

Desenvolvimento de Arquitetura de Módulo de Medição e Monitoramento de Sistemas Fotovoltaicos ^{*}

Mateus F. Santos ^{*} João B. Gertrudes ^{**}

^{*} Departamento de Tecnologia (DTEC), Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), BA (e-mail: ferrmathh2@gmail.com).

^{**} Departamento de Tecnologia (DTEC), Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), BA (e-mail: jbosco@ecomp.uefs.br)

Abstract: In the field of solar energy generation, “smart microgrids” are presented as a great advance for consumers who wish to play an active role in this area. For this, monitoring of power generation is necessary. At this point, this article deals with the idealization and assembly of a smart meter capable of monitoring energy generation, from its architecture to its practical assembly.

Resumo: No âmbito da geração de energia solar, se apresentam as “microrredes inteligentes” como um grande avanço para os consumidores que desejam ter um papel ativo nessa área. Para isso, é necessário um monitoramento da geração de energia. Nesse ponto, o presente artigo trata da idealização e montagem de um medidor inteligente capaz de monitorar a geração de energia, desde a sua arquitetura, até a sua montagem prática.

Keywords: Arduino, NodeMCU, Microgrids, Energy, Solar, Monitoring, Measurer, Module

Palavras-chaves: Arduino, NodeMCU, Microrredes, Energia, Solar, Monitoramento, Medidor, Módulo

1. INTRODUÇÃO

A microgeração (potência instalada de até 75 kW) com recurso à fontes primárias renováveis é uma das inovações tecnológicas mais promissoras, e importante ferramenta de implementação da tão desejada transição energética - uma política de limpeza das matrizes de energia adotada pela maioria dos países para atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável. Com regulamentação em vigor desde 2012 (aprimorada em 2015), aliada aos sucessivos aumentos no preço final de energia, criou-se um ambiente favorável à demanda crescente por este tipo de geração nas residências brasileiras. O sistema de compensação estabelecido pela Normativa ANEEL 482/2012 resultou em um aumento substancial do número de unidades consumidoras com microgeração principalmente com recurso à geração solar fotovoltaica. A potência instalada deste tipo de geração distribuída passou de 7 MW em 2012 para 28 GW em 2023, segundo dados Associação Brasileira de Energia Solar (ABSOLAR). No modelo de microgeração atualmente regulamentado criou-se a figura do microprodutor de energia, ainda com um papel passivo no relacionamento comercial com a concessionária através do sistema de compensação de créditos. A tendência é que esta condição de passividade se modifique nas futuras “microrredes de geração renovável”. Isso só será possível através da implantação nas unidades geradoras de medidores inteligentes (*smart meters*). Tais medidores incorporam

em seus circuitos o sensoriamento de diversas grandezas de interesse e em conjunto com tecnologias de informação e comunicação bidirecionais são capazes de incorporar novas funcionalidades em comparação com medidores comuns. Tais recursos tecnológicos, aliada aos recentes avanços na inteligência computacional têm o potencial de permitir que os consumidores/produtores participem de forma mais ativa no mercado de energia através do chamado *gerenciamento de energia pelo lado da demanda*. Projetos de pesquisa e desenvolvimento neste sentido darão as respostas e soluções que permitirão ao consumidor/produtor participar de forma ativa e tomar decisões, por exemplo, de venda/injeção de energia e ou de consumo próprio ou de armazenamento da sua própria geração em momentos convenientes a depender do preço da energia praticado no momento, por exemplo. O monitoramento de parâmetros em tempo real terá um papel fundamental neste aspecto. É neste contexto que se enquadra o presente artigo. Trata-se dos resultados iniciais do desenvolvimento de um módulo de medição de grandezas importantes como tensão, corrente, potência, energia, temperatura das placas e temperatura ambiente de uma planta de geração de energia solar. Esta ferramenta possibilita ao usuário monitorar a geração de energia e outros parâmetros importantes da unidade microgeradora, e com isso, contribuir com o monitoramento e gerenciamento de energia pelo lado da demanda. De modo específico este artigo apresenta a arquitetura e o protótipo funcional do medidor de grandezas ambientais e elétricas do lado de corrente contínua (montante do inversor).

^{*} Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Estadual de Feira de Santana (PPPG-UEFS); Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

2. FUNDAMENTAÇÃO E METODOLOGIA

Para a montagem do módulo de medição, em um primeiro momento foi pensado em uma arquitetura a partir das bases bibliográficas pesquisadas, entre elas estão PEREIRA and GOMES (2015), Santos et al. (2020), Costa et al. (2020) e NEVES and DE MENEZES (2016). Com isso, foi escolhido um modelo de arquitetura simples e de fácil montagem, se baseando também em conceitos chave da Engenharia de Software, que são o Desacoplamento e a Coesão, que juntos permitem a facilidade de manutenção e de atualização.

A Arquitetura desenvolvida conta com quatro submódulos: **Aquisição; Persistência dos dados; Entrada e saída; e Processamento**. Cada submódulo tem seu papel bem definido na arquitetura do medidor, que serão descritas a seguir.

2.1 Submódulo de Aquisição

A função do submódulo de Aquisição é simples: capturar e processar os sinais analógicos oriundos de sensores externos que farão o papel de monitorar as grandezas físicas desejadas, que são a corrente, a tensão, as temperaturas de placa e ambiente (e futuramente a radiação solar e velocidade do vento). Para a montagem desse submódulo inicialmente foram necessários sensores de corrente, tensão e temperatura e um microcontrolador capaz de capturar os sinais dos sensores e traduzi-los para o mundo digital.

Com base nas bibliografias utilizadas, percebeu-se uma preferência da maioria dos autores pelo **Arduino UNO** para realizar a conversão analógica-digital. O **Arduino UNO** é uma plataforma de hardware programável que conta com um microcontrolador *ATmega*. A preferência se dá pelo fato de ser uma plataforma de simples programação, sendo também por esse motivo escolhida para o submódulo em questão.

Já com respeito aos sensores utilizados, foram escolhidos quatro sensores, um para cada uma das grandezas necessárias: um módulo sensor de corrente invasivo, o *ACS712*, que tem a capacidade de medir tanto corrente alternada quanto contínua, sendo utilizado entre alguns dos autores consultados como, Dias et al. (2016), Pereira and Gomes (2018) e NEVES and DE MENEZES (2016); um módulo sensor de temperatura *LM35* que possui uma faixa de leitura de 0°C a 100°C, utilizado por Dias et al. (2016) em seu medidor; um módulo sensor de temperatura *MAX6675K*, capaz de medir altas temperaturas, para a temperatura da placa; e um módulo sensor de tensão baseado em divisor de tensão simples, capaz de medir até 25 Volts (ideal para testes de bancada mas que deve ser adequado para medições de campo).

2.2 Submódulo de Persistência dos Dados

Este submódulo é responsável pelo armazenamento dos dados, que permite gerar o histórico de medições e ser possível fazer análises mais precisas da geração de energia.

Para o armazenamento foi escolhido um banco de dados relacional, o *MariaDB*, hospedado na nuvem com a *Amazon Web Services* (AWS).

2.3 Submódulo de Entrada e Saída

O papel desse submódulo é permitir a comunicação do medidor com o usuário através de entradas externas e saídas internas pós-processamento. Esse submódulo foi pensado para dar praticidade ao usuário do módulo de medição, tornando possível o monitoramento das medições tanto localmente por um visor no hardware, quanto remotamente por uma interface web.

Para isso, foi escolhido um *display tela LCD 20X4* para apresentar os dados instantâneos de medição de forma local. Já para a interface web foi produzido uma *Application Programming Interface* (API), para a lógica da página (ou *backend*) e uma *Single-Page Application* (SPA), para a interface gráfica (ou *frontend*).

O *backend* foi feito utilizando a linguagem de programação *Python*, linguagem interpretada e de fácil uso, e o *frontend* com *JavaScript*, linguagem também interpretada, utilizando a biblioteca *React.js*. Duas ferramentas de fácil aprendizagem e manuseio que são largamente utilizadas.

Em coincidência com o submódulo de persistência dos dados, a interface web, tanto a API quanto a SPA foram hospedados na nuvem também utilizando os serviços da AWS.

2.4 Submódulo de Processamento

Esse submódulo deve fazer o processamento dos dados binários adquiridos através da digitalização das grandezas analógicas e aplicar os cálculos matemáticos para obtenção dos valores nas grandezas usuais, como *graus Celsius*, *Volts* e *Ampere*. Além disso, apresentar esses dados de forma gráfica ao usuário do sistema; comunicar-se com o submódulo de entrada e saída e armazenar os dados processados no submódulo de persistência dos dados.

Para esse processo foi necessário um microcontrolador, que poderia ser o mesmo **Arduino UNO** que fez parte do submódulo de aquisição. Porém, o Arduino tem limitações quando se trata de comunicação *web*, sendo necessário acoplar módulos externos para garantir essa funcionalidade. Tendo essa necessidade, foi decidido por utilizar uma segunda plataforma de Hardware, a **NodeMCU**, que conta com um microcontrolador *ESP8266* que possui conexão *Wi-Fi* nativa e permite a comunicação *web* necessária para os objetivos do projeto.

O **Arduino UNO** se comunica de forma serial utilizando o protocolo de comunicação universal *asynchronous receiver/transmitter* (UART), com a **NodeMCU**, e transmite os dados capturados para o processamento.

Por sua vez, a **NodeMCU** se comunica tanto de forma serial com o *display tela LCD 20x4*, quanto com comunicação sem fio, utilizando o *hypertext Transfer Protocol* (HTTP), com o submódulo de persistência dos dados para armazenar os dados já processados.

A interface *web* comunica diretamente com o submódulo de persistência dos dados e exibe os dados aos usuários do sistema em tempo real.

2.5 Arquitetura final

Com todos os submódulos definidos, tanto em composição, quanto em funcionalidade, o desenho da arquitetura final do módulo de medição foi definido. A arquitetura final do módulo é apresentada na Figura 1:

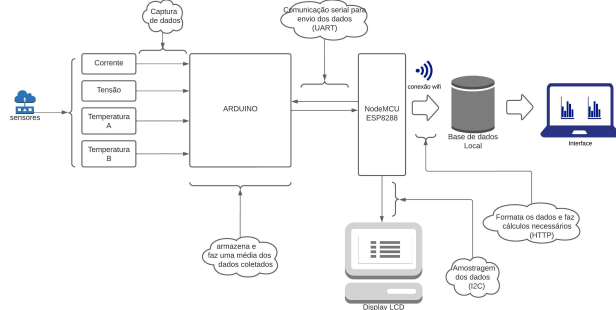


Figura 1. Arquitetura final do módulo de medição.

3. PROTÓTIPO E RESULTADOS

Após a decisão de arquitetura e os componentes que a compõem, foi definida a lógica de funcionamento, processamento dos dados e das comunicações entre os módulos. A seguir serão abordadas as lógicas necessárias para a montagem do módulo de medição.

3.1 Lógica do submódulo de Aquisição

Como o papel desse módulo é apenas a obtenção dos valores das grandezas analógicas em ambiente digital, o **Arduino UNO** faz isso com grande facilidade, apresentando funcionalidades já programadas para essa função. Com isso foi decidido apenas a taxa de obtenção dos dados.

Para ser possível uma boa visualização e precisão na medição, o **Arduino UNO** captura cinco medições por segundo, fazendo uma média simples desses valores obtidos e os enviando diretamente de forma bruta para a **NodeMCU** através da comunicação UART estabelecida entre ambas as plataformas. Essa taxa de amostragem precisa ser avaliada em cenários de operação em campo. Deve ser adequada para acompanhar mudanças bruscas (de alta frequência) nas medições devido a sombreamentos, por exemplo, ou devido à chaveamentos em aplicações em sistemas de controle de conversores.

3.2 Lógica do submódulo de Processamento

Esse módulo recebe os dados brutos vindos do **Arduino UNO** a cada segundo, tendo que executar o processamento desses dados para apresentá-los ao usuário do sistema. O Processamento desses dados começa basicamente transformando os dados recebidos em valores reais. Os dados recebidos estão formatados na resolução que o **Arduino UNO** os captura, entre 0 e 1024 bits, com a exceção do sensor MAX6675K que possui uma biblioteca dedicada e já vem formatado em graus celsius.

Levando em consideração que o **Arduino** captura valores entre 0 e 5 *Volts*, faz-se uma relação básica de valores:

$$V_{bits} = \frac{5}{1024} = 0,0048828 \quad (1)$$

$$V_{bits} = 4,883mV$$

Com essa relação, pode-se encontrar os valores das grandezas que cada sensor captura, de acordo com a resolução de cada um deles.

$$T_a = \frac{V_{bits}}{R_{LM35}} \quad (2)$$

$$V = \frac{V_{bits}}{R_{div}} \quad (3)$$

$$I = \frac{V_{bits}}{R_{ACS712}} \quad (4)$$

Os *R*'s dizem respeito as resoluções de cada sensor, e informam a quantidade de *millivolts* por unidade de grandeza.

Após obter os valores reais das grandezas é feito o cálculo básico para obter os demais dados necessários como potência e energia gerada. A potência do lado CC é calculada a partir da relação a seguir:

$$P = VI \quad (5)$$

Já a energia é calculada utilizando o intervalo de tempo de 1 segundo, e sendo acumulada ao longo do tempo que o processamento dos dados foi feito.

Finalmente, os valores são exibidos no *display tela* para o usuário, juntamente com a data e horário atual. Além disso, os valores são acumulados por um minuto, sendo somados cerca de 60 vezes, afim de fazer uma média desses valores para serem enviados para o submódulo de persistências dos dados. Essa média é feita tendo em conta a capacidade de armazenamento do submódulo, que, mesmo com uma taxa baixa de captura dos dados, ainda acaba o dia com 1.440 registros na base de dados.

3.3 Lógica para o submódulo de Entrada e Saída

O módulo de entrada e saída cuida apenas da apresentação dos dados de forma gráfica ao usuário, além de mostrar as últimas medições em destaque. Isso é feito através de consultas no banco de dados que retornam os registros, sendo capaz apresentá-los na tela.

3.4 O protótipo

A montagem foi feita de acordo com a pinagem vista na Figura 2.

É possível perceber um conversor de nível lógico sendo utilizado. Isso se dá pelo fato do **Arduino UNO** trabalhar com nível de entrada de 0 a 5 na entrada analógica *Volts*, e a **NodeMCU**, de 0 a 3,3 *Volts*.

Além disso, para apresentação dos dados no *display tela* foi utilizado um conversor *I2C*, que permite a comunicação *I2C* e diminuir consideravelmente o número de pinos utilizados pelo *display*.

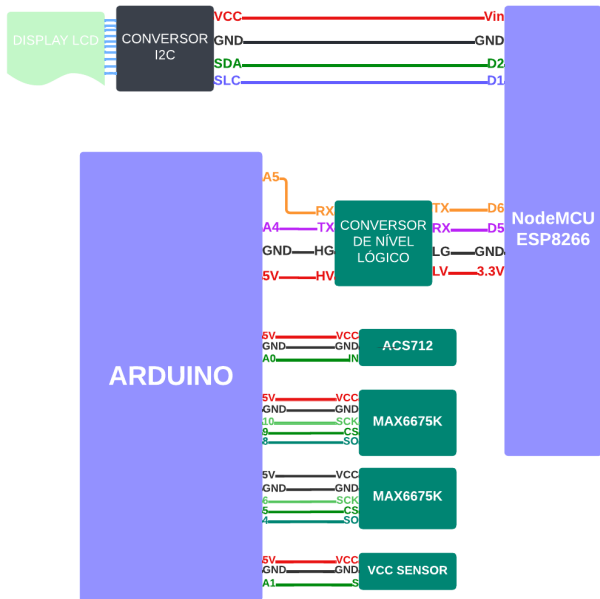


Figura 2. Pinagem do módulo de medição

A montagem final, de acordo a Figura 2 feita em laboratório pode ser vista na Figura 3, onde estão presentes todos os componentes citados no processo.

Na Figura 4 e Figura 5 é possível ver o protótipo em funcionamento, apresentando as interfaces com o usuário, tanto a local como a Web.

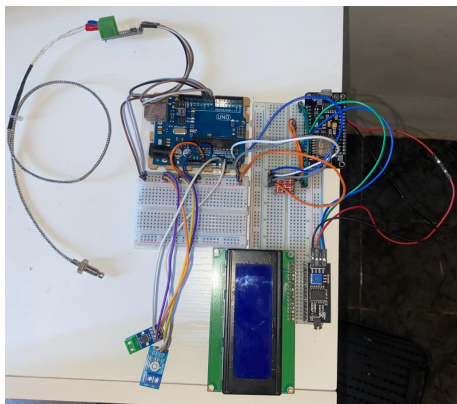


Figura 3. Protótipo do módulo de medição

3.5 Resultados e Testes de Bancada

Os testes do protótipo foram realizados em ambiente de laboratório, utilizando potenciômetros em opção aos sensores para ser possível uma simulação mais controlada das grandezas, sendo possível alterar os valores com maior facilidade. Para isso a lógica do sensor MAX6675K foi adaptada para se adequar ao potenciômetro. Na Figura 6 pode-se visualizar a montagem com os potenciômetros

Os testes foram feitos colocando valores aleatórios nos potenciômetros afim de assegurar a captura e transição correta dos dados entre os módulos e os cálculos efetuados no módulo de processamento. A Figura 4 e a Figura 5 são imagens que demonstram o funcionamento em teste, onde



Figura 4. Protótipo do módulo de medição em funcionamento.

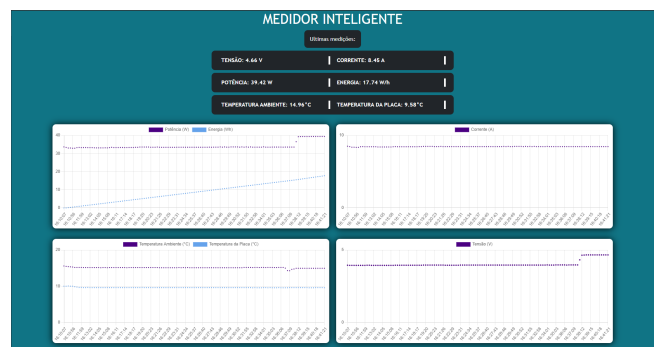


Figura 5. Interface web.

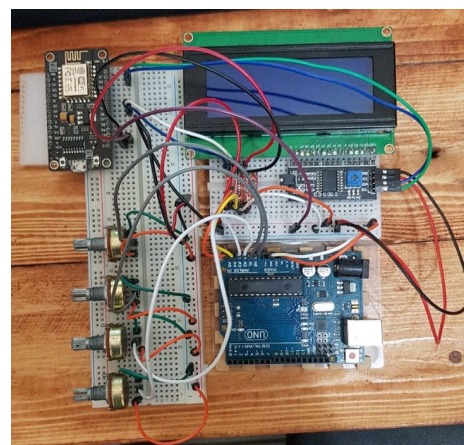


Figura 6. Protótipo com potenciômetros

é possível observar o correto funcionamento de troca de informações entre os módulos, o que evidencia o correto funcionamento e também a conversão de forma correta de todos os valores das grandezas obtidas.

4. PRÓXIMOS PASSOS

Como foi possível observar, o módulo de medição se encontra em um estágio de testes e melhorias para a completa efetivação de todo o processo, com isso, algumas medidas serão tomadas afim de melhorar o desempenho do módulo.

Uma dessas melhorias é a compactação do módulo, que atualmente em fase de protótipo tem um tamanho inadequado para as pretensões do projeto. Isso se deve em grande parte pelo uso do *Arduino UNO* que ocupa bastante espaço. Com isso, uma alternativa para a compactação é a troca por um *Arduino NANO*, que é cerca de 5 vezes menor que o *Arduino UNO* e tem as mesmas características quando se fala de hardware, poder de processamento e funcionalidades.

Outro ponto de melhoria é com relação a interface web, que atualmente é bastante enxuta, e apresenta dados limitados. Com a base de dados das medições é possível acrescentar análises mais detalhadas para auxiliar o usuário a tomar decisões mais precisas com relação a sua energia gerada e outros parâmetros importantes. Além disso, permitir ao usuário exportar esses dados em formatos de planilhas e compartilhar com outros softwares e hardwares, caso necessário.

A próxima melhoria diz respeito a comunicação sem fio utilizada. Atualmente esse processo é feito utilizando o protocolo HTTP, como já foi falado anteriormente. Porém, quando se trata de comunicação de embarcados, a melhor solução é o protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), que possui muitos benefícios para esse tipo de comunicação com relação ao HTTP. Um desses é que não é necessário se identificar e estabelecer contato a cada mensagem trocada, como é feito com o HTTP, economizando bastante tempo.

5. CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos, conclui-se que a arquitetura e montagem adotadas foram eficientes para o funcionamento correto do medidor. Com base nos resultados obtidos foram identificadas algumas melhorias, de fácil implementação na arquitetura propostas que vão melhorar ainda mais o desempenho do módulo desenvolvido, afim de alcançar um produto com alto desempenho.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Estadual de Feira de Santana (PPPG-UEFS); Projeto BRICS/CNPq-UNICAMP/UEFS (440124-2022/0); e ao Programa Interno de Auxílio Financeiro à Pesquisa (FINAPESQ/UEFS 2022) do Estado da Bahia. Agradecimentos também ao professor-orientador do projeto Dr. João Bosco Gertrudes pela ajuda e direcionamento no desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

Costa, J.G., Souza Júnior, L.A.L.d., and Silva, N.S. (2020). Análise de consumo de energia utilizando arduino.

- Dias, R.M., Dias, J.B., and Dai Prá, L.B. (2016). Aquisição de dados de um sistema fotovoltaico conectado à rede com a plataforma arduino. In *Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS*, 1–8.
- NEVES, P.R.P. and DE MENEZES, N.R. (2016). Projeto e implementação de um protótipo de medidor e analisador de energia elétrica com controle de demanda. *Uningá Review*, 28(3).
- PEREIRA, S. and GOMES, G.R. (2015). Estimativa da radiação solar por meio da plataforma arduino. In *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. DIAS, R.M.*
- Pereira, S. and Gomes, G.R. (2018). Sistema de monitoramento de corrente e tensão na produção de energia fotovoltaica baseado em arduino. In *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia.*
- Santos, E.T.M., Fernandes, J.O., de Araújo, J.V.G., and Breda, J.F.D. (2020). Protótipo trifásico para monitoramento de consumo de energia elétrica utilizando a plataforma arduino. *Brazilian Applied Science Review*, 4(5), 2939–2953.