

SISTEMA REMOTO MICROCONTROLADO DE BAIXO CUSTO PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, CONSUMO DE EQUIPAMENTOS E DISTÚRBIOS NA REDE UTILIZANDO TECNOLOGIAS IOT

IRAN MACEDO B. NETO*, MARIA ALICE DE MELO SOUSA*, DIEGO R. C. SILVA*, MARCELO B. NOGUEIRA*, MARCONI C. RODRIGUES*

**Escola de Ciências & Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Natal 59078-275, Rio Grande do Norte - Brasil*

Emails: iranmacedo@bct.ect.ufrn.br, alice.melosousa@gmail.com, diego@ect.ufrn.br, marcelonogueira@ect.ufrn.br, marconicamara@ect.ufrn.br

Abstract— Although Brazil is abundant in rivers, and it allows the development of hydroelectric power production on a large scale, the growing demand for electricity in all sectors of society produces a need for observation in which ways we use it and the impact that the devices cause on the network. Thus, this article proposes a low-cost microcontrolled system with real-time monitoring and analysis of the electric current consumption and its Total Harmonic Distortion Index (THD_i) required by a device in its states using IoT architecture.

Keywords— THD, Internet of Things, low cost automation, Monitoring remote system, Smart Meter.

Resumo— Embora o Brasil seja abundante em rios e isso permita o desenvolvimento da produção de energia hidroelétrica em larga escala, a crescente demanda de eletricidade em todos os setores da sociedade produz a necessidade de observação nas maneiras em que a utilizamos e o impacto que os aparelhos causam na rede. Sabendo disso, esse artigo propõe um sistema microcontrolado de baixo custo para o monitoramento e análise, em tempo real, do consumo de corrente elétrica e seu índice de Distorção Harmônica Total (DHT_i) requisitado por um dispositivo em seus estados de funcionamento utilizando arquitetura IoT.

Palavras-chave— DHT, Internet das coisas, Automação de baixo custo, Sistema remoto de monitoramento, Medição inteligente.

1 Introdução

Desde os primórdios, inovações nas tecnologias utilizadas pelo homem buscam tornar as atividades realizadas no cotidiano muito mais simples e otimizadas. No cenário hoje vivenciado, as técnicas provenientes da Indústria 4.0, tecnologias inteligentes e interligadas e que vão muito além da automação, têm como objetivo transformar eficazmente a forma que o homem se relaciona com o ambiente em que está inserido. Nesse âmbito, a tendência é reavaliar e repensar nas concepções sobre consumo da energia elétrica, buscando reduzir desperdícios e evitar gastos desnecessários.

Grande parte dos dispositivos eletrônicos utilizados no contexto atual, têm corriqueiramente propriedades de cargas não lineares que provocam distorções harmônicas e contribuem para a poluição do sinal elétrico. Esses tipos de carga afetam diretamente a qualidade de energia distribuída pelas concessionárias do ramo, alterando assim, as características dos padrões estabelecidos para o sinal. Diversas consequências podem ser observadas desde superaquecimentos, desligamentos, sobretensões até danos aos circuitos internos dos dispositivos. Logo, torna-se indispensável a difusão desse tema aos consumidores, além da busca e manutenção sobre a qualidade do produto ofertado.

A Distorção Harmônica Total (DHT_i) é um índice que está totalmente atrelado ao sinal da corrente elétrica e quando o mesmo apresenta-se em baixa porcentagem, significa que a qualidade

de energia é alta. Uma das principais fontes de distorção harmônica é a descontinuidade ou corte de tensão causado pela comutação de chaves eletrônicas, o chamado “efeito notching”. Por ser uma distorção tão frequente, pela norma IEEE 519-1992, o “efeito notching” é definido como um indicador dos efeitos que os conversores estáticos tem na degradação da qualidade de energia (De Jesus et al., 2003).

Nas abordagens propostas em (Horska et al., 2014) e (Zodape and Kamat, 2016) são apresentadas proposições e soluções para a medição do índice de distorção, porém requerem arquiteturas complexas e uso de materiais mais caros ou de difícil acesso. Em contrapartida, a proposta apresentada neste artigo visa um sistema de custo acessível e de fácil manipulação para mensurar o DHT_i baseando-se na arquitetura de padrões abertos IoT. Tal sistema poderá se comunicar remotamente por meio de um microcontrolador até uma central pelo protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Os dados serão adquiridos por um Circuito Medidor de Corrente (CMC) para, a partir daí, o índice de distorção ser tratado e extraído por meio de cálculos feitos no próprio microcontrolador. Todas as informações são armazenadas em nuvem que o usuário poderá acessar em formato de gráfico, permitindo uma noção da eficiência energética presente em seu ambiente.

O presente trabalho está dividido em quatro seções principais: Primeiramente, na introdução,

são apresentados conceitos, problemáticas e o cenário em que o sistema proposto está inserido. Na segunda seção, a metodologia, são discutidos mais detalhes do sistema e seus componentes. A Seção III mostra o procedimento dos testes, a precisão do sistema e seus resultados e interpretações. Por fim, na conclusão, são feitas as considerações finais sobre o projeto e explicações dos contextos onde o desenvolvimento desta aplicação pode ser necessária, além das propostas para trabalhos futuros.

2 Metodologia

Nesta seção são apresentados a arquitetura, o hardware utilizado pelo sistema proposto, a estrutura do medidor de corrente, assim como o tratamento e armazenamento de dados pelo servidor.

2.1 Arquitetura geral

A figura 1 exibe um esquemático dos componentes que formam o sistema. Por meio destes, é possível monitorar remotamente o consumo dos equipamentos elétricos. Atualmente, encontram-se diversas proposições de arquitetura para automação via IoT. Entretanto, devido a capacidade da permanência de funcionamento offline e sua estrutura descentralizada de controle, foi optado pelo desenvolvimento da arquitetura apresentada em (Araujo et al., 2017).

Durante a amostragem de dados, proporcionada por meio do CMC, o sensor de corrente detecta continuamente o valor correspondente à corrente que trafega pelo circuito. Este sinal é coletado pelo microcontrolador que, em seguida, realiza a transformada rápida de Fourier (FFT) a fim de calcular a amplitude das contribuições harmônicas e determinar os níveis de DHT_i. As informações são então enviadas para a nuvem local (Raspberry Pi), onde serão armazenadas e poderão ser monitoradas pelo usuário através de uma interface intuitiva. A figura 2 apresenta as respectivas trocas de informações por cada componente da arquitetura.

Com o objetivo de evitar sobrecargas de informação na comunicação com o servidor e aprimorar o tempo necessário para cada processo, é proposto neste sistema que os cálculos referentes ao DHT_i sejam realizados no próprio microcontrolador.

2.2 Hardware

O sistema contém um sensor de corrente elétrica invasivo: ACS712ELCTR-05B-T (All, 2006 - 2013). Através do campo magnético causado pelo fluxo de cargas elétricas, o sensor produz como resposta um sinal de tensão proporcional de aproximadamente 0,185 V/A (sensibilidade padrão para a versão utilizada). Para coletar os da-

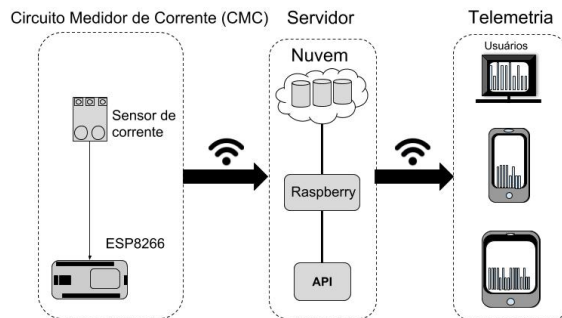


Figura 1: Arquitetura do sistema remoto

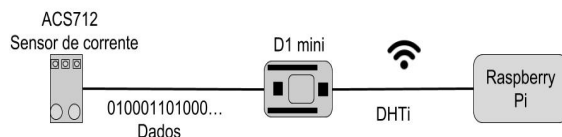


Figura 2: Fluxo de dados entre os componentes de hardware

dos é utilizado um microcontrolador com conversor analógico-digital que amostrará o sinal.

O microcontrolador escolhido para esta aplicação é o ESP8266 desenvolvido pela EXPRESSIF SYSTEM (Exp, 2016) prototipada na placa D1 mini pela WEMOS ELECTRONICS. Com baixo valor de mercado, uma grande comunidade online e módulos Wi-Fi integrados, o ESP8266 se destaca dentre seus concorrentes ao possibilitar comunicação sem fio permitindo uma maior simplicidade em projetar aplicações evitando problemas como mal contatos ou manipulações com cabos. É importante mencionar que o microcontrolador em questão não é o único a realizar os processos especificados, qualquer outro SoC (System on Chip) que contenha as funcionalidades necessárias para compor o sistema irá, com as devidas adaptações, ser bem sucedido.

Atuando como um servidor local, o Raspberry Pi 3 (Ras, October 2016) é um computador de placa única com tecnologia wireless que permite trabalhar como middleware (componente que media a comunicação entre servidor e máquina) com a categorização dos dados e armazenamento local. Também voltado à proposta de baixo-custo, esse dispositivo se encaixa nos requisitos para o correto funcionamento do sistema além de proporcionar a possibilidade de escalabilidade independente do tipo de protocolo utilizado.

2.3 Circuito Medidor de Corrente

O circuito responsável por mensurar a corrente elétrica demandada pelo dispositivo é composta pelos componentes de hardware mencionados acima dispostos de maneira que permita o consumo de uma carga em funcionamento. A figura 3

mostra como o circuito atua: O plug macho é conectado à rede de tensão próxima a 220V (tensão padrão na rede pública da região nordeste do Brasil). Logo após, o sensor é conectado em série com o circuito, pois age semelhante a um amperímetro, seguindo com o acoplamento ao plug fêmea. Dessa forma, a carga atuará como uma chave permitindo o fluxo de corrente. Ressalta-se que quando não há aparelho conectado ou não há acionamento do objeto monitorado o circuito permanece aberto não existindo passagem de corrente.

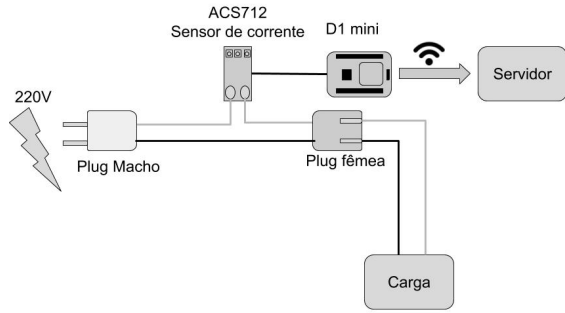


Figura 3: Circuito de medição de corrente

2.4 Nuvem e visualização de dados

Após as rotinas de aquisição e cálculo dos dados recebidos, as informações são armazenadas com as respectivas data e hora do processamento para visualização em tempo real. Em virtude disso, no microcontrolador, as informações são agrupadas no formato JSON (JavaScript Object Notation), devido sua facilidade de manipulação, e enviadas a um servidor local (Raspberry Pi) que irá interpretar e salvar as informações. A comunicação entre microcontrolador e servidor ocorre através do protocolo MQTT cuja estrutura garante qualidade de serviço ainda que os dispositivos estejam em locais com fraco sinal de internet. Com a capacidade de acumular dados limitada por sua estrutura física, a nuvem local pode se conectar com um banco de dados externo que possibilite o armazenamento de dados, assegurando o seu acesso de forma a permitir o monitoramento persistente por parte do usuário de forma remota.

3 Resultados

O sinal analisado pelo microcontrolador, proveniente do sensor, será analisado no domínio da frequência através da FFT que apresentará um espectro das suas componentes possibilitando calcular o índice de Distorção Harmônica Total de corrente (Equação 1). Para melhores análises é considerado o intervalo de ± 5 Hz em torno da frequência principal e seus harmônicos. Na equação 1: I_h representa a corrente da harmônica de

ordem h e I representa a corrente da frequência fundamental.

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_h^2}}{I} \quad (1)$$

De mesma forma é possível calcular o nível de corrente elétrica RMS (Root Mean Square) consumida durante o período de amostragem por meio da equação 2, onde considera x um vetor de amostras do sinal de entrada e n o número de amostras adquiridas.

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n x_i^2}{n}} \quad (2)$$

3.1 Análise de precisão do CMC

Antes de serem realizados quaisquer testes práticos com o sistema proposto, se faz necessário avaliar o correto funcionamento do sensor de corrente e o circuito de medição sob as condições reais de transmissão pública de energia. Através de uma bancada de testes e kits WEG foram utilizadas diversas associações de resistores para estimar a corrente elétrica que iria fluir pelo circuito. O multímetro digital ET2082C foi utilizado para auxiliar na constatação da acurácia do sensor. Segundo (Min, 2009) sua precisão para correntes AC é de $\pm 2\%$ dentro da faixa de valores medidos.

Na tabela 1 encontram-se resultados que validam o sensor nas condições citadas anteriormente. A coluna I_{amp} e I_{sensor} representam, respectivamente, os valores de corrente detectados pelo amperímetro e pelo hardware durante a experiência. Na última coluna, observa-se o erro de medição em relação aos valores apresentados pelo amperímetro. Desse modo, é possível concluir que há um aumento do erro de medição do sensor conforme a corrente que passa no sistema se aproxima de zero e portanto, mensurar correntes muito pequenas pode proporcionar erros semelhantes aos apresentados na tabela em questão. É também importante mencionar que o sensor possui um ruído interno (21mV ou 0.42% do valor de saída) que influem no valores apresentados. Uma vez verificada a efetividade do CMC, é possível testar o funcionamento do sistema proposto mensurando o consumo não-linear de corrente elétrica.

Tabela 1: Valores do teste de funcionamento do sensor de corrente

$R_{eq}(\Omega)$	$I_{amp}(A)$	$I_{sensor}(A)$	Erro(%)
66	3,20	3,18	0,63 %
100	2,10	2,13	1,42 %
133,3	1,59	1,61	1,26 %
150	1,42	1,44	1,39 %
200	1,06	1,07	0,94 %
250	0,84	0,81	3,57 %
400	0,41	0,43	4,65 %
600	0,33	0,36	8,33 %

3.2 Condições e perfis dos testes

O ambiente de testes é alimentado com o sinal elétrico público. Na figura 4, capturada a partir de um osciloscópio, pode-se analisar o formato e frequência característica que compõe o sinal de energia fornecido pela concessionária local. Observe que o sinal tem formato senoidal e frequência fundamental em torno de 60Hz.

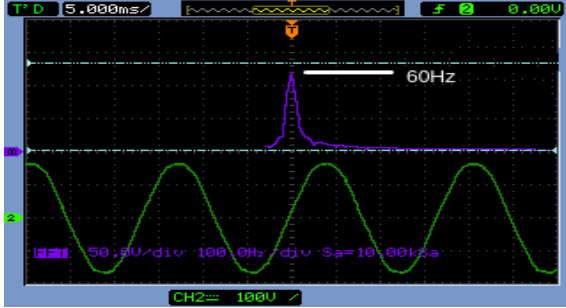


Figura 4: Sinal elétrico que alimenta o sistema

O número de amostras e a frequência de amostragem foram escolhidas baseados na capacidade de armazenamento do microcontrolador e no tempo de processamento necessário para realizar a FFT e enviar as informações ao servidor. Nos resultados apresentados foi escolhido o valor de 1024 amostras e frequência de 1024 Hz pois tais valores se mostraram adequados em acumular informações não comprometendo nenhum dos processos e apropriados para a detecção, sem efeitos de aliasing, de frequências até a oitava harmônica. É importante evidenciar que trabalhos como (Teixeira, 2009) mostram que a contribuição de poluição para harmônicas de ordem altas tem baixa influência quando comparada com harmônicos de valores mais baixos.

Como objeto a ser analisado foi escolhido como carga um computador desktop: Processador AMD A8-5500B 3.2 GHz, memória RAM de 8 GB e HD de 640GB. Devido a sua natureza não linear de requisitar corrente elétrica em virtude dos componentes semicondutores que o formam e seus regimes de funcionamento, harmônicos são gerados no sinal elétrico e assim afetam toda a rede e os aparelhos conectados nela (Shwehdi and AL-Ismail, 2012).

Nas seções abaixo são mostrados gráficos temporais, com resolução de 1 segundo, das características do sinal elétrico consumido e dos níveis de distorção em 3 momentos de funcionamento do computador. Primeiramente, a transição do computador desconectado para o computador conectado na rede elétrica. Em segundo, o acionamento do computador já conectado na rede elétrica. E por último, quando o computador ligado é submetido à manipulação de grande quantidade e fluxo de dados induzindo o computador a aumentar sua potência consumida (testes de stress). Nos grá-

ficos, a corrente total consumida é formada pela corrente na frequência fundamental (sinal elétrico demandado pelo aparelho) e da corrente harmônica (distorção no sinal que é consumida pelo aparelho). De mesma forma, é apresentado o índice de distorção correspondente daquele sinal.

3.3 Traços da corrente elétrica consumida em transição de regimes de Inatividade para Espera

As figuras 5 e 6 expressam as características da corrente elétrica no momento em que o computador é conectado à energia. Inicialmente desconectado, no instante 'a' ocorre a conexão do computador à energia. Logo após, no instante 'b', nota-se um aumento da energia consumida e do índice de distorção desse sinal até o momento 'c' onde ocorre a estabilização dos picos em ambos os gráficos. Após esse momento, apenas há o funcionamento da fonte responsável por retificar o sinal da rede para níveis apropriados aos circuitos internos, representando assim, o modo de espera.

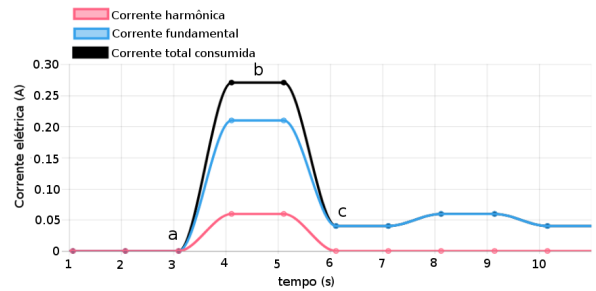


Figura 5: Níveis de corrente durante a transição do estado desligado para Em espera. Legenda: a - Instante de conexão à energia, b - Pico de consumo para inicialização do circuitos internos, c - Estabilização do consumo de corrente.

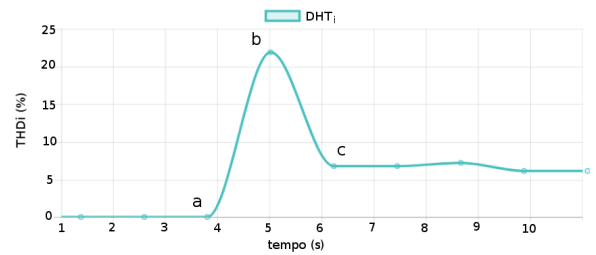


Figura 6: Níveis de DHT_i durante a transição do estado de desligado para Em espera. Legenda: a - Instante em que o dispositivo é conectado a energia, b - Pico de distorção no sinal, c - Estabilização de níveis de distorção

Embora na figura 5 (instante 'c') dê a impressão de indicar corrente harmônica nula, esses valores não são de fato nulos mas bem próximos de

zero. A divisão com os baixos níveis de corrente fundamental (equação 1) aumenta o índice de distorção resultando nos valores expressados pela figura 6 (entre 7 e 8%).

Isso indica que não somente deve-se analisar os níveis de DHT_i mas correlacioná-los a quantidade de corrente naquele instante. Por isso, proporcionalmente, para um certo sinal, dado um índice de DHT_i fixado, quanto maior a corrente elétrica mais sensível a poluições ele estará. Posteriormente, foi monitorado o processo de acionamento dos circuitos internos do computador.

3.4 Traços da corrente elétrica consumida em transição de regimes de Espera para Ligado

Anterior ao instante 'a' (momento em que o computador é inicializado) nas figuras 7 e 8, o dispositivo em questão permanece em modo de espera (comportamento semelhante ao apresentado no teste anterior). Após ser acionado, o computador irá começar a realizar tarefas de busca e escrita de programas na memória. Como é observado no instante 'b', para o cumprimento de tais tarefas irá ser exigido mais potência. Como já mencionado, devido à aspectos internos do computador, os níveis de corrente poluída irão aumentar embora os níveis de distorções diminuam nesse estado de funcionamento.

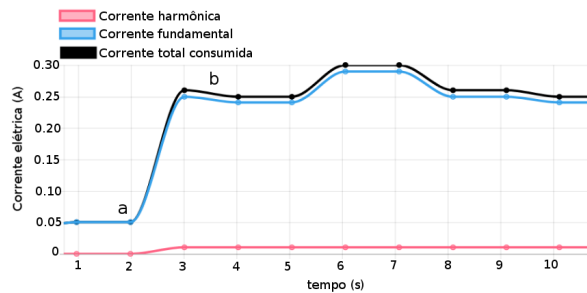


Figura 7: Valores de corrente elétrica durante a transição do estado de Espera para ligado. Legenda: a - Instante em que o dispositivo é acionado, b - Traço de consumo no processo de inicialização

3.5 Traços da corrente elétrica consumida em teste de stress

Como último teste foi analisado nas figuras 9 e 10 a demanda de corrente elétrica por parte do computador sob testes de stress, os quais induzem a realização de tarefas computacionais complexas, por exemplo, manipular cálculos de matrizes de ordem elevada e etc. Na transição do ponto 'a', instante em que é colocado o teste de stress para o ponto 'b', há um aumento do consumo elétrico e a diminuição da distorção e após isso a estabilização dos respectivos níveis.

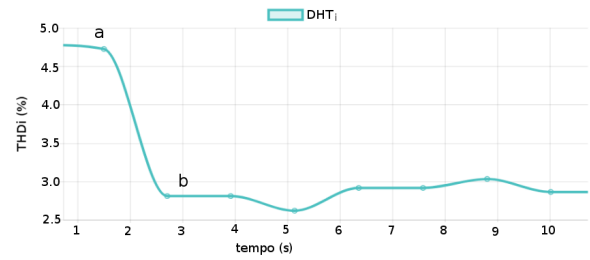


Figura 8: Níveis de DHT_i durante a transição do estado de Espera para ligado. Legenda: a - Instante em que o dispositivo é acionado, b - Índices de distorção no processo de inicialização

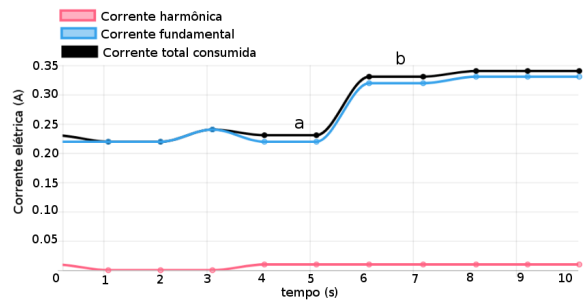


Figura 9: Valores de corrente elétrica durante em teste de stress. Legenda: a - Instante em que o teste é realizado, b - Aumento do consumo elétrico devido a processamento computacional

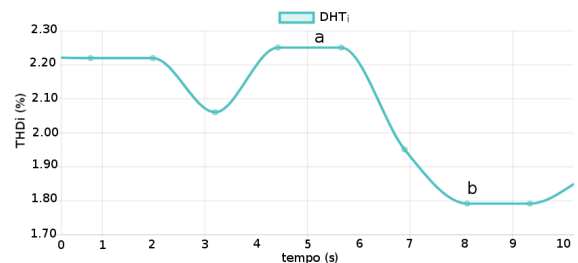


Figura 10: Níveis de DHT_i durante teste de stress. Legenda: a - Instante em que o teste é realizado, b - Queda dos níveis de distorção

A partir de todos os resultados obtidos e apresentados, a tabela 1 a seguir, mostra de forma sucinta os valores de corrente e de DHT_i de cada modo de funcionamento.

Tabela 2: Valores aproximados de corrente e de distorção harmônica em cada um dos regimes de funcionamento apresentados. I_h - Corrente harmônica.

Transições	$I_{total}(A)$	$I_h(A)$	DHT_i
Inativo	0,000	0,000	0,00%
Espera	0,050	0,003	7,00%
Ligado	0,250	0,010	3,00%
Stress	0,350	0,010	1,80%

Embora se tenha provado a capacidade de monitorar remotamente uma carga elétrica, bem como o sinal que a alimenta, deve ser lembrado que existem diversas causas que prejudicam a acurácia do sistema proposto (Santos et al., 2016) como: Mal funcionamento nos circuitos e hardware, interferência magnética, problemas nos serviços web, arredondamentos, ruídos, dentre outros. Para uma melhor análise da contribuição de erro deve-se isolar cada componente observando seus comportamentos.

4 Conclusões

Foi tratado nesse artigo a estrutura e os resultados de experiências do proposto sistema remoto micro-controlado cujas funções são monitorar a eficiência energética, consumo de equipamentos e distúrbios na rede por meio de gráficos que mostram as componentes da corrente consumida e o índice de DHT_i.

Os resultados provaram sua efetividade para a aplicação feita e, além de atingir os objetivos propostos, a observação dos dados apresentados de certos estados dos equipamentos, podem indicar consumo de corrente não intencional ou mesmo falhas que produzam um maior gasto energético e consequentemente financeiro como a identificação de poluição do sinal fornecido pelas concessionárias (Andrade Jr et al., 2006). Se aplicado em partições públicas, empresas ou ambientes com grande quantidade de eletrodomésticos podem analisar o consumo elétrico dos equipamentos, e planejar medidas em favor da diminuição do desperdício energético, aumentando o tempo de manutenção de instalações elétricas, dentre outros.

Apesar deste trabalho apresentar formas de visualização de dados remoto, ainda há muito a ser pesquisado nessa área de aplicação. Atuadores de correção de distorção (Ciufu et al., 2017), análise da rede em larga escala e alarmes direcionados aos responsáveis serão objetos de estudo e pesquisa visando aprimorar o sistema e gerar alto impacto na sociedade bem como difusão de sistemas IoT.

Referências

- All (2006 - 2013). *Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor*.
- Andrade Jr, G., Naidu, S., Néri, M., Soares, R. and Costa, E. (2006). Contribuições da distorção harmônica de tensão entre concessionária e consumidor, *Anais Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Campina Grande/PB*.
- Araujo, D., Costa, J., R. C. Silva, D., B. Nogueira, M. and C. Rodrigues, M. (2017). Arquitetura geral de um sistema para automação residencial utilizando plataformas abertas, *XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017 Brazilian Symposium on, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, pp. 1–6.
- Ciufu, L., Popescu, C.-L. and Popescu, M.-O. (2017). Experimental mitigation techniques to reduce the total harmonic distortion of low voltage non-linear power sources, *Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), 2017 10th International Symposium on, IEEE*, pp. 138–141.
- De Jesus, N. C., Castoldi, F. T., Nonenmacher, C. F. B., F., D. S. T., de Oliveira, H. R. P. M. and Papaléo, G. (2003). Análise da influência de cargas não-lineares: Avaliação dos efeitos e limites de cortes de tensão (voltage notching, *Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica*, V SBQEE, pp. 2–3.
- Exp (2016). *ESP8266EX*.
- Horska, J., Maslan, S., Streit, J. and Sira, M. (2014). A validation of a thd measurement equipment with a 24-bit digitize, *recision Electro-magnetic Measurements (CPM 2014)*, IEEE, pp. 502–503.
- Min (2009). *Instruction Manual*.
- Ras (October 2016). *Raspberry Pi Compute Module (CM1), Raspberry Pi Compute Module 3 (CM3), Raspberry Pi Compute Module 3 Lite (CM3L)*.
- Santos, B. P., Silva, L. A., Celes, C. S., Borges, J. B., Neto, B. S. P., Vieira, M. A. M., Vieira, L. F. M., Goussevskaia, O. N. and Loureiro, A. A. (2016). Internet das coisas: da teoria à prática., *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos 2016*.
- Shwehdi, M. and AL-Ismail, F. (2012). Investigating university personnel computers (pc) produced harmonics effect on line currents, *Int. Conf. on Renewable Energies & Power Quality (ICREPQ'12)*.
- Teixeira, D. Â. (2009). *Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial*, Master's thesis, Universidade Federal de Minas Gerais.
- Zodape, M. S. and Kamat, V. N. (2016). Use of smart metering for resolving harmonic issues, *Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, IEEE, p. 3961–3964.