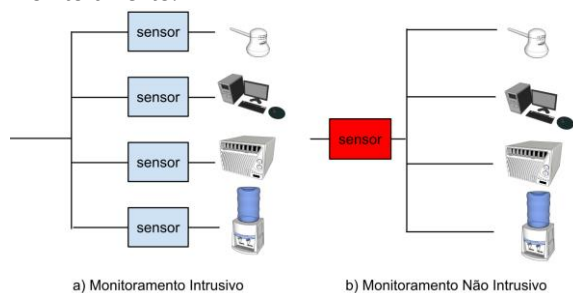


Figura 1 Estruturas dos sistemas de monitoramento

Na abordagem não intrusiva apenas um sensor é colocado no ramal principal. Contudo o software que efetua a análise dos dados, a fim de desagregar as informações de cada carga, é bem complexo. Alguns softwares são baseados em ferramentas de reconhecimento de padrões (Farinaccio & Zmeureanu 1999) e técnicas de inteligência artificial. A reversão de balanço entre hardware e software pode ser vista como um benefício dependendo da aplicação, pois ela permite a redução de custo com sensores. Um sistema de Monitoramento Não Intrusivo, geralmente tem precisão inferior a um sistema de Monitoramento Intrusivo, contudo, o seu grau de imprecisão pode ser tolerado em algumas situações.

Os pontos apresentados acima evidenciam que as duas abordagens de monitoramento apresentam vantagens e desvantagens, de forma que o contexto em que são aplicadas direciona qual deve ser escolhida.

O presente projeto de pesquisa propõe uma nova estrutura de monitoramento, que busca unir os melhores aspectos de ambas as abordagens, buscando reduzir o custo do sistema de monitoramento e propiciar o gerenciamento automatizado do uso dos eletrodomésticos. Para se efetuar tal análise será montado o sistema de monitoramento exibido na Figura 2.

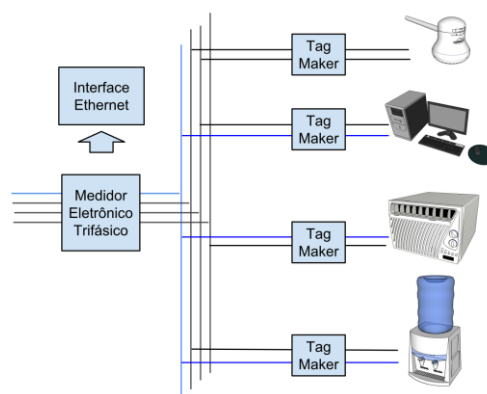


Figura 2 Sistema de Monitoramento Proposto

Um equipamento, batizado de *Tag Maker*, irá monitorar a corrente do eletrodoméstico ao qual estará conectado a fim de determinar quando este ligou ou desligou. Quando o *Tag Maker* detectar um ligar/desligar ele irá gerar um código identificando que tal eletrodoméstico ligou. O código será transmitido para o Medidor Principal que estará conectado no ramal principal da instalação elétrica. Uma vez que o *Tag Maker* irá apenas monitorar a corrente, ele poderá ser simples e de baixo custo, pois não será necessária uma grande memória e nem uma medição de corrente muito precisa. A capacidade de armazenamento e processamento de dados estará concentrada no Medidor Principal. Neste equipamento serão executados algoritmos de Monitoramento Não Intrusivo, os quais farão a determinação do consumo individual de cada carga. É importante perceber que com a posse dos códigos enviados pelos *Tag Maker* o Medidor Principal poderá obter resultados muito mais precisos na execução dos algoritmos de Monitoramento Não Intrusivo.

Contudo, o foco do novo sistema proposto não está limitado ao monitoramento. Uma vez, que se tem um equipamento computacionalmente potente, o Medidor Principal, e vários elementos próximos aos eletrodomésticos, os *Tag Makers*, fica viabilizado o gerenciamento automatizado das cargas. O Medidor principal, valendo-se das informações obtidas no monitoramento e das preferências do usuário, previamente configuradas, tomará decisões de qual eletrodoméstico deve ser ligado ou não para atingir metas de consumo estabelecidas. O usuário usará a internet, através de computadores e dispositivos móveis, tais como smartphones e tablets, para definir quais são as metas de consumo e quais são suas preferências de uso dos eletrodomésticos (tais como uma lista de prioridades para desligamento, limite máximo de uso de um determinado eletrodoméstico, etc.). Após o

Medidor Principal definir qual eletrodoméstico deve ser desligado ele enviará uma mensagem ao *Tag Maker* que se valendo de um relé eletromagnético interromperá o funcionamento do eletrodoméstico desejado.

Este artigo foca-se no desenvolvimento de *hardware* para este sistema de monitoramento, ou seja, na rede de sensores. A Seção 2 deste artigo descreve a rede de sensores, detalhando a composição dos sensores e o funcionamento da rede. A Seção 3 descreve os testes preliminares feitos, destacando os pontos que ainda precisam de aperfeiçoamento. A Seção 4 apresenta as conclusões e discute trabalhos futuros.

2 A rede de sensores

O Sistema de Monitoramento tem como infraestrutura básica uma rede de sensores, composta por um medidor no ramal principal da residência e 10 *Tag Makers* conectados nas tomadas dos eletrodomésticos. Uma característica do projeto é encontrar soluções de *hardware* de baixo custo, principalmente nas medidas de corrente, tensão e harmônicas. O desenvolvimento foi bastante desafiador, uma vez que esta solução não existia e a rede foi desenvolvida para atender especificamente as necessidades do projeto. Isto significa desenvolvimento do *hardware*, *firmware* e *software*. Os componentes do *hardware* do projeto são:

- 10 *Tag Makers* – nós sensores para medida da corrente dos equipamentos e com relé para controle da carga;
- 1 *Gateway* – para conexão dos dados à Internet;
- 1 Medidor Principal – com capacidade de medir corrente, tensão, fator de potência e componentes harmônicas.

A Figura 3 apresenta o diagrama em blocos do sistema.

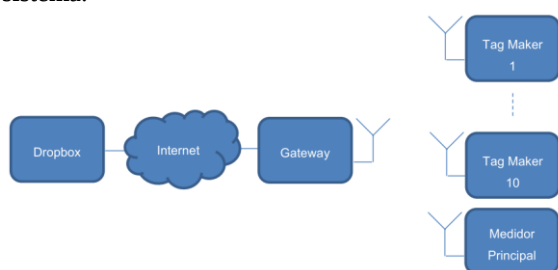


Figura 3 Diagrama de Blocos da Rede de Sensores.

O funcionamento do sistema é centralizado no *Gateway* que faz a solicitação das informações para os *Tag Makers* e para o medidor principal. A disciplina de solicitação das informações medidas é pela técnica *polling*. Ou seja, sequencialmente o *Gateway* solicita a cada elemento da rede as informações fechando um ciclo completo em um certo período de

tempo. Enquanto cada dispositivo sensor envia suas informações os outros sensores continuam realizando as medidas. O pacote enviado para os nós sensores é composto de 52 bytes e contém o endereço do nó sensor. Cada sensor envia as medidas realizadas na sequência, que também utiliza um pacote de 52 bytes.

O medidor principal emula 4 sensores e como o tempo de varredura é de 1 segundo entre sensores, chegou-se ao valor de 14 segundos para a varredura dos 14 sensores. Assim, os sensores realizam as medidas continuamente e respondem à solicitação do *Gateway* a cada 14 segundos. Portanto, cada *Tag Maker* mede a corrente a cada 1 segundo e envia 14 medidas quando solicitado. O mesmo acontece com o medidor principal. Embora o foco do sistema de monitoramento seja usar apenas as mensagens do *Tag Maker* informando quando aconteceram eventos de liga e desliga dos eletrodomésticos, para fins de validação é necessário que estes também efetuem medidas da corrente nesta etapa de pesquisa científica. Em uma implementação comercial não seria necessário o envio das amostras de corrente, apenas os eventos. O *Gateway* armazena as medidas em um arquivo com extensão *.txt*. As medidas são armazenadas em arquivos que se fecham a cada hora e são enviados para a Internet, sendo armazenadas em nuvem.

O elemento chave para construção da rede é o módulo rádio BE990 projetado e produzido pela empresa Radioit. Com características únicas no mercado brasileiro, este módulo é composto por um microcontrolador e um transceptor operando na frequência de 915 MHz. Um aspecto importante a ser mencionado é que este módulo é homologado pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), sendo o único módulo produzido no Brasil com estas características. A Figura 4 mostra uma foto do módulo BE990.

Adicionalmente a Radioit desenvolveu uma plataforma para desenvolvimento de *firmware* para prototipagem rápida denominada Radiuino, a qual foi registrada no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI). Graças ao desenvolvimento do próprio módulo rádio e da plataforma Radiuino foi possível o desenvolvimento da rede de sensores sem fio para atender as especificações do projeto.

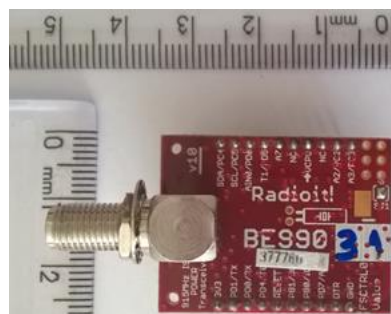


Figura 4 O módulo rádio BE990.

2.1 O Tag Maker

O *Tag Maker* é composto das seguintes partes: Módulo rádio BE990, Placa com relé para ligar e desligar o eletrodoméstico, soquete para o BE990, bornes de alimentação e para conexão do transformador de corrente, Fonte, Transformador de corrente e caixa com tomada. A Figura 5 apresenta a foto de um *Tag Maker*. Como pode ser visto na Tabela 1 alguns *Tag Makers* também tem a funcionalidade de medir temperatura, isso foi planejado visando futuros estudos sobre eletrodomésticos de refrigeração ou aquecimento.



Figura 5 Constituição interna do Tag Maker.

2.2 O Gateway

A Figura 6 apresenta uma foto que mostra o *Gateway*. Composto de um minicomputador e uma placa para conexão do rádio BE990. Esta entidade da rede possui a função de fazer a interface entre a rede de sensores sem fio e a Internet. O *Gateway* não estava previsto no projeto inicial e foi uma sugestão da empresa Radioit, o que deu maior flexibilidade ao sistema. Como pode ser observado na Figura 6, o *Gateway* possui um minicomputador ligado à Internet e uma placa de adaptação onde é acoplado o módulo BE990. Este *Gateway* é autônomo, e ao ser inicializado começa a varredura dos nós sensores.



Figura 6 Constituição interna do Gateway.

2.3 O Medidor Principal

O medidor principal é capaz de medir: corrente, tensão, distorção harmônica (até 15ª harmônica) e fator de potência. O medidor principal é composto por uma placa de adaptação que ajusta os níveis de tensão dos transformadores de tensão e dos transformadores de corrente. A saída da placa de ajuste está ligada no *shield* que faz a adaptação dos sinais com

um microcontrolador e também possui o soquete para acoplamento do módulo BE990. A Figura 7 apresenta o medidor principal.

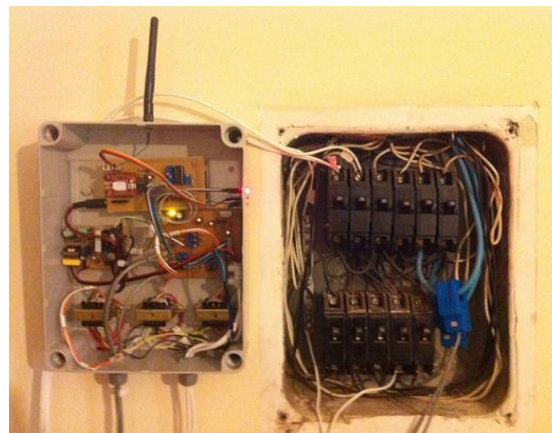


Figura 7 O medidor do ramal principal.

3 Testes Preliminares

A rede foi instalada em uma residência bifásica e estão sendo monitorados os equipamentos listados na Tabela 1. Embora a rede continue medindo até o presente momento (junho, 2016), para facilitar a visualização dos dados, este artigo apresenta as medidas de um intervalo de 4 dias, das 00:00 do dia 02 de maio até às 23:59 do dia 05. A Figura 8 apresenta a corrente para o Sensor 1. Aparentemente a máquina de lavar roupas tem consumido energia perto da meia noite, a não ser que a máquina esteja programada para tal, isso pode estar indicando algum problema no sensor.

Tabela 1 Lista de Instalação dos Sensores

Sensor	Local / Equipamentos Monitorados		
Tag Maker 01	Máquina de lavar roupas		
Tag Maker 02	Forno Micro-ondas		
Tag Maker 03	Cafeteira/Liquidificador		
Tag Maker 04	DVR/Modem/roteador/Notebook		
Tag Maker 05*	Bomba piscina		
Tag Maker 06*	TV/NET/X- BOX		
Tag Maker 07*	Geladeira		
Tag Maker 08	Aquecedor piscina		
Tag Maker 09	Ar condicionado		
Tag Maker 10	Boiler		
Medidor** Principal	11	Ramal Principal	Corrente
	12		Tensão
	13		Distorção Harmônica Total de Corrente
	14		Fator de Potência

*Sensores que incluem medição de temperatura.

**Como o Medidor Principal emula 4 sensores, por conveniência especificou-se na tabela as variáveis que cada sensor emulado monitora.

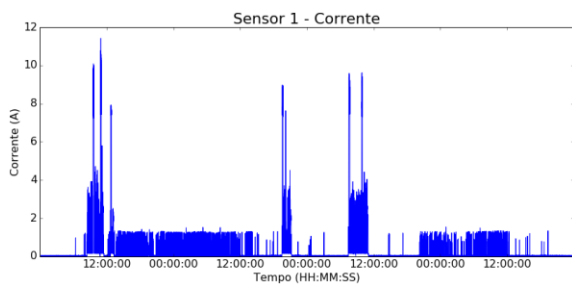


Figura 8 Corrente para o Sensor 1 instalado na Máquina de Lavar

3.1 Perdas de medidas

Para verificar se aconteceram perdas de pacotes na comunicação da rede de sensores e, assim consequentemente perdas de medidas, foram analisados os rótulos de tempo de cada uma das amostras de cada um dos sensores. Para a variável de corrente considerou-se que um intervalo de tempo maior do que 10 segundos entre duas amostras consecutivas implica em perda de pacotes. Para o Sensor 1 o número total de intervalos foi 2844, sendo o maior deles com duração igual a 00:06:21.8. A Figura 9 apresenta um histograma dos intervalos sem medições. Como é possível perceber, ocorreram mais de 2000 intervalos com duração aproximada de 25s. O tempo total acumulado dos intervalos de medição foi 24:22:59.0, o que representa 25.4% dos 4 dias de medições. Mesmo o tempo total perdido seja grande o tamanho médio que o sensor fica sem enviar medidas é pequeno, o que deve permitir a identificação de um evento sem grandes problemas.

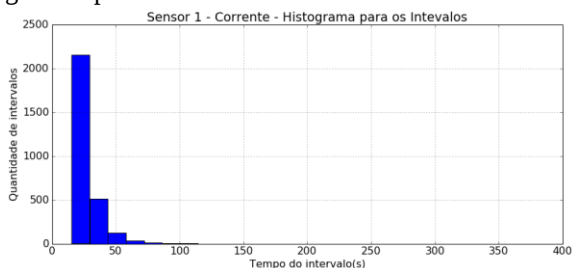


Figura 9 Histograma dos Intervalos nas Medições do Sensor 1 de acordo com o tempo de duração.

Foram calculadas as mesmas métricas relativas a perda de medidas para os demais sensores. As Figuras de 10 a 13 apresentam um resumo das métricas por sensor. Na Figura 10 é possível perceber que o Sensor 1 teve muito mais intervalos nas medidas do que os demais sensores. Entretanto, a Figura 12 mostra que o Sensor 6 perdeu mais medidas por ter ficado em um único intervalo 1 dia e 06:01:40.9 sem enviar qualquer medida. Falta verificar se tamanho intervalo é relativo a algum problema no sensor ou se este foi acidentalmente desligado. É importante destacar que com exceção dos sensores 1, 4, 5 e 6 os demais funcionam de forma excelente perdendo no máximo 3.37% do tempo de medição.

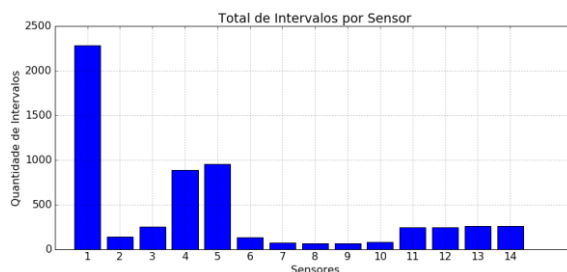


Figura 10 Total de intervalos sem medidas por sensor

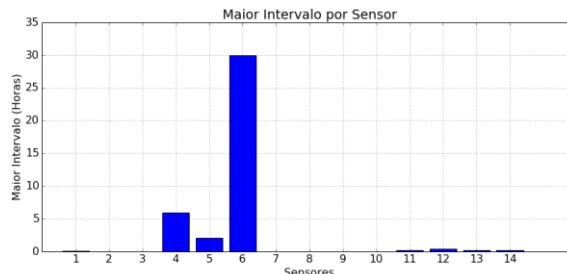


Figura 11 Maior intervalo sem medidas de cada sensor

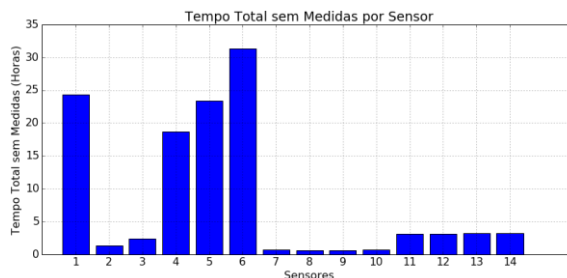


Figura 12 Tempo total sem medidas por sensor

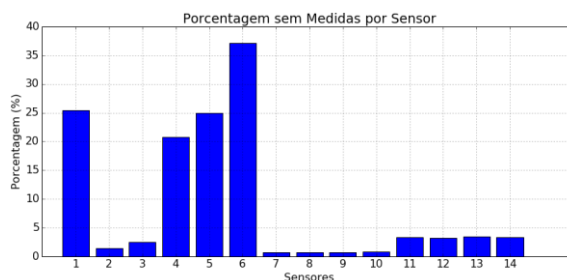


Figura 13 Porcentagem do tempo de medição que não apresenta amostras

3.2 Outliers

As medições têm apresentado alguns *outliers* que sugerem algum problema na amostragem ou no armazenamento da amostra. Por exemplo, Figura 14 apresenta picos na temperatura durante intervalos muito pequenos, o que seria termicamente impossível. A Tabela 2 apresenta um segmento da sequência de amostras da temperatura para o Sensor 7. Aparentemente o erro está na colocação do ponto decimal no armazenamento da amostra. As medições de Tensão também apresentam *outliers*, como mostra a Figura 15. Os picos de tensão são fisicamente mais prováveis do que os picos térmicos. Contudo, os valores dos picos se mostram muito altos, o que poderia ter causado danos a vários equipamentos. Como aparentemente não se teve notícia de nenhum equipa-

mento danificado, permanece a dúvida se os picos são reais ou são erros de medições. É mais provável que sejam erros nas medições. Vale esclarecer que a fase T permanece sempre em zero porque a casa monitorada é bifásica.

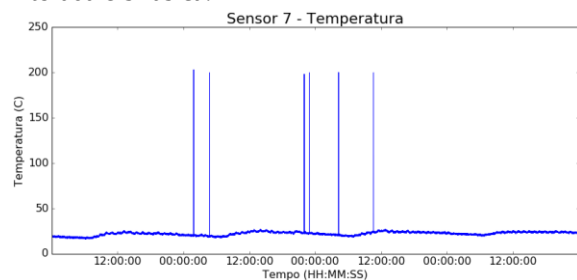


Figura 14 Temperatura amostrada pelo Sensor 7, para a Geladeira

Tabela 2 Sequência de Amostras de Temperatura para a Geladeira

Horário	Temperatura
2016-05-03 01:52:01.188470	20.803499
2016-05-03 01:52:15.476007	19.826900
2016-05-03 01:52:30.468574	202.939407
2016-05-03 01:52:44.731498	19.338600
2016-05-03 01:52:59.966782	20.315201

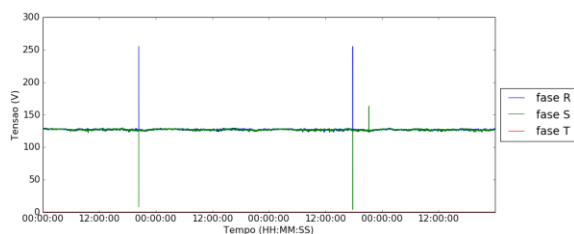


Figura 15 Tensão das fases

4 Conclusão

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma rede de sensores visando um sistema de monitoramento que forneça informações adequadas e convenientemente organizadas, porém com um custo reduzido aos consumidores. A rede consegue monitorar as dez principais cargas de uma residência e a temperatura de alguns sensores. Com exceção do Sensor 6 os demais sensores conseguem apresentar as medidas de mais de 75% do tempo das medidas, como o objetivo do sistema de monitoramento é reconhecer apenas os eventos referente ao funcionamento das cargas esse valor será mais que suficiente. Entretanto, a rede tem apresentado *outliers* e a medição do fator de potência ainda não está adequada.

A rede está em processo de aperfeiçoamento e nos próximos dias os problemas apresentados devem ser revistos. Em trabalhos futuros os *Tag Makers* serão mais simplificados para apenas detectar o funcionamento, buscando minimizar o seu custo. Os dados do monitoramento devem ser disponibilizado de forma pública e um conversor de dados para que

seja possível o uso no *Non Intrusive Load Monitoring Toolkit* (NILMTK) (Batra et al. 2014). O NILMTK é um conjunto de ferramentas de código aberto especificamente concebido para permitir a comparação de algoritmos de desagregação de carga de uma forma reproduzível em vários conjuntos de dados disponíveis publicamente.

Agradecimentos

Agradecimentos a Fundação de Amparo à Pesquisa – FAPESP pelo apoio financeiro a este trabalho. As opiniões, hipóteses e conclusões ou recomendações expressas neste material são de responsabilidade dos autores e não necessariamente refletem a visão da FAPESP.

Referências Bibliográficas

- ANEEL, 2011. Tarifa branca ao consumidor de baixa tensão valerá com novo medidor. Available at: http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=4921&id_area=90.
- Batra, N. et al., 2014. NILMTK: An open source toolkit for non-intrusive load monitoring. In *Proceedings of the 5th international conference on Future energy systems*. ACM, pp. 265–276.
- Farinaccio, L. & Zmeureanu, R., 1999. Using a pattern recognition approach to disaggregate the total electricity consumption in a house into the major end-uses. *Energy and Buildings*, 30(3), pp.245–259.
- Hart, G.W., 1992. Nonintrusive appliance load monitoring. *Proceedings of the IEEE*, 80(12), pp.1870–1891.
- ReclameAqui, 2016. Tarifa branca: a boa opção para economizar na conta de luz que não saiu do papel. Available at: http://noticias.reclameaqui.com.br/noticias/tarifa-branca-a-boa-opcao-para-economizar-na-conta-de-luz-qu_2050/.