

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA APLICADA A UM SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Alba Francine de Souza Caetano – albaafsc@hotmail.com

Waner Wodson A. G. Silva – waner@unifei.edu.br

Marcel Fernando da Costa Parentoni - parentoni@unifei.edu.br

Universidade Federal de Itajubá Campus Itabira, Departamento de Engenharia Elétrica

Resumo. – Os Sistemas de Energia Elétrica (SEE) estão em um grande processo de transformação. O Brasil está propício a um novo contexto e modificações em seu SEE a qualquer momento, conforme confere a Resolução Normativa ANEEL 482/2012, implicando na instalação de novos equipamentos que promoverão melhorias e otimizações na medição de energia elétrica para os consumidores residenciais. O presente artigo apresenta o desenvolvimento de uma plataforma de gestão de energia, com uma interface web, adequado aos paradigmas das Smart Grids (Redes Inteligentes) e Internet of Things (IoT). Dessa forma, o consumidor terá acesso a informações importantes e poderá acompanhar e controlar de forma efetiva e remota os seus gastos, além de traçar o perfil de consumo por meio do acesso ao seu histórico.

Palavras-chave: Plataforma de gestão, redes inteligentes, geração fotovoltaica.

1. INTRODUÇÃO

Sistemas de energia elétrica existem como tal há pouco mais de 120 anos. As transformações para a modernização da rede têm tido foco nos sistemas de geração e transmissão de energia. Todavia com os recentes estudos sobre redes inteligentes e a evolução da tecnologia, atualmente é dada uma atenção maior para os sistemas de distribuição para o usuário final. A importância dada à qualidade da energia e a eficiência energética nos dias de hoje são razões que contribuem para este desenvolvimento (Falcão, 2009).

No que tange principalmente à medições realizadas nesse tipo de sistema, o cenário atual tende à substituição progressiva dos medidores eletromecânicos por digitais. Um dos principais fatores motivadores é a possibilidade de leitura remota da energia consumida. O trabalho de desenvolvimento de um equipamento tal como se deseja é uma tarefa multidisciplinar, envolvendo conceitos que vão desde circuitos elétricos até algoritmos de processamento digital de sinais. Logo, desenvolver o instrumento, além de trazer benefícios como o aprimoramento da tecnologia, possibilita a melhor adequação às necessidades atuais.

O desenvolvimento de uma plataforma de aquisição, processamento e armazenamento de dados referentes à energia elétrica, com *interface web* e o acionamento de alguns dispositivos remotamente, permitirá ao consumidor ter acesso a mais informações, controle e a realizar o acompanhamento de forma efetiva e remota dos seus gastos. Além disso, poderá acessar o histórico com o seu perfil de consumo, recurso esse interessante, visto que se encontra aprovada pela ANEEL a aplicação de tarifas diferenciadas do valor da energia conforme o dia e o horário do consumo (tarifação horo-sazonal), para consumidores residenciais. Essa tarifação está prevista para entrar em vigor nos próximos anos, contribuindo assim para uma maior conservação e gerenciamento da energia.

O setor atual, com os avanços tecnológicos aliados ao crescimento dos investimentos em sistemas de cogeração fotovoltaica ou eólica pela população, possui um prognóstico bastante positivo. Em vista desse atual contexto, os estudos e implementação do projeto para a melhoria do setor são os estímulos que conduziram a este projeto, produzindo um sistema de monitoramento/gestão para uso eficiente do sistema elétrico.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Ha alguns estudos direcionados para o desenvolvimento de sistemas de gestão de energia elétrica, entretanto muitos desses não possuem a característica de monitoramento remoto via *interface web*. Além de não serem construídos com o adicional de possibilitar ao consumidor verificar a energia gerada por seu sistema de cogeração e a consumida da concessionária. Esse último item é de grande relevância para o contexto atual, quando, consumidores têm optado por investir em um sistema de geração própria, possibilitando economia em relação ao consumo de energia proveniente da concessionária. Esses sistemas de cogeração recebem o conceito de Geração Distribuída, conforme a Resolução Normativa ANEEL nº482/2012 .

A proposta de implementação do referido sistema, possibilitará a gestão do consumo/geração de uma determinada instalação. Levando-se em conta que Micro e Minigeração Distribuída constituem em o consumidor brasileiro poder gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Essas inovações aliam economia financeira, consciência socioambiental e autossustentabilidade. Observando o cenário atual é imprescindível que se faça uso consciente dos recursos energéticos disponíveis. Considerando que é possível realizar a gestão de energia do sistema de consumo/geração por meio da implementação da plataforma proposta, agregando os conceitos de IoT e *Smart Grids* associados a um baixo custo, verifica-se a viabilidade da implementação do sistema.

2.1 Smart Grids

Uma *Smart Grid* caracteriza-se pela utilização intensiva de tecnologia da informação e comunicação com a rede elétrica. Através da possibilidade de intercomunicação com os diversos componentes da rede, permite o desenvolvimento de estratégias de controle e otimização da mesma, tornando-a muito mais eficiente e segura (Deblasio, 2008).

A Fig. 1 exibe o esquemático funcional de uma *Smart Grid*, cuja abordagem faz alusão ao sistema de gestão de energia implementado em uma residência, observando-se então, o desenvolvimento de estratégias de controle na mesma de forma otimizada.

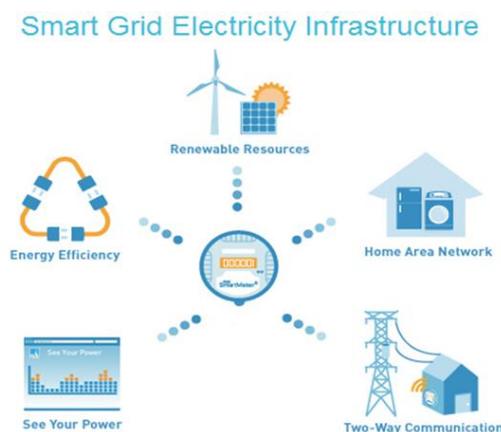


Figura 1- Esquemático funcional de uma *Smart Grid*.

2.2 Internet of Things (IoT)

A proposta de uma interface web ativa é embasada no conceito de IoT –*Internet of Things* (Internet das “Coisas”), constituindo em um meio de conexão de objetos, usados em diferentes contextos, sendo esta uma tecnologia de automatização em rede que torna mais complexas as informações.

Os sistemas constituídos pela tecnologia IoT, caracterizam-se pelo uso de sensores, atuadores e tecnologia de comunicação de dados montados em objetos físicos, o que permite que sejam monitorados, coordenados ou controlados através de uma rede de dados ou da internet (Prasad, 1012).

A IoT aparece como sinônimo de ambientes conectados, e aos poucos vem sendo desenvolvida para aplicações industriais e na área de utilidades, incorporando a capacidade de monitorar e controlar redes de energia elétrica.

3. DESENVOLVIMENTO DA PLATAFORMA DE GESTÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Foram levados em conta diversos fatores relevantes no processo de seleção do hardware a ser utilizado, como tecnologia implementada ao dispositivo, confiabilidade, etc. A universidade dispõe das mais atuais plataformas microcontroladas necessárias para realização do projeto.

No presente trabalho desenvolveu-se um servidor web através do *Node.js*, que é uma plataforma construída sobre o motor *JavaScript* do navegador web para facilmente construir aplicações de rede rápidas e escaláveis.

O servidor web recebe, armazena e exibe dados a partir da medição dos sinais de tensão e corrente de uma instalação, sendo que essa possui um sistema de geração fotovoltaico de 3kW de pico.

Foi desenvolvido um sistema de condicionamento de sinal, que adequa os valores medidos às necessidades do SoC (*System-on-chip*) microcontrolador Hercules LAUNCHXL-RM42®, destinado a realizar o processamento dos dados de corrente e tensão. O mesmo, envia os sinais via comunicação serial para o *Raspberry Pi 2*® que fará o armazenamento dos dados enviados e disponibilizará através de uma *interface web* que poderá ser acionada local e remotamente, tendo também a opção de acionamento de dispositivos.

No servidor *web* são disponibilizados dados do sistema monitorado em tempo real, como potências ativa, reativa e aparente, corrente, fator de potência, tensão da rede, potência ativa gerada pelas placas solares e a corrente proveniente das mesmas. Além de estar disponível também, um histórico do consumo de energia e o perfil de potência gerada e da rede durante o período registrado.

As informações da energia podem ser acessadas pela internet, através de diversos dispositivos como celulares *smartphones*, *notebooks*, *desktops*, *tablets*, entre outros. A Fig. 2 apresenta o diagrama do sistema proposto

implementado em uma residência, onde é possível verificar a existência de um sistema de cogeração fotovoltaica e/ou eólica, um sistema de sensores para realizar a aquisição de dados do sistema de cogeração e os que são provenientes da rede e enviá-los para o microcontrolador. Assim é possível que o usuário acesse remotamente as informações da instalação.



Figura 2- Sistema de Gestão de Energia Elétrica implementado em uma residência.

Na Fig. 3 é exibido o esquemático de funcionamento da plataforma de gestão de energia elétrica associada à *smart grids*, possibilitando compreender como as partes constituintes do sistema são integradas.

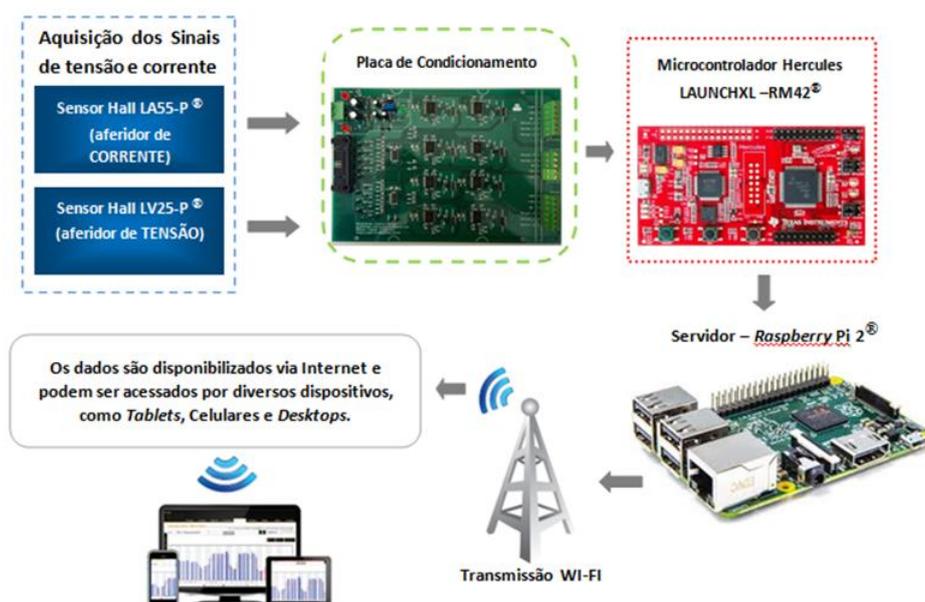


Figura 3- Esquemático de funcionamento da Plataforma de Gestão de Energia associada à *Smart Grids*.

Nos itens subsequentes são expostos maiores detalhes sobre cada parte componente da Plataforma de Gestão desenvolvida.

3.1 Sistema de Condicionamento de Sinais

Para aquisição de valores de tensão utilizou-se o sensor *hall* LV25-P®. Para a amostragem do sinal de corrente utilizou-se dois sensores *hall* LA55-P®. Sendo que, um sensor de corrente mede a corrente que entra na residência e o outro a corrente que os módulos fotovoltaicos geram.

Para condicionar os sinais provenientes dos sensores utilizou-se o circuito mostrado na Fig. 4, onde é exibida a montagem final para o circuito de condicionamento de sinal, constituído por amplificadores operacionais, a fim de que o sinal a ser aplicado à entrada analógica do microcontrolador esteja compreendido entre 0V e 3,3V.

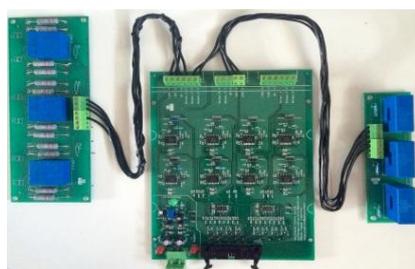


Figura 4- Sensores e circuito de condicionamento de sinal.

3.2 Tratamento dos sinais e análise das variáveis

No microcontrolador Hercules LAUNCHXL-RM42 os sinais passam por conversores ADC (Analogico/Digital), para serem digitalizados e utilizados no processo de cálculo das grandezas. A utilização do microcontrolador é justificada pelo fato de não haver um conversor ADC no *Raspberry Pi 2*, outros sistemas como o *BeagleBone®* e *Intel Galileo®* possuem o conversor ADC integrado, porém nesses dispositivos não é possível fazer as amostragens em intervalos de tempos definidos, o que acarretaria em erro nos cálculos.

Com o objetivo de efetuar o cálculo das grandezas elétricas necessárias à implementação da presente Plataforma de Gestão, foram implementadas as equações descritas abaixo:

Em regime permanente a tensão ao longo do tempo pode ser expressa como na Eq. (1).

$$v(t) = V_{pico} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (1)$$

Quando uma dada fonte é conectada a uma carga genérica com características lineares, a corrente irá fluir tal como na Eq. (2).

$$i(t) = i_{pico} \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

Comparando-se os níveis de potência dissipada em uma carga quando alimentada com tensão contínua e a potência dissipada na mesma carga quando alimentada com tensão alternada, dá-se origem ao conceito de valor eficaz (ef) ou valor RMS (root mean square, ou raiz média quadrática). As Eq. (3) e Eq. (4) demonstram os valores de tensão RMS e corrente RMS, respectivamente.

$$V_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N v_j^2} \quad (3)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N i_j^2} \quad (4)$$

Definiu-se para o sistema de aquisição de dados uma taxa de amostragem de 15,36kHz, que dará origem à 256 amostras por ciclo de 60 Hz. Cada intervalo amostrado é designado pelo índice j na Eq. (5).

A transferência de cargas implica na realização de um trabalho, ou seja, há uma energia envolvida nesse processo. Assim, torna-se muito importante a caracterização matemática em termos de energia e potência. Pela definição, tem-se que a potência média em um elemento genérico conectado a uma fonte de tensão alternada é expresso como na Eq. (5).

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t) \cdot v(t)] dt} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (v_j \cdot i_j) \quad (5)$$

À potência total fornecida pela fonte alternada dá-se o nome de potência aparente (S), definida pela Eq. (6).

$$S = V_{RMS} \cdot I_{RMS} \quad (6)$$

Assim, tem-se a potência que está relacionada a cargas puramente reativas, que é denominada potência reativa (Q), dada pela Eq. (7).

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7)$$

Por fim, surge o conceito de Fator de Potência (FP), definido pela relação entre potência ativa e aparente de um dado circuito, conforme a Eq. (8).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (8)$$

O cálculo do valor referente ao consumo de energia do sistema, que é disponibilizado na página de histórico é dado pela Eq. (9).

$$E = \int_0^{\infty} P_t dt = \sum_0^{\infty} P_t \Delta t \quad (9)$$

E - Energia Consumida;

Δt - Intervalo de amostragem de tensão e corrente;

P_t - Potência medida no instante t .

A tarifação de energia para consumidores residenciais, atualmente corresponde à tarifa convencional, caracterizada pelo pagamento da energia consumida em kWh.

3.3 Utilização do Raspberry Pi 2®

Uma vez que as operações são realizadas, os resultados são enviados via comunicação serial para o *Raspberry Pi 2* a cada 1 segundo. O mesmo conecta-se à rede via tecnologia *wireless*, e disponibiliza as informações do sistema de gestão de energia elétrica em uma página *web*, permitindo que o usuário possa acessar as informações através de quaisquer dispositivos eletrônicos conectados a esta rede ou fora dela.

As informações recebidas pelo *Raspberry Pi 2*, são fornecidas em tempo real na página *web*, sendo exibidos os gráficos de potências provenientes da rede e do sistema de geração da instalação, além dos dados de tensão, corrente e potências dos mesmos. Encontra-se também disponível na página, o histórico do perfil de consumo registrado durante o período desejado.

O acesso ao servidor *web* é feito pelo endereço IP que foi atribuído ao *Raspberry*, e de acordo com as configurações da rede, pode-se atribuir um endereço pelo DNS (*Domain Name System*), ou Sistema de Nomes de Domínios, que relaciona o endereço IP com um nome, ex.: *www.nomequalquer.com.br*. O histórico foi desenvolvido utilizando-se o banco de dados MySQL.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizadas as etapas individuais de desenvolvimento e confecção do sistema de condicionamento, programação do microcontrolador e *Raspberry*, foi realizado o processo de integração das partes constituintes da plataforma e iniciou-se a etapa de obtenção dos resultados experimentais.

Para a comprovação do funcionamento do sistema, instalou-se na rede elétrica do laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Itajubá - *Campus Itabira* (simulando o funcionamento de uma residência), os sensores *hall* de tensão e corrente para realizar a aquisição de dados dos sinais. O laboratório possui em sua instalação um sistema de geração fotovoltaica com 3kW de pico. Para realizar a simulação de cargas residenciais utilizou-se bancos de cargas (Resistivas, Indutivas e Capacitivas) alternando-as de forma controlada.

Os pontos de medições foram instalados conforme visualização na Fig. 5, onde um sensor de corrente foi instalado em série com a saída do inversor de frequência do sistema de geração, o outro sensor de corrente conectado em série após a saída do disjuntor que recebe o sinal da rede (que alimenta as células de carga) e o sensor de tensão foi ligado em paralelo à saída de sinal da rede. Desta forma, a carga a ser utilizada será alimentada tanto pelo sistema de geração, quanto pela rede.

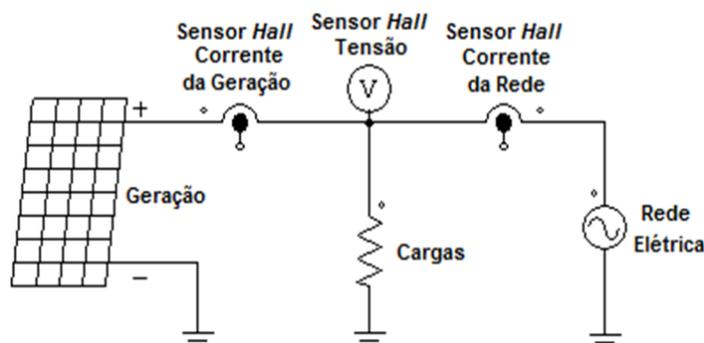


Figura 5- Esquema de conexão dos sensores *hall* para realização da aquisição de dados.

Na Fig. 6 é exibida a plataforma de gestão de energia em funcionamento. Observa-se que todo o sistema foi inserido em um invólucro, com o objetivo de otimizar a disposição do sistema embarcado e evitar eventuais contatos indesejados.

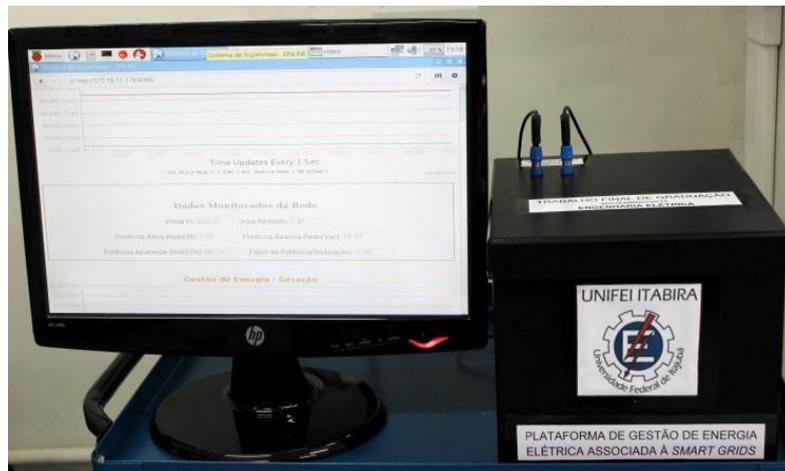


Figura 6- Plataforma de Gestão de Energia Elétrica associada à *Smart Grids* em funcionamento.

O sistema de gestão realiza o monitoramento em tempo real dos sinais da rede. Sendo assim, averiguou-se em um dado instante, o valor dos sinais do sistema de geração fotovoltaico em sua IHM (Interface Homem-Máquina), registrando uma corrente de 1,3A e tensão de 205,9V. A Fig. 7 exibe os valores na página de gestão de energia, no mesmo instante de tempo.

Foi utilizado um medidor de qualidade da energia (*Mavowatt 20[®]* – Gossen Metrawatt), para que os dados registrados no sistema de gestão fossem comparados aos registrados pelo mesmo. A partir de tal comparação, é calculado um erro percentual de medição.

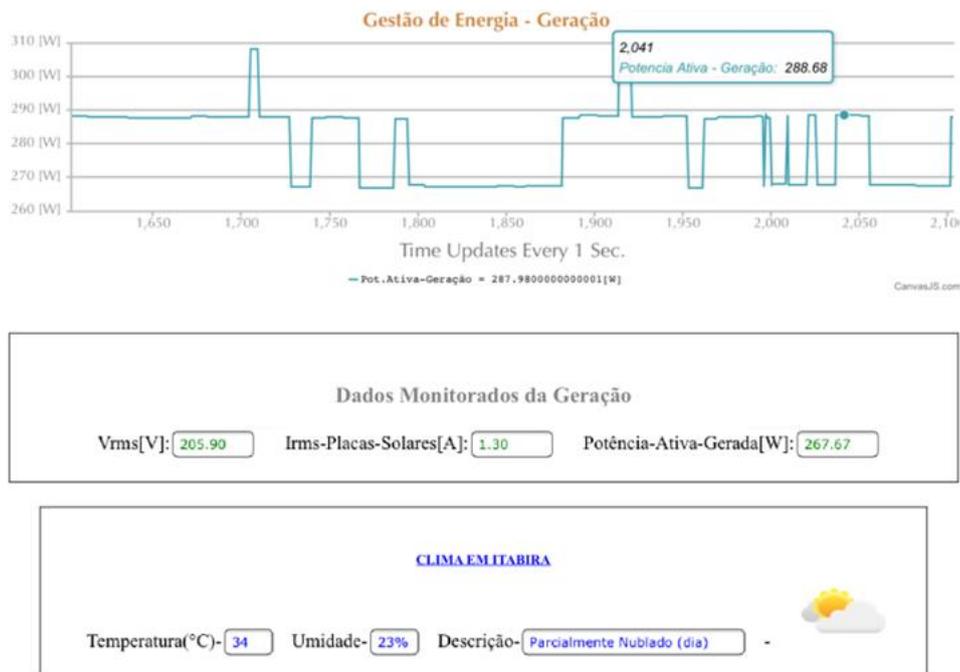


Figura 7- Dados registrados no Sistema de Gestão de Energia Elétrica para o sistema de geração fotovoltaico.

Considerando que, nessa situação, não se registrou qualquer erro entre a medição do sistema desenvolvido e o valor registrado no medidor de qualidade de energia, é possível verificar o grau de exatidão e a qualidade na medição em relação ao analisador de qualidade de energia. Inseriu-se, conforme visualizado na página do Sistema de Gestão *Online* na Fig. 9, as condições, em tempo real, do clima na cidade de Itabira-MG. Essa inserção permitirá ao usuário ter uma previsibilidade do potencial de geração das placas solares, considerando que a previsão do tempo é um dos fatores de maior influência.

Posteriormente realizou-se então, a associação paralela de três cargas resistivas e três indutivas com valores respectivos por carga de 138,3 Ω e 367mH, no dado instante em que no medidor de qualidade da energia registrava-se um valor de tensão de 213,9V e corrente de 7,0A. A Fig. 8 exibe os valores registrados no sistema de gestão de energia elétrica *online*.

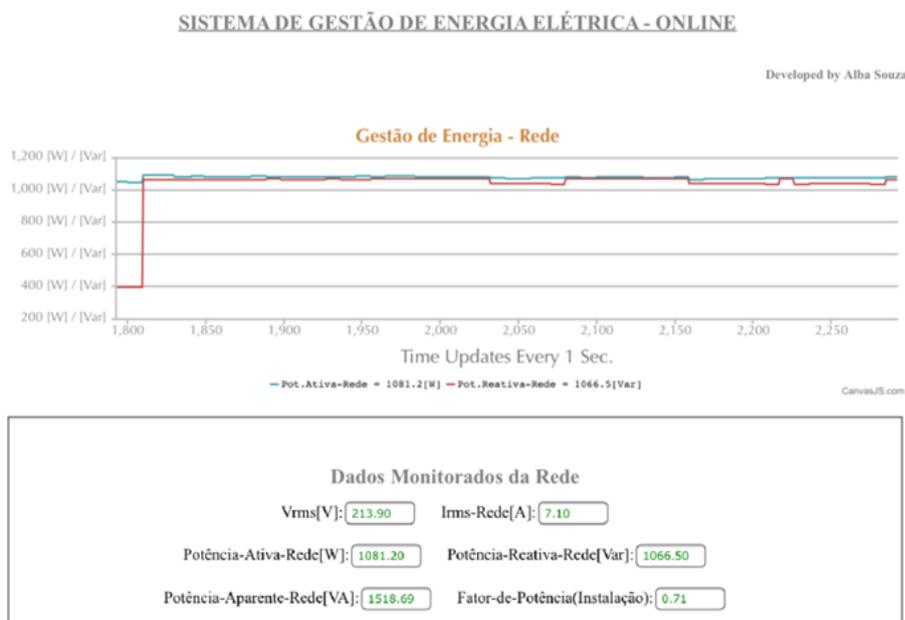


Figura 8- Dados registrados no Sistema de Gestão de Energia para a associação de carga resistiva e indutiva.

Obteve-se um erro de medição de 1,4% para esta medição. Para essa configuração de carga registrou-se um FP de 0,71. Valor coerente, considerando que a associação possui uma resultante de impedância equivalente a $32,6 \angle 45^\circ [\Omega]$.

Finalmente realizou-se, durante o período compreendido entre os dias 22/10/2015 e 28/10/2015, o monitoramento contínuo da instalação, conectando à mesma uma carga com característica puramente resistiva. Na página *web* designada ao histórico de consumo de energia, verifica-se o perfil de consumo conforme visto na Fig. 9.

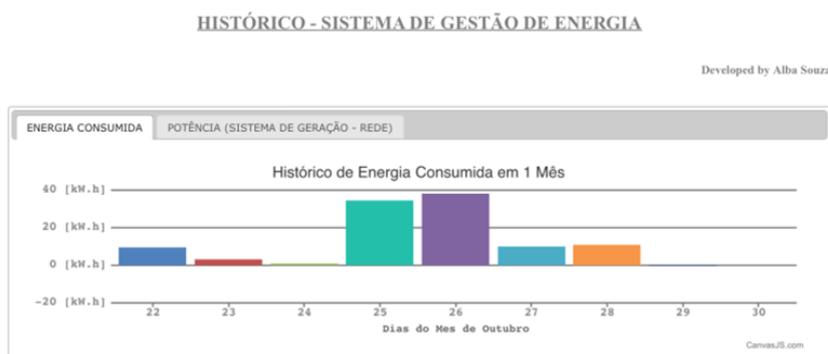


Figura 9- Dados registrados no Sistema de Gestão de Energia Elétrica para o consumo de energia entre os dias 22/10/2015 e 28/10/2015.

Observa-se que houve algumas variações no que diz respeito à energia consumida e potência gerada durante o período monitorado. Estas variações são devidas à eventuais desligamentos do sistema, e alteração no valor de resistência da carga durante o período analisado.

Na Fig. 10, visualiza-se a página do sistema de gestão sendo acessada por dois dispositivos eletrônicos de forma distinta (*smartphone* e *tablet*), comprovando efetivamente que é possível ter acesso remoto às informações do sistema.

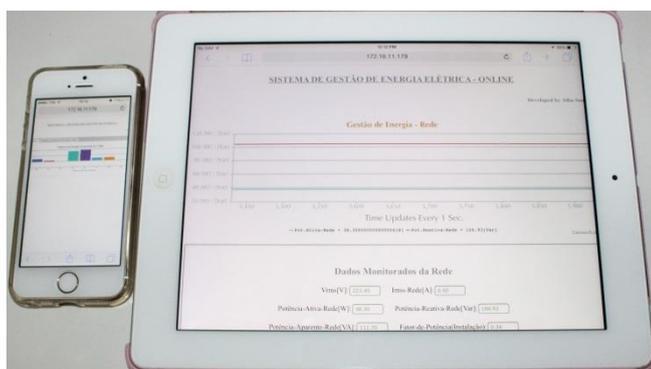


Figura 10- Dispositivos eletrônicos acessando de forma remota a página *web* do Sistema de Gestão de Energia.

5 CONCLUSÃO

Apresentou-se no decorrer do artigo o desenvolvimento de uma Plataforma de Gestão de Energia Elétrica associada à *Smart Grids*, cujo sistema possui monitoramento *online* e acesso remoto. Seu desenvolvimento possibilitou a criação de um sistema razoavelmente compacto, fazendo uso de poucos recursos e de forma otimizada, adequando-se aos conceitos de *Smart Grids* e IoT de forma confiável e segura. Foram utilizadas duas plataformas compactas na composição do sistema, que permitiram realizar as amostragens em tempos definidos, o que é necessário para os cálculos instantâneos.

Os resultados obtidos e apresentados demonstram o grau de exatidão do sistema de gestão e comprovam seu correto funcionamento, permitindo ao usuário ter acesso a diversas informações a respeito da instalação de forma distinta (sistema de geração, rede de alimentação e histórico de consumo). Essas informações fazem com que seja possível ao usuário monitorar a energia consumida da rede, o que permite ao mesmo ter controle do seu consumo, com o intuito de promover o uso racional e economia de energia, além de detectar possíveis falhas ou consumo excessivo.

Observou-se ainda o acesso remoto, realizado por meio de dispositivos eletrônicos, como *tablets* e *smartphones*, ao sistema de gestão, o que futuramente pode ser aplicado à redes inteligentes para aferição dos valores consumidos, permitindo ainda fazer um estudo de previsibilidade de aumento de demandas energéticas. Considerando a aprovação realizada pela ANEEL, para a modificação do sistema de tarifação convencional aplicado aos consumidores residenciais, para a horo-sazonal, prevista para os próximos anos, será possível promover conservação no uso da energia.

Agradecimentos

À Universidade Federal de Itajubá – *Campus* Itabira por disponibilizar a infraestrutura presente nos laboratórios.

REFERÊNCIAS

- Falcão, D. M., “Smart Grids e Microredes: O future já é Presente,” 2009 COPPE/UFRJ e Cigré- Brazil, pp. 1-2.
- Vieira, F. P., “Instrumento microprocessado para medição de potência ativa, reativa e fator de potência,” São Paulo University, São Paulo, 2008, pp.1-6.
- ANEEL, “Audiência Pública ANEEL nº57/2015,” [Online]. Available:http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/057/contribuicao/vale_s_a_ap_0572015.pdf. 2015.
- ANEEL, “Resolução Normativa nº 482,” [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/bren2012482.pdf>. 2012.
- Deblasio, R., Tom, C., “Standards for the Smart Grid,” Energy 2030 Conference 2008, IEEE, pp. 1-7.
- ENISA, “Smart Grid security certification in Europe – Challenges and recommendations,” 2014, pp. 56.
- Granados, J., Rahmani, A. M., Nikander, P., Liljeberg, P., “Towards energy-efficient HealthCare: Na Internet-ofThings architecture using inteligente gateways,” Wireless Mobile Communication and Healthcare Conference 2014, IEEE, pp. 279-282.
- Prasad, S.S., Kumar, C., “An Energy Efficient and Reliable Internet of Things,” Communication, Information and Computing Technology (ICCICT) Conference 2012, IEEE, pp.1-4.
- IEEE, “Internet of Things Networking and control,” IEEE Workshop, 2014.
- Moreira, R. H., Abernethy M., “O que é Node.js,” Optimal Auctions, 2013, pp. 1.
- Caetano, F. S. C., Souza, L.C.C., Arantes, I. L., Vicente, E. M., “Plataforma de Aquisição e Registro de Energia Elétrica Aplicada A redes Elétricas Inteligentes (Smart Grids),” XIX Automatic Brazilian Congress, Campina Grande, 2012.
- Concha, I. M. C., Correa, V. T., “Interface de Gestão Ativa de Consumo de Energia Elétrica para Smart Grids,” Paraná Federal University, Paraná, 2008, pp. 59.
- Vieira, F. P., “Instrumentação Eletrônica,” MSc. dissertation, Electrical Engineering Department, São Carlos Federal University, São Carlos, 2008.
- Fugimoto, S. K., “Estrutura de tarifas de Energia Elétrica,” Dr. Thesis, Electrical Engineering Department, São Paulo University, São Paulo, 2010, pp.95-120.

MANAGEMENT PLATFORM OF ELECTRIC ENERGY ASSOCIATED TO SMART GRIDS

Abstract. *The Electrical Power Systems (EPS) are in a great transformation process. The Brazil is propitious to a new environment and changes in his EPS at any time, as envisaged in the ANEEL Resolution 482/2012, resulting in the installation of new equipment that will promote improvements and optimizations in the measurement of electricity for residential consumers. This article presents the development of a platform for energy management with an active web interface suitable to the paradigms of the Smart Grids (Intelligent Networks) and Internet of Things (IoT). In this way, consumers will have access to important information and they can monitor and control effectively and remotely their spending, and to profile the consumption through accessing their historical.*

Key words: *Management platform, smart grids, photovoltaic generation.*